



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**IMPLEMENTACIÓN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO DEL AISLAMIENTO DE
DEVANADOS DE GENERADORES ELÉCTRICOS DE POTENCIA EN LA PLANTA
GENERADORA ELÉCTRICA DEL NORTE**

Juan Pablo Rozotto Reyes

Asesorado por el Ing. Oscar Alejandro Saravia León

Guatemala, abril de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**IMPLEMENTACIÓN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO DEL AISLAMIENTO DE
DEVANADOS DE GENERADORES ELÉCTRICOS DE POTENCIA EN LA PLANTA
GENERADORA ELÉCTRICA DEL NORTE**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

JUAN PABLO ROZOTTO REYES

ASESORADO POR EL ING. OSCAR ALEJANDRO SARAVIA LEÓN

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, ABRIL DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Fernando Alfredo Moscoso Lira
EXAMINADOR	Ing. Oscar Alejandro Saravia León
EXAMINADOR	Ing. Natanael Jonathan Requena Gómez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

IMPLEMENTACIÓN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO DEL AISLAMIENTO DE DEVANADOS DE GENERADORES ELÉCTRICOS DE POTENCIA EN LA PLANTA GENERADORA ELÉCTRICA DEL NORTE

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 3 de noviembre de 2009.


Juan Pablo Rozotto Reyes

Guatemala, 3 de agosto de 2012

Ing. Francisco Javier González
Coordinador del Área de Potencia
Escuela de Ingeniería Mecánica-Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente

Estimado Ingeniero González.

Por este medio tengo el agrado de informar que como Asesor de la Práctica del Ejercicio Profesional Supervisado (E.P.S.), del estudiante universitario Juan Pablo Rozotto Reyes de la carrera de Ingeniería Eléctrica, con carné No. 94-15524, procedí a revisar el informe final, cuyo título es "Implementación de Mantenimiento Predictivo del Aislamiento de Devanados de Generadores Eléctricos de Potencia en la planta Generadora Eléctrica del Norte".

En tal virtud, LO DOY POR APROBADO, solicitándole que se le dé el respectivo trámite.

Sin otro particular, me suscribo.

Atentamente,

 **Oscar Alejandro Saravia L.**
INGENIERO ELECTRICISTA
COLEGIADO No. 6465

Ing. Oscar Alejandro Saravia León
Colegiado No. 6465
Asesor de EPS



Guatemala, 26 de septiembre de 2012.
Ref.EPS.DOC.1263.09.12.

Inga. Norma Ileana Sarmiento Zeceña de Serrano
Directora Unidad de EPS
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimada Ingeniera Sarmiento Zeceña.

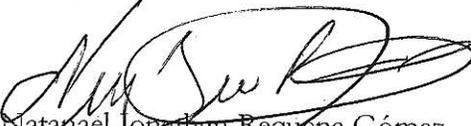
Por este medio atentamente le informo que como Supervisor de la Práctica del Ejercicio Profesional Supervisado (E.P.S.), del estudiante universitario **Juan Pablo Rozotto Reyes** de la Carrera de Ingeniería Eléctrica, con carné No. **9415524**, procedí a revisar el informe final, cuyo título es **"IMPLEMENTACIÓN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO DEL AISLAMIENTO DE DEVANADOS DE GENERADORES ELÉCTRICOS DE POTENCIA EN LA PLANTA GENERADORA ELÉCTRICA DEL NORTE"**.

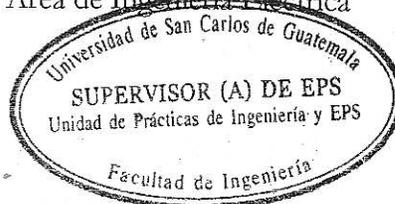
En tal virtud, **LO DOY POR APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Natanael Jonathán Requena Gómez
Supervisor de EPS
Área de Ingeniería Eléctrica



c.c. Archivo
NJRG/ra



Guatemala, 26 de septiembre de 2012.
Ref.EPS.D.769.09.12.

Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
Director Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Presente

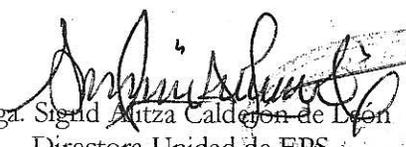
Estimado Ingeniero Puente Romero.

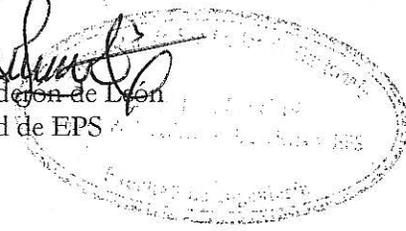
Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado **"IMPLEMENTACIÓN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO DEL AISLAMIENTO DE DEVANADOS DE GENERADORES ELÉCTRICOS DE POTENCIA EN LA PLANTA GENERADORA ELÉCTRICA DEL NORTE"** que fue desarrollado por el estudiante universitario, **Juan Pablo Rozotto Reyes**, quien fue debidamente asesorado por el Ing. Oscar Alejandro Saravia León y supervisado por el Ing. Natanael Jonathan Requena Gómez.

Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y requisitos de ley del referido trabajo y existiendo la aprobación del mismo por parte del Asesor y del Supervisor de EPS, en mi calidad de Directora apruebo su contenido solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,
"Id y Enseñad a Todos"


Inga. Sigrid Aitza Calderón de León
Directora Unidad de EPS



SACdL/ra



REF. EIME 52.2012

El Director de Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; **JUAN PABLO ROZOTTO REYES** titulado: **“IMPLEMENTACIÓN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO DEL AISLAMIENTO DE DEVANADOS DE GENERADORES ELÉCTRICOS DE POTENCIA EN LA PLANTA GENERADORA ELÉCTRICA DEL NORTE”**, procede a la autorización del mismo.

Ing. Guillermo Antonio Puente Romero



GUATEMALA, 04 DE OCTUBRE 2,012.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **IMPLEMENTACIÓN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO DEL AISLAMIENTO DE DEVANADOS DE GENERADORES ELÉCTRICOS DE POTENCIA EN LA PLANTA GENERADORA ELÉCTRICA DEL NORTE**, presentado por el estudiante universitario **Juan Pablo Rozotto Reyes**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, abril de 2013

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por ser mi fortaleza, por guardarme, por todas las bendiciones que he recibido de Él, incluyendo la culminación de mis estudios universitarios.

Mi familia

Por que todos han sido parte de mi edificación como hombre y de los cuales muchos me enseñaron de Dios.

Mi universidad

Fue en ella en donde encontré la vocación de mi vida y en ella pasé los mejores tiempos.

Mis amigos

Eddy Roberto Aguilar, Erick Detlefsen, Luis Cortez, Mauricio Calle, Axel Pérez, Oscar Saravia; por todos los momentos disfrutados y sufridos que compartimos.

AGRADECIMIENTOS A:

- Mi esposa** Claudia Estrada por su amor, paciencia y tolerancia en los días difíciles.
- Ing. Erick Rivas** Por su gran ayuda, apoyo y empuje para la realización de este proyecto en la Generadora Eléctrica del Norte (Genor).
- Mi asesor** Oscar Saravia, por su asesoría y apoyo desinteresados durante el proyecto y en la realización del informe final.
- Ing. Natanael Requena** Por su apoyo y empuje para llevar a cabo y culminar el proyecto.
- Genor** Planta en donde se me permitió desarrollar el proyecto y en la cual aprendí múltiples cosas útiles en mi formación profesional.

2.1.2.3.	Mantenimiento predictivo	87
2.1.3.	Mantenimiento a generadores de potencia	88
2.1.3.1.	Mantenimiento correctivo a generadores.....	88
2.1.3.2.	Mantenimiento preventivo a generadores.....	89
2.1.3.3.	Mantenimiento predictivo a generadores.....	92
2.1.4.	Descargas parciales	95
2.1.5.	Descargas parciales en generadores	103
2.1.5.1.	Conceptos básicos.....	105
2.1.5.2.	Mecanismos de falla	113
2.1.5.3.	Tipos de descargas parciales según el mecanismo de falla	120
2.1.6.	Detección de descargas parciales en línea en generadores de potencia	125
2.1.6.1.	Sensores de descargas parciales	127
2.1.6.2.	Filtros.....	129
2.1.6.3.	Sistema de recolección de datos	138
2.1.6.4.	Interfase a la computadora	140
2.2.	Implementación de la detección de descargas parciales como mantenimiento predictivo a generadores de potencia ..	141
2.2.1.	Comparación ante otras pruebas para generadores de potencia	142
2.2.2.	Selección de un sistema de detección de descargas parciales.....	144
2.2.3.	Diseño e instalación de un sistema de descargas parciales	145

2.2.4.	Adquisición de datos de descargas parciales mediante el uso de interfase a computadora.....	149
2.2.5.	Interpretación de datos que pueden obtenerse por el sistema de detección de descargas parciales	160
2.2.6.	Diseño y desarrollo de un programa de mantenimiento predictivo con base a detección de descargas parciales en línea.....	166
2.2.7.	Resultados de prueba y diagnóstico de estado del aislamiento de generadores con base a interpretación de estos.....	167
2.2.7.1.	Generador 1	168
2.2.7.2.	Generador 2	176
2.2.7.3.	Generador 3	183
2.2.7.4.	Generador 4	192
3.	FASE ENSEÑANZA - APRENDIZAJE	199
3.1.	Capacitación de personal involucrado en el proyecto.....	199
3.1.1.	Capacitación sobre teoría de las descargas parciales	200
3.1.2.	Capacitación en el uso de computadoras y Windows para el personal que lo requiera	201
3.1.3.	Curso de manejo de equipo de detección de descargas parciales	201
3.1.4.	Curso de manejo del software para la captura y análisis de datos de descargas parciales	202
3.1.5.	Capacitación sobre interpretación de datos adquiridos de descargas parciales.....	203

4.	FASE DE INVESTIGACIÓN: PLAN DE CONTINGENCIA	205
4.1.	Objetivo general	205
4.1.1.	Objetivos específicos.....	205
4.2.	Introducción	205
4.3.	Marco teórico.....	206
4.3.1.	Bunker.....	206
4.3.2.	Aceite lubricante	207
4.3.3.	Huracán y tormenta tropical.....	208
4.3.4.	Sismo o terremoto	208
4.3.5.	Inundación.....	210
4.3.6.	Incendio.....	211
4.3.7.	Emergencia	212
4.3.8.	Simulacro	212
4.4.	Antecedentes	214
4.4.1.	Datos de la empresa	214
4.4.2.	Materias primas	215
4.4.3.	Aspectos legales	216
4.4.3.1.	Comisión Nacional para la Reducción de Desastres (CONRED).....	216
4.4.3.2.	Ministerio de Trabajo y Previsión Social, Dirección General de Previsión Social, Departamento de Higiene y Seguridad Ocupacional	216
4.4.3.3.	Instituto Guatemalteco de Seguridad Social (IGSS)	217
4.4.4.	Riesgos potenciales en la planta de Genor	218

4.4.4.1.	Investigación bibliográfica sobre contingencias en plantas de generación de energía eléctrica	218
4.4.4.2.	Contingencias ocurridas en Genor ...	220
4.4.4.3.	Contingencias ocurridas en el área de Izabal.....	224
4.5.	Diseño de un plan de contingencia	226
4.5.1.	Formación de brigada	227
4.5.2.	Acciones inmediatas en todas las emergencias ...	229
4.5.3.	Acciones a realizar en caso de fuego y explosiones	230
4.5.4.	Acciones a realizar en caso de sismos	231
4.5.4.1.	Durante un sismo	232
4.5.4.2.	Después de un sismo	233
4.5.5.	Acciones a realizar en caso de huracán o tormenta tropical	234
4.5.5.1.	Antes del huracán o tormenta tropical.....	234
4.5.5.2.	Durante el huracán o tormenta tropical.....	236
4.5.5.3.	Después del huracán o tormenta tropical.....	238
CONCLUSIONES		241
RECOMENDACIONES.....		245
BIBLIOGRAFÍA.....		247
ANEXOS		249

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Vista esquemática de un generador síncrono simplificado de dos polos.....	7
2.	Distribución espacial de densidad de flujo y forma de onda correspondiente al voltaje generado por el generador monofásico de la figura 1	9
3.	Vista esquemática de generadores trifásicos de dos polos, de cuatro polos, conexión y de devanados.....	11
4.	Partes de un generador de potencia	12
5.	Rotor cilíndrico.....	14
6.	Rotor de polos salientes	15
7.	Circuito típico de un sistema de excitación sin escobillas	17
8.	Estator con bobina Form-Wound	25
9.	Una bobina Form-Wound siendo insertada en dos ranuras del núcleo	26
10.	Sección de una ranura con devanado Form-Wound.....	29
11.	Foto de una bobina multivuelta	29
12.	Condición de factor de potencia unitario y condición factor de potencia en atraso	47
13.	Factor de potencia unitario, factor de potencia en atraso y factor de potencia en adelanto.....	49
14.	Descomposición del campo del estator.....	50
15.	Voltajes de unidades y su diferencia.....	58
16.	Corriente circulante.....	59

17.	Corriente circulante con la unidad 1 con mayor voltaje.....	63
18.	Curva de capacidad.....	65
19.	Varias descargas parciales	98
20.	Material con una cavidad y circuito equivalente.....	100
21.	Circuito equivalente después de descarga y circuito de prueba	101
22.	Forma de onda de corriente en Ck y Ct.....	103
23.	Esfuerzo eléctrico en un vacío entre bobina y el núcleo	105
24.	Descarga parcial según la teoría de campo	106
25.	Ocurrencia de las descargas parciales.....	108
26.	Polaridad del pulso basado en la ubicación del vacío.....	120
27.	Vacíos dentro del aislamiento	121
28.	Vacíos cercanos a los conductores	123
29.	Vacíos cercanos al núcleo del estator	124
30.	Descargas fase a fase.....	125
31.	Ubicación del acoplador capacitivo	128
32.	Característica de la frecuencia	131
33.	Impedancia desigual	132
34.	Separación de ruido por tiempo de llegada diferencial	134
35.	Separación direccional de ruido en base al tiempo de arribo.....	136
36.	Un solo acoplador por fase.....	138
37.	Fotografía de un PDTrac de Iris Power	146
38.	Fotografía de un sensor EMC, sección de un sensor EMC de Iris Power	147
39.	Fotografía de la instalación de sensores en un generador	148
40.	Fotografía de una caja de conexión instalada en el exterior de un generador.....	149
41.	Diagrama de conexión de PDTrac de Iris Power	150
42.	Panel frontal de PDTrac de Iris Power.....	151

43.	Pantalla inicial del software PDTracPro de Iris Power donde se visualiza la base de datos de Genor	152
44.	Pantalla de generador 3, lengüeta Information	153
45.	Pantalla de generador 3, lengüeta Connect aquí se puede observar que ya está en línea	154
46.	Pantalla de generador 3, lengüeta Measurements sublengüeta Trend Measurements.....	155
47.	Ventana emergente para la descarga de los datos guardados en el PDTrac	156
48.	Pantalla de generador 3, lengüeta Configuration la cual solo se ve al estar en línea	157
49.	Gráfico de tendencia de NQN	158
50.	Pantalla de generador 3, lengüeta Measurements sublengüeta 2D Measurements	159
51.	Gráfico PHA.....	159
52.	Sumario de variables de descargas parciales.....	161
53.	PHA para fase A del generador 1, a) enero, b) mayo	168
54.	Tendencias de NQN y Qm de la fase A del generador 1.....	170
55.	PHA para fase B del generador 1, a) enero, b) mayo	171
56.	Tendencias de NQN y Qm de la fase B del generador 1.....	173
57.	PHA para fase C del generador 1, a) enero, b) mayo	174
58.	Tendencias de NQN y Qm de la fase C del generador 1	175
59.	PHA para fase A del generador 2, a) enero, b) mayo	176
60.	Tendencias de NQN y Qm de la fase A del generador 2.....	178
61.	PHA para fase B del generador 2, a) enero, b) mayo	179
62.	Tendencias de NQN y Qm de la fase B del generador 2.....	180
63.	PHA para fase C del generador 2, a) enero, b) mayo	181
64.	Tendencias de NQN y Qm de la fase C del generador 2	183

65.	PHA para fase A del generador 3, a) enero, b) mayo	184
66.	Tendencias NQN y Qm de la fase A del generador 3	186
67.	PHA para fase B del generador 3, a) enero, b) mayo	187
68.	Tendencias NQN y Qm de la fase B del generador 3	189
69.	PHA para fase C del generador 3, a) enero, b) mayo	190
70.	Tendencias NQN y Qm de la fase C del generador 3	191
71.	PHA para fase A del generador 4, a) enero, b) mayo	192
72.	Tendencias NQN y Qm de la fase A del generador 4	193
73.	PHA para fase B del generador 4, a) enero, b) mayo	194
74.	Tendencias NQN y Qm de la fase B del generador 4	195
75.	PHA para fase C del generador 4, a) enero, b) mayo	196
76.	Tendencias NQN y Qm de la fase C del generador 4	197
77.	Corte transversal de un motor reciprocante, en donde se presenta un punto caliente	220
78.	Trayectoria del huracán Mitch del 13 de octubre al 4 de noviembre 1998	221
79.	Trayectoria del huracán Felix 2007	223
80.	Ubicación de epicentro de terremoto en Honduras en mayo 2009	224
81.	Mapa de epicentros de terremotos y réplicas de sismos en 1976, la estrella negra muestra el terremoto mayor y las estrellas blancas las réplicas	225
82.	Fallas geológicas en el área de Izabal.....	226

TABLAS

I.	Calibración de sistema, de manera que $B1 + L1 = B2 + L2$	135
II.	Ruido del sistema y del bus se muestran juntos como ruido total del sistema	137
III.	Cronograma de actividades del proyecto de EPS	141

IV.	Prueba de descargas parciales relacionadas con otras pruebas clásicas.....	143
V.	Sumario estadístico de valores Q_m según base de datos de Iris Power	163
VI.	Programa de pruebas para los primeros cinco meses	167

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
θ	Ángulo
\approx	Aproximadamente a
Δ	Delta, tipo de conexión
$^\circ$	Grado
Ω	Ohmio, se refiere a la unidad de resistencia eléctrica
$>$	Mayor que
\gg	Mucho mayor que
$\#$	Número
$\%$	Porcentaje
\sim	Proporcional a
ω	Velocidad angular $2\pi f$

GLOSARIO

Armadura	Imán o electroimán que gira sobre un eje dentro de un motor eléctrico.
Babbit	Es un metal de aleación que se emplea para disminuir la fricción de los cojinetes. Está formado por estaño, antimonio y cobre.
Componente de Poisson	Se refiere a la distribución de Poisson. En teoría de probabilidad y estadística, la distribución de Poisson es una distribución de probabilidad discreta que expresa, a partir de una frecuencia de ocurrencia media, la probabilidad que ocurra un determinado número de eventos durante cierto período de tiempo.
Concatenamiento	La concatenación es, en general, el acto de unir o enlazar cosas.
Corriente de Eddy	O corriente de Foucault (corriente parásita o Corrientes torbellino) es un fenómeno eléctrico; se produce cuando un conductor atraviesa un campo magnético variable o viceversa. El movimiento relativo causa una circulación de electrones o corriente inducida dentro del conductor.

Efecto piel Este fenómeno hace que la Resistencia efectiva o de corriente alterna sea mayor que la Resistencia óhmica o de corriente continua. Este efecto es el causante de la variación de la resistencia eléctrica, en corriente alterna, de un conductor debido a la variación de la frecuencia de la corriente eléctrica que circula por este. Se conoce por la teoría electromagnética que si circula una corriente por un conductor de cobre que tiene una sección transversal lo suficientemente grande, la corriente tiende a fluir en la periferia del conductor.

Electrical tracking En ingeniería eléctrica este término se refiere a una fuga de corriente eléctrica entre dos puntos o conductores separados por un material aislante causada por suciedad, partículas de carbón, humedad, etcétera.

Epóxico Es un polímero termoestable que se endurece cuando se mezcla con un agente catalizador o endurecedor.

Extruido Ejercer presión para comprimir, empujar y expulsar a través de orificios.

Fuerza magnetomotriz Es aquella capaz de producir un flujo magnético entre dos puntos de un circuito magnético.

IEEE	Corresponde a las siglas de Institute of Electrical and Electronics Engineers en español Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, una asociación técnico-profesional mundial dedicada a la estandarización, entre otras cosas.
Iris Power	Empresa canadiense establecida en 1990, dedicada a proveer productos y servicios para mejorar las capacidades de mantenimiento de motores y generadores de gran tamaño usados en instalaciones de generación de potencia o en industria de gran tamaño alrededor del mundo.
Ley de Paschen	La Ley de Paschen, llamada así después de que Friedrich Paschen fuera el primero en establecerla en 1889. Estudió la tensión disruptiva de láminas paralelas envueltas de gas como función de la presión y la distancia entre ellas. La tensión necesaria para crear un arco eléctrico a través del espacio entre láminas disminuyó a un punto a medida que la presión fue reducida. Luego, comenzó a aumentar gradualmente, excediendo su valor original.

Mica

Las micas son minerales pertenecientes a un grupo numeroso de silicatos de alúmina, hierro, calcio, magnesio y minerales alcalinos caracterizados por su fácil exfoliación en delgadas láminas flexibles, elásticas y muy brillantes, dentro del subgrupo de los filosilicatos. Su sistema cristalino es monoclinico. Generalmente, se les encuentra en las rocas ígneas tales como el granito y las rocas metamórficas como el esquisto. Las variedades más abundantes son la biotita y la moscovita.

Percentil

Es el término que divide a la distribución en cien partes; se representan con la letra P. Para el percentil i-ésimo, donde la i toma valores del 1 al 99. El i % de la muestra son valores menores que él y el 100-i % restante son mayores.

Pérdidas**I²R**

Son las pérdidas en el cobre de una máquina eléctrica y son las pérdidas por calentamiento debido a la resistencia de los conductores del rotor y del estator.

Período

Este término se utiliza regularmente para designar el intervalo de tiempo necesario para completar un ciclo repetitivo o simplemente el espacio de tiempo que dura algo. Es el inverso de la frecuencia, en segundos.

Permitividad

Se determinada por la tendencia de un material a polarizarse ante la aplicación de un campo eléctrico y de esa forma anular parcialmente el campo interno del material. Está directamente relacionada con la susceptibilidad eléctrica. Por ejemplo, en un condensador, una alta permitividad hace que la misma cantidad de carga eléctrica se almacene con un campo eléctrico menor y, por ende, a un potencial menor, llevando a una mayor capacitancia del mismo.

Primotor

Los principales elementos constituyentes de un sistema genérico de cogeneración son:
Elemento primotor o primomotor
Elemento de recuperación de calor de desperdicio
Sistema de transmisión de energía
Sistemas auxiliares (bombas, compresores, alternador, etcétera). Sistema de control
El componente más importante es el motor primario o primotor, el cual convierte la energía del combustible en la energía que suministra la flecha. Los dispositivos de conversión más ampliamente utilizados son las turbinas de vapor, las turbinas de gas y los motores de combustión interna o alternativos.

Relevador

Es un interruptor operado eléctricamente.

Reluctancia

Es la resistencia que un material posee al verse influenciado por un campo magnético. Se define como la relación entre la fuerza magnetomotriz (f.m.m.) (la unidad del SI es el amperio, aunque a menudo se la llama amperio vuelta) y el flujo magnético (SI: weber). El término lo acuñó Oliver Heaviside en 1888.

Resonancia

El término resonancia se refiere a un conjunto de fenómenos relacionados con los movimientos periódicos o cuasiperiódicos en que se produce reforzamiento de una oscilación al someter el sistema a oscilaciones de una frecuencia determinada.

Stress

Esfuerzo.

Tenacidad

En ciencia de materiales, la tenacidad es la energía total que absorbe un material antes de alcanzar la rotura, por acumulación de dislocaciones. En mineralogía la tenacidad es la resistencia que opone un mineral u otro material a ser roto, molido, doblado, desgarrado o suprimido, siendo una medida de su cohesión.

Termopar	Un termopar (también llamado termocupla) es un transductor formado por la unión de dos metales distintos que produce un voltaje (efecto Seebeck), que es función de la diferencia de temperatura entre uno de los extremos denominado punto caliente o unión caliente o de medida y el otro denominado punto frío o unión fría o de referencia.
Turbogenerador	Es una turbina acoplada directamente a un generador eléctrico para la generación de energía eléctrica. Grandes turbogeneradores movidos por vapor son los que proveen la mayoría de la electricidad del mundo.
VAC	Voltaje de Corriente Alterna.
VCD	Voltaje de Corriente Directa.

RESUMEN

Este informe final de EPS pretende que el lector conozca y entienda todo lo referente a la construcción de los generadores de potencia, la forma en que estos se controlan con el fin de que se conozcan las grandes fuerzas magnéticas que actúan en la conversión de energía electromecánica y, a la vez, son aplicadas a los componentes del generador, sin entrar en materia de los sistemas de control con detalle y fórmulas; además de la protección que se les proporciona por medio del uso de dispositivos de protección y sobre las pruebas que a estos se les practica.

También en la sección 2.1.2 trata sobre el tema del mantenimiento industrial, los tipos de mantenimiento que existen y su práctica para, posteriormente en la sección 2.1.3, introducir al lector en los tipos de mantenimiento que se le realiza a los generadores de potencia, en donde se mencionan las diferentes actividades que se desarrollan para preservarlos.

En la sección 2.1.4 se trata después sobre el tema de las descargas parciales en los diferentes materiales dieléctricos y luego en la sección 2.1.5, se enfoca en las descargas parciales en los generadores de potencia, las características de estas, los mecanismos de falla que las generan y desarrollan, los tipos de descargas parciales que existen y como se detectan estas.

En la sección 2.2 se presenta la idea del uso de la detección de descargas parciales como mantenimiento predictivo a los generadores de potencia, se hace una comparación de esta prueba ante otras que son de uso común en nuestro medio. Se explica como se seleccionó un sistema de detección de descargas parciales en el proyecto de EPS, el diseño e instalación de este sistema y la implementación de su uso, el diseño y desarrollo del mantenimiento predictivo y como se interpretan los datos que se adquieren con el sistema.

De último se presentan los datos de los generadores de potencia de la planta en donde se desarrollo el EPS y se da un diagnóstico del estado del aislamiento de estos.

OBJETIVOS

General

Diseñar e implementar un sistema de mantenimiento predictivo en línea que permita y garantice la operación continua y eficiente de los generadores de potencia de la planta.

Específicos

1. Conocer, a través del tiempo, el estado y el deterioro del aislamiento de los generadores de potencia.
2. Mantener en un nivel aceptable la eficiencia de los sistemas de generación, evitando pérdidas de energía por medio de la detección en tiempo de posibles fallas.
3. Cumplir con los requerimientos de instituciones nacionales, garantizando el suministro de energía eléctrica.
4. Mantener a los generadores trabajando correctamente para garantizar el flujo económico hacia los accionistas de la empresa.

INTRODUCCIÓN

Cada día los sistemas de energía eléctrica son más grandes y complejos. En el medio, en el SNI actualmente la tasa de crecimiento de la demanda de potencia es ligeramente mayor a la tasa de crecimiento de la oferta poniendo en riesgo el margen de seguridad y reserva, por lo que es necesario que las máquinas que entregan la potencia al sistema sean más confiables, esto para evitar que algún día pueda haber racionamiento del servicio, mientras se construyan grandes centros de generación.

En busca de esta confiabilidad se pueden desarrollar planes de mantenimiento preventivo continuo para los generadores que funcionan actualmente, pero se sacrificaría la disponibilidad por elevar la confiabilidad, por lo que para llegar a un balance, en este documento se plantea un método para lograr una alta confiabilidad junto a una alta disponibilidad de los generadores de potencia.

Se plantea el proceder para la implementación de un mantenimiento predictivo el cual no requiere que los generadores estén fuera de línea para realizarlo y da una idea precisa de la condición de uno de los componentes principales de los generadores, siendo el aislamiento de los devanados del estator.

Como informe final del trabajo de EPS, aquí se presenta el desarrollo de un proyecto en una planta de generación de energía eléctrica en Guatemala en la cual se desea tener una confiabilidad alta por su posición estratégica.

1. RESEÑA HISTÓRICA Y ASPECTOS GENERALES DE LA EMPRESA

1.1. Historia y antecedentes

Generadora Eléctrica del Norte LTDA, más conocida en el medio como Genor, nació en 1998 como una Planta térmica, la cual de acuerdo a la clasificación anterior está ubicada dentro de las Plantas de Motores Reciprocantes.

Por otro lado, trajo el beneficio a la localidad de la estabilidad en el voltaje, ya que en poblaciones cercanas, previo a que entrara en operación esta planta, surgían muchas variaciones de voltaje. Por estar localizados en un extremo del Sistema Nacional Interconectado. También ha existido la generación de empleo directo e indirecto en pequeña escala, que se ha multiplicado beneficiando a varias familias de la localidad.

1.2. Actividad de la empresa

Genor tiene como actividad única la generación de energía eléctrica, para lo cual cuenta con cuatro motores con su respectivo generador, capaces de producir en su totalidad 42 megawatts y ofrece energía eléctrica en una forma más competitiva y segura al incrementar la capacidad del Sistema Nacional Interconectado. Su misión es producir eficientemente energía eléctrica, utilizando para ello la tecnología más avanzada y el profesionalismo de personal experto para satisfacer las necesidades del gran usuario en la industria y el comercio del país.

1.3. Ubicación

Está ubicada en la finca Buenos Aires, kilómetro 292 carretera al Atlántico, CA-9, en jurisdicción de Puerto Barrios, departamento de Izabal. Los generadores de Genor se conectan en 13,8 kilovoltios a su subestación de transformación (elevación) y es un nodo que está conectado a la subestación del INDE, Puerto Barrios, por medio de una línea de 69 kilovoltios de 3 kilómetros de largo y, por medio de otra línea de 69 kilovoltios y 45 kilómetros de largo, está conectado a la subestación de La Ruidosa, Morales, Izabal.

1.4. Mercado objetivo

Está conectada al SNI y participa en el mercado spot de energía eléctrica en un porcentaje de su capacidad, la empresa también cuenta con una comercializadora propia, por lo cual gran parte de la potencia de la planta está contratada por varios clientes del área y del centro del país.

2. FASE TÉCNICA

2.1. Marco teórico

En este apartado se toma en cuenta todo lo referente a la fase técnica la cual contempla los tipos de generadores de potencia, su funcionamiento, los parámetros para su construcción entre otros temas.

2.1.1. Generadores de potencia eléctrica

“La energía está definida como la capacidad de un cuerpo para hacer trabajo mecánico; la energía es almacenada en la naturaleza (energía primaria) de pocas formas, tales como combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural), biomasa, energía potencial (gravitacional), geotermia, mareas, formas nucleares y radiación solar. La energía no puede ser almacenada en la naturaleza en forma de electricidad; sin embargo, la energía eléctrica es fácil de transmitir a largas distancias y cumplir con las necesidades de los usuarios por medio de un adecuado control. Más del 30% de energía que se usa en el mundo es convertida en energía eléctrica antes de su uso, principalmente por medio de generadores eléctricos”.¹

¹ BOLDEA, Ion. Synchronous Generators. The electric power Engineering Series. p. 1.1.

“Los generadores eléctricos o alternadores son máquinas sincrónicas que convierten la energía mecánica en energía eléctrica AC”.² La energía eléctrica es producida cuando un primotor convierte energía que esté almacenada de alguna forma en energía mecánica por medio del movimiento giratorio de su eje al cual también está acoplado el eje de un generador eléctrico en el que se encuentra el rotor de este (la parte móvil del generador). Si se cumplen las condiciones necesarias, en las terminales del estator de este (la parte estática) habrá un voltaje y al ser conectado a alguna o a varias cargas se producirá una corriente eléctrica.

“En el proceso se usa una forma de energía intermedia llamada energía magnética, alojada principalmente entre el estator y el rotor”.³ “La interacción entre los campos magnéticos multipolares del estator y del rotor genera la energía eléctrica, la interacción es llamada síncrona ya que cuando el generador está funcionando, los campos magnéticos del estator y del rotor giran a la misma velocidad”.⁴

Instantáneamente la potencia mecánica en el eje del primotor es aproximadamente la potencia eléctrica en las terminales del generador, lo cual se puede expresar como se indica en la fórmula:

$$P_{mec} \approx P_{elec} \quad (1)$$

Donde:

P_{mec} = potencia mecánica

P_{elec} = potencia eléctrica

² KIAMEH, Philip. Electrical Equipmente Handbook, Troubleshooting and maintenance. p. 12.1.

³ BOLDEA, Ion. Synchronous Generators. p. 1.5.

⁴ NEIL, Sclater, TRASITER, John E. Handbook of electrical desing details. p. 45.

De forma equivalente a (1)

$$\omega T \approx VI \quad (2)$$

Donde:

ω = velocidad angular del eje del primotor

T = torque del primotor aplicado a su eje

V = voltaje en las terminales del generador

I = corriente de línea del generador

Por medio de controladores dedicados, la velocidad angular del eje y el voltaje en las terminales del generador se controlan y regulan por lo que se podrían considerar constantes en (2), entonces para el estado estable la expresión se reduce a (3).

$$T \sim I \quad (3)$$

“De (3) se deduce que el torque suministrado por el primotor es directamente proporcional a la corriente eléctrica demandada al generador; en otras palabras, cuanto más cargas se conecten al generador, más torque debe proporcionar el primotor para mantener las condiciones estables del conjunto acoplado y, por lo tanto, deberá consumir más energía primaria; esto es una consecuencia clara del concepto de la conservación de la energía”.⁵

⁵ FINK, Donald, WAYNE, Beaty. Standard handbook of electrical engineering. p. 7 - 9.

La producción de energía eléctrica a gran escala tiene lugar en centrales que, dependiendo del tipo de energía primaria utilizada, pueden ser hidráulicas, térmicas clásicas o térmicas nucleares; ya sea por logística o por la proximidad a las fuentes de energía primaria, las centrales de generación se ubican generalmente lejos de las áreas en donde se concentran los consumidores. “Normalmente los generadores de potencia que se encuentran instalados en centrales de generación de energía eléctrica son de potencias mayores a 2 megawatts debido a razones de eficiencia y trabajan en voltajes entre 6 y 25 kilovoltio para evitar conductores muy masivos en el devanado del estator”.⁶

Los generadores eléctricos de potencia pueden ser clasificados de varias formas, pero la mejor forma de clasificarlos es por el principio que utilizan para trabajar, de este modo los tres principales tipos de generadores eléctricos de potencias son:

- Síncronos
- Asíncronos
- Paramétricos “(con anisotropía magnética y magnetos permanentes)”⁷

En este documento únicamente se tratarán los generadores síncronos, aunque la aplicación pueda extenderse a los otros dos tipos de generadores, esto no será mencionado a lo largo de este documento.

⁶ Barrero, Fermin. Sistemas de energía eléctrica. p. 8.

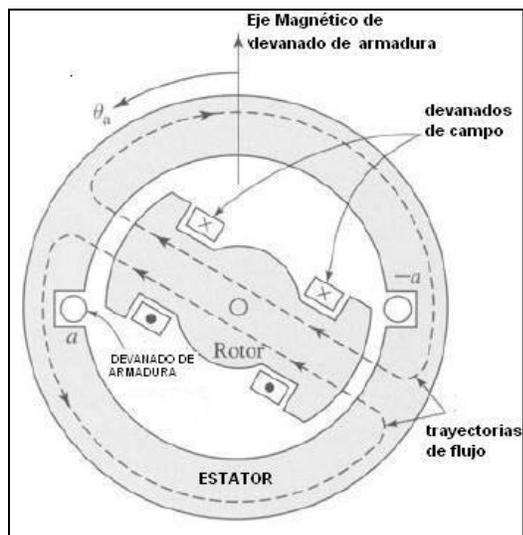
⁷ BOLDEA, Ion. Synchronous generators. p. 1 – 2.

Funcionamiento

Una idea preliminar del funcionamiento de un generador síncrono puede ser alcanzada por medio del análisis del voltaje inducido en la armadura del generador muy simplificado mostrado esquemáticamente en la figura 1.

El devanado de campo de este generador produce un único par de polos magnéticos; por ese motivo este generador es de dos polos. Con excepciones muy raras, el devanado de armadura de un generador síncrono está en el estator y el devanado de campo se encuentra en el rotor, como sucede en este generador simplificado.

Figura 1. **Vista esquemática de un generador síncrono simplificado de dos polos**



Fuente: FITZGERALD, A.E. Electric machinery. p. 177.

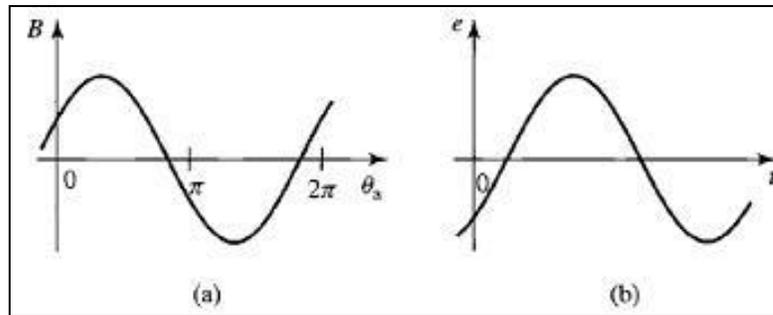
El devanado de campo es excitado y controlado por corriente directa que en este ejemplo es conducida por medio de escobillas estacionarias, las cuales hacen contacto con anillos rozantes o anillos colectores. Es mejor desde el punto de vista de funcionamiento tener el devanado de campo el cual es simple, liviano y de baja potencia en el rotor mientras que el devanado de armadura, es de alta potencia y que típicamente es de tres fases, alojado en el estator.

El devanado de armadura, formado aquí de una única bobina de N vueltas, está vista en sección por medio de dos lados de bobina a y $-a$ localizados en pequeños alojamientos diametralmente opuestos en la periferia interna del estator de la figura 1. Los conductores que forman estos lados de bobinas son paralelos al eje del generador y son conectados en serie por conexiones en los lados, las cuales no son indicadas en la figura.

El rotor es girado a velocidad constante bajo control como se indicó anteriormente por un primotor acoplado al eje de este. Se asume que el devanado de armadura está en circuito abierto y por lo tanto, el flujo en este generador es producido únicamente por el devanado de campo. Las trayectorias de flujo son mostradas esquemáticamente por líneas punteadas en la figura. Un análisis altamente idealizado de este generador simple ayudaría a asumir que habría una distribución sinusoidal de flujo magnético en el área que separa la superficie externa del rotor y la superficie interna del estator el cual es llamado entrehierro.

La distribución radial resultante de la densidad de flujo magnético B en el entrehierro está indicada en la figura 2a como una función del ángulo espacial θ_a (medido respecto al eje magnético del devanado de armadura) alrededor de la periferia del rotor.

Figura 2. **Distribución espacial de densidad de flujo y forma de onda correspondiente al voltaje generado por el generador monofásico de la figura 1**



Fuente: FITZGERALD, A.E. Electric Machinery. p.177.

En la práctica, la densidad de flujo en el entrehierro de un generador de polo salientes real puede hacerse que se aproxime a la distribución sinusoidal por medio del diseño mecánico apropiado de la forma de las caras de los polos.

Mientras el rotor gira, los concatenamientos de flujo del devanado de armadura cambian con el tiempo. Bajo la suposición de una distribución sinusoidal de flujo y una velocidad constante de giro del rotor, el voltaje resultante en la bobina va a ser sinusoidal en el tiempo como se indica en la figura 2. El voltaje de la bobina pasa a través de un ciclo completo por cada revolución que complete el generador de dos polos de la figura 1. Su frecuencia, en ciclos por segundo (Hertz), es la misma que la velocidad del rotor en revoluciones por segundo: la frecuencia eléctrica del voltaje generado está sincronizado con la velocidad mecánica y esta es la razón para la designación generador síncrono. Así, un generador síncrono de dos polos debe girar 3 600 veces por minuto para generar un voltaje de 60 Hertz.

La frecuencia eléctrica del voltaje producido por generadores síncronos puede ser calculado por medio de la ecuación (4).

$$f_e = \frac{(\# \text{ polos})}{2} \frac{n}{60} \text{ Hz} \quad (4)$$

Donde:

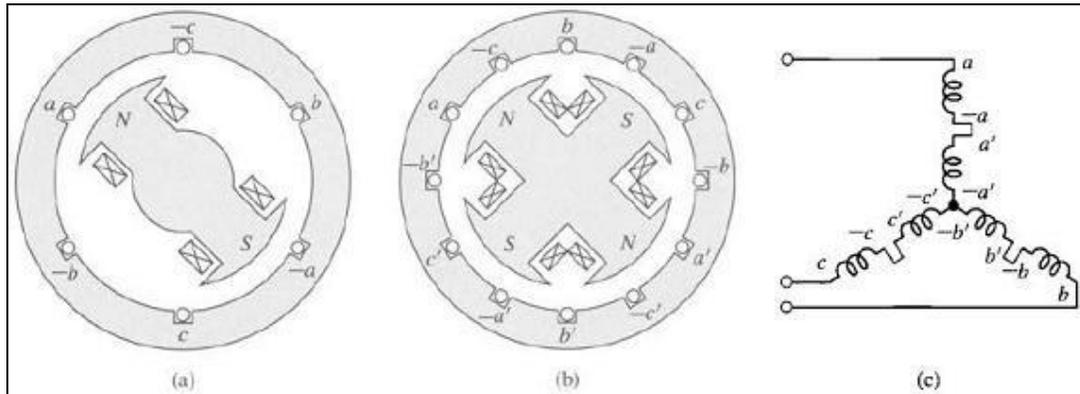
f_e = frecuencia eléctrica

n = velocidad mecánica en revoluciones por minuto

La mayoría de los sistemas de potencia en el mundo son trifásicos; por lo tanto y con muy pocas excepciones, los generadores síncronos son trifásicos. Para la producción de un juego de tres voltajes con un desplazamiento de fase de 120 grados eléctricos en el tiempo, se debe usar un mínimo de tres bobinas con un desplazamiento de fase de 120 grados mecánicos entre ellos.

En la figura 3a se aprecia una vista esquemática simplificada de un generador de dos polos trifásico, se puede ver una bobina por cada fase y cada una con una letra designada a, b y c; en un generador elemental de cuatro polos, un mínimo de dos conjuntos de bobinas debe ser usado por fase, como se puede apreciar en la figura 3b; las dos bobinas de cada fase son conectadas en serie para que se sumen los voltajes que se generan en cada una y las tres fases deben ser interconectadas ya sea en Y o en Δ , la figura 3c muestra el diagrama de cómo se deben conectar las bobinas en una conexión Y.

Figura 3. **Vista esquemática de generadores trifásicos de dos polos, de cuatro polos, conexión y de devanados**



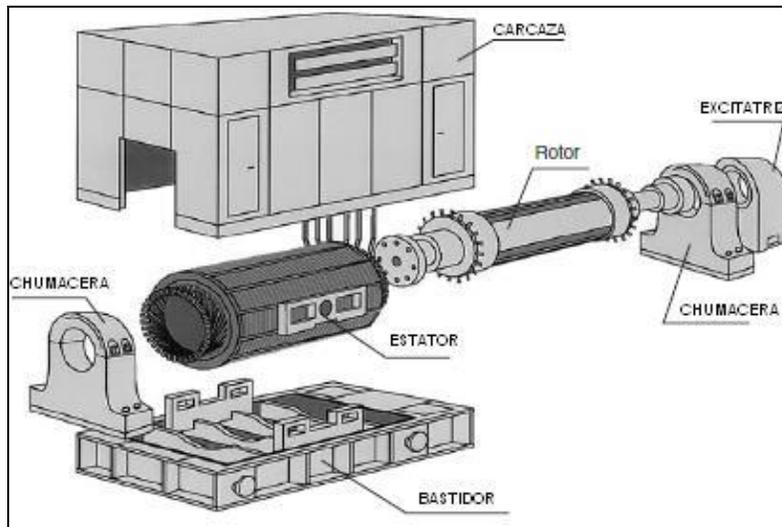
Fuente: FITZGERALD, A.E. Electric Machinery. p.182.

“Cuando el generador está conectado a la carga, la corriente de armadura crea una onda de flujo magnético en el entrehierro, el cual rota a la velocidad síncrona, este flujo reacciona con el flujo creado por la corriente de campo y como resultado se presenta un torque electromecánico (par magnético o fuerza magnetomotriz) por la tendencia de estos dos campos magnéticos a alinearse. En un generador este torque se opone a la rotación y es lo que los primotores deben vencer; este torque es el mecanismo por medio del cual los generadores convierten energía mecánica a energía eléctrica”.⁸

Las partes básicas de un generador síncrono son el rotor, el estator, el bastidor o carcasa (el cual incluye el sistema de enfriamiento y las chumaceras) y el sistema de excitación como se puede apreciar en la figura 4.

⁸ FITZGERALD, A.E. Electric Machinery. p.180.

Figura 4. Partes de un generador de potencia



Fuente: WARNE, D.F. Newnes Electrical Power Engineer's Handbook. p.128.

2.1.1.1. Construcción de los generadores de potencia

Para la construcción de los generadores es necesario tomar en cuenta los siguientes parámetros para su correcto funcionamiento, así mismo, se describen las partes que lo componen.

- Rotor

Los rotores están hechos de un eje de metal forjado, el metal usado recibe una cuidadosa fundición, tratamiento y análisis final para garantizar su tenacidad, ya que en un cortocircuito en las terminales el contra-torque se incrementa de 4 a 5 veces el torque de carga completa del generador.

Los generadores síncronos son construidos en uno de los dos posibles diseños de rotores dependiendo de la velocidad angular al que trabajarán: cilíndricos o de polos salientes.

- Rotores cilíndricos

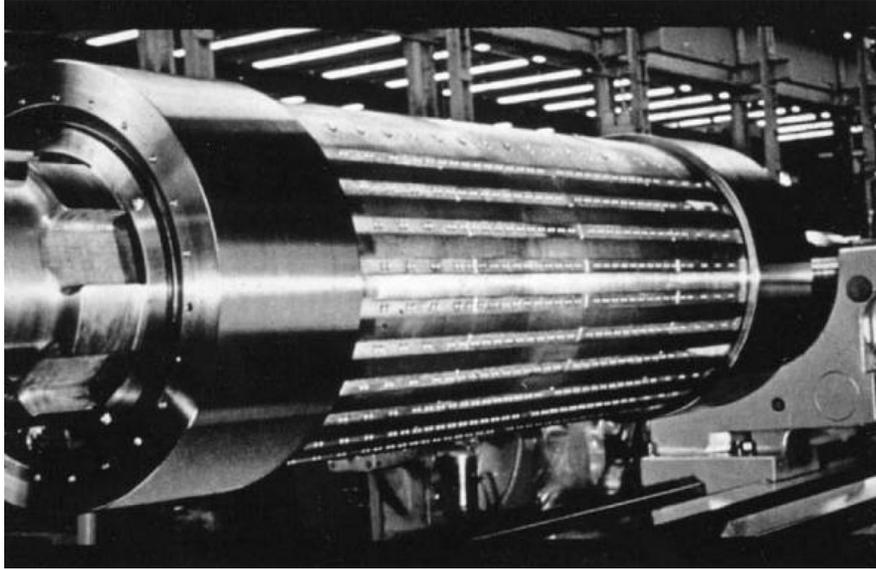
“Son cilindros de metal sólido con el devanado de campo insertado en ranuras maquinadas en la superficie del rotor. Los generadores con rotor cilíndrico usualmente son de 2 o 4 polos, estos rotores pueden soportar los esfuerzos de la rotación de alta velocidad”.⁹ La superficie relativamente lisa de este tipo de rotor, figura 5, reduce las pérdidas por movimiento del aire o gas en el entrehierro, estas pérdidas pueden ser sustanciosas a altas velocidades en presencia de protuberancias en la superficie del rotor.

“La forma cilíndrica y dimensiones de estos rotores los hace estructuralmente más robustos bajo las grandes fuerzas centrífugas que se presentan en máquinas de alta velocidad”.¹⁰

⁹ SCLATER, Neil. Handbook of electrical deesign details. p. 47.

¹⁰ STONE, Greg. C. Electrical Insulation for rotating machines. p. 4.

Figura 5. **Rotor cilíndrico**



Fuente: STONE, Greg C. Electrical Insulation for Rotating Machines. p. 4.

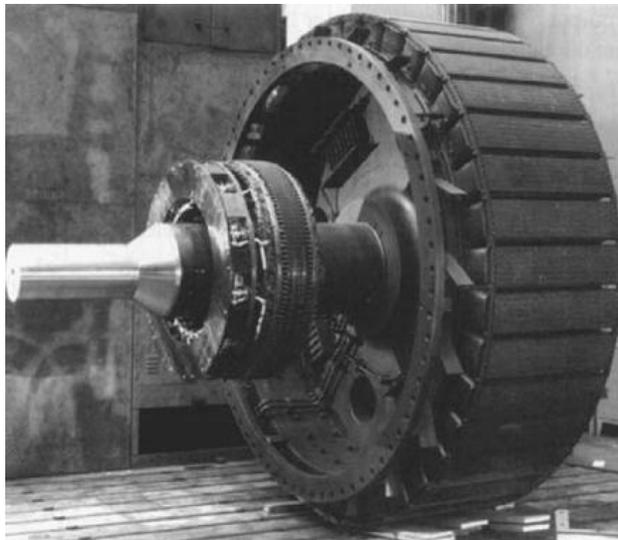
- **Rotores de polos salientes**

“Estos tienen múltiples piezas de polos montadas en la estructura del rotor y los devanados de campo son embobinados en estas piezas, debido a la mayor complejidad en su construcción y gran relación diámetro-largo, figura 6, estos rotores no pueden soportar los esfuerzos de la rotación de alta velocidad”.¹¹ Las piezas de los polos están montadas en un aro cilíndrico, el cual está acoplado al eje del rotor por medio de pernos o soldadura.

¹¹ SCLATER, Neil. Handbook of Electrical Design Details. p. 47.

Ya que las piezas de los polos sobresalen desde el aro con espacios entre polos, estos crean una turbulencia considerable en el entrehierro cuando el rotor gira, dando como resultado una pérdida relativamente alta en mover el aire o gas, en forma del efecto ventilador. Sin embargo, ya que las velocidades a la que giran estos rotores son menores de 900 revoluciones por minuto, las pérdidas son moderadas. “En algunos casos los rotores pueden tener 50 polos para muy baja velocidad”.¹²

Figura 6. **Rotor de polos salientes**



Fuente: KIAMEH, Philip. Electrical Equipment Handbook, Troubleshooting and Maintenance.
p. 12.

¹² STONE, Greg. C. Electrical Insulation for Rotating Machines. p. 5.

- Sistema de excitación

“Una corriente directa es aplicada a los devanados del rotor de un generador síncrono para producir el campo magnético de este. El circuito de campo del rotor es alimentado usando alguno de los dos métodos comunes: el de anillos rozantes y escobillas y el de fuente de CD montada directamente en eje”.¹³

- Método anillos rozantes y escobillas

Los anillos rozantes son anillos metálicos que rodean todo el eje del rotor pero están aislados eléctricamente de este. Cada uno de los dos anillos en el eje está conectado a cada extremo del devanado CD del rotor y algunas escobillas (fijas) rozan a cada anillo. La terminal positiva de la fuente de CD está conectada a un anillo rozante y la terminal negativa al otro anillo. Con esto se asegura que el mismo voltaje CD es aplicado a los devanados de campo sin importar la posición angular del eje o la velocidad del rotor.

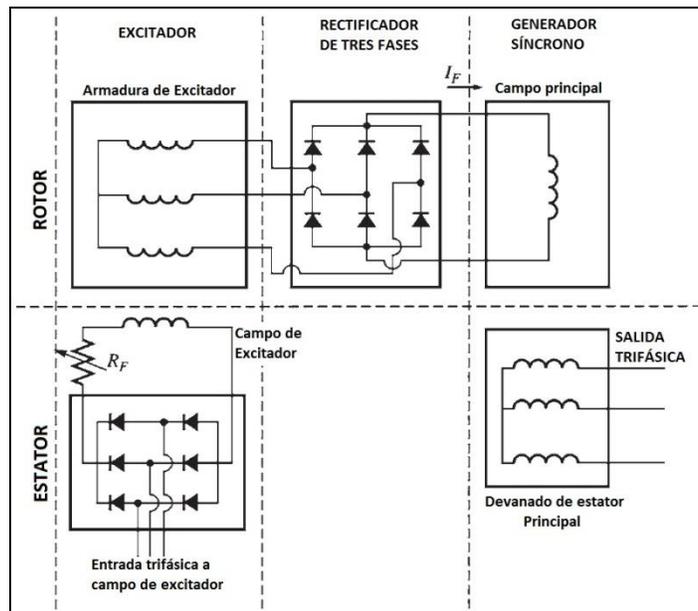
Los anillos rozantes y las escobillas requieren un alto grado de mantenimiento debido a que regularmente este sistema está propenso a desgastes. También, la caída de voltaje a través de las escobillas puede ser la causa de grandes pérdidas de potencia cuando las corrientes de campo son grandes.

¹³ KIAMEH, Philip. Electrical Equipment Handbook, Troubleshooting and Maintenance. p. 12.1–12.4.

- Método fuente de CD montada directamente en eje

Los generadores grandes usan excitación sin escobillas, esta consiste de un pequeño generador CA el cual tiene su circuito de campo montado en el estator y su circuito de armadura montado en el eje del rotor. La salida del generador excitador es trifásica CA y es convertida en potencia CD por medio de un puente trifásico rectificador también montado en el rotor. Esta potencia CD es alimentada hacia el circuito principal de campo del rotor. La corriente de campo del generador principal puede ser controlada por una pequeña fuente CD conectado al circuito de campo del generador excitador, el cual es estático, figura 7.

Figura 7. **Circuito típico de un sistema de excitación sin escobillas**



Fuente: KIAMEH, Philip. Electrical Equipment Handbook, Troubleshooting and Maintenance.

p. 12.3.

- Carcasa

“La estructura exterior de los generadores, hecha de hierro ya sea moldeado o soldado, soporta el núcleo laminado del estator y tiene patas o bridas, para ser montado en la base cimentada. La vibración de la estructura proveniente de las fuerzas magnéticas del núcleo o del desbalance del rotor es minimizada por montajes resistentes del núcleo o el diseño para evitar resonancia de la estructura con frecuencias forzantes. La estructura también soporta en algunos casos los cojinetes del generador; también provee protección de los elementos y canaliza el aire o gas de enfriamiento desde y hacia el núcleo, devanados de estator y rotor”.¹⁴

- Cojinetes

Los cojinetes en generadores síncronos pequeños son de lubricación con grasa o con aceite, en generadores mayores se usan del tipo lubricados por aceite por medio de arrastre y en generadores más sofisticados se usan del tipo cónico, especialmente cuando la dinámica del rotor es crítica. Hay muchas clases de cojinetes que tienen un aislamiento entre sus partes móviles y las partes estáticas, de este modo se evita que corrientes circulen a través de estos y que se causen daños en las superficies de soporte y de arrastre.

¹⁴ GRIGSBY, Leonard L. Electric Power Generation, Transmission and Distribution. p. 57.

“En las bases de estos puede ser alojado sensores para la medición de la temperatura de estos la cual debe ser monitoreada en la operación de un generador, el análisis del aceite o grasa de los cojinetes es recomendable para detectar desgaste metálico en estos”.¹⁵

- Sistema de enfriamiento

“En los generadores de potencia trabajando en estado estable hay varias fuentes de calor: la que produce la corriente al fluir por los devanados del estator y por los del rotor (llamadas pérdidas I^2R), pérdidas magnéticas en el núcleo, pérdidas por efecto ventilador y pérdidas por corriente de Eddy. Todas estas pérdidas causan que la temperatura de los devanados se incremente; si este calor no se remueve, el aislamiento de los devanados se deteriorará y el generador fallará. En la construcción de generadores se utilizan, principalmente, tres tipos de enfriamiento: enfriamiento indirecto por aire, enfriamiento indirecto por hidrógeno y devanados directamente enfriados”.¹⁶

¹⁵ GRIGSBY, Leonard L. Electric Power Generation, Transmission and Distribution. p. 58.

¹⁶ MURTHY, Vishnu K. M. Computer-Aided Design of Electrical Machines. p. 27.

- Enfriamiento indirecto por aire

Los generadores en el rango de hasta 100 megavatios son casi siempre enfriados por aire fluyendo hacia el rotor y estator. Este es llamado enfriamiento indirecto ya que los conductores del devanado no están directamente en contacto con el aire de enfriamiento debido a la presencia del aislamiento eléctrico en los devanados.

El aire puede ser continuamente forzado a entrar siendo tomado del ambiente, lo que significa que no recircula. Estos son llamados de ventilación abierta, aunque debe usarse filtrado para prevenir la entrada de partículas y, si es posible, evitar la entrada de humedad a los generadores por medio de trayectorias indirectas para forzar el aire a entrar; también son referidos como con protección del ambiente.

Una segunda manera de obtener aire frío es cerrar completamente el generador y recircular aire por medio de un intercambiador de calor ya sea del tipo aire-aire o aire-agua, esto es a menudo necesario para generadores instalados en áreas muy contaminadas o expuestos a los elementos. Virtualmente todos los hidrogenadores usan aire recirculado, con el aire enfriado por intercambiadores de calor tipo aire-agua. Para turbogeneradores en un rango de hasta algunos cientos de megawatts, el sistema de aire recirculado es actualmente la forma más común de enfriamiento.

- Enfriamiento indirecto por gas

Casi todos los turbogeneradores usan hidrógeno recirculado como gas de enfriamiento. Esto es porque el hidrógeno requiere 14 veces menos energía para moverse y tiene 6,6 veces mejor conductividad térmica que el aire. Hay entonces una eficiencia en costos al usar hidrógeno a pesar del gasto extra involucrado, debido al porcentaje de ganancia en la eficiencia. La línea divisoria entre cuando usar hidrógeno para enfriar está constantemente cambiando, en los 90, había una tendencia definida a usar enfriamiento por hidrógeno para generadores en el rango mayor a 300 megavatios, mientras que en el pasado, enfriamiento por hidrógeno era a veces usado en generadores con turbina de gas o vapor tan pequeños como 50 megavatios.

- Devanados directamente enfriados

Estatores y rotores de generadores muy grandes son frecuentemente enfriados directamente. En los devanados directamente enfriados, agua o hidrógeno es pasado internamente a través de los conductores o a través de ductos inmediatamente adyacentes a los conductores. En los estatores con devanados enfriados directamente por agua, agua muy pura pasa por los conductores ahuecados de cobre o a través de tubos de acero inoxidable adyacentes a los conductores de cobre.

Ya que el medio de enfriamiento está directamente en contacto con los conductores, este remueve muy eficientemente el calor desarrollado por las pérdidas. En los generadores enfriados indirectamente, el calor debe ser primero transmitido a través del aislamiento eléctrico que cubre los conductores, el cual forma una significativa barrera térmica.

Aunque no es realmente efectivo en remover el calor en estos casos, en devanados enfriados directamente con hidrógeno, a este se le permite fluir dentro de los conductores de cobre ahuecados o en los tubos de acero inoxidable, como es en el diseño de enfriamiento directo con agua. En ambos casos, aprovisionamiento especial debe ser instalado para garantizar que el enfriamiento por agua o por hidrógeno no introducirá problemas al aislamiento eléctrico.

- Estator

Básicamente está formado por el núcleo enchapado, los devanados y el aislamiento, de los cuales se entra en detalle en las siguientes secciones.

- Núcleo

“Es donde se alojan los devanados del estator, sirve para concentrar el campo magnético proveniente del rotor en los conductores de las bobinas y ofrece una trayectoria de baja reluctancia para los campos magnéticos desde el rotor al estator; también previene que la mayoría del campo magnético del estator escape de los extremos de este, los cuales podrían causar corrientes fluyendo en los materiales conductivos adyacentes y también ayuda a disipar el calor generado en los devanados”.¹⁷

Está formado de láminas de metales magnéticos que normalmente tienen entre 0,35 y 0,5 milímetros de grosor, las cuales están recubiertas por una fina capa de barniz aislante al horno o por una capa fina de óxido, estas son fijadas juntas una a otra a presión para evitar espacios vacíos y posteriormente se le hace el maquinado para darle la forma final diseñada.

“En el diseño del núcleo se contemplan los espacios para alojar los devanados y los espacios para permitir la circulación de aire o de gas para el enfriamiento; la forma de fijarlas puede ser por medio de tornillos, remaches o por cordones de soldadura; en algunos diseños se utiliza un agente adhesivo para asegurar que en los dientes ya maquinados del núcleo las láminas no vibren independientemente”.¹⁸

¹⁷ STONE, Greg. C. Electrical Insulation for Rotating Machines. p. 18.

¹⁸ KIAMEH, Philip. Electrical Equipment Handbook, Troubleshooting and Maintenance. p. 13.17.

La naturaleza laminada del núcleo es reducir pérdidas de energía en forma de calor por medio de la reducción al mínimo de las corrientes de Eddy ya que el aislante entre las láminas interrumpe las trayectorias de corrientes; mientras más finas las láminas, más se reducen las pérdidas. “Las láminas están alineadas en la dirección de las líneas de campo que se producen en el generador”.¹⁹ En un generador de potencia el núcleo está solidamente conectado a tierra.

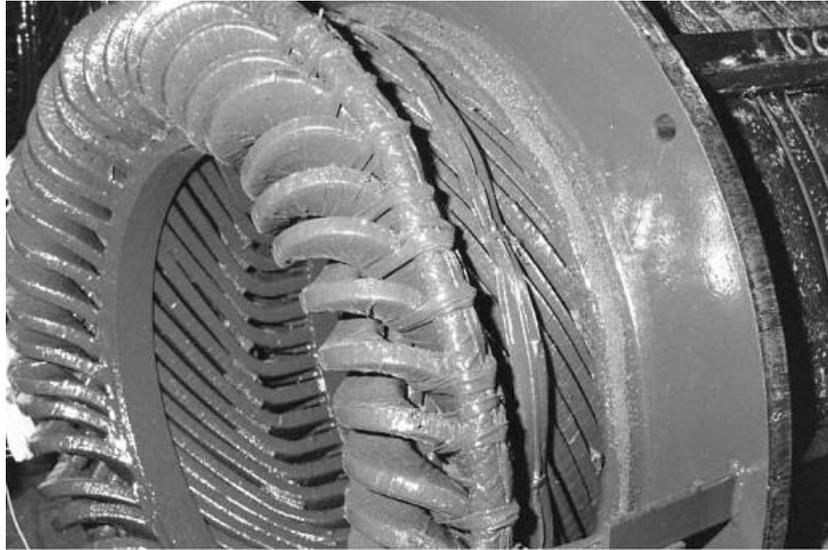
- Devanados del estator

Como se indicó anteriormente, por los devanados del estator circulan las grandes corrientes de carga que son inducidas por la interacción de los campos magnéticos. Para generadores de potencia se utilizan dos formas de estructurar los devanados del estator: Form-Wound usando bobinas con varias vueltas o Form-Wound usando barras Roebel. El segundo es muy poco usado en el medio y se encuentra en generadores de más de 100 megawatts, este documento se enfoca al primer tipo, de aquí en adelante cuando se mencione un devanado Form-Wound, la referencia será para la estructura tipo Form-Wound de bobinas de varias vueltas.

Los estatores Form-Wound son usados para generadores que operan a 1 000 vatios y más. Tales devanados son hechos de bobinas aisladas que han sido preformadas antes de la inserción en las ranuras del núcleo del estator, figura 8.

¹⁹ FITZGERALD. A.E. Electric Machinery. p. 26.

Figura 8. **Estator con bobina Form-Wound**



Fuente: Greg C. Stone. *Electrical Insulation for Rotating Machines, Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair*. p. 11.

Estas bobinas preformadas consisten de un trayecto continuo de alambre magnético formado en una bobina la cual a veces es referida como la forma de diamante figura 9, con aislante adicional aplicado sobre los trayectos de bobinas. Usualmente, cada bobina puede tener de dos a doce vueltas y muchas de estas bobinas son conectadas en serie para crear el número apropiado de polos y vueltas entre la terminal de fase y tierra (o neutro).

“Se utiliza un diseño y un proceso de manufactura cuidadoso para asegurar que cada vuelta en una bobina sea adyacente a la bobina continua siguiente para que exista la más mínima diferencia de voltaje posible entre ellas; por medio de minimizar el voltaje entre vueltas adyacentes, un aislamiento más delgado puede ser usado para separar las vueltas”.²⁰

Figura 9. **Una bobina Form-Wound siendo insertada en dos ranuras del núcleo**



Fuente: STONE, Greg C. Electrical Insulation for Rotating Machines, Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair. p. 11.

²⁰ STONE, Greg. C. Electrical Insulation for Rotating Machines. p. 12.

- Aislamiento de devanados del estator

Uno de los componentes principales de un estator es el aislamiento eléctrico, el material aislante es pasivo diferente a los conductores y el núcleo los cuales son componentes activos en hacer funcionar un generador; esto es, el aislante no ayuda a producir un campo magnético ni a guiar la trayectoria de estos.

Es un hecho que para los diseñadores y constructores de generadores no habría nada mejor que eliminar el aislante eléctrico en los devanados del estator, ya que el aislante incrementa el tamaño de la máquina y su costo y reduce la eficiencia; ni ayuda a crear torque o corriente. Sin embargo, sin el aislamiento los conductores de cobre se pondrían en contacto entre ellos o con el núcleo aterrizado del estator, causando que la corriente fluya en trayectorias indeseadas y evitaría una apropiada operación de la máquina.

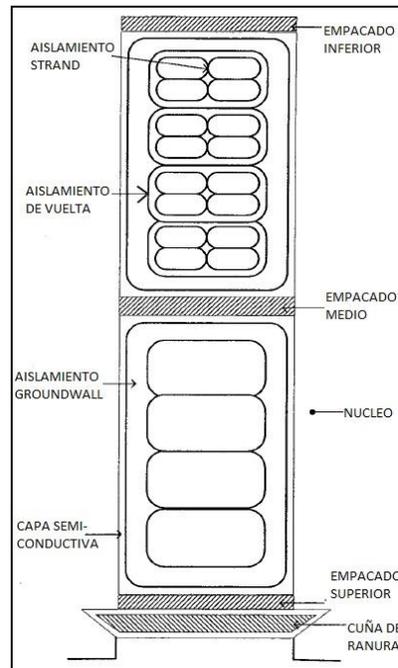
El aislamiento es visto como un costo operativo inevitable. Adicionalmente, los generadores enfriados indirectamente requieren que el material aislante sea un buen conductor térmico, de este modo los conductores no se sobrecalentarán. El sistema de aislamiento también debe mantener a los conductores firmemente en su lugar para prevenir movimientos.

El material aislante contiene materiales orgánicos como constituyente primario ya que estos se funden a bajas temperaturas al momento de aplicarlos pero tienen menor fortaleza mecánica que el cobre y el hierro; de esta manera, la vida del devanado de un estator es limitada casi siempre por el aislamiento eléctrico en lugar de ser por el cobre o el hierro.

El sistema de aislamiento contiene varios componentes diferentes y rasgos los cuales juntos aseguran que los cortocircuitos eléctricos no ocurran, que el calor de los conductores por efecto de pérdidas I^2R sea transferido a los disipadores de calor y que los conductores no vibren a pesar de las grandes fuerzas magnéticas. Los componentes básicos del sistema de aislamiento son: aislamiento Strand (o de hilo), aislamiento de vuelta y aislamiento Groundwall (o de tierra).

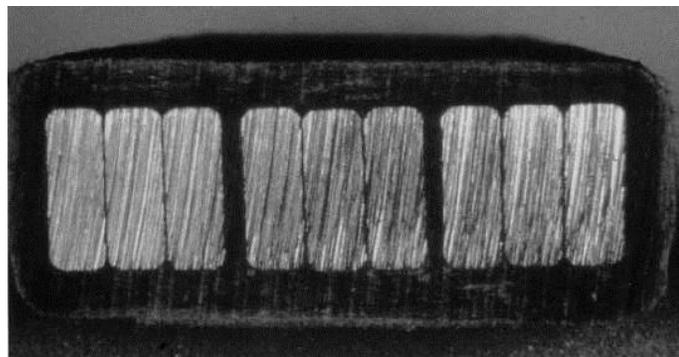
En la figura 10 se puede ver un dibujo de un corte transversal en una ranura de un núcleo de estator, en esta se identifican los componentes indicados anteriormente; también se puede apreciar que en este ejemplo hay dos bobinas en cada ranura lo cual es típico; además de los componentes del aislamiento principal, el sistema de aislamiento a veces tiene recubrimiento para reducir el stress del alto voltaje y componentes de soportes para los extremos del devanado. La figura 11 es una foto de una sección transversal de una bobina de varias vueltas.

Figura 10. **Sección de una ranura con devanado Form-Wound**



Fuente: STONE, Greg C. Electrical Insulation for Rotating Machines, Design, Evaluation, Aging, Testing and Repair. p. 15.

Figura 11. **Foto de una bobina multivuelta**



Fuente: STONE, Greg C. Electrical Insulation for Rotating Machines, Design, Evaluation, Aging, Testing and Repair. p. 16.

- Aislamiento strand (de hilo)

Hay razones eléctricas y mecánicas para dividir un conductor en una bobina o barra Form-Wound. Desde el punto de vista mecánico, un conductor que es suficientemente grande para conducir la corriente necesaria en la bobina o barra en un generador grande debe tener una sección transversal relativamente grande, este tipo de conductor es difícil de doblar y darle la forma requerida de la bobina/barra; un conductor formado de conductores pequeños (también llamados subconductores) es fácil de moldear en la forma requerida comparado a un conductor grueso.

Desde el punto de vista eléctrico, hay razones para utilizar varios hilos o subconductores y aislar unos de los otros. Como es sabido de la teoría electromagnética, en un conductor con área transversal grande, la corriente tiende a fluir en la periferia del conductor, esto es conocido como el efecto piel, este efecto da lugar a una profundidad de la piel del conductor a través de la cual fluye la mayoría de la corriente.

La profundidad de la piel en un conductor de cobre a 60 Hertz es 8,5 milímetros; si el conductor tiene una sección transversal tal que el espesor es mayor a 8,5 milímetros, habrá una tendencia de que la corriente no fluya por el centro del conductor, lo cual implica que la corriente no está usando toda la sección transversal disponible.

Esto se reflejaría como una resistencia efectiva de corriente alterna que es mayor a la de corriente directa, por lo que las pérdidas I^2R se incrementan, lo cual se podría evitar si la misma sección transversal se haya hecho por medio de varios hilos o subconductores que estén aislados unos de otros para evitar que ocurra el efecto piel, por lo que toda la sección de cobre es usada para el flujo de corriente.

Adicionalmente, ocurren pérdidas por corrientes de Eddy en conductores sólidos de sección transversal muy grande. En las ranuras del núcleo, el campo magnético principal es primariamente radial, esto es, perpendicular a la dirección axial. Existe un pequeño flujo circunferencial (fuga de ranura) que puede inducir corrientes de Eddy. En el extremo del embobinado, un campo magnético axial es causado por el abrupto final de los núcleos del rotor y del estator, este campo puede ser substancial en generadores síncronos que son subexcitados y puede causar corrientes a circular dentro de la sección transversal del conductor; entre mayor sea el área de la sección transversal, mayor será el flujo magnético que puede ser rodeado por una trayectoria en la periferia del conductor y mayor será la corriente inducida.

El resultado es una mayor pérdida I^2R debido a esta corriente circulante, reduciendo el grosor de los conductores, se logra una reducción de las pérdidas por fugas de campos magnéticos mejorando la eficiencia.

Por estas razones eléctricas, se requiere que los subconductores se aíslen entre ellos, la diferencia de voltaje entre ellos es de pocas decenas de voltios, por lo que este aislamiento puede ser bastante delgado.

Este aislamiento puede ser dañado durante el proceso de la manufactura de las bobinas, por lo que debe tener buenas propiedades mecánicas. Ya que el aislamiento Strand está inmediatamente adyacente a los conductores de cobre que están transportando la corriente principal del estator, los cuales producen pérdidas I^2R , está expuesto a las mayores temperaturas en el estator. Por esto, el aislamiento Strand debe tener buenas propiedades térmicas.

- Aislamiento de vuelta

El propósito de este aislamiento es el de prevenir cortocircuitos entre las vueltas de una bobina. Si ocurriera un cortocircuito en una vuelta, esta se convertiría en algo así como el secundario de un autotransformador. Si, por ejemplo, el devanado tiene 100 vueltas entre fase y neutro (el devanado primario) y si se pone en cortocircuito una vuelta (el secundario), entonces una corriente 100 veces lo normal fluiría por la vuelta en cortocircuito, esto obedece la ley de los transformadores $N_p I_p = N_s I_s$ de donde N es el número de vueltas en el primario y el secundario e I es la corriente en el primario y secundario.

Consecuentemente, esta gran corriente producirá rápidamente un sobrecalentamiento; normalmente esta corriente alta es seguida por una rápida falla a tierra debido a que el cobre se funde y quema cualquier aislamiento. Claramente se deduce que se necesita un aislamiento de vuelta efectivo para garantizar una larga duración del devanado.

El voltaje nominal en operación a través del aislamiento de vuelta puede estar hasta en el rango del valor del voltaje fase a fase debido a que, por definición, las vueltas están colocadas aleatoriamente en las ranuras y debido a esto algunas vueltas de una fase pueden ser adyacentes a una vuelta de final de fase de otra fase; por lo tanto, muchos constructores insertan barreras extras de aislamiento entre bobinas en la misma ranura pero que son de diferentes fases y entre bobinas en diferentes fases en los extremos de los devanados. El voltaje nominal a través de vueltas adyacentes en una bobina multivoltas está muy bien definido.

Esencialmente, se podría tomar el valor del voltaje de fase a neutro y dividirlo entre el número de vueltas entre la terminal de fase y el neutral lo cual dará el voltaje por vuelta; esto es posible ya que los constructores de bobinas toman el considerable cuidado para asegurarse de que la inductancia en cada bobina sea la misma y que la inductancia de cada vuelta dentro de cada bobina sea la misma.

Ya que la impedancia inductiva en ohmios es $X_L = 2\pi fL$, las vueltas resultan ser impedancias en un divisor de voltaje, en donde las bobinas en serie tienen igual impedancia.

En general, el voltaje entre cada vuelta puede estar entre 30 y 250 voltios de corriente alterna, dependiendo del tamaño de generador y del voltaje nominal de estos. El aislamiento de vuelta en bobinas de devanados tipo Form-Wound puede estar expuesto a muy altos voltajes transitorios asociados a fallas en líneas, arranques de equipos grandes, descargas atmosféricas, etcétera. Tales voltajes transitorios pueden envejecer o perforar el aislamiento de vuelta. El aislamiento de vuelta alrededor de la periferia de los conductores de cobre también es expuesto al esfuerzo de voltaje nominal corriente alterna de fase a tierra, también al esfuerzo del voltaje vuelta a vuelta y al de voltaje de fase bobina a bobina.

Antes de 1970, el aislamiento Strand y el de vuelta eran componentes separados en bobinas multivoltas, después de entonces, muchos constructores, en busca de reducir costos, han combinado el aislamiento Strand y el de vuelta, esto elimina un paso en la manufactura e incrementa la fracción de la sección de la ranura del núcleo la cual puede ser llenada con más cobre; sin embargo, algunos usuarios han encontrado que ocurren fallas en servicio mucho antes de los esperado en estatores que no tienen el componente de aislamiento de vuelta por separado.

Las bobinas también están expuestas a esfuerzos mecánicos y térmicos. El mayor esfuerzo mecánico ocurre durante el proceso de formado de la bobina, el cual requiere que las vueltas recubiertas de material aislante sean dobladas o moldeadas en grandes ángulos, los cuales estiran y rompen el aislamiento. Ya en funcionamiento en estado estable, fuerzas mecánicas vibratorias inducidas magnéticamente (de doble frecuencia que la nominal) actúan sobre las vueltas durante la operación. Adicionalmente, grandes fuerzas magnéticas transitorias actúan en las vueltas durante sincronizaciones fuera de fase de los generadores. Como resultado, se requiere que el aislamiento de vuelta tenga una excelente resistencia mecánica.

Los esfuerzos térmicos del aislamiento de vuelta son similares a los del aislamiento Strand ya que son adyacentes, debido a que los conductores de cobre generan calor; entre mayor sea la temperatura de descomposición o de fundición del aislamiento de vuelta, mayor será la corriente de diseño que puede fluir por el estator.

- Aislamiento groundwall

Este aislamiento es una barrera a tierra. Es el componente que separa los conductores de cobre del núcleo del estator aterrizado, fallas en este aislamiento usualmente disparan un relevador de falla a tierra, poniendo el generador fuera de línea, por lo que es igual de importante y crítico para la apropiada operación. Para una vida útil larga, el aislamiento groundwall debe soportar los rigores del esfuerzo mecánico, eléctrico y térmico al que es sujeto.

Diseño eléctrico: las bobinas conectadas al extremo de la fase de un devanado tendrán el voltaje de fase a neutro completo a través de su aislamiento (núcleo = tierra). Este alto voltaje sólo ocurre en las bobinas cercanas a la terminal de fase y requiere de un sustancial grosor del aislamiento groundwall. Las bobinas conectadas al extremo neutral de cada fase tienen esencialmente nada de voltaje a través del groundwall durante la operación normal. Aún así, virtualmente todas las máquinas son diseñadas para tener el mismo grosor de aislamiento para las bobinas del extremo de fase o del extremo del neutro.

Si las bobinas tuvieran diferente grosor de aislamiento groundwall y si dependiera del voltaje al que estuvieran sometidas, entonces las ranuras del núcleo deberían ser de diferentes tamaños y habría problemas si cuando una bobina cercana al neutro tuviera que estar en la misma ranura que una bobina cercana a la fase.

Estas complicaciones en el diseño se evitan haciendo que todas las ranuras tengan las mismas dimensiones y por ende todas las bobinas del devanado tengan el mismo grosor de aislamiento groundwall.

Diseño térmico: el aislamiento groundwall en un generador enfriado indirectamente es la principal trayectoria para transmitir el calor de los conductores de cobre (fuente de calor) hacia el núcleo del estator (disipador de calor). Así que, el aislamiento groundwall deberá tener una resistencia térmica tan baja como sea posible, para evitar altas temperaturas en el cobre.

Para alcanzar una baja resistencia térmica se requiere que los materiales de este aislamiento tengan una alta conductividad térmica y que estén libres de vacíos (similares a burbujas o espacios vacíos), tales vacíos bloquean el flujo de calor, ya que la conductividad térmica del aire que está dentro de los vacíos es mucho menor a la del material del aislamiento groundwall. Por eso, el aislamiento debe ser capaz de operar a altas temperaturas y ser hecho de tal forma que se minimice la formación de burbujas de aire en el groundwall.

Diseño mecánico: suceden grandes fuerzas magnéticas actuando sobre los conductores de cobre, las cuales son primariamente el resultado de los dos campos magnéticos de las corrientes fluyendo en la bobina superior y en la bobina inferior de cada ranura del núcleo; estos campos interactúan, ejerciendo una fuerza que hace que tanto los conductores individuales de cobre como las bobinas vibren (primariamente) de arriba para abajo en la ranura. La fuerza, F , que actúa en la bobina superior a 120 hertz para una corriente de 60 hertz en la dirección radial por cada metro de longitud de bobina está dada por la fórmula (5) expresada en kilonewtons:

$$F = 0,96NI^2/d \quad (5)$$

Donde:

F = fuerza

N = número de vueltas

I = corriente a través de los conductores

d = longitud de los conductores

Si la corriente en la bobina se expresa como

$$I = A \text{ sen } \omega t \quad (6)$$

Donde:

A = constante de amplitud de onda

$\omega = 2\pi$ por la frecuencia

t = tiempo

Sustituyendo (6) en (5) queda

$$F = 0,96 (A \text{ sen } \omega t)^2/d \quad (7)$$

Utilizando la igualdad trigonométrica

$$\text{sen}^2 \omega t = (1 - \cos 2\omega t)/2 \quad (8)$$

en (7) la fórmula de la fuerza queda así

$$F = 0,96A^2 (1 - \cos 2\omega t)/2d \quad (9)$$

Así que, hay una fuerza neta constante hacia el fondo de la ranura. Alrededor de esa fuerza corriente directa hay una fuerza oscilante de dos veces la frecuencia nominal (120 hertz), también hay una fuerza de 120 hertz en la dirección circunferencial causada por la interacción del campo magnético del rotor interactuando con la corriente de la bobina del estator; la cual solamente es de 10% de la fuerza radial. El aislamiento groundwall también debe ayudar a prevenir que los conductores de cobre vibren en respuesta a las fuerzas magnéticas; si este estuviera lleno de vacíos de aire, los conductores de cobre podrían vibrar libremente. Una masa incomprensible de aislante debe haber entre el cobre y la superficie de la bobina, entonces los conductores no podrán vibrar.

- Capa semiconductiva de ranura

Debido a que las bobinas son fabricadas fuera del núcleo del estator, estas deben ser un poco más pequeñas de ancho que el ancho de las ranuras del núcleo, de otra forma, las bobinas no podrían ser insertadas dentro de la ranura. Debido a esto, es inevitable que quede un espacio de aire entre la bobina y el núcleo. Como se verá de manera profunda en la sección 2.1.4.1, un porcentaje significativo del voltaje del cobre aparecerá a través del espacio de aire en la ranura, en generadores enfriados por aire, si el esfuerzo eléctrico en este espacio excede los 3 kilovatios/milímetro, una descarga parcial ocurrirá, esta descarga parcial puede erosionar el aislamiento groundwall de la bobina y luego causar falla. Este tipo de descargas son llamadas descargas de ranura.

Principalmente los estatores que trabajan a más de 6 kilovatios pueden experimentar este fenómeno. Aparte de erosionar el aislamiento estas descargas pueden generar ozono el cual combinado con nitrógeno puede crear ácidos que pueden ser peligrosos para las personas o para el mismo generador.

Para prevenir estas descargas parciales, los fabricantes agregan una capa parcialmente conductiva al exterior de las bobinas en forma de pintura o de cinta en el área que estará insertada en las ranuras, esta capa es conocida como capa semiconductiva (la cual no tiene ninguna relación con los semiconductores usados en electrónica) y la cual debería estar en contacto con el núcleo aterrizado del estator en muchos puntos a lo largo de la longitud de la ranura.

Con una resistencia suficientemente baja, esta capa está a potencial de tierra debido a su contacto con el núcleo, de esa forma, el voltaje a través del espacio de aire entre las bobinas y el núcleo es cero, no podrán ocurrir descargas parciales ya que el esfuerzo eléctrico nunca excederá los 3 kilovoltios/milímetros. “En contraparte, la cara de la capa semiconductiva que está en contacto con el núcleo tiene una resistencia muy alta ya que de lo contrario pondría en cortocircuito las láminas de este”.²¹

- **Proceso de impregnación**

Los devanados de los estatores de los generadores son impregnados con resinas orgánicas para darle tenacidad al aislamiento de las bobinas y para que estas queden ajustadas en su ranura sin la posibilidad de moverse.

²¹ STONE, Greg. C. Electrical Insulation for Rotating Machines, p. 24 -25.

Muchos constructores de generadores van impregnando las bobinas mientras las van incrustando en las ranuras del estator, pero otros constructores introducen todas las bobinas en las ranuras, llevan a cabo las conexiones de las bobinas y cuando ya todo está concluido, le hacen un proceso de impregnación al núcleo del estator con las bobinas insertadas llamado Impregnación Vacío-Presión Global (global VPI).

“Este proceso se lleva a cabo poniendo los estatores dentro de autoclaves de gran tamaño en donde inicialmente se le hace un secado al vacío y se aplica calor, en este proceso también se elimina cualquier traza de aire (para evitar burbujas), posteriormente se inunda el autoclave en resina de baja viscosidad sin solvente, se aplica presión por medio de un gas no reactivo para garantizar que esta ingrese en toda ranura y espacio del estator, después se retira el gas, se bombea la resina excedente de regreso a tanques hasta que el estator se escurre, se aplica calor en el autoclave para cocer la resina impregnada y de este modo el estator se cura. Este último tipo de impregnación es el que aplica en este documento por los generadores involucrados en el proyecto”.²²

²² STONE, Greg. C. Electrical Insulation for Rotating Machines, p. 91.

2.1.1.2. Control de generadores de potencia

El control operacional de generadores síncronos interconectados en un sistema de potencia debe entenderse en términos del comportamiento interactivo entre los generadores y la condición de que la carga no es constante. En esta sección se explicará estos comportamientos empezando por el de generadores trabajando aisladamente para posteriormente analizar el comportamiento de generadores dentro un sistema de potencia.

- Potencia activa: generador aislado

La velocidad del rotor de un generador ha de ser entendido como el equilibrio entre dos fuerzas en oposición: El torque ejecutado por el primotor el cual tiende a elevar la velocidad y el torque en la dirección contraria, ejecutado por el campo magnético dentro del generador, el cual tiende a reducir la velocidad. La reducción de velocidad es directamente relacionada a la potencia eléctrica que está siendo suministrada por el generador a la red. Este es debido a que el campo magnético que provee el efecto de freno (la reacción de armadura) es directamente proporcional a la corriente en los devanados de la armadura, mientras que la corriente también determina la cantidad de potencia transmitida.

Si algún usuario conectado al generador activa repentinamente una carga, la corriente en el estator aumentará un poco, aumentando la reacción de armadura y por lo tanto frenará un poco al generador, en orden de mantener una frecuencia rotacional constante del generador, el primotor debe ahora suplir un poco de torque adicional para ajustarse e igualarse al valor de velocidad estipulado.

Por el contrario, si otro usuario desconecta una carga, la corriente en el estator y su campo magnético se reducen y la velocidad del generador aumentará; para mantener el equilibrio, el primotor debe ahora empujar menos fuerte de modo que el torque del primotor y el contra torque del generador se igualen y la frecuencia rotacional se estabilice.

El torque suministrado por el primotor es ajustado por medio de un gobernador, el cual puede ser una válvula para controlar el flujo de vapor o de agua hacia una turbina o puede ser un posicionador de un fuel rack para controlar el flujo de combustible hacia un motor de combustión interna, etcétera. Este gobernador puede ser operado manualmente o, como es práctica general, por medio de un sistema automatizado de control. En cualquier situación, donde un generador debe responder a las fluctuaciones de carga, ya sea con un generador trabajando aisladamente o si trabaja en una red y es designado como seguidor de carga o regulador de frecuencia, un control automático es usado.

El sistema automático del gobernador incluye algún dispositivo que continuamente monitorea la velocidad, cualquier variación respecto al valor deseado es traducida en una señal hacia el gobernador para que este regule un porcentaje apropiado. Alternativamente, un generador o planta puede operar conectado a una red con un nivel fijo de potencia el cual típicamente corresponde a su máxima potencia, en este caso, se dice que opera como base o en su límite de carga.

- Potencia reactiva-voltaje: generador aislado

La otra dimensión de control de generadores es la que tiene que ver con el voltaje y la potencia reactiva, las cuales son controladas por la corriente de campo proveída al devanado del rotor por el excitador. Este efecto es menos obvio que la relación entre la rotación y la potencia real y para entender esto bien se explicarán los campos magnéticos dentro del generador.

Para empezar, se puede apreciar fácilmente que incrementando la corriente directa en el rotor resultará en un incremento correspondiente en el campo magnético del rotor, el cual a su vez incrementa la fuerza electromotriz (fem) en los devanados del estator. El punto importante de entender aquí es que la fem del generador primero se manifiesta como voltaje o diferencia de potencial entre las terminales del generador y que esta fem es lo que causa que corrientes fluyan a través de los devanados y de la carga. Pero la magnitud de esta corriente es determinada por la impedancia de la carga. Por eso, es mejor ver a la corriente de la armadura como reflejo de lo que ocurre en la carga, no en el generador por sí mismo.

El voltaje en las terminales, por el otro lado, es determinado por el generador y es casi completamente independiente de la carga; aunque una carga muy grande puede causar una reducción en el voltaje si esta excede la capacidad del generador para sostener el voltaje deseado.

De esta manera, el voltaje de terminal es primariamente una función de la fem en la armadura, controlada por la corriente directa del campo del rotor: incrementando la corriente de campo se incrementará el voltaje del generador y reduciendo la corriente de campo se reducirá el voltaje del generador.

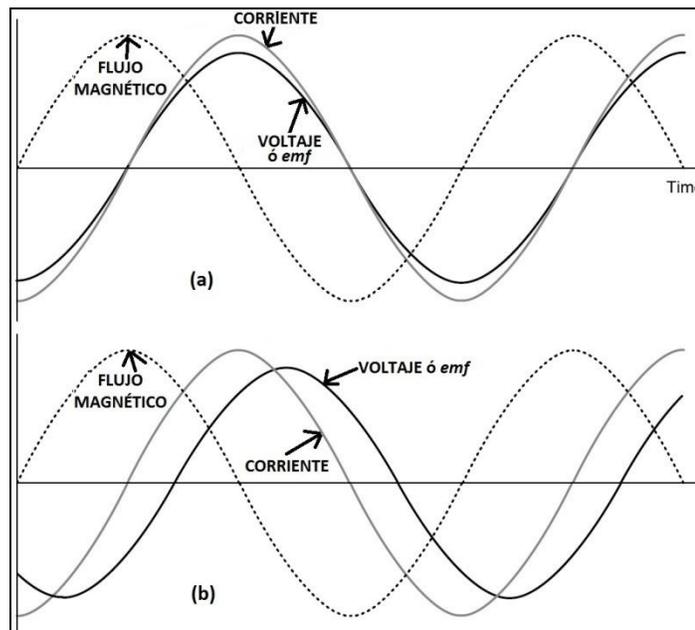
- Potencia reactiva

Para entender el concepto de potencia reactiva es necesario analizar en más detalle la geometría del campo magnético y el tiempo relativo o diferencia de fase de los voltajes y corrientes alternos. Se representará este fenómeno para todo el estator tomando en análisis una sola fase e incluso un devanado de una fase en la armadura. En las gráficas de la figura 12, el eje horizontal indica tiempo marcado en términos del ángulo del rotor; para representar otros devanados, sólo sería necesario cambiar la marca de cero en el eje del tiempo. El eje vertical indica voltaje, corriente o flujo, aquí las escalas son arbitrarias ya que son de diferentes unidades. La curva punteada muestra al flujo magnético (el campo del rotor) como es visto por el devanado de la armadura.

Este flujo varía sinusoidalmente, con su máximo ocurriendo en el momento que el campo del rotor está apuntando en una dirección perpendicular al plano del devanado. La segunda curva, la más oscura, muestra la (negativa) relación de cambio de este flujo, el cual puede también ser leído como la fem o el voltaje en el devanado de armadura.

La tercera curva muestra la corriente en el devanado de armadura, la cual también puede ser leída como la magnitud del campo magnético (estator) debido a este único devanado. La corriente de armadura, incluyendo su relación temporal con el voltaje, es determinada por la carga conectada al generador.

Figura 12. **Condición de factor de potencia unitario y condición factor de potencia en atraso**



Fuente: VON MEIER, Alexandra. Electric Power Systems (a conceptual introduction). p. 103.

En la figura 12, la carga es puramente resistiva o el factor de potencia es unitario. Consecuentemente, el tiempo de la corriente y el voltaje coinciden. La gráfica inferior muestra una condición de operación más típica con un factor de potencia en atraso, donde la carga incluye algunas reactancias inductivas (tales como motores).

El atraso en el factor de potencia significa que la corriente está atrasada con respecto al voltaje. Por consiguiente, la tercera curva está desplazada de la segunda curva, así que su máximo ocurre una fracción de ciclo después.

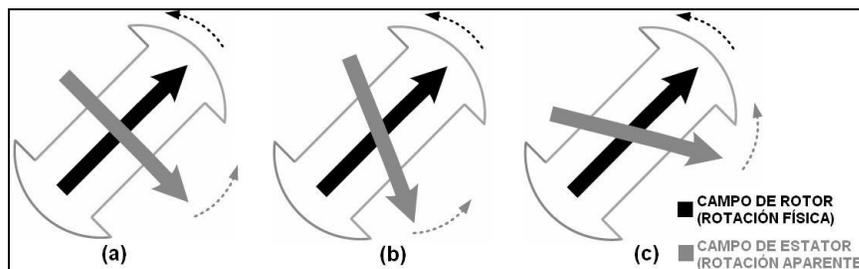
En esta situación, el generador se dice que suministra VARs o potencia reactiva a la carga. La situación opuesta, la cual es menos frecuente en la práctica, sería la de un factor de potencia en adelanto, en donde el generador está recibiendo VARs, en ese caso la carga tendría más reactancia capacitiva que inductiva y como resultado, el máximo de la corriente ocurre una fracción de ciclo antes que el del voltaje. Ahora se graficará el mismo fenómeno en una forma diferente, en la que se toma en cuenta toda la armadura y se toma ventaja del sincronismo o el hecho de que eventos en la armadura permanecen en paso con la rotación del rotor.

Mejor que graficar el voltaje y la corriente en el tiempo, es observarlo en un punto particular (un devanado), se graficará la posición de los campos magnéticos del rotor y del estator en el espacio, como si fueran observados un instante en el tiempo. Desde el punto de vista de algún devanado dado, el máximo efecto del campo magnético del rotor ocurre a un intervalo de tiempo específico después que el campo del rotor ha pasado, debido a que es cuando su razón de cambio máxima es observada.

A un factor de potencia unitario, este intervalo de tiempo corresponde a 90 grados o un cuarto de ciclo. Con un factor de potencia en atraso, el intervalo de tiempo será un poco mayor a 90°, ya que la corriente de armadura experimenta un retraso adicional debido a la carga reactiva.

Con un factor de potencia en adelanto, este será un poco menor a 90 grados, ya que la corriente de armadura se acelera con respecto a la fem inducida por la carga capacitiva. Sin embargo, no importa que ángulo haya entre los campos del rotor y del estator, este ángulo permanece fijo cuando ambos campos rotan en sincronismo. Así, se puede caracterizar adecuadamente la situación utilizando dos flechas representando los dos campos en cualquier momento arbitrario durante la rotación. Esta representación se ve en la figura 13.

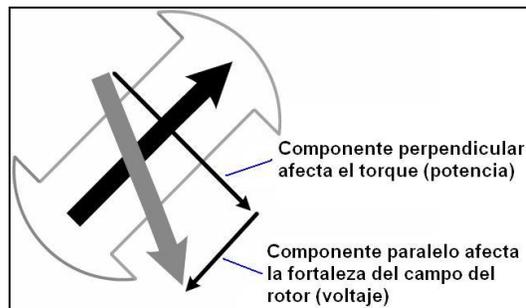
Figura 13. **Factor de potencia unitario, factor de potencia en atraso y factor de potencia en adelanto**



Fuente: VON MEIER, Alexandra. Electric Power Systems (a conceptual introduction). p.105.

El significado del ángulo del campo del estator en relación al campo del rotor es que este afecta la cantidad de fuerza o torque físico ejecutado sobre el rotor. Esta fuerza es mayor entre más perpendiculares son entre ellos los campos; si estos apuntaran en la misma dirección, no habría ninguna fuerza entre ellos. Esto por lo tanto, tiene sentido, para propósitos analíticos, el descomponer el campo del estator en dos componentes, lo cual es tratar el campo del estator como la suma de dos fenómenos separados que tienen efectos físicos distintos: una componente que es perpendicular al campo del rotor y otra que es paralela, esta descomposición se representa en la figura 14 para el caso de factor de potencia en atraso.

Figura 14. **Descomposición del campo del estator**



Fuente: VON MEIER, Alexandra. Electric Power Systems (a conceptual introduction). p.106.

La componente perpendicular representa la proporción a la cual el campo del rotor está actuando físicamente para ejecutar fuerza sobre el campo del estator, de ese modo permitiendo la conversión en potencia mecánica (contra torque).

La componente paralela, en la otra mano, es la que actúa en conjunto con el campo del rotor, de esa manera, esta representa una suma (algebraica) al campo del estator. En el caso de factor de potencia en atraso, esta componente se resta.

De esta manera, cuando el factor de potencia se atrasa y el generador está suministrando potencia reactiva, el campo del estator actúa en parte para minimizar o debilitar el campo del rotor. Para un factor de potencia en adelanto, el campo del estator actúa en parte para incrementar el campo del rotor. Como se vio anteriormente, la magnitud del campo del rotor determina la fem inducida en la armadura y, por tanto, el voltaje de barra. Esto establece la conexión entre la potencia reactiva y el voltaje.

- Voltaje

Suponiendo un único generador alimentando una carga resistiva y repentinamente algo puramente reactivo, carga inductiva (un inductor ideal) es conectado, no hay cambio en el requerimiento de potencia real (watt), sólo un incremento en la potencia reactiva (VAR), a la corriente de armadura (determinada por la carga) ahora se le ha agregado una componente que se queda atrás 90° respecto a su voltaje y corriente previa. Esta adición implica un leve incremento en conjunto de la magnitud de la corriente de armadura, así como, en conjunto un desplazamiento de fase de esta en la dirección de atraso.

Consecuentemente, el campo del estator toma una nueva posición con respecto al campo del rotor, ahora quedándose atrás de este en un ángulo un poco mayor que 90 grados. Ya que el campo del estator crece ligeramente en magnitud (debido al incremento de corriente), su componente perpendicular (relacionada a la potencia real) no cambia, pero ahora también tiene una componente paralela y opuesta al campo del rotor, reduciéndolo. Esta reducción del campo del rotor ahora produce una baja en el voltaje del generador.

Un proceso análogo ocurre si la carga adicionada repentinamente es capacitiva. Si, antes de la adición, la carga era puramente resistiva, entonces la cadena de eventos es como se indica a continuación: a la corriente de armadura se ha sumado una corriente 90 grados adelantada a su voltaje y a su corriente inicial, la cual constituye en conjunto un incremento en la magnitud y un desplazamiento en la dirección de adelanto; el campo del estator ahora está adelantado menos de 90° del campo del rotor y de esta manera actúa fortaleciendo el campo del rotor, el voltaje del generador se eleva; el factor de potencia ahora es negativo (en adelanto) y se dice que el generador consume potencia reactiva (proporcionada por la carga).

- Control de voltaje

Sin ninguna acción adicional, un cambio en el voltaje resultará en un cambio de la potencia real suministrada a la carga. Por ejemplo, si se adiciona carga inductiva, el voltaje del generador se reducirá y con esto la potencia real también va a reducirse, es aquí, en donde la acción de operación se presenta.

En respuesta a esta baja de voltaje, el operador o un sistema de control automático incrementará la corriente de campo del rotor (corriente de excitador) para compensar esta disminución por el campo del estator y regresa el voltaje a su valor original. Por el contrario, si el voltaje del generador se incrementa debido a la reducción de la carga reactiva, la corriente de campo es apropiadamente reducida por la operación del control.

La mayoría de unidades de generación están operando con mecanismos automáticos de control de voltaje que mantienen el voltaje del generador constante a un valor de ajuste particular y continuamente varía la corriente de campo, como la carga lo requiera.

Cuando se desea hacer un cambio deliberado en la corriente de campo (por ejemplo, para ajustar la contribución de potencia reactiva de varios generadores), el operador típicamente interviene por medio del cambio del valor de ajuste del voltaje y permitiendo que el mecanismo automático haga el correspondiente ajuste de la corriente de campo.

Es importante reconocer que en cualquier caso, la potencia reactiva y el voltaje del generador no pueden ser controlados independientemente.

Asignando un voltaje particular que se requiere que el generador proporcione, los VARs producidos por el generador (y por lo tanto, el factor de potencia del generador) son dictados por la carga. Como una primera aproximación, la corriente de campo del rotor no consume energía y por eso cambiándola no tiene relación directa en la cantidad de potencia real generada.

- Potencia activa: generadores interconectados

Todos los generadores síncronos en una red no solamente rotan exactamente a la misma frecuencia, sino que también llevan el paso unos con otros, esto significa que el tiempo en el voltaje alterno producido por cada uno coinciden muy de cerca. Esta es una necesidad física si todos los generadores están simultáneamente proporcionando potencia a la red. Como se demostrará, si algún generador acelera para adelantarse a los otros, este generador inmediatamente es forzado a producir potencia adicional mientras desahoga de carga a los otros. Esta contribución adicional de potencia resulta en una mayor reacción de armadura y un mayor torque contrario en el primotor, el cual tiende a bajar la velocidad del generador hasta que el equilibrio es alcanzado.

Contrariamente, si un generador intenta bajar la velocidad para atrasarse respecto a los otros, este cambio resultará físicamente en una reducción de la carga de este generador mientras que se incrementa la de los demás, reduciendo el torque de su primotor y permitiendo que la velocidad suba hasta que el equilibrio es reestablecido. Equilibrio aquí significa que la frecuencia rotacional de un generador es constante en el tiempo, en contraste a un período transitorio durante el cual el generador gana o pierde velocidad.

Mientras que todos los generadores se establecen en dicho equilibrio a la frecuencia del sistema o red, usualmente en segundos después de un disturbio, este equilibrio puede fijarse ligeramente adelantado o atrasado en términos de fase o en el instante exacto al cual el máximo voltaje ocurre.

Esta variación del sincronismo preciso entre los voltajes los cuales son proporcionados por diferentes generadores (o medidos en diferentes lugares en la red) es referida como el ángulo de potencia o ángulo de voltaje, a menudo denotado con el símbolo δ (delta minúscula). El ángulo de potencia de cada generador está directamente relacionado a su porción de potencia real que proporciona: entre más adelantado esté su ángulo de potencia (expresado como un ángulo mayor positivo), mayor es la potencia producida por el generador comparado a los otros.

Los ángulos de potencia pueden variar solamente durante una pequeña fracción de ciclo o de otra manera se perderá el sincronismo entre ellos. Este problema es referido como estabilidad.

Para generadores interconectados, la pérdida de sincronismo significa que las fuerzas resultantes de su interacción eléctrica ya no actuarán de nuevo para regresarlos a un equilibrio estable, haciendo su operación coordinada imposible.

En términos de administración de sistemas de potencia, tal condición claramente significa desastre; es por eso que afortunadamente, para la mayoría de sistemas bajo circunstancias normales, el sincronismo es una consecuencia natural de la inherente física de los generadores.

Ahora se examinará porque un incremento en el ángulo de fase del generador corresponde a un incremento en la potencia real entregada al sistema por este y que fuerzas hay que tienden a mantener a los generadores en sincronismo. Para simplificar, se considerará la interacción de dos generadores cercanos, no un sistema completo. Esta aproximación es especialmente buena para dos generadores en una misma planta.

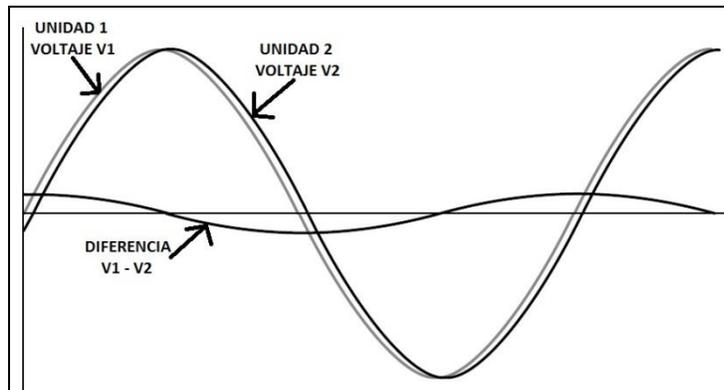
Está justificado físicamente en que la impedancia entre dos generadores muy cercanos es pequeña comparado a la impedancia del resto del sistema y de la carga (la trayectoria entre ellos sería la trayectoria preferida para cualquier corriente), esto significa que estas unidades van a interactuar más fuertemente entre ellas que con el resto del sistema, este será un caso hipotético de dos generadores, el 1 y el 2 de la planta A, se observará su interacción cuando el nivel de la generación de potencia en la unidad 1 es incrementada.

Se inicia con el incremento de apertura del gobernador del primotor de la unidad 1. El torque adicional hacia delante en el primotor causa que la velocidad aumente, esta aceleración del rotor causa que este se mueva ligeramente adelantado comparado con el rotor de la unidad 2, esto significa que el valor pico de la fuerza electromotriz o voltaje producido en cada fase de los devanados de armadura en la unidad 1 ocurre ligeramente adelante que los de la unidad 2; el ángulo del voltaje o de potencia δ está un poco incrementado.

Nótese que las dos unidades son todavía consideradas síncronas ya que permanecen en paso una con la otra y sus movimientos permanecen interdependientes; sólo marcha una pequeña fracción de un paso en frente de la otra. Ciertamente, los ángulos de potencia van a ser idénticos sólo si ambas unidades suministran la misma cantidad de potencia a la carga exactamente en medio. Este cambio en el tiempo del voltaje resulta en una diferencia entre el voltaje de la unidad 1 y el sistema, representado por la unidad 2, medido en cualquier instante. A la diferencia entre el ligeramente adelantado V_1 y el voltaje normal V_2 se le llamará diferencia de voltaje.

Si se graficara esta diferencia de voltaje en el tiempo, se obtendría una curva que estaría aproximadamente 90 grados fuera de fase con ambas, ver la figura 15.

Figura 15. Voltajes de unidades y su diferencia



Fuente: VON MEIER, Alexandra. Electric Power Systems (a conceptual introduction). p. 110.

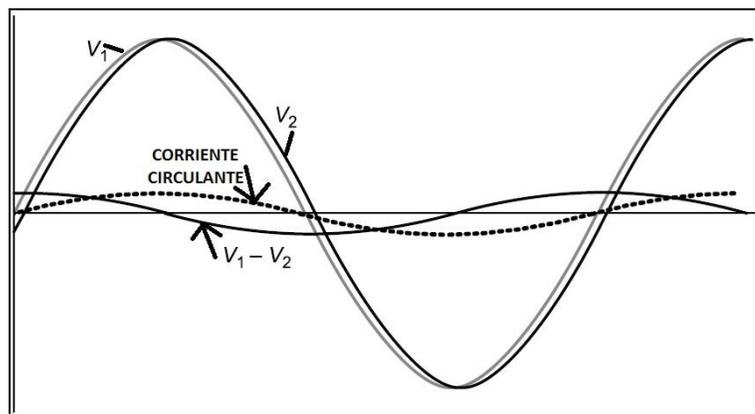
Desde la perspectiva de la unidad 1, esta diferencia de voltaje es positiva en los tiempos cuando V_1 (su propio voltaje) es mayor que V_2 y negativo cuando V_1 es menor a V_2 ; desde la perspectiva de V_2 sucede lo contrario, la diferencia de voltaje es positiva si V_2 es mayor a V_1 y es negativa cuando V_2 es menor a V_1 y la gráfica de esta diferencia de voltaje está asociada con la corriente que fluye entre los dos generadores. Esta corriente es llamada una corriente circulante debido a que esencialmente circula entre las dos unidades.

Existe también una corriente circulante entre la unidad 1 y los otros generadores en un sistema, pero esta es menor debido a la mayor impedancia entre ellos; esto es el por qué representando el sistema completo sólo por la unidad 2 es una aproximación razonable.

El tiempo de esta corriente circulante es crucial. Se debe reconocer dos cosas: primero, debido a que unidades 1 y 2 tienen perspectivas opuestas (estas miran un voltaje con diferente signo), la corriente circulante medida en los devanados de armadura de cada generador será opuesta. Se podría decir que la corriente está saliendo de un lado mientras que entra en el otro. Segundo, se reconoce que la impedancia del circuito que contiene dos generadores cercanos es esencialmente reactancia inductiva y muy poca resistencia, ya que los cables son gruesos y enrollados. Por eso, la corriente circulante estará retrasada casi 90 grados de la diferencia de voltajes que la induce a fluir.

El resultado, como se muestra en la figura 16, es una corriente circulante que está aproximadamente en fase con corriente regular inicial generada por la unidad 1, pero aproximadamente 180 grados fuera de fase (simplemente opuesta) con la misma corriente regular inicial generada por la unidad 2.

Figura 16. **Corriente circulante**



Fuente: VON MEIER, Alexandra. Electric Power Systems (a conceptual introduction). p.111.

De esta forma, la corriente circulante se suma a la corriente de armadura de la unidad 1, pero se resta a la de la unidad 2. Consecuentemente, se puede observar un incremento en la magnitud de la corriente de armadura de la unidad 1 y un decremento en la corriente de la unidad 2. Ya que la magnitud del voltaje de generador no ha sido cambiada en ningún caso y ya que la potencia es el producto del voltaje y la corriente, lo que significa que la salida de potencia real de la unidad 1 se incrementa, mientras que la salida de potencia de la unidad 2 se reduce.

En efecto, la unidad 1 se adelantó en fase lo que significa que el empujará más fuerte y literalmente tomará algo de carga fuera de la unidad 2. De hecho, la reducción de carga será compartida entre todos los generadores en un sistema, con el mayor cambio significativo en las unidades más cercanas. Es importante, entonces, reconocer que todos los generadores síncronos interconectados van a ser afectados en principio por un aumento o reducción de la potencia de salida de cualquier generador.

Suponiendo que, en el ejemplo anterior, la unidad 1 se adelanta respecto a los otros por el incremento en la potencia de su primotor, mientras ningún otro cambio sea hecho en el sistema, como se demostró, corrientes circulantes entre los generadores van a fluir para así tomar carga de otros generadores. En respuesta a la reducción de la resistencia mecánica, esos generadores tenderán a subir la velocidad, lo cual es razonable de asumir que sus sistemas de gobernador detectarán el incremento de velocidad y consecuentemente reducir la salida de potencia de sus primotores.

Sin embargo, si tales correcciones no son hechas, la frecuencia en el sistema completo crecerá como resultado de una generación total que excede a la carga total. Contrariamente, si el total de la potencia generada fuera menor que la carga, todos los generadores tenderán a reducir la velocidad.

- Sincronización

Cuando un generador síncrono está conectado a un sistema energizado que está operando a una frecuencia especificada, un proceso de sincronización es requerido, también llamado como paralelando el generador a la red.

En este proceso, primeramente se lleva al generador hasta la velocidad sincrónica mientras que todavía está eléctricamente desconectado, con instrumentación en los dos circuitos, la red y el generador, la frecuencia tanto como la fase relativa y el voltaje del generador son cuidadosamente comparados a los de la red, al igualar la frecuencia y el voltaje, pequeños ajustes son hechos en la velocidad del generador para hacer corresponder las fases precisamente, una vez la correspondencia es alcanzada, la conexión eléctrica es establecida por medio del cierre de un interruptor entre el generador y la barra de la red.

Finalmente, con el generador flotando a carga cero, el gobernador hace que la potencia del primotor se incremente, hasta que el generador esté entregando su potencia de salida especificada.

- Potencia reactiva: generadores interconectados

En un sistema de potencia, el suministro instantáneo es igual a la demanda instantánea, consecuencia de la conservación de la energía; este principio se refuerza el mismo: si se quiere introducir más potencia al sistema, cambiará de primero la frecuencia y de último el voltaje, de modo que la conservación se mantenga verdadera. La energía asociada con la potencia reactiva es conservada similarmente. Aunque la potencia reactiva no envuelve transferencia neta de energía en el tiempo, el flujo instantáneo aún debe ser determinado.

Aunque la nomenclatura generando y consumiendo la potencia reactiva es una convención arbitraria, permanece cierto que la cantidad de potencia reactiva generada en cualquier instante debe ser igual a la consumida; de igual forma que la potencia real. La conservación de potencia reactiva se refuerza, asimismo, en este caso primariamente a través de cambios en el voltaje.

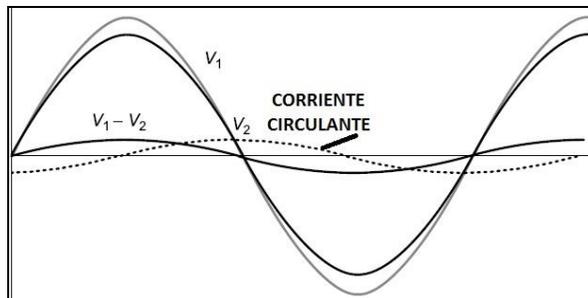
Justo como la asignación de la generación de potencia real entre generadores interconectados puede ser variada por medio de un cambio en el ángulo de potencia o el tiempo relativo del voltaje, así puede la asignación de potencia reactiva. Aquí, el significado de control es la magnitud del voltaje suministrado en relación con otros generadores, lo cual es controlado por la corriente del rotor.

Si todos los generadores en un sistema estuvieran generando el mismo voltaje en su barra, sus factores de potencia serían los mismos y de esta forma sus potencias reactivas podrían estar en la misma proporción de la potencia real que generan.

Para entender la interdependencia de los niveles de voltaje de un generador y la contribución de potencia reactiva, se considerarán de nuevo dos generadores cercanos, unidades 1 y 2. Suponiendo que se quiere incrementar la contribución de la unidad 1 a las necesidades de potencia reactiva del sistema, mientras se reduce la de la unidad 2. Este cambio es efectuado por el incremento de la corriente de rotor de la unidad 1, el cual en la práctica sería realizado por el incremento del ajuste de voltaje. La situación se ilustra por medio de la figura 17 con V_1 ligeramente mayor que V_2 .

De nuevo, se gráfica la diferencia de voltajes, pero ahora esta diferencia está perfectamente en fase con el voltaje generado y el cambio observado como un simple incremento de la magnitud de ese voltaje, también se da un incremento de corriente en la armadura de la unidad 1.

Figura 17. **Corriente circulante con la unidad 1 con mayor voltaje**



Fuente: VON MEIER, Alexandra. Electric Power Systems (a conceptual introduction). p.113.

Para una primera aproximación, esta corriente circula en el circuito local compuesto por el bus que interconecta las terminales de las dos unidades. Como antes, la impedancia de este circuito es casi sólo inductiva y por eso la corriente está 90 grados atrasada.

De esta manera no tiene efecto en la potencia generada por las unidades. Además, ya que la unidad 2 está en perspectiva opuesta, la corriente circulante en su armadura es negativa en el mismo instante que es positiva en la unidad 1. En la unidad 1 la corriente circulante está atrasada y de esta manera coincide con la componente en atraso de la corriente de armadura que está asociada con la potencia reactiva suministrada a la carga. En la unidad 2, la misma corriente es observada como corriente en adelanto.

Ahora se recalca que el campo magnético asociado con una corriente en atraso o en adelanto actúa para debilitar o fortalecer el campo del rotor, respectivamente. De esta manera, la corriente circulante debilita el campo del rotor en la unidad 1 y fortalece el de la unidad 2.

Asumiendo que las unidades trabajaban a un factor de potencia un poco atrasado al inicio, la magnitud de la corriente de armadura en la unidad 2 es ahora menor, ya que esta fue liberada un poco de su componente en atraso por la corriente circulante en atraso. Como resultado la potencia reactiva de la unidad 1 se incrementa y la de la unidad 2 decrece. Ya en un sistema de potencia grande, con varios generadores muy separados y conectados por líneas de transmisión, la interacción entre estos resulta en una fuerza estabilizadora que tiende a equalizar los voltajes, análogamente a la fuerza que tiende a equalizar la frecuencia.

- Límites de operación

En casi todos los casos, la magnitud de la corriente de los devanados del estator puede ser usado como el criterio para el límite de operación, como se indicó, el aislamiento de estos debe trabajarse en ciertos márgenes para evitar que se dañe y causar fallas irreversibles; este criterio tiene que ver con el calentamiento de los componentes y el cual se convierte más prohibitivo cuando la unidad opera a factores de potencia muy diferente a la unidad.

Esta información comprensiva acerca de un generador en particular es capturada y proporcionada por el fabricante en un diagrama llamado curva de capacidad, figura 18, la cual indica la frontera de las combinaciones posibles de las potencias real y reactiva: todos los puntos dentro del área circunscrita por una curva son permitidos sin riesgo de daño y todos los puntos fuera del área son prohibitivos.

Figura 18. **Curva de capacidad**



Fuente: VON MEIER, Alexandra. Electric Power Systems (a conceptual introduction). p. 117.

2.1.1.3. Protección de generadores de potencia

“La protección puede brindarse por diferentes maneras ya sean para proteger la sobrecarga, la sobrecorrientes, por sobrevoltajes por mencionar algunos a continuación se estudian más a fondo.

- Protección de sobrecarga

Es bien raro que los generadores tengan problemas por sobrecargas, como la cantidad de potencia real que pueden entregar es una función del primotor, el cual está siendo continuamente monitoreado por sus gobernadores y regulador. Cuando se provee protección de sobrecarga, esta usualmente toma la forma de un sensor de temperatura empotrado en los devanados del estator. El devanado del rotor es chequeado por la medición de la resistencia de su devanado de campo.

- Protección de sobrecorriente

Es una práctica normal instalar relevadores con retraso de tiempo inverso mínimo definido para la protección por sobrecorriente, no para la protección térmica del generador sino como una característica de respaldo para dispararse sólo bajo condiciones de falla. En el caso de un generador trabajando en un sistema aislado, este relevador podría estar conectado a un único TC en el extremo neutral en orden de cubrir una falla de devanado. Con varios generadores en paralelo, existe una dificultad en alcanzar un adecuado ajuste, así que los relevadores deberán estar conectados a un TC por cada línea de cada generador.

- Protección de sobrevoltaje

El sobrevoltaje puede ocurrir como condición transitoria de alta velocidad o como condición sostenida a la frecuencia del sistema. Los originadores normalmente son cubiertos por supresores de transientes en puntos estratégicos en el sistema o alternativamente en las terminales del generador dependiendo del acople capacitivo relativo del generador/transformador, sus conexiones, etcétera.

Sobrevoltajes a la frecuencia nominal son el resultado de reguladores de voltaje defectuosos, errores en controles en manual y pérdida repentina de carga debido a apertura de circuitos. Por eso las protecciones de sobrevoltaje sólo se aplican a generadores trabajando en automático y desatendidos, el ajuste normal adoptado es bastante alto, casi como al 150% del voltaje nominal pero con disparo instantáneo.

- Protección de puesta a tierra de estator y fallas a tierra

El punto neutral del devanado de estator de un generador normalmente es conectado a tierra de modo que pueda ser protegido y la impedancia es generalmente usada para limitar la corriente de falla. La falla de aislamiento del estator puede guiar una falla a tierra en el sistema. Arqueo severo hacia el núcleo puede fundir el hierro de este al punto de fallar y soldar varias láminas del núcleo. En el peor de los casos, puede ser necesario reconstruir el núcleo.

En la práctica, el grado de limitación de la corriente de falla a tierra varía desde la corriente nominal a valores tan bajos como 5 amperios.

Los generadores conectados directamente a una red de distribución sus puntos neutros son conectados a tierra a través de un resistor. Sin embargo, cuando es grande la unidad generador-transformador, la conexión a tierra se hace a través del devanado primario de un transformador de potencia, el devanado secundario es cargado con un resistor de bajo valor de ohmios, su resistencia reflejada es bastante alta (proporcional al cuadrado de la relación de vueltas) y este previene sobrevoltajes transitorios que pueden ser producidos como resultado de un arqueo por falla a tierra.

Cuando está conectado directamente a través de una impedancia, relevadores de sobrecorriente de tipo instantáneo y con retraso son usados. Un ajuste de 10% de la máxima corriente de falla a tierra es considerado como un ajuste seguro, lo cual normalmente es suficiente para evitar falsos disparos debido a las corrientes de oleada (surge) transmitidas a través de la capacitancia del sistema. El retraso de tiempo ajustado en el relevador es de 5%.

- Protección de desbalance de carga

Una carga trifásica balanceada produce una reacción de campo, la cual es aproximadamente constante, que rota sincronizadamente con el sistema de campo del rotor. Cualquier condición de desbalance puede ser desglosada en componentes de secuencia cero, positiva y negativa. Las componentes positivas se comportan como la carga balanceada. Las componentes cero no producen reacción de armadura.

Sin embargo, las componentes negativas crean una reacción de campo, las cuales rotan en contra del campo de corriente directa y por lo tanto producen un flujo, el cual cruza el rotor al doble de la velocidad rotacional. Esta induce corrientes de frecuencia doble en sistema de campo y en el cuerpo del rotor.

Las corrientes de Eddy resultantes son muy grandes, tan severas que ocurre un calentamiento excesivo, calentando rápidamente el rotor al punto de que el metal puede suavizarse y es susceptible a ser extruido bajo fuerzas centrífugas hasta salir de la superficie del rotor, con peligro de golpear el núcleo del estator. Por tanto, es muy importante que se instale protección de secuencia de fase negativa.

- Protección de potencia inversa

La protección de potencia inversa es aplicable cuando hay generadores trabajando en paralelo y para proteger en caso de que el primotor falle, ya que si esto ocurriera, el generador se convertiría en motor tomando potencia del sistema y podría agravar la falla mecánica del primotor.

- Protección por pérdida de excitación

Si el campo del rotor fallará por cualquier razón, el generador trabajaría entonces como un generador de inducción, continuaría generando potencia determinada por la carga ajustada en el gobernador del primotor. Este estaría operando a una frecuencia de deslizamiento y aunque no hay peligro inmediato al conjunto, ocurrirá calentamiento, como el generador síncrono no está diseñado para trabajar continuamente en tales condiciones. Se debe utilizar un relevador tipo mho para detectar esta condición en el campo del rotor.

- Protección por pérdida de sincronización

Un generador puede perder sincronización con el sistema de potencia debido a un severo disturbio de falla del sistema o por estar operando a alta carga con un factor de potencia en adelanto. Esta situación causa que el rotor oscile, con variaciones consecuentes de corriente, voltaje y factor de potencia. Si el desplazamiento angular del rotor excede los límites establecidos, el rotor va a deslizarse un ángulo equivalente a un polo. Si el disturbio ha pasado, para el momento en que el deslizamiento de polo ocurre, entonces el sistema puede recuperar el sincronismo, de lo contrario debe ser aislada del sistema.

“Alternativamente, disparar el interruptor de campo para que la máquina funcione como generador asíncrono, reduce el campo de excitación y carga, entonces vuelve a cerrar el interruptor de campo para resincronizar suavemente.”²³

²³ ELMORE, Walter A. Protective Relaying Theory and Applications. p. 117-120.

2.1.1.4. Pruebas a generadores de potencia

Para medir la potencia en los generadores existen muchas pruebas por ello es importante y fundamental estudiar cada una de ellas, para ir conociendo a fondo el funcionamiento de los generadores.

- Pruebas para la determinación de parámetros de los generadores de potencia

La operación en estado estable de los generadores síncronos trifásicos es usualmente bajo condiciones de carga balanceada. Esto es, las corrientes de fase son iguales en amplitud pero desfasadas 120 grados entre ellas. Sin embargo, hay situaciones cuando un generador síncrono debe operar bajo condiciones de estado estable desbalanceadas. La operación desbalanceada puede ser descrita a través del método de componentes simétricas. Las reactancias de estado estable X_d , X_q o X_l , corresponden a las componentes simétricas positivas: X_2 para la componente negativa y X_0 para la componente cero.

Juntas, con los parámetros de secuencia directa para transientes, X_2 y X_0 participan en las expresiones de corriente de generador bajo transientes desbalanceados.

“En esencia, las pruebas a continuación indicadas son diseñadas para generadores síncronos trifásicos pero con algunas adaptaciones pueden ser usados para generadores monofásicos. Los parámetros a ser medidos para el modelado de estado estable de un generador síncrono son los siguientes:

- X_{du} es la reactancia de eje directo no saturado
- X_{ds} es la reactancia de eje directo saturado dependiente del voltaje, potencia MVA y factor de potencia.
- X_{adu} es la reactancia de eje directo mutuo (estator a excitación) no saturado, ya reducido al estator ($X_{du} = X_{adu} + X_l$).
- X_l es la reactancia de fuga del estator.
- X_{ads} es la reactancia de magnetización de eje directo saturado ($X_{ds} = X_{ads} + X_l$).
- X_{qu} es la reactancia de eje de cuadratura no saturado.
- X_{qs} es la reactancia de eje de cuadratura saturado.
- X_{aqs} es la reactancia de magnetización de eje de cuadratura no saturado.
- X_2 es la resistencia de secuencia negativa.
- X_0 es la reactancia de secuencia cero.
- R_0 es la resistencia de secuencia cero.
- SCR es la relación de corto circuito ($1/X_{du}$).²⁴

²⁴ BOLDEA, Ion. Synchronous Generators. p. 8.25.

- Pruebas de rendimiento

“A los generadores se les desarrollan pruebas para establecer conformidad con el rendimiento proyectado y los parámetros dinámicos de rendimiento. A continuación, se explican estas pruebas, las cuales están contenidas en la recomendación IEEE 115”.²⁵

- Resistencia

La resistencia de los devanados de estator y de rotor es típicamente muy baja, por lo que hay que hacer mediciones usando la técnica de 4 hilos. Es importante que la resistencia sea medida a una temperatura conocida para que puedan ser hechas correcciones a las temperaturas de operación.

- Curva de saturación de circuito-abierto

El generador debe ser accionado por un motor eléctrico a la velocidad nominal y se varía la excitación para producir voltaje en las terminales sobre un rango, típicamente desde 30% a 120% de lo nominal. Se requiere de cuidado en esto, particularmente en máquinas muy grandes en las cuales el flujo excesivo puede dañar al núcleo.

²⁵ FINK, Donald G. Standard Handbook of Electrical Engineering. p. 7-9.

- Pérdidas a circuito abierto

Las pérdidas en el hierro pueden ser establecidas por medio de esta prueba, la cual es similar a la prueba de la curva de saturación de circuito-abierto, con la diferencia de que el motor accionador debe estar bien caracterizado y la potencia consumida por este debe ser medida.

- Curva de saturación de cortocircuito

Esta prueba es similar a la de curva de saturación de circuito-abierto, con la diferencia de que las terminales del generador deben estar en cortocircuito y que la corriente de excitación debe ser variada para producir corriente en el estator sobre algún rango conveniente. La resistencia aerodinámica y las pérdidas por fricción se pueden deducir de la potencia de entrada a excitación cero. La pérdida de carga puede ser estimada como la diferencia entre la potencia de entrada a corriente de armadura nominal y la suma de la fricción y resistencia aerodinámica y las pérdidas I^2R .

- Curva de saturación con factor de potencia cero

Para un generador relativamente pequeño, la curva de saturación con factor de potencia cero puede ser determinada operando el generador con su eje sin carga, accionado por un segundo generador. Ajustando la excitación en el generador bajo prueba y la excitación en el segundo generador, es posible medir la curva de saturación con factor de potencia cero.

Con generadores grandes para los cuales este método de adosado mutuo no es práctico, la curva de factor de potencia cero es determinada usualmente por métodos numéricos. A menudo esos métodos emplean elementos finitos.

- Desaceleración

La desaceleración puede ser usada para determinar pérdidas si la inercia de la máquina es conocida. Ya que, si el eje de la máquina está sin carga, la potencia disipada es la desaceleración desde la velocidad síncrona, esto puede dar una buena medida de la disipación. La prueba puede ser hecha con la máquina operando ya sea en condiciones de circuito abierto, en cortocircuito o a excitación cero. Es bastante usual hacerlo desde una pequeña sobrevelocidad. Esta prueba puede ser usada para determinar una inercia desconocida ya con pérdidas conocidas y desaceleración observada.

- Calor de operación

Estas son pruebas desarrolladas por la operación de un generador a alguna condición hasta que la temperatura estabiliza. Los datos de esta prueba a circuito-abierto, cortocircuito y factor de potencia cero pueden ser combinados para estimar el ascenso de calor en operación normal. En máquinas grandes, buenas estimaciones de disipación pueden ser hechas midiendo el ascenso de temperatura de refrigerante (aire, nitrógeno, agua, etcétera). Esta es una alternativa o suplemento a la medición de potencia de entrada o la desaceleración de la máquina.

- Pruebas de diagnóstico de estado (de mantenimiento)

“Hay una gran cantidad de pruebas que se le pueden hacer a los generadores de potencia, muchos de los cuales se indican a continuación con una breve descripción de cada una”.²⁶

- Potencial-alto CA (AC High-pot)

Prueba de sobrevoltaje aplicado de las terminales del generador a tierra, sirve para probar el aislamiento groundwall del estator, en esta prueba el aislante cumple o no cumple, pero si no cumple, el aislamiento se perfora y se daña en la prueba; no es efectivo para llevar tendencias o estadísticas. Es una prueba que se hace fuera de línea. Se hace como prueba en fábrica y cuando sea necesario. (IEEE 112).

- Aislamiento de cojinetes

Se mide la resistencia entre el eje y la tierra, en esta prueba hay o no hay aislamiento. Es una prueba que se hace fuera de línea y se recomienda hacer cada año. (IEEE 43).

²⁶ STONE, Greg C. Electrical Insulation for Rotating Machines. p. 7-9.

- Temperatura de cojinetes

Medición del metal del cojinete, de la carcasa o del aceite del cojinete. Aplica para todos los cojinetes lubricados por aceite o por grasa, es muy buena prueba para hacer tendencias. Es una prueba que se puede hacer en línea y continuamente.

- Capacitancia

Prueba de corriente alterna para medir la capacitancia de aislamiento de fase a neutro, muy útil cuando se manufacturan bobinas individuales en generadores de mediano voltaje; puede ser útil para hacer tendencias en generadores. Es una prueba que se hace fuera de línea, se hace al momento de fabricación y se recomienda cada uno o dos años.

- Pérdidas en el núcleo

Prueba para detectar laminaciones en corto en el núcleo del estator, es una prueba en donde el núcleo cumple o no cumple; típicamente no es efectiva para hacer tendencias, no es común hacerla. Es una prueba que se hace fuera de línea, típicamente durante el proceso de rebobinado.

- Aislamiento de acople

Prueba que se hace para medir la resistencia de aislamiento entre el acople y el eje del generador, en esta prueba el acople cumple o no cumple. Es una prueba que se hace fuera de línea y se recomienda cada 1 o 1,5 años o en un mantenimiento mayor.

- Potencial-alto CD (DC high-pot)

Sobrevoltaje aplicado de fase a neutro para medir corrientes de fuga, los métodos de voltaje a paso o rampa son efectivos para hacer tendencias. Es una prueba que se hace fuera de línea y se recomienda cada 1 o 2 años. El máximo voltaje a aplicar es de acuerdo a estándares de la industria.

- Factor de disipación (factor de potencia)

Se aplica bajo o alto voltaje para medir las pérdidas en el aislamiento, es moderadamente efectivo para encontrar problemas térmicos o humedad en los devanados. Es una prueba que se hace fuera de línea y se recomienda cada 1 o 2 años.

- Factor de potencia tip-up

Sirve para determinar las diferencias en pérdidas en el aislamiento desde bajo a alto voltaje, es moderadamente efectivo para hacer tendencias. Es una prueba que se hace fuera de línea y se recomienda cada 1 o 2 años.

- Análisis de aceite o grasa

Análisis fisicoquímico del aceite o grasa de los cojinetes, es efectivo para detectar a tiempo desgastes anormales. Es una prueba que se hace en el laboratorio, la muestra se saca de los cojinetes cuando el generador está fuera de línea, salvo excepciones en donde haya válvulas de servicio, se recomienda cada 0,5 o 1 año.

- Ángulo de fase

Evaluación eléctrica de los devanados, usando mediciones de corriente alterna de bajo voltaje, puede ser efectiva para hacer tendencias si son correctas la temperatura del devanado y la posición del rotor. Es una prueba que se hace fuera de línea y se recomienda hacer cada 1 o 2 años.

- Resistencia de aislamiento

Mide la resistencia de aislamiento entre las terminales y tierra, excelente para detectar humedad o suciedad en el aislamiento e integridad dieléctrica; efectiva para llevar tendencias y estadísticas si se aplican correcciones por temperatura. Es una prueba que se hace fuera de línea y se recomienda hacer cada 1 o 2 años.

- Índice de polarización

Es el cociente de la prueba de resistencia de aislamiento de 10 minutos con la misma hecha en 1 minuto, se usa para detectar humedad o suciedad, también se puede detectar envejecimiento de aislamiento, es efectivo para llevar tendencias, debe usarse rango de escala adecuado. Es una prueba que se hace fuera de línea y se recomienda hacer cada 1 o 2 años.

- Termografía

Se utiliza para detectar puntos o áreas calientes usando cámara térmica. Durante el funcionamiento, se debe hacer por medio de ventanillas especiales que se deben instalar en la carcasa del generador, esta prueba es efectiva para hacer tendencias y encontrar problemas con la ventilación, daños en el núcleo o desalineamiento. Es una prueba que se debe hacer en línea, se recomienda hacer cada 2 o 3 años.

- Ultrasonido

Se usa para detectar ruido ultrasónico de la fricción de los cojinetes. También puede usarse para evaluar adherencia de babbitt en la concha del cojinete para los cojinetes de tipo película de aceite. Es excelente para llevar tendencias. Esta prueba se debe hacer en línea y se recomienda hacer cada año.

- Análisis de vibraciones

Se usa para detectar vibraciones en el eje o en las carcasas de los cojinetes; se hace de forma directa en la carcasa del cojinete y por proximidad en el eje, efectiva para llevar tendencias. Esta es una prueba que se debe hacer en línea y se recomienda cada 6 meses.

- Temperatura de devanados

Es una prueba que aplica para generadores que tienen sensores de temperatura tipo RTD o termopares instalados entre los devanados del estator, es efectiva para llevar tendencias, debe tomarse en cuenta la temperatura y la carga del generador. Es una prueba que se hace en línea y se recomienda hacerla continuamente durante la operación.

- Descargas parciales fuera de línea

Esta prueba detecta directamente pulsos de descargas parciales a voltajes nominales, es efectiva para llevar tendencias, detecta la mayoría de problemas en el aislamiento excepto vibraciones en los extremos de los devanados, se recomienda hacer cada 0,5, 1 o 2 años dependiendo de la edad del generador.

- Comparación de oleada (surge comparison)

Aplica oleadas de voltaje simuladas, sirve para encontrar daños en el aislamiento de bobinas del devanado. Es una prueba que se hace fuera de línea y se recomienda hacer cada 2 años o cuando se requiere.

- Oscurecimiento (blackout)

Se aplica alto voltaje de corriente alterna y se buscan descargas con las luces apagadas, con esta prueba se encuentran problemas de contaminación en los extremos del devanado. Es una prueba que se hace fuera de línea y se recomienda cada 2 años.

- Detección de ozono

Prueba especial para generadores enfriados por aire, el ozono es un producto de las descargas parciales cuando estas ocurren en la superficie del devanado. Esta prueba se debe hacer en línea y de preferencia que sea un monitoreo continuo.

- Detección de descargas parciales en línea

Este monitoreo detecta directamente pulsos de descargas parciales en los devanados durante operación normal, es muy similar a la prueba fuera de línea pero tiene la ventaja de que se hace a voltaje nominal, carga nominal, temperatura nominal, etcétera.

Esta prueba se lleva a cabo en línea y se recomienda hacer cada 6 meses pero se puede hacer continuamente. Lo mejor de esta prueba es que no se requiere gran fuente de poder para hacer la prueba y por eso el equipo es pequeño.

- Detección de vibración en extremos de devanados

La vibración en los extremos de los devanados es una causa importante de falla en generadores de dos o cuatro polos y es un mecanismo de falla muy importante de ponerle atención en generadores grandes accionados por turbina, es efectiva para llevar tendencias. Es una prueba que se recomienda hacer continuamente como monitoreo.

- Medición de entrehierro

Esta prueba es para detectar deflexiones en el eje o imperfecciones en los polos cuando el rotor es de polos salientes, movimiento del estator, distorsión de los bordes del rotor por fuerzas centrífugas, deterioro de cojinetes o balanceos inapropiados. Se mide la distancia entre el núcleo del estator y los polos o la superficie del rotor cilíndrico. Esta prueba se puede hacer fuera de línea pero es recomendable un monitoreo continuo por medio de sistemas dedicados.

2.1.2. Mantenimiento

“Se entiende por mantenimiento a la función empresarial a la que se encomienda el control del estado de las instalaciones de todo tipo, tanto las productivas como las auxiliares y de servicios. En ese sentido se puede decir que el mantenimiento es el conjunto de acciones necesarias para conservar o restablecer un sistema en un estado que permita garantizar su funcionamiento a un costo mínimo”.²⁷ Hay muchas clases y tipos de mantenimiento, aquí se dará una breve explicación de los tres tipos de mantenimiento que son comunes en el medio.

2.1.2.1. Mantenimiento correctivo

“Se subdivide en dos, el mantenimiento por avería y el mantenimiento correctivo planificado.

- Mantenimiento por avería

En el cual se le pone el menos interés a la condición de operación de la maquinaria crítica de la planta, equipo o sistemas. Ya que la mayoría de las tareas de mantenimiento son reactivas a las averías o interrupciones de producción, en lo único que se enfocan estas tareas es que tan rápido puede ser regresada a servicio la maquinaria o sistema. Esta metodología de administración de mantenimiento es inefectiva y extremadamente cara; los dos factores que la hacen cara son la pobre planificación y las reparaciones incompletas.

²⁷ CABAÑAS FERNANDEZ, Manes. Técnicas del mantenimiento y diagnóstico de máquinas eléctricas. p. 6.

También se incurre en pérdida de producción, desperdicio de mano de obra al tener a operarios en espera y en la posible pérdida de producto (desperdicio).

- Mantenimiento correctivo planificado

En el mantenimiento correctivo se realizan tareas cuando existen problemas previos a la avería, a diferencia del mantenimiento por avería, está enfocado en tareas regulares y planificadas que mantienen toda la maquinaria crítica de la planta y sistemas en óptimas condiciones de operación. La efectividad es juzgada por los costos de ciclo de vida de la maquinaria, equipo y sistemas de la planta, no en que tan rápido regresó a servicio una máquina que se arruinó. El mantenimiento correctivo, como un subconjunto de un comprensivo programa de mantenimiento preventivo, es una metodología proactiva hacia la administración de mantenimiento.

El objetivo fundamental de esta metodología es para eliminar averías, desviaciones de la condición óptima de operación, reparaciones innecesarias y para optimizar la efectividad de los sistemas críticos de la planta. Consiste en detectar y reparar con prontitud una falla en potencia, esto es, que la maquinaria puede tener ya un problema, el cual aún no ha ocasionado paro de producción, que después de ser detectado, se evalúa la criticidad de este y se programa una salida de operación para la reparación”.²⁸

²⁸ MOBLEY, Keith. R. Maintenance Engineering Handbook.p. 96.

2.1.2.2. Mantenimiento preventivo

El concepto de mantenimiento preventivo tiene una multitud de significados. Una interpretación literal del término es que es un programa de mantenimiento el cual está comprometido a la eliminación de todo el mantenimiento por avería y reducir severamente el número y frecuencia de acciones de mantenimiento correctivo.

Un programa comprensivo de mantenimiento preventivo utiliza evaluaciones irregulares del equipo crítico, maquinaria y sistemas de la planta para detectar problemas potenciales y hacer un programa de tareas de mantenimiento el cual prevenga cualquier degradación en condiciones de operación.

“En la mayoría de plantas, el mantenimiento preventivo está limitado a las lubricaciones periódicas, ajustes y otras tareas calendarizadas. Esos programas no son programas preventivos reales. Un programa comprensivo de mantenimiento preventivo incluiría tareas de mantenimiento predictivo, tareas con base a horas de operación o calendarizadas y mantenimiento correctivo para proveer un soporte comprensivo para todas las plantas de producción o sistemas de manufactura”.²⁹

²⁹ MOBLEY, Keith. R. Maintenance Engineering Handbook. p. 100.

2.1.2.3. Mantenimiento predictivo

El mantenimiento predictivo no es la solución única y absoluta para todos los factores que limitan el total desempeño de una planta. De hecho, este no puede afectar el desempeño de una planta directamente. El mantenimiento predictivo es una técnica de administración que, simplemente, utiliza evaluaciones regulares de la condición actual de operación del equipo de planta, sistemas de producción y funciones administrativas de la planta para optimizar la operación total de esta. La salida o el producto de un programa de mantenimiento predictivo son datos. Hasta que los datos sean analizados y comparados contra estándares predefinidos y que la acción sea tomada para resolver las desviaciones o problemas revelados por los datos, el desempeño de la planta no puede ser perfeccionado.

Por eso, debe existir una filosofía de administración que esté comprometida al mejoramiento de la planta antes de que cualquier beneficio significativo pueda ser derivado. Sin un compromiso absoluto y el soporte de la alta dirección y la completa cooperación de todas las funciones de la planta, un programa de mantenimiento predictivo no puede proveer el medio para resolver el pobre rendimiento de la planta. Tecnología predictiva puede ser usada para mucho más que simplemente medir la condición de operación de maquinaria crítica de planta. La tecnología permite evaluaciones exactas de todos los grupos funcionales, tales como mantenimiento, dentro de la compañía.

“Apropiadamente usado, el mantenimiento predictivo puede identificar la mayoría o si no todos, de factores que limitan la efectividad y eficiencia de la planta completa”.³⁰

³⁰ MOBLEY, Keith. R. Maintenance Engineering Handbook. p. 170.

2.1.3. Mantenimiento a generadores de potencia

El mantenimiento a los generadores son fundamentales para el buen funcionamiento de estos, por ello, es importante conocer los tipos de mantenimientos.

2.1.3.1. Mantenimiento correctivo a generadores

Esencialmente esta sería una opción de no mantenimiento y podría ser efectiva en costo para un generador de bajo valor para el cual se esperaría que la falla de este no tendría consecuencias de seguridad o económicas al sistema de operación de la planta.

Si se lleva a cabo esta opción, se debe reconocer que una falla en servicio puede extensivamente dañar el generador al extremo que no sea económicamente reparable o que tenga que ser reemplazado, las fallas que se podrían presentar en un generador serían: vueltas en corto, campo del rotor a tierra, sensibilidad térmica, calentamiento por componentes de secuencia negativa, contaminación, daños en cojinetes, daños al eje, perforaciones en el aislamiento, laminaciones del núcleo en corto, etcétera.

“Las decisiones de reparar o reemplazar un devanado después de una falla usualmente son determinadas por el costo y el tiempo. Este tipo de mantenimiento no es adecuado para los generadores de potencia, debido al factor seguridad en función del tamaño de estos y las fuerzas que se emplean en la operación; también debido al factor económico ya que se dá la pérdida del negocio y se puede incurrir en multas si existen contratos de disponibilidad”.³¹

³¹ STONE, Greg. C. Electrical Insulation for Rotating Machines. p. 352.

2.1.3.2. Mantenimiento preventivo a generadores

“En este caso se desarrollan inspecciones y reparaciones durante pausas programadas. La programación de las pausas puede no ser óptima para los generadores ya que a menudo depende de otras consideraciones. Con este tipo de mantenimiento, intervalos de inspecciones y tareas varían desde 1 hasta 10 años aunque es recomendable hacerlo con base en horas de operación y no tanto con base a tiempo calendario, dependiendo del tipo de generador y si las pausas son dictadas por otro equipo en la planta (por ejemplo, el primotor)”.³²

El ingrediente clave para desarrollar programas de mantenimiento basado en tiempo es la experiencia con los generadores, la cual es necesaria para construir confianza con un diseño específico para asegurar cuando es requerido el mantenimiento.

Cuando la programación lo permite, inspecciones más frecuentes deben ser hechas en generadores nuevos hasta que en algún momento, por los resultados obtenidos, dan la seguridad de incrementar los intervalos.

“Adicionalmente, generadores antiguos usualmente también requieren inspecciones, tareas y pruebas más frecuentes. Cualquier programa de mantenimiento preventivo debe ser flexible y sensible a cambios repentinos a la condición del generador en respuesta a nuevos requerimientos de operación”.³³

Para obtener la eficiencia y la confiabilidad de los generadores, deben ser mantenidos correctamente.

³² GILL, Paul. Electrical Power Equipment Maintenance and Testing. p. 576.

³³ STONE, Greg C. Electrical Insulation for Rotating Machines. p. 353.

Las tareas más comunes de mantenimiento preventivo programado que se le realizan a los generadores son los que se indican en los siguientes párrafos.

- Inspecciones visuales

En estas inspecciones las partes más significativas en las cuales la inspección debe ser hecha son los cojinetes, los devanados del estator, los devanados del rotor y el sistema de excitación. En estas se debe buscar signos de deterioración o degradación del aislamiento, rajaduras del aislamiento, contaminación, abrasión, partes flojas, estado de escobillas por si el generador las usará.

- Limpieza de devanados

Se realiza principalmente en los generadores enfriados por aire, ya que a pesar que se utilizan filtros, estos no son capaces de filtrar partículas como las del hollín y contaminación y que al acumularse en los devanados y núcleo pueden corroer el aislamiento; además, en presencia de humedad reducen la resistencia del aislamiento de los devanados. Esta limpieza debe ser hecha con base al capítulo 7 del estandar IEEE56 y a las recomendaciones del fabricante.

- Cambio de filtros

Los filtros en los generadores enfriados por aire deben ser cambiados programadamente para garantizar el flujo de aire de enfriamiento.

- Monitoreo de temperaturas

Se debe monitorear la temperatura de los devanados y de los cojinetes, idealmente si pudiera medir la temperatura del aire de enfriamiento.

- Alineación

La alineación entre el eje del primotor y el del generador debe ser verificada periódicamente y corregida si es necesario.

- Cambio de aceite o engrase de cojinetes

Si los cojinetes utilizan aceite, este debe ser reemplazado después de las horas de operación estipuladas por el fabricante, en cambio si los cojinetes utilizan grasa, estos se deben engrasar periódicamente.

- Retorque de terminales

Los generadores son máquinas rotativas por lo que siempre están sometidos a cierto grado de vibración tolerable, debido a esto todas las partes utilizadas en su construcción son soldadas y en caso de partes que están sujetadas por tornillos o tuercas, a estos se les aplica puntos de soldadura para que no se aflojen. Las terminales eléctricas normalmente están conectadas al cableado o barraje de salida por medio de tornillos, los cuales se recomienda revisarles el torque periódicamente.

- Termografía

Rutinas de termografía del interior del generador, si es posible y de cojinetes cuando están en funcionamiento, ayudan a detectar fallas en potencia.

2.1.3.3. Mantenimiento predictivo a generadores

“Como se indicó en la sección 2.1.2.3 de este documento, el mantenimiento predictivo es una técnica que utiliza evaluaciones y pruebas regulares de la condición actual de operación del generador y lo que se obtiene son datos”.³⁴

En un generador de potencia, las actividades de mantenimiento predictivo, aparte del análisis de vibraciones y ultrasonido en cojinetes, casi todas son realizadas para determinar la condición del aislamiento de los devanados del rotor y del estator que es los más susceptible (o menos robusto) en un generador.

“Hay cuatro principales razones para hacerle pruebas y monitorear el aislamiento de los devanados: evaluar la condición de devanados y estimar la vida útil de estos, para priorizar mantenimientos, pruebas de puesta en marcha y garantía y determinar causa raíz de falla. Las primeras dos son a lo que se refiere el concepto del mantenimiento predictivo”.³⁵ En el listado siguiente se indican las pruebas que se pueden llevar a cabo en un programa de mantenimiento predictivo.

³⁴ STONE, Greg. C. Electrical Insulation for Rotating Machines. p. 235-237.

³⁵ Ibid. p. 227-228.

- Pruebas fuera de línea del estator
 - Resistencia de aislamiento
 - Índice de polarización
 - Medición de la capacitancia
 - Factor de disipación
 - Factor de potencia tip-up
 - Detección de descargas parciales off-line
 - Oscurecimiento

- Pruebas fuera de línea del rotor
 - Resistencia de aislamiento
 - Índice de polarización
 - Circuito abierto
 - Prueba de impedancia
 - Prueba de caída de voltaje de rotor

- Pruebas en línea del estator
 - Vibración de extremo de devanados
 - Detección de ozono
 - Detección de descargas parciales

- Pruebas en línea del rotor
 - Monitoreo de flujo síncrono del rotor
 - Análisis de marca de corriente

- Pruebas fuera de línea contra pruebas en línea

Muchas pruebas fuera de línea a los devanados del estator y rotor pueden ser hechas en las terminales, evitando el desensamblaje del generador; sin embargo, algunas pruebas pueden ser hechas únicamente con la máquina al menos parcialmente desensamblada. De esta manera, todas las pruebas fuera de línea, por definición requieren al menos una pausa corta. En contraste, los monitoreos en línea referidos como pruebas, son hechos durante la operación del generador.

Por eso, no es necesario hacer pausa, aunque, para algunos monitoreos, las condiciones de operación del generador se cambian para sacar la mayor cantidad de información de diagnóstico.

En general, las pruebas o monitoreos en línea son preferidos por las siguientes causas:

- No es necesaria una pausa del generador para determinar la condición del devanado.
- Usualmente, el costo de adquirir los datos de diagnóstico son más baratos que las pruebas fuera de línea, ya que generalmente, una persona puede recolectar los datos y solamente toma unos cuantos minutos.
- Esto facilita el mantenimiento predictivo, ya que se puede determinar cuál generador requiere una pausa para revisión, sin necesidad de sacar todos de servicio para realizarles pruebas.

“En la prueba o monitoreo, los esfuerzos que ocurren en servicio están presentes, es muy difícil para una prueba fuera de línea simular apropiadamente el estrés de distribución de corriente alterna que ocurre en servicio; además, están presentes todas las condiciones nominales de operación: como la temperatura, la ventilación, la vibración, el voltaje, la corriente, las fuerzas magnéticas, la histéresis del hierro y la fuerza centrífuga”.³⁶

Un programa de mantenimiento ideal iniciaría actividades correctivas en un generador eléctrico solo cuando se sabe que existe un problema. Con la llegada de técnicas de diagnósticos avanzados en línea, programas basados en la condición, preferiblemente a mantenimiento preventivo o correctivo, se han convertido muy populares en años recientes. La evaluación de la condición del aislamiento requiere la provisión de dispositivos apropiados para el monitoreo en línea más la aplicación de pruebas de diagnóstico fuera de línea seleccionadas. “Las mediciones normales para cada dispositivo de monitoreo deben ser conocidos para que cualquier desviación provea información inteligente. Por eso, datos de punto de partida deben ser obtenidos”.³⁷

2.1.4. Descargas parciales

Haciendo referencia a lo indicado en el estandar IEC60270 en relación a las descargas parciales. Descarga parcial es una descarga eléctrica localizada que sólo cruza parcialmente el aislamiento entre conductores y la cual puede o no ocurrir adyacente a un conductor.

³⁶ STONE, Greg C. Electrical Insulation for Rotating Machines. p. 229.

³⁷ Ibid. p. 354.

Esta definición es complementada en el estandar IEC60270 por tres notas, de las cuales sólo las notas 1 y 2 serán comentadas aquí:

- “Descargas parciales son, en general, una consecuencia de una concentración de esfuerzo eléctrico local en el aislamiento o en la superficie de este. Generalmente, tales descargas aparecen como pulsos de duración mucho menor a $1\mu\text{s}$; otras formas de descargas que pueden ocurrir son las continuas, como por ejemplo, las llamadas descargas sin pulso en dieléctricos gaseosos; este tipo de descarga no será detectada normalmente por los métodos de medición descritos en el estándar”.³⁸
- Corona es una forma de descarga parcial que ocurre en un medio gaseoso alrededor de conductores los cuales están remotos del aislamiento sólido o líquido; corona no debe ser usado como un término general para todas las formas de descargas parciales. Descargas parciales son de ese modo, descargas eléctricas localizadas dentro de cualquier sistema de aislamiento como el aplicado en aparatos, componentes o sistemas eléctricos.

“En general las descargas parciales están restringidas a una parte de los materiales dieléctricos usados y de esta manera sólo parcialmente puentean los electrodos entre los cuales el voltaje es aplicado. El aislamiento puede consistir de materiales sólidos, líquidos o gaseosos o alguna combinación de estos”.³⁹

³⁸ KUFFER, E. High Voltage Engineering. p. 422.

³⁹ WADHWA, C.L. High Voltage Engineering. p. 181-183.

En general, las descargas parciales se pueden presentar en los sistemas de aislamiento de cualquier equipo o dispositivo que esté sometido a alto voltaje (> 4 kilovatios), por ejemplo, cables, transformadores, generadores, motores, TCs, TPs, interruptores, seccionadores, aisladores, pararrayos tipo semiconductivos, etcétera.

- Características de las descargas parciales

“El término descarga parcial incluye un amplio grupo de fenómenos de descarga:

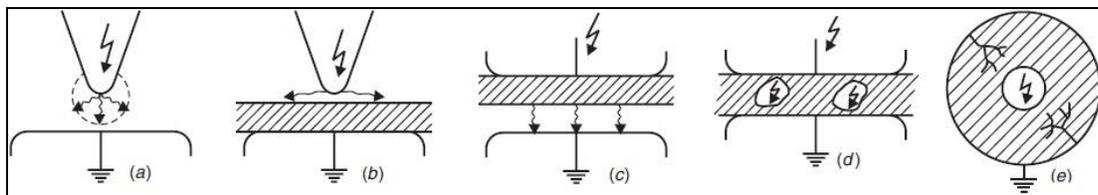
Descargas corona o descargas en gas, ocurren en dieléctricos gaseosos o líquidos en presencia de campos no homogéneos en los bordes agudos de conductores sujetos a alto voltaje, figura 19.

Descargas superficiales o descargas en materiales laminados, aparecen en la frontera o interface de diferentes materiales de aislamiento o dieléctricos, figura 19. Descargas internas o de cavidad, ocurren en vacíos o cavidades dentro de dieléctricos sólidos o líquidos (burbujas) cuando el gas dentro de estos se sobre estresa, figura 19. Canales tipo ramal, campos de gran intensidad son producidos en un material de aislamiento en sus bordes agudos y deterioran el material aislante, impactos continuos de descargas parciales producidos de esta forma son conocidos como ramales, figura 19.

El significado de descargas parciales ha sido largamente reconocido en la vida del aislamiento. Cada evento de descarga causa una deterioración del material por la energía del impacto de iones acelerados o electrones de alta energía, causando transformaciones químicas de varios tipos.

El número de eventos de descargas durante un intervalo de tiempo elegido depende fuertemente de la forma de voltaje aplicado y serán mayores para voltajes AC, la deterioración existente depende del material usado”.⁴⁰

Figura 19. **Varias descargas parciales**



Fuente: WADHWA, C.L. High Voltage Engineering. p. 182.

- Descarga parcial externa

Son los procesos que ocurren externamente al equipo.

- Descarga parcial interna

Es el proceso de descarga eléctrica el cual ocurre dentro de un sistema cerrado (descargas en vacíos, canales, etcétera). Esta clase de designación es esencial para que los sistemas de detección de descargas parciales distingan perfectamente las descargas parciales internas de las externas.

⁴⁰ WADHWA, C.L. High Voltage Engineering. p. 181 y 211.

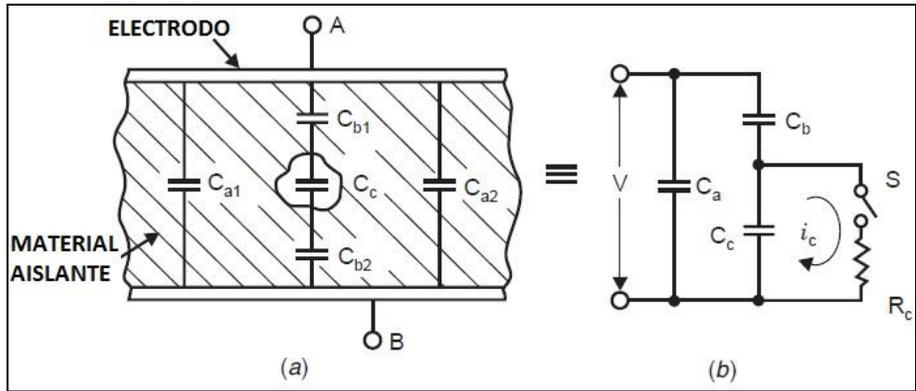
Las descargas parciales pueden ser medidas para asegurar la expectativa de vida de los materiales de aislamiento; estas mediciones no sólo se hacen por métodos eléctricos, sino también por métodos ópticos, acústicos y químicos.

- Circuito equivalente de una descarga parcial

Si hay descargas parciales de cualquier tipo en un material dieléctrico, estas pueden ser medidas sólo a través de sus terminales. La figura 20 muestra un arreglo de un simple capacitor en el cual un vacío lleno de gas está presente, la descarga parcial en el vacío ocurrirá cuando el esfuerzo eléctrico en el vacío sea ϵ_r veces el esfuerzo en el resto del material en donde ϵ_r es la permitividad del material.

Debido a la geometría del material, se forman varias capacitancias como se muestra en la figura 20 a, líneas de flujo que empiezan del electrodo y terminan en el vacío formarán una capacitancia C_{b1} y similarmente C_{b2} entre el electrodo B y el vacío. C_c es la capacitancia de este vacío; similarmente C_{a1} y C_{a2} son las capacitancias de las porciones saludables del dieléctrico en los dos lados del vacío. La figura 20 muestra el equivalente entre $C_a = C_{a1} + C_{a2}$, y $C_b = C_{b1}C_{b2}/(C_{b1} + C_{b2})$ y C_c es la capacitancia de la cavidad. En general $C_a \gg C_b \gg C_c$.

Figura 20. **Material con una cavidad y circuito equivalente**



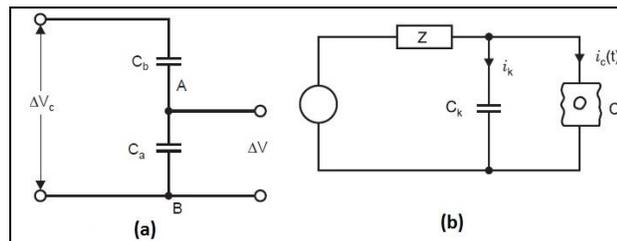
Fuente: WADHWA, C.L. High Voltage Engineering. p.182.

Cuando se cierra el interruptor S equivale a la simulación de una descarga parcial en el vacío cuando el voltaje en el capacitor C_c alcanza el voltaje de ruptura. La descarga resulta en una corriente $i_c(t)$ que fluye, R_c simula un valor finito de esta corriente.

Suponiendo que un voltaje V es aplicado a través de los electrodos A y B y la muestra es cargada a este voltaje y la fuente es quitada, el voltaje V_c a través del vacío es suficiente para saltar este vacío, lo cual es equivalente a cerrar el interruptor S en la figura 20 b. Como resultado, la corriente $i_c(t)$ fluye la cual libera una carga $\Delta q_c = \Delta V_c C_c$ la cual es dispersada en el material dieléctrico a través de la capacitancia C_b y C_a . Aquí ΔV_c es la caída en el voltaje V_c como un resultado de descarga, el circuito equivalente durante la redistribución de la carga Δq_c es mostrada en la figura 21 a.

El voltaje, tal y como es medido a través de AB será: $\Delta V = C_b \Delta V_c / (C_a + C_b) = (\Delta q_c / C_c) C_b / (C_a + C_b)$. Ordinariamente ΔV_c es en kV mientras que ΔV son unos cuantos voltios ya que la relación C_b / C_a es del orden de las diez milésimas a las milésimas, la caída de voltaje ΔV aunque pueda ser medida, pero como C_b y C_c no son conocidos normalmente, ni ΔV_c y ni Δq_c pueden ser obtenidos. Como la relación $\Delta V / V$ es muy pequeña, su detección es una tarea muy tediosa.

Figura 21. **Circuito equivalente después de descarga y circuito de prueba**



Fuente: WADHWA, C.L. High Voltage Engineering. p.183.

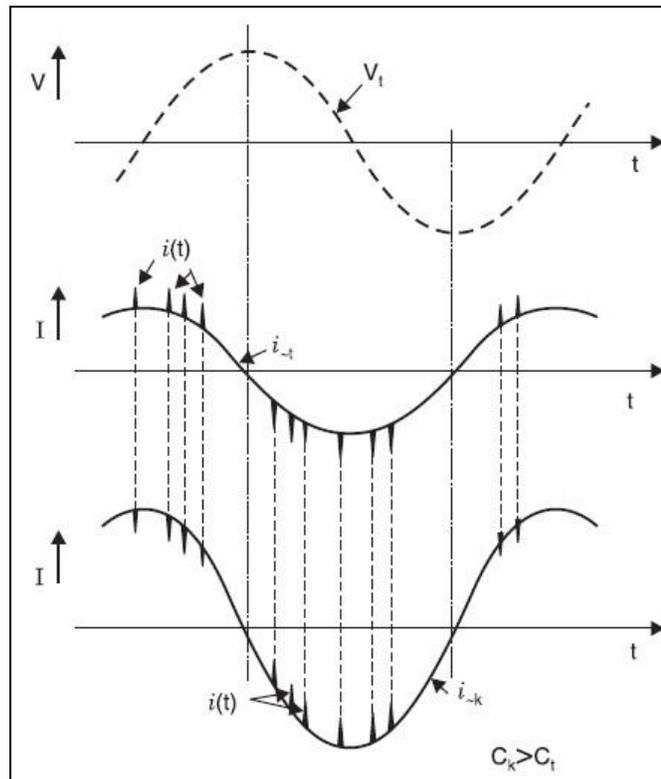
Suponiendo, que el objeto de prueba permanece conectado a la fuente de voltaje de la figura 21 b, aquí C_k es el capacitor de acople. Z es la impedancia que consiste ya sea solo de la capacitancia o del capacitor y el inductor libre de descargas parciales o filtro el cual desacopla el capacitor de acople y el objeto de prueba de la fuente, únicamente durante el período de la descarga, cuando una corriente $i_c(t)$ de alta frecuencia circula entre C_k y C_t ; C_t es la capacitancia total del equipo de la prueba espécimen.

Debe notarse que Z ofrece gran impedancia a la corriente circulante (corriente impulso) y, por eso, está limitada sólo a C_k y C_t . Sin embargo, corriente de desplazamiento de frecuencia de la fuente continúan fluyendo a través de C_k y C_t y las formas de la onda de corriente a través de C_k y C_t se muestra en la figura 22.

“Es importante notar que las corrientes de pulso en C_k y C_t tienen exactamente la misma ubicación y amplitud pero polaridades opuestas. Por eso, se puede decir que estas corrientes de pulso no son suministradas por la fuente pero son debidas a las descargas parciales locales. La amplitud de los pulsos depende del voltaje aplicado y el número de pulsos depende del número de vacíos; entre mayor sea el número de fallas, mayor será el número de pulsos en un medio ciclo”.⁴¹

⁴¹ IEEE. Trial Use Guide to the Measurement of partial discharges in rotating machinery. p.7-8.

Figura 22. Forma de onda de corrientes en C_k y C_t



Fuente: WADHWA, C.L. High Voltage Engineering. p.184.

2.1.5. Descargas parciales en generadores

En los generadores síncronos de potencia hay numerosos sitios potenciales de descargas parciales. El diseño del generador, los materiales de construcción, los métodos de manufactura, las condiciones de operación y las prácticas de mantenimiento pueden profundamente afectar la cantidad, localización, características, evolución y la significancia de las descargas parciales.

La delaminación y cavidades del aislamiento groundwall que se desarrolla como un resultado de la mala operación, envejecimiento térmico, vibración de devanados y erosión por descargas parciales del generador pueden exhibir características que son muy diferentes a las cavidades en aislamiento nuevo. Los sitios de las descargas parciales pueden también ser desarrolladas o estar presentes en la interfase entre los conductores y el aislamiento groundwall y entre el aislamiento groundwall y el tratamiento semiconductor en las superficies de los elementos del devanado del estator.

Otros sitios potenciales de las descargas parciales pueden ser dentro de grietas, disrupciones mecánicas del aislamiento por sobrecalentamiento, sitios dañados por impacto, fracturas del aislamiento y áreas desgastadas.

Pueden ocurrir sitios de descarga de ranura pueden ocurrir como resultado de ciertas condiciones del recubrimiento semiconductor que ya estaban presentes cuando el generador era nuevo o inició operaciones, estas condiciones, incluyendo discontinuidades en el recubrimiento semiconductor de la ranura, valores de alta resistencia en el recubrimiento tales que este no funcione como lo deseado, porosidad, separaciones, defectos de migración y defectos de abrasión o erosión.

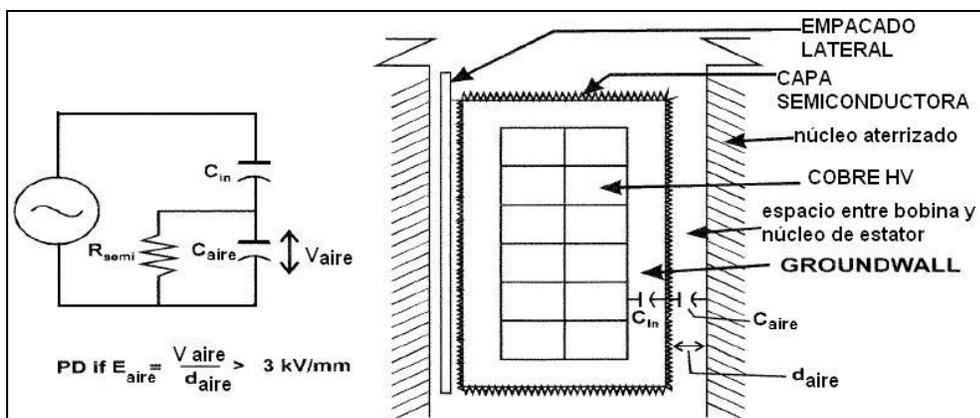
“Las descargas de ranura pueden también ser causadas o extinguidos por ciertos tipos de contaminación química”.⁴²

⁴² PD. Seminar, Basic PD theory detection of PD, PD characteristics. p.7.

2.1.5.1. Conceptos básicos

Una vez un vacío o hueco está formado dentro del volumen o en la superficie del aislamiento, una diferencia de potencial se formará a través de este. La magnitud de este voltaje dependerá del voltaje aplicado, la capacitancia del aislamiento y el gas dentro del vacío. El voltaje que se forma a través del vacío se modela en la figura 23. “Una descarga puede ocurrir solamente cuando la tensión eléctrica (voltios/milímetros) excede el punto de ruptura eléctrica para ese gas en este vacío, basado en la ley de Paschen. Otras cosas que pueden afectar el esfuerzo eléctrico en un vacío son el largo de la cavidad, el diámetro, la presión del gas y la naturaleza de la superficie de las paredes del vacío. En general, el producto de la separación del vacío y la presión del gas establece el voltaje necesario para formar una descarga, por ejemplo el voltaje de ruptura”.⁴³

Figura 23. Esfuerzo eléctrico en un vacío entre bobina y el núcleo



Fuente: PD Seminar, Basic PD Theory Detection of PD, PD characteristics. p. 7.

⁴³ STONE, Greg C. Electrical Insulation for Rotating Machines. p. 137.

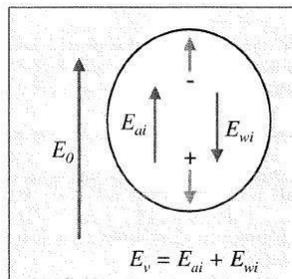
- Teoría de campo

El modelo capacitivo descrito anteriormente no predice la variabilidad del patrón de las descargas parciales, especialmente:

- ¿Por qué se tienen diferentes análisis de distribuciones de fase de pulso?
- ¿Por qué la descarga parcial ocurre antes que el voltaje cruce el cero?
- ¿Por qué las descargas parciales decrecen si el voltaje aplicado es mayor?

La teoría de campo es una forma de predecir las descargas parciales y describir su comportamiento. Si el esfuerzo eléctrico, E_v , en un vacío, es la suma de dos esfuerzos, figura 24. Primero, el esfuerzo eléctrico del campo en el material de alrededor, E_{ai} , el cual es determinado por la geometría del campo. Segundo, el esfuerzo eléctrico de las cargas atrapadas en la superficie del vacío de previas descargas parciales, E_{wi} o la componente Poisson.

Figura 24. **Descarga parcial según la teoría de campo**



Fuente: PD Seminar, Basic PD Theory Detection of PD, PD characteristics. p. 7.

La componente Poisson, basada en la distribución de carga de la superficie del vacío, es afectada por la conductividad de la superficie del vacío. La conductividad de esta superficie depende del material, temperatura, historial de las descargas y el tiempo entre descargas. Mientras la conductividad de la superficie se incrementa, entonces las descargas parciales disminuyen ya que la reducción en carga espacial disminuirá el campo neto dentro del vacío. Eventualmente, las superficies de los vacíos pueden convertirse conductivas en su totalidad y las descargas parciales detectables se detendrán todas o se transformarán en un pulso de resplandor o pseudoresplandor.

- Propiedades físicas de las descargas parciales en generadores

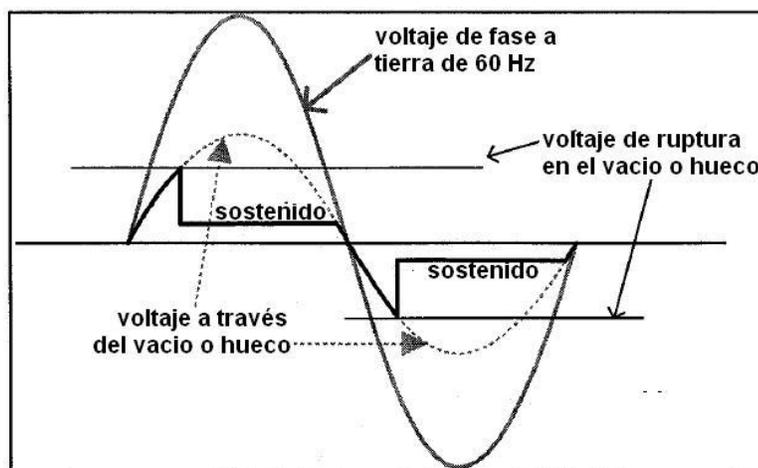
Cuando la aplicación de voltaje de 60 hertz aumenta sinusoidalmente, la aparente tensión eléctrica a través del vacío aumenta hasta que alcanza 3 kilovatios/milímetros, lo cual es el equivalente al voltaje de ruptura en el vacío. El sobrevoltaje es el estado en el cual el voltaje a través de un vacío excede el voltaje de ruptura requerido para el tamaño del vacío y el gas.

Cuanto más grande el sobrevoltaje, más intensos los efectos de carga espacial en el vacío. Aunque el vacío puede estar en un estado de sobrevoltaje, la ruptura no ocurrirá hasta que un electrón libre (debido a la radiación cósmica o natural) aparece dentro del vacío y desencadena una avalancha de electrones. Esta avalancha es un flujo de electrones a través del vacío que crea un pulso de corriente de elevación muy rápida (unos pocos nanosegundos), llamado descarga parcial.

La dependencia en los electrones libres para que una descarga parcial se establezca hace la ocurrencia de descargas parciales un evento estadístico y por lo tanto, no previsible. Una vez que se produce la ruptura, el voltaje a través del vacío colapsa a un voltaje de nivel suficiente para sostener la descarga. La mayoría de los instrumentos sólo detectan el pulso inicial de ruptura.

No ocurrirán más descargas detectables hasta que el voltaje del vacío se haya revertido en polaridad y se haya establecido otra condición de sobrevoltaje. Por lo tanto, (como se muestra en la figura 25) por cada vacío habrá una descarga parcial detectable ocurriendo dos veces en un ciclo de corriente alterna.

Figura 25. **Ocurrencia de las descargas parciales**



Fuente: PD Seminar, Basic PD Theory Detection of PD, PD characteristics. p. 7.

- Dependencia del voltaje

La chispa (descarga parcial) no solamente es una indicación de que existe un vacío lleno de gas o aire y que existe un síntoma de deterioro, sino que también rompe las uniones de carbono de las resinas orgánicas y acelera el envejecimiento. Dado que la magnitud de la tensión de voltaje a través del vacío depende del voltaje aplicado, muchas descargas parciales sólo ocurren en bobinas de alto voltaje (final de línea). Las bobinas de final neutral no tienen la suficiente tensión de voltaje a tierra para exceder el punto eléctrico de ruptura del aire o el hidrógeno.

Algunos vacíos no producen un pulso de chispa, pero en su lugar tienen características de luminosidad y semiluminosidad. Los detectores de descargas parciales más convencionales no detectan esta actividad. El modelo mostrado en la figura 23 es un modelo extremadamente simplista; la frecuencia y magnitud de la descarga en un vacío es un fenómeno complejo que depende del tamaño, forma, presión interna del gas y naturaleza de la superficie del vacío.

- Forma de pulso

El pulso de una descarga parcial es unipolar con un tiempo rápido de elevación y una corta amplitud. El período de oscilación, los tiempos de elevación y las magnitudes de los subsecuentes picos varían para cada pulso. Estos dependen de la geometría de la máquina, la ubicación del pulso y los materiales de aislamiento. Como las descargas parciales son efectivamente pulsos, producirán energía a través del espectro de frecuencia desde corriente directa a gigahertz.

Además de los pulsos que producen chispas, hay también otros menos detectables en frecuencias más lentas provenientes de las colas iónicas. Por lo tanto, es posible detectar actividad de descarga parcial a través de varias bandas de frecuencia con ventajas y desventajas para cada una. También significa que ningún instrumento puede detectar toda la energía disipada debido a las descargas parciales.

Muchos aparatos para la detección de las descargas parciales sólo detectan el pulso inicial que tiene un tiempo de elevación de 1 - 5 nanosegundos. Con base en el tiempo de elevación, en una primera aproximación, la frecuencia actual de un pulso es:

$$f = 1/\text{período} = 1/(4*\text{tiempo de elevación})$$

Por ejemplo, un pulso con un tiempo de elevación de 3 nanosegundos tendría un período,

$$\text{período} = 4* 3 \text{ nanosegundos} = 12 \text{ nanosegundos y una frecuencia}$$

$$f = 1/\text{Período} = 1/12 \text{ nanosegundos} = 83 \text{ megahertz.}$$

De esta manera, el rango de elevación de 1 – 5 nanosegundos corresponde al rango de frecuencia de 50 – 250 megahertz.

- Recorrido del pulso

Una vez ocurrido el pulso, debe viajar a algún lugar para ser detectado por el sensor. Los pulsos de alta frecuencia viajan a través del devanado del estator en tres formas diferentes: transmisión, acoplamiento capacitivo y radiación.

- Transmisión

El método más ampliamente entendido y predecible para que un pulso viaje es mediante la transmisión a través de los conductores de cobre, similar a la señal de potencia de 60 hertz. Cuando los pulsos de alta frecuencia viajan como ondas de transmisión, sufren severas distorsiones debido a la inductancia de las bobinas. La inductancia de las bobinas del estator, que es una característica normal y necesaria para la producción eléctrica, es una propiedad que desarrolla un campo electromagnético cuando impide cambios repentinos en la corriente.

Aunque esto tiene un efecto positivo en la señal de potencia de baja frecuencia de 60 hertz, disminuye los pulsos de alta frecuencia (50 - 250 megahertz) de descargas parciales. La distorsión es atenuación de la señal e incremento de los tiempos de elevación (reacción a más baja frecuencia). De hecho los pulsos se distorsionan al punto tal de no ser reconocidos como descargas parciales de alta frecuencia, luego de atravesar sólo algunas bobinas.

A pesar de este fenómeno hay dos condiciones que hacen posible la detección de la descarga parcial: primero, que el envejecimiento (por ejemplo, el desarrollo de mecanismos de falla) normalmente afecta en alguna medida a todas las bobinas; y segundo que las descargas parciales sólo pueden ocurrir cuando hay suficiente voltaje a tierra para causar una ruptura eléctrica del aire en el vacío; lo que ocurre en las bobinas de alto voltaje.

De esta manera la detección de descargas parciales debe ser en las bobinas de final de línea, las que seguramente tendrán el envejecimiento típico y son las bobinas de más riesgo ya que son las bobinas de alto voltaje. Lo que no puede detectarse a causa de estas características de distorsión es un defecto excepcional en una bobina de bajo voltaje.

- Acoplamiento capacitivo

A diferencia de la transmisión donde el pulso viaja a través de un inductor, en el acoplamiento capacitivo el pulso viaja a través de la capacitancia del devanado. Para la señal de alta frecuencia el capacitor aparece como un cortocircuito y permite que la corriente pase a través de él virtualmente sin impedimentos. Aunque esto sería ideal para la detección de descargas parciales ya que viajarían sin ninguna distorsión a través del devanado, la predicción de acoplamiento capacitivo es poco práctica.

La magnitud del acoplamiento capacitivo depende de: el grosor del aislamiento, el espacio de separación y la integridad de la resina orgánica; los cuales cambian constantemente con la temperatura, humedad y carga. Aunque se sepa que el acoplamiento capacitivo ocurre y puede detectarse, no es posible predecir como un pulso puede acoplarse capacitivamente a través del devanado. Sin embargo, una vez que el comportamiento se establece a través de pruebas empíricas, este puede ser monitoreado.

- Radiación

El último método mediante el cual viajan los pulsos, es la radiación que ocurre cuando un pulso de alta frecuencia crea una onda que viaja a través de un medio. A causa de esta característica, una antena de radiofrecuencia ubicada en cercana proximidad de una descarga parcial que tenga corona, detectará el disturbio. La dificultad de usar este método para monitorear descargas parciales es que, como en la transmisión, el pulso se distorsiona muy rápidamente, perdiendo su identidad como descarga parcial de alta frecuencia. De manera que, con el fin de asegurar qué es la chispa de un vacío, hay que monitorear a altas frecuencias y muy cerca de la fuente de descargas parciales, que son las bobinas de alto voltaje.

A continuación, se analizan los mecanismos de falla en los devanados de los generadores para una mejor comprensión de la presencia de descargas parciales.

2.1.5.2. Mecanismos de falla

Entre los mecanismos de fallas se pueden mencionar los siguientes parámetros también se mencionan los tipos de fallas que pueden ocurrir entre las que se pueden mencionar el deterioro térmico, ciclos de carga y adherencia inadecuada por mencionar algunas.

- Deterioración térmica

El deterioro térmico en un generador de potencia puede ocurrir como resultado de sobrecargas, enfriamiento defectuoso, voltajes de fase desbalanceado y diseño pobre. Como con la mayoría de los sistemas de aislamiento, el daño es acumulativo, no reversible y resulta en una reducida habilidad de la resina adherente (epóxica o poliéster) de mantener mecánicamente pegadas y juntas las capas de aislamiento. Esta pérdida de adherencia mecánica permite la formación de vacíos o huecos dentro de las capas de cinta que forman el espesor del aislamiento. Mientras las capas de cinta se delaminan, los conductores pueden quedar libres para vibrar, de esta manera las descargas parciales en los vacíos se crean.

Las descargas parciales, a lo largo con posible abrasión mecánica, puede preceder a cortocircuitos de vueltas o hilos en las bobinas. La quebradura del aislamiento debido a un sobrecalentamiento simple puede tomar años, dependiendo de la temperatura y el grosor del aislamiento groundwall.

- Ciclos de carga

El impacto negativo de los cambios frecuentes de carga a un generador son los esfuerzos de corte cíclicos aplicados al aislamiento debido a los diferentes coeficientes lineales de expansión térmica en los materiales del devanado del estator.

Como el cobre expande al incrementarse la temperatura debido a las pérdidas I^2R , el aislamiento, el cual está pegado al cobre y apretadamente acuñado entre los conductores y el núcleo, no puede expandirse tan rápido debido a un menor coeficiente de expansión térmica y menor temperatura.

Esfuerzos repetitivos por cambios de carga repentinos estiran la adherencia mecánica entre el aislamiento groundwall y el aislamiento de hilo o el aislamiento de vuelta causando al adherente eventualmente debilitarse o quebrarse. Esto es mayormente observado en generadores de núcleo largo, que en generadores con núcleos no mayores a dos metros. Las plantas con turbina de gas, debido a la naturaleza de su operación, son susceptibles a este tipo de deterioro.

- Adherencia inadecuada

A veces, durante el proceso de impregnación, pequeños huecos son dejados inadvertidamente dentro del aislamiento groundwall. Estos pueden ocurrir debido a inadecuados valores de vacío o presión en el proceso, inadecuada viscosidad de la resina, temperatura inapropiada al momento de aplicarse o a objetos extraños incrustados en las cintas del aislamiento. En la presencia del esfuerzo por voltaje, pueden ocurrir descargas parciales a través de estos vacíos y atacar la resina orgánica, este ataque puede preceder cortocircuitos de vueltas o de hilo si los huecos son cercanos a los conductores de cobre y eventualmente fallas en las bobinas de varias vueltas pueden ocurrir dentro de los primeros 2 a 5 años de uso.

Si los vacíos o huecos están en el centro del grosor del aislamiento groundwall, las descargas parciales son menos dañinas y de baja magnitud, de modo que la falla puede tomar muchos años. Un problema adicional de la adherencia inadecuada es que los vacíos internos crean una barrera inhibidora para la transferencia de calor del cobre hacia el núcleo resultando en un mayor esfuerzo térmico. Debido a las complejidades presentes durante el proceso de impregnación, este mecanismo de falla es más presente en estatores que pasaron por el proceso VPI o en bobinas ricas en resina hechas usando cintas antiguas.

- Holgura en devanados

Si están correctamente instaladas, las cuñas y el empacado lateral deberán prevenir que las bobinas estén flojas. Sin embargo, ya que algunas resinas de aislamiento se encogen cuando terminan de curarse, las bobinas pueden ser de menor tamaño quedando holgadas en la ranura. También, algunos materiales de acuñado y empacado pueden volverse quebradizos o encogerse al paso del tiempo, permitiendo que se aflojen las bobinas. En presencia de aceite, el empacado y los tensores pueden suavizarse rápidamente debido al medio lubricante.

Si las bobinas están holgadas, esta holgura permitirá rápidamente que la áspera superficie laminada del estator dañe las superficies de recubrimiento sobre la bobina. Estas superficies dañadas de bobinas crean discontinuidades sobre la superficie permitiendo que esfuerzos de voltaje se formen a través de estos lugares aislados o entre estos y el hierro del estator.

Si los esfuerzos de voltaje exceden el punto eléctrico de ruptura del medio (gas o aire), una descarga ocurrirá, eventualmente, un efecto escalera se desarrolla en donde el aislamiento groundwall es delgado en el punto de contacto con el núcleo, pero mantiene su espesor normal en los canales de ventilación del núcleo. Sin embargo, el tiempo absoluto entre la detección de holguras y falla es impredecible, este puede ser tan corto como dos años en algunos devanados, especialmente en los que hay un gran esfuerzo eléctrico a través de su aislamiento groundwall.

- Descarga eléctrica de ranura

Descarga de ranura es el término dado a las descargas que ocurren entre la superficie de la bobina y el hierro del estator, si la capa semiconductiva en la superficie de la bobina se deteriora, resultará en el desarrollo de descargas parciales de ranura y la producción de ozono, estos dos fenómenos acelerarán la descomposición del adhesivo epóxico orgánico o resina poliéster.

Debido a esta descomposición de las resinas, las bobinas decrecerán en tamaño y pueden aflojarse, si sucede esto, las superficies semiconductivas de las bobinas serán las primeras en dañarse causando áreas de esfuerzo eléctrico alto. Si el recubrimiento semiconductivo no está muy bien hecho, especialmente si se utilizó pintura, este puede convertirse en no conductor a altas temperaturas y resultaría en esfuerzos eléctricos muy altos. No obstante, mientras las bobinas permanezcan en las ranuras de forma segura, rajaduras eléctricas de falla pueden tomar décadas en aparecer.

- Esfuerzo de voltaje de interfase

Con el fin de controlar adecuadamente el esfuerzo de voltaje de los devanados, la interfase entre los materiales de los recubrimientos semiconductor y de nivelación deben ser efectivos, debido a grandes esfuerzos eléctricos y altas temperaturas, esta interfase puede deteriorarse en el tiempo especialmente con pinturas para el control de esfuerzos de voltaje. Como un resultado de esta deterioración, el recubrimiento de nivelación pierde contacto con la tierra, flotando a altos voltajes y chispas a través de la interfase y tierra.

En máquinas enfriadas por aire, esto producirá ozono y dejará una banda blanca de residuos en la salida de la ranura. La banda se ve fácilmente cuando se inspeccione el generador. Daños en el aislamiento por este tipo de deterioro es muy lento hasta que ocurran descargas parciales entre dos puntos en la superficie de la bobina.

- Contaminación de devanados

Cuando algún tipo de contaminación conductiva como humedad o mezcla de aceite con polvo/suciedad de contaminación, es posible que se desarrolle un canal conductor (tracking) eléctrico a través de las cubiertas o a lo largo de los extremos de los brazos de los devanados. El canal conductor eléctrico ocurre debido a que la contaminación introduce una trayectoria conductiva entre dos bobinas adyacentes de diferente potencial y a menudo de diferentes fases.

Como un resultado del canal conductor, pueden surgir descargas parciales y atacar el aislamiento groundwall sobre la superficie. Puede ocurrir deterioro permanente fase-a-fase o fase-a-neutro y es posible una falla eventual del aislamiento groundwall. La condensación de la humedad en la sección de la ranura puede conducir a problemas si un generador ha estado sin operar, el aceite tiende a disolverse y aflojar los componentes del sistema de aislamiento y puede captar polvo el cual reduce la transferencia de calor de la superficie del devanado reduciendo de esta manera la vida del aislamiento. En generadores no sellados, aceite en combinación con polvo, pueden obstruir los pasajes de aire de enfriamiento y causar sobrecalentamiento.

- Espacio inadecuado

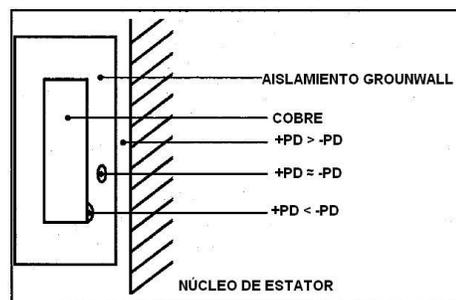
Con el fin de reducir el tamaño de las bobinas o barras y ahorrar cobre o reducir pérdidas, los fabricantes ocasionalmente fallan en dejar espaciados adecuados entre bobinas en el área de los extremos del devanado, si se tienen dos componentes adyacentes de diferentes fases con espaciado insuficiente entre ellos, es altamente posible que ocurra actividad de descargas parciales entre los dos. En máquinas enfriadas por aire esto deja residuos de polvo blanco. Estas descargas erosionarán lentamente el aislamiento groundwall y eventualmente lo perforará.

Entre más cercanas estén las bobinas o componentes, más pronto será la falla. Generalmente, estas fallas fase-a-fase toman varios años en suceder, pero producen grandes cantidades de ozono en máquinas enfriadas por aire. La combinación de espaciado inadecuado y una operación en ambientes contaminados pueden proveer una condición ideal para actividad de descargas parciales.

2.1.5.3. Tipos de descargas parciales según el mecanismo de falla

“Modelar las características actuales de una descarga es difícil ya que las dimensiones del hueco, el gas y la presión de este, la inductancia, capacitancia, geometría, entre otros temas pueden afectar la magnitud y frecuencia del pulso”.⁴⁴

Figura 26. Polaridad del pulso basado en la ubicación del vacío



Fuente: PD Seminar, Basic PD Theory Detection of PD, PD characteristics. p. 9.

Sin embargo, hay algunas características básicas del pulso que dependen del mecanismo de falla que las propicia y que pueden ser predichas basándose en la ubicación del vacío como se muestra en la figura 26.

- Vacíos dentro del aislamiento

Las máquinas que no han sido impregnadas apropiadamente o que han estado funcionando por varios años a altas temperaturas tienden a desarrollar vacíos dentro del aislamiento.

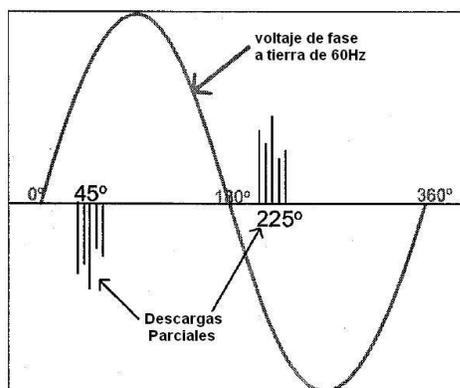
⁴⁴ PD Seminar, Basic PD Theory Detection of PD, PD characteristics. p.8.

Como se describió anteriormente, las descargas parciales ocurrirán a través de ese vacío cuando la condición de sobrevoltaje exista y un electrón libre esté presente.

Una vez que ocurre la descarga parcial, el voltaje a través del hueco se estabiliza al nivel requerido para mantener la actividad de descarga. Durante este proceso, las cargas dentro del vacío se redistribuirán de acuerdo a la carga aplicada.

Como el ciclo de corriente alterna revierte la polaridad, estas cargas causarán otra condición de sobrevoltaje en la polaridad opuesta y entonces ocurrirá otra descargas parcial. Si ambos lados del vacío tienen materiales similares de aislamiento, entonces la distribución de la carga será igual durante los ciclos positivo y negativo. En teoría, (como se muestra en la figura 27) habrá dos pulsos de descargas parciales observables en cada ciclo de corriente alterna de igual magnitud y polaridad opuesta por vacío dentro de la masa del aislamiento.

Figura 27. **Vacíos dentro del aislamiento**



Fuente: PD Seminar, Basic PD Theory Detection of PD, PD characteristics. p. 9.

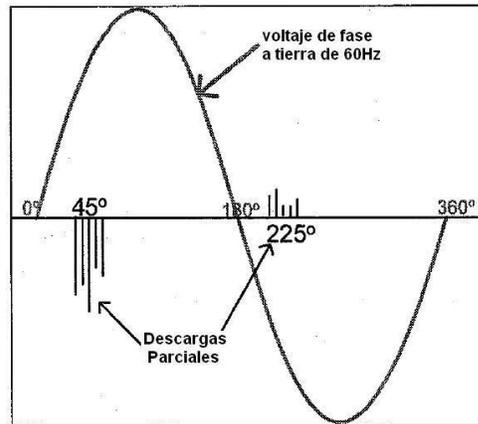
Estos pulsos se agrupan en las posiciones clásicas de pulsos dependientes de fase a tierra, esto es, pulsos negativos a 45 grados y pulsos positivos a 225 grados con referencia al voltaje fase-tierra de 60 hertz.

- Vacíos cercanos a los conductores

Una máquina que frecuentemente se carga y descarga (ciclo de carga) o que se recalienta severamente, desarrolla vacíos cerca de los conductores de cobre. Un vacío entre el conductor de cobre y el aislamiento, exhibe un fenómeno diferente a aquellos que se encuentran en la masa del aislamiento. Aunque los mecanismos básicos de ruptura son los mismos, a causa de que los electrodos son de distintos materiales ocurre un predominio en la polaridad.

La movilidad de los iones positivos en la superficie del aislamiento es menor que la de los iones negativos en la superficie del conductor. El resultado es el predominio de iones negativos migrando a través del hueco hacia la superficie positiva del aislamiento. En este caso habrá, usualmente, un predominio observable de pulsos de descargas parciales negativos agrupados a 45 grados durante el ciclo positivo de corriente alterna, como se muestra en la figura 28.

Figura 28. **Vacíos cercanos a los conductores**

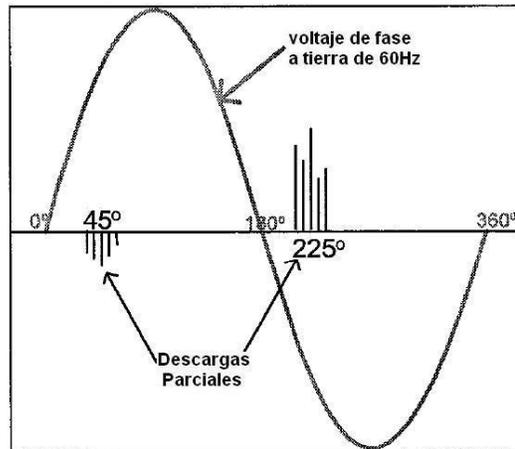


Fuente: PD Seminar, Basic PD Theory Detection of PD, PD characteristics. p.10.

- Vacíos cercanos al hierro del núcleo

Bobinas flojas, cintas o pintura semiconductiva de baja calidad y problemas con la interfase de graduación/semiconducción pueden causar descargas en la superficie entre las barras del estator y el hierro del núcleo aterrizado, llamadas descargas de ranura. Como con aquellas cercanas a los conductores de cobre, estas descargas ocurren entre electrodos hechos de diferentes materiales. Aquí las cargas positivas inmóviles en el aislamiento y las cargas móviles negativas del electrodo metálico a tierra, hacen que los pulsos ocurran durante el ciclo negativo de la corriente alterna. Como el electrodo metálico está a tierra, los pulsos de descargas parciales observables serán predominantemente positivos agrupados a 225 grados, como se muestra en la figura 29.

Figura 29. Vacíos cercanos al núcleo del estator



Fuente: PD Seminar, Basic PD Theory Detection of PD, PD characteristics. p.10.

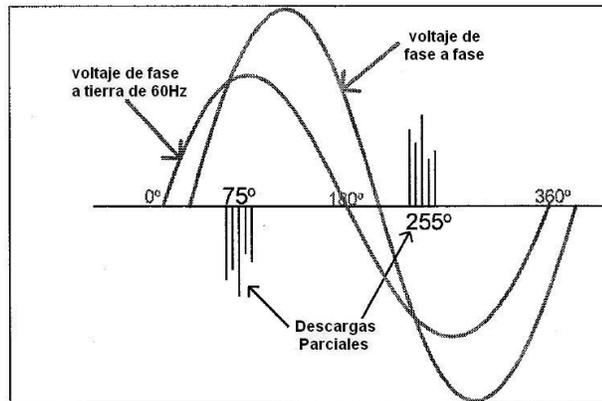
- Descargas de fase a fase

La contaminación o el espaciado inadecuado en el área de extremos de devanados o en los cables de terminales del generador pueden producir una actividad de descarga parcial en estas áreas. A diferencia de los pulsos descritos previamente que son dependientes del voltaje fase-tierra, estos pulsos se basan en el voltaje fase-fase.

Aunque estos pulsos tienden a ser muy erráticos, es posible, a veces, distinguirlos de otros, observando su ubicación con referencia al voltaje fase-tierra.

Típicamente, a causa de la dependencia de voltaje de fase a fase hay un desplazamiento de fase de 30 grados desde las posiciones clásicas, asociadas con pulsos que son dependientes del voltaje fase-tierra, como se muestra en la figura 30.

Figura 30. **Descargas fase a fase**



Fuente: PD Seminar, Basic PD Theory Detection of PD, PD characteristics. p. 10.

Los pulsos fase-fase tienden a agruparse a 15, 75, 195 y 255 grados, basados en la ubicación de los pulsos y la rotación de fase de la máquina. Algunas veces es posible determinar cuáles son las dos fases involucradas, pero más frecuentemente, es difícil extraer esa información de los pulsos detectados, en forma precisa.

2.1.6. Detección de descargas parciales en línea en generadores de potencia

“Los principios de medición están basados sobre un proceso de conservación de energía asociado con las descargas eléctricas tales como: emisión de ondas electromagnéticas, luz, sonido o formación de compuestos químicos. La más antigua y simple pero la menos sensitiva forma es el método de escuchar un sonido como de silbido proveniente de las descargas parciales”.⁴⁵

⁴⁵ STONE, Greg C. Electrical Insulation for Rotating Machines. p. 295.

Un alto valor de factor de pérdida $\tan \delta$ es una indicación de que hay descargas parciales en el aislamiento del devanado. Esta es también una medición no muy confiable ya que hay pérdidas adicionales generadas debido a la aplicación de alto voltaje, las que son localizadas pueden ser muy pequeñas en comparación al volumen de las pérdidas resultantes del proceso de polarización.

“Los procesos ópticos son usados sólo para los materiales de aislamiento que son transparentes y por lo tanto no es aplicable a todos los tipos de materiales. Métodos de detección acústica usando transductores ultrasónicos pueden ser usados con algo de éxito. Los más modernos y más exactos métodos son los eléctricos, el principal objetivo de estos es separar las corrientes asociadas con las descargas parciales de cualquier otro fenómeno”.⁴⁶

Saber que existen descargas parciales es bueno, pero detectarlas es mejor aún y lo importante es utilizar la información que se obtenga para comprobar la condición del generador, así realizar cualquier mantenimiento y reparación que sean necesarias. Para descargas parciales, ya se analizó que la magnitud depende del tamaño del vacío, que la cantidad está relacionada con el número de vacíos y que algunas veces la polaridad y la posición de la fase pueden identificar la ubicación de los vacíos.

Ahora sólo falta indicar cómo detectar la magnitud, cantidad, polaridad y posición de la fase con referencia al voltaje fase-tierra de las descargas parciales originadas dentro del devanado, sin detectar los pulsos de alta frecuencia de otras fuentes.

⁴⁶ WADHWA, C.L. High Voltage Engineering. p. 181.

La detección de las descargas parciales involucra la medición de cuatro características de los modelos de descargas parciales:

- Magnitud de descargas parciales: lo cual se refiere al tamaño o volumen de los vacíos.
- Conteo de pulsos de descargas parciales: lo que se refiere al número de vacíos o defectos.
- Polaridad de descargas parciales: es lo que se refiere a la ubicación de los vacíos dentro de la masa del aislamiento.
- Posición relativa al voltaje fase tierra de las descargas parciales: referido a la ubicación de los defectos tanto en la ranura como en los extremos de devanados.

2.1.6.1. Sensores de descargas parciales

“Los sensores de descargas parciales montados de manera permanente bloquean la señal eléctrica de Corriente Alterna y sus armónicos, pero dejan pasar los pulsos de descargas parciales de alta frecuencia”.⁴⁷ Durante el funcionamiento normal, un buen instrumento conectado a los sensores separa el ruido y clasifica apropiadamente las descargas parciales. El tipo de instalación de sensores y el instrumento de prueba que se utiliza dependen de la máquina o equipo a ser monitoreado.

⁴⁷ IEEE Trial- Use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery. p. 42.

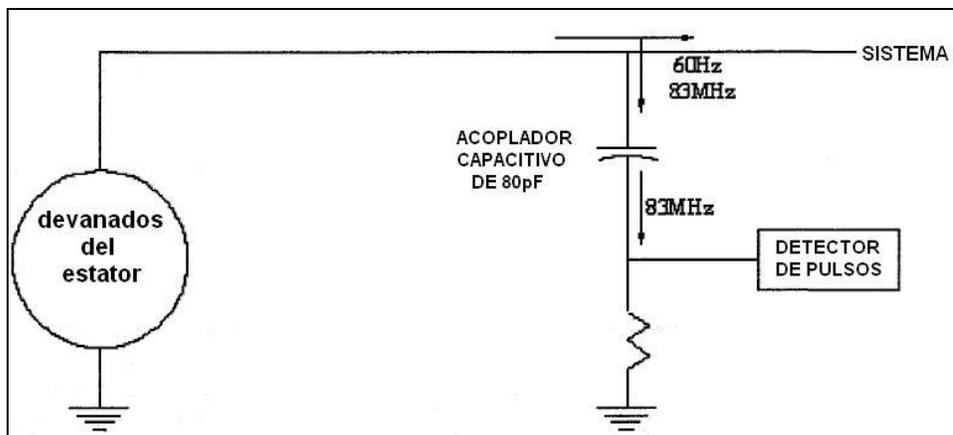
El primer paso hacia la detección de descargas parciales es la instalación de sensores en un lugar cercano a la fuente de las descargas parciales, los cuales son acopladores capacitivos.

Los acopladores capacitivos utilizados son típicamente de 80 picofaradios +/- 3 picofaradios. Estos acopladores bloquean la señal de 60 hertz y pasan la señal de descargas parciales de alta frecuencia, como se muestra en la figura 31. Resulta obvio comparando la impedancia de un capacitor de 80pF a una frecuencia nominal de 60 hertz a una frecuencia típica de descargas parciales (≈ 83 megahertz).

$$X_c(60) = 1/2\omega C = 1/2\pi(60)(80 \times 10^{-9}) = 33 \text{ M}\Omega$$

$$X_c(83) = 1/2\omega C = 1/2\pi(83 \times 10^6)(80 \times 10^{-9}) = 24 \text{ }\Omega$$

Figura 31. **Ubicación del acoplador capacitivo**



Fuente: PD Seminar, Basic PD Theory Detection of PD, PD characteristics. p. 14.

Estos capacitores de acoplamiento normalmente son robustos y confiables presentando mínimo riesgo para la maquinaria en la cual se van a instalar (ya que si fallarán provocarían un corto de línea a neutro).

Están fabricados con tolerancias eléctricas mínimas y son libres de efecto corona a niveles superiores de los voltajes que normalmente se encuentran en las máquinas en funcionamiento.

Estos capacitores se instalan permanentemente a la fase, a la barra de la fase o a los anillos de los circuitos. Al conectar los acopladores a estos puntos de alto voltaje estos permanecen muy cerca de las áreas que tienen la actividad más alta de descargas parciales en el devanado. Como las descargas parciales dependen del voltaje aplicado, por lo tanto, sólo las bobinas de final de línea tienen probabilidad a tener actividad de descargas.

2.1.6.2. Filtros

Esta prueba por ser en línea, con todas las condiciones de operación de los generadores, hasta hace poco tiempo era difícil de llevar a cabo debido a la presencia de ruido eléctrico en un sistema de potencia el cual tiene características similares a las descargas parciales. El ruido eléctrico proveniente de la operación de herramientas eléctricas, corona causada por los conmutadores y las fuentes de frecuencias de radio, etcétera, se confunde fácilmente con las descargas parciales de los devanados de las máquinas. Esto puede llevar a errores de diagnóstico haciendo que se tomen como deteriorados los devanados en buenas condiciones, disminuyendo así la credibilidad de los resultados de la prueba.

Las pruebas en línea se han mejorado y se han desarrollado de modo que se puede reducir significativamente la influencia del ruido, conduciendo a una indicación más confiable de la condición del aislamiento del generador. Los instrumentos modernos utilizan varios métodos de separación del ruido, estos son por medio de frecuencia, por impedancia desigual, por tiempo de arribo de los pulsos y por la forma del pulso.

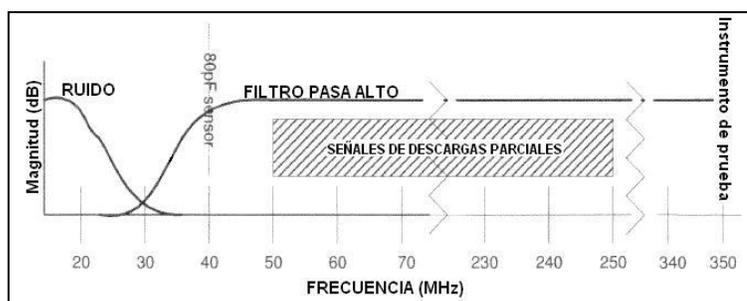
- Frecuencia

Una de las formas más efectivas de eliminar el ruido es hacer pruebas a frecuencias lo suficientemente elevadas para que sólo se detecten pulsos de descargas parciales de frecuencias > 50 megahertz, y los pulsos de ruido de frecuencias bajas < 20 megahertz sean eliminados. La clave está en seleccionar un rango de frecuencia apropiado de manera tal que el coeficiente señal-ruido (CSR) sea tan alto que sólo las señales de descargas parciales puedan ser detectadas, sin posibilidad de detectar pulsos de ruido.

Los sensores establecen el límite del nivel bajo de la frecuencia. Los sensores de 80 picofaradios terminados a una impedancia de 50 ohmios, limitan la banda de detección de baja frecuencia a 40 megahertz. A esta frecuencia la señal de ruido es virtualmente eliminada y por lo tanto el coeficiente señal-ruido es extremadamente alto, limitando al sensor para que sólo detecte señales de alta frecuencia, reduciendo un poco la cantidad total de energía de descargas parciales, pero se elimina la necesidad de recurrir a un experto para discriminar entre ruido y descargas parciales. La idea es tener una prueba que pueda ser realizada y analizada por una persona no experta.

El segundo nivel de control de frecuencia son los instrumentos de prueba, los cuales tienen una amplitud de banda de 0,1 - 350 megahertz. Capaces de detectar el tiempo de elevación rápido de los pulsos iniciales y las frecuencias altas (50 - 250 megahertz) típicas de descargas parciales originadas en el devanado. Utilizando la frecuencia de cierre de 40 megahertz del sensor y la limitación de frecuencia superior de 350 megahertz del instrumento, se monitorea la banda de frecuencia de 40 - 350 megahertz. Como se muestra en la figura 32, esto permite la detección del tiempo de elevación rápido de los pulsos de descargas parciales sin interferencia de ruido.

Figura 32. **Característica de la frecuencia**



Fuente: PD Seminar, Basic PD Theory Detection of PD, PD characteristics. p. 17.

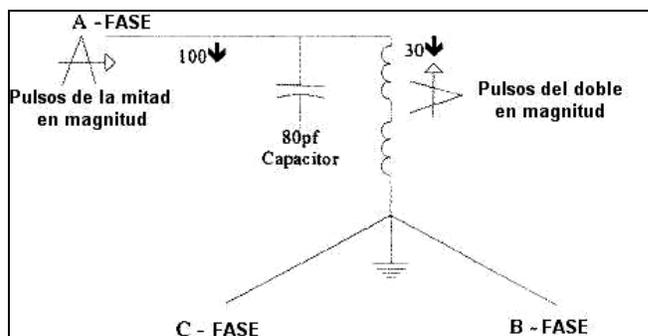
Las señales de alta frecuencia se atenúan bastante rápido dentro del devanado así que sólo los pulsos que ocurren a través de los vacíos o huecos, en las bobinas que están cerca de la parte de alto voltaje del devanado serán detectados con la prueba de alta frecuencia, por ejemplo, > 40 megahertz.

Sin embargo, como se ha establecido anteriormente, los pulsos a través de los huecos son altamente dependientes del voltaje de fase a tierra aplicado, por lo tanto, las bobinas que están cerca del final de alto voltaje son las más probables a tener descargas parciales. Ya que la mayoría de las fallas ocurren en estas bobinas y los mecanismos comunes de falla afectan al devanado completo, las pruebas de alta frecuencia son muy acertadas en la detección de mecanismos de falla.

- Impedancia desigual

Otro método para la separación de ruido es utilizar la tendencia natural del pulso de alta frecuencia a distorsionarse cuando atraviesa un conductor de un nivel de impedancia (característica) de sobretensión hacia otro o a través de una impedancia diferente. El efecto es un cambio en la magnitud (atenuación) y el aumento en el tiempo de elevación (frecuencia) del pulso. Como la impedancia típica de sobretensión del anillo de un circuito es 100 ohmios y la de la bobina es 30 ohmios, un pulso de alta frecuencia que viaja a través de este empalme, será alterado figura 33.

Figura 33. **Impedancia desigual**



Fuente: PD Seminar, Basic PD Theory Detection of PD, PD characteristics. p. 17.

Un pulso que se origina en el devanado casi se duplicará en magnitud a medida que viaja desde una bobina de baja impedancia a un bus de alta impedancia. Mientras tanto, los pulsos del sistema (ruido) se atenuarán a la mitad de la magnitud original viajando de un bus de alta impedancia a una bobina de baja impedancia.

A causa de este fenómeno, los cables de alto voltaje de los capacitores de detección deben ser fijados en el devanado tan cerca como sea posible (menos de un metro) al empalme de la primera bobina con el anillo del circuito. Los sensores colocados en esta posición tendrán un máximo de sensibilidad a las descargas parciales del generador y un máximo de atenuación para el ruido.

- Tiempo de arribo de pulsos

Quizás el medio más efectivo para eliminar el ruido dentro de la frecuencia de descargas parciales es a través del método de tiempo de llegada. Aunque este método requiere esfuerzo extra durante la instalación, asegura que los pulsos externos sean clasificados como ruido. Pueden utilizarse dos configuraciones de instalación para la separación por tiempo de llegada: diferencial y direccional.

- Separación diferencial del ruido

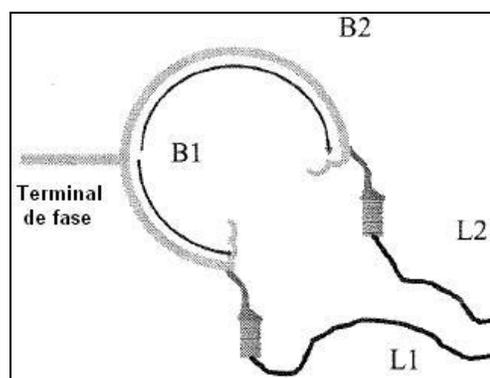
En los hidrogenadores, se ubican pares de acopladores en una fase y la longitud de los cables que conducen las señales se ajusta de tal manera que cualquier pulso del sistema (ruido) detectado por los dos acopladores llega al instrumento de manera simultánea.

El instrumento hará una comparación diferencial del tiempo de llegada junto con la forma, tamaño y polaridad del pulso, consecuentemente separando el ruido de las descargas parciales de la máquina.

Los lugares óptimos para el emplazamiento de los acopladores en el generador dependen de la disposición del devanado del estator. Si no existe el espacio físico, puede no ser posible instalar pares de acopladores en lugares que separen mejor los efectos del ruido externo.

El estilo diferencial de instalación del acoplador puede ser hecho en generadores que tengan por lo menos un metro de anillo de bus en cada uno de los paralelos a ser monitoreados, para una distancia total entre acopladores de por lo menos 2 metros. Para máquinas con longitud insuficiente de anillos de circuito, se recomienda una instalación direccional, figura 34.

Figura 34. **Separación de ruido por tiempo de llegada diferencial**



Fuente: PD Seminar, Basic PD Theory Detection of PD,PD characteristics. p. 18.

En máquinas de menos de 100 megawatts se instalan generalmente dos acopladores. Uno al final de cada uno de los distintos circuitos paralelos del estator. Si un generador tiene más de dos paralelos por fase, es posible instalar un acoplador en cada paralelo para una cobertura extra del devanado. Esto se acostumbra en unidades grandes (> 100 megawatts) o para unidades pequeñas muy importantes donde se justifica el costo extra. Cuando se realiza el calibrado de máquinas con más de dos acopladores por fase, los acopladores se aparean para el calibrado y para la adquisición de datos. Los instrumentos de prueba separan los pulsos de acuerdo con el criterio de tiempo de llegada indicado en la tabla I.

Tabla I. **Calibración de sistema, de manera que $B1 + L1 = B2 + L2$**

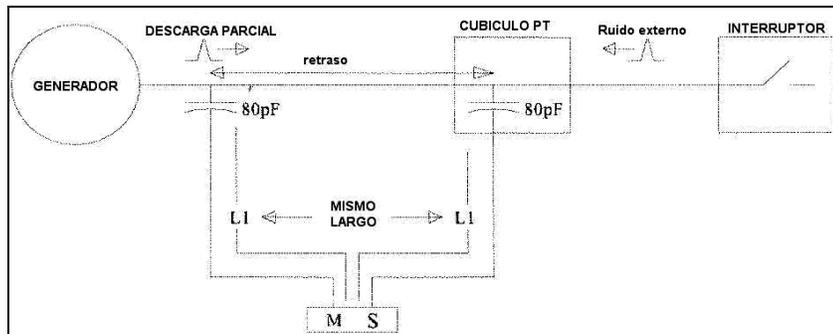
Clasificación	Sensor C1	Sensor C2
C1	L1	B1+B2+L2
C2	B2+B1+L1	L2
Ruido*	B1+L1	B2+L2

Fuente: PD Seminar, Basic PD Theory Detection of PD, PD characteristics. p. 18.

- Separación direccional del ruido

Si no hay anillo del circuito o el anillo es menos de 2 metros de largo (según se requiere para el estilo diferencial) una instalación direccional es necesaria. Para una instalación direccional, un acoplador (generador) se coloca tan cerca como sea posible del empalme entre la bobina de final de línea y el anillo del circuito. El segundo acoplador (red) se instala en el bus de la fase, en un lugar conveniente hacia el sistema y por lo menos a dos metros del primer acoplador, figura 35.

Figura 35. Separación direccional de ruido en base al tiempo de arribo



Fuente: PD Seminar, Basic PD Theory Detection of PD, PD characteristics. p. 18.

El calibrado involucra la medición del tiempo de demora o el tiempo que le toma a un pulso de elevación rápida (alta frecuencia), viajar entre los acopladores de una misma fase. En una instalación direccional, el ruido del sistema llega a los acopladores desde la misma dirección al final de ambos cables de señal, en lugar de arribar desde direcciones opuestas tal como en el caso del estilo diferencial.

L1 representa el tiempo en nanosegundos que le toma a un pulso viajar a través de los cables de señal. Para una instalación direccional, los cables de señal son de la misma longitud; por lo tanto, L1 es igual para ambos acopladores, retraso o demora es el tiempo en nanosegundos que le toma a un pulso viajar a través del bus entre dos acopladores.

El instrumento de prueba separa los pulsos de acuerdo al criterio de tiempo de llegada indicado en la tabla II.

Tabla II. **Ruido del sistema y del bus se muestran juntos como ruido total del sistema**

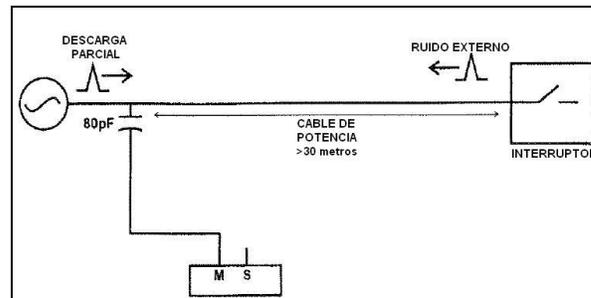
Clasificación	Sensor de la Máquina	Sensor del Sistema
Unidad DP	L1	L1 + demora
Ruido del Sistema	L1 + demora	L1
Ruido del Bus	L1 + <demora	L1 + <demora

Fuente: PD Seminar, Basic PD Theory Detection of PD, PD characteristics. p. 19.

- Forma de pulsos

En algunas instalaciones, la unidad está conectada al sistema de tensión eléctrica a través de un cable relativamente largo. Si el cable es de 30 metros de largo o más, los pulsos de ruido de alta frecuencia del sistema de tensión pueden ser atenuados y dispersados severamente. Si el pulso tiene un tiempo de elevación rápido, entonces, probablemente se trate de descargas parciales. Si el pulso tiene un tiempo de elevación lento, entonces se tratará de ruido. En estos casos solamente un acoplador por fase y tres por unidad es necesario. Este tipo de instalación se le llama a menudo como instalación de un solo acoplador donde no se requiere calibración, aunque se recomienda una prueba de sensibilidad tal y como se indica en la figura 36.

Figura 36. **Un solo acoplador por fase**



Fuente: PD Seminar, Basic PD Theory Detection of PD, PD characteristics. p. 20.

2.1.6.3. **Sistema de recolección de datos**

El concepto de las ventajas de las pruebas en línea se fundamenta en el hecho de que las pruebas se realizan bajo condiciones de trabajo nominal y sin necesidad de detener al generador, por lo que es ideal que los sensores de descargas parciales permanezcan instalados y conectados a las líneas de alto voltaje para ser utilizados por los sistemas de recolección de datos en cualquier momento, ya sea de forma programada o por si existiera alguna necesidad de chequear el correcto funcionamiento.

Los sistemas de recolección de datos pueden ser permanentes o recurrentes, esto depende de la criticidad que se le asigne a estas pruebas o como una práctica común, es que las pruebas recurrentes pueden ser practicadas en los primeros años de uso del generador y con base a las tendencias de los datos de estas pruebas, pensar en migrar a un sistema permanente.

En caso el sistema de recolección de datos sea recurrente, la prueba consiste en conectar el equipo a los sensores por medio de cables especiales, dejar que se recolecten los datos durante el tiempo estipulado por el fabricante y posteriormente descargar los datos a una computadora.

“En el caso de un sistema permanente, como su nombre lo indica, este constantemente recolecta los datos y los almacena en su base de datos. Para cualquiera de los dos tipos de sistemas, los datos a adquirir son similares”.⁴⁸

Los equipos digitales para detectar descargas parciales y almacenar sus características están basados en general sobre sistemas de medición analógica o instrumentos para la medición de la carga descargada en cada descarga parcial; seguido de un sistema de adquisición y procesamiento digital. Estas partes digitales del sistema son entonces utilizadas para procesar señales analógicas para evaluaciones posteriores, para almacenar cantidades relevantes y para desplegar los resultados de las pruebas.

“El objetivo principal de aplicar técnicas digitales a la medición y detección se debe a la necesidad de grabar en tiempo real al menos la mayoría de pulsos de descargas parciales consecutivas por su carga aparente q_i ocurriendo en un instante de tiempo t_i y sus valores instantáneos del ángulo de fase de ocurrencia dentro del ciclo de voltaje. Ya que la calidad del hardware y software usados pueden limitar la exactitud y resolución de las mediciones de los parámetros, el estándar IEC 60270 provee algunas recomendaciones y requerimientos los cuales son relevantes para la captura y registro de las secuencias de descarga”.⁴⁹

⁴⁸ PD Seminar, Basic PD Theory Detection of PD, PD characteristics. p. 16 - 22.

⁴⁹ E. KUFFER, High Voltage Engineering. p. 211.

Los datos adquiridos y almacenados por estos sistemas pueden ser la amplitud de las descargas parciales positivas y negativas, la cantidad de repeticiones de estas por segundo y los valores máximos (positivos y negativos) de las descargas parciales. Algunos sistemas también adquieren datos como máximos, mínimos, promedio y desviación estándar de los datos diarios, también estos datos de modo mensual.

2.1.6.4. Interfase a la computadora

El sistema de recolección de datos almacena valores de forma binaria, para adquirir los datos y analizarlos posteriormente se requiere de un software propietario, el cual debe estar instalado en una computadora.

Para el caso de un sistema de pruebas recurrente, estos datos podrían ser descargados por una computadora portátil conectándolo directamente al equipo recolector y para el caso de un equipo de medición permanente los datos también pueden descargarse periódicamente por una computadora portátil o por medio de una red para recibir constantemente los datos desde este equipo en una computadora de escritorio.

Los datos pueden ser vistos y analizados por medio del uso de las funciones del software, el cual dependiendo del fabricante, se pueden desplegar de forma amigable y entendible.

2.2. Implementación de la detección de descargas parciales como mantenimiento predictivo a generadores de potencia

En la planta Generadora Eléctrica del norte Ltda. (Genor) hay cuatro generadores ABB de 14,35 megavatios, con voltaje nominal de 13,8 kilovoltios, 600 revoluciones por minuto; los cuales son enfriados por aire el cual es movido por ventiladores que están acoplados directamente a sus rotores. En estos generadores, el aislamiento del devanado del estator es de mica lo cual en ABB es llamado Micadur; además, el estator completo fueron impregnados con el sistema VPI. Como se indicó anteriormente, la planta entró en operación en 1998 y durante el tiempo que lleva de operación, las actividades de mantenimiento que se le han practicado a los generadores han sido del tipo preventivo principalmente.

En el presente proyecto de EPS, el objetivo es la implementación de un sistema de mantenimiento predictivo para el aislamiento del devanado de los generadores de Genor, con base a la calendarización indicada en la tabla III, la cual tiene como primer mes a noviembre de 2009.

Tabla III. **Cronograma de actividades del proyecto de EPS**

ACTIVIDAD	MES 1				MES 2				MES 3				MES 4				MES 5				MES 6			
	S1	S2	S3	S4																				
DETERMINACIÓN DE MATERIAL AISLANTE DE GENERADOR																								
SELECCIÓN DE EQUIPOS																								
DETERMINACIÓN DETECCIONES POR DP																								
FASE DE INVESTIGACIÓN																								
COTIZACIÓN DE EQUIPOS																								
COMPARACIÓN DE PRUEBA DP ANTE OTRAS																								
ENTRENAMIENTO DE SUPERVISOR ELÉCTRICO																								
CAPACITACIÓN DE WINDOWS DE PERSONAL																								
CURSO INTRODUCTORIO A DP PARA PERSONAL																								
COMPRA DE EQUIPOS																								
INSTALACIÓN DE EQUIPOS EN G's																								
CAPACITACIÓN DE TOMA DE DATOS CON EQUIPO																								
CURSO ANÁLISIS DE DATOS, REPORTE Y TENDEN																								
DESARROLLO DE PLAN DE MANTENIMIENTO																								
CREACIÓN DE TENDENCIAS Y REPOTES																								

Fuente: elaboración propia.

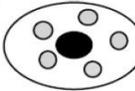
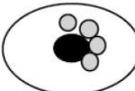
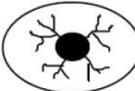
Se decide buscar algún método de monitoreo de la condición del aislamiento de los generadores, que pueda ser llevado a cabo en cualquier momento, que no requiera de paros de maquinaria y personal especializado, para realizar las mediciones e interpretar los datos, también se hace mención de varias pruebas que se le hacen a los generadores, de estas pruebas se analizaron las que se realizan específicamente para devanados del estator, de las cuales la inclinación fue hacia la prueba de descargas parciales en línea.

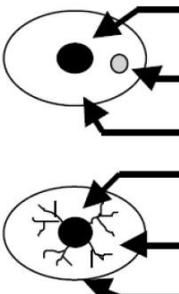
2.2.1. Comparación ante otras pruebas para generadores de potencia

En esta sección se intenta dar una comparación de la prueba de detección de descargas parciales ante otras pruebas tradicionales y otras modernas que se realizan en el país.

La tabla IV ilustra la relación relativa entre los resultados de las pruebas de descargas parciales y los métodos tradicionales de pruebas para determinar la condición del aislamiento de un generador. El modelo del estado del aislamiento, contenido en la primera columna, ilustra los conductores de cobre internos, el sistema de aislamiento y las diferentes formaciones de vacíos y trayectorias que se pueden formar en el sistema de aislamiento.

Tabla IV. Prueba de descargas parciales relacionadas con otras pruebas clásicas

ESTADO DEL AISLAMIENTO	CONDICIÓN REAL DEL AISLAMIENTO	PRUEBA DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO	PRUEBA DE INDICE DE POLARIZACIÓN	PRUEBA DE ALTO POTENCIAL	PRUEBA DE DESCARGAS PARCIALES
	BUENO	ALTA	BUENO	LA CORRIENTE LINEAL DE FUGA VRS. VOLTAJE ES MÍNIMA	ACTIVIDAD DE DESCARGAS PARCIALES NO MEDIBLE
	MARGINAL	ACEPTABLE	ACEPTABLE	LA CORRIENTE LINEAL DE FUGA VRS. VOLTAJE ES ESTABLE	ACTIVIDAD DE DESCARGAS PARCIALES MÍNIMAS, BALANCEADAS LAS DESCARGAS POSITIVAS Y NEGATIVAS
	SECO PERO EL AISLAMIENTO ESTÁ DESLAMINÁNDOSE	FALSOS RESULTADOS ACEPTABLES	FALSOS VALORES ACEPTABLES	FALSOS VALORES DE CORRIENTE DE FUGA VRS. VOLTAJE	DESCARGAS PARCIALES OBSERVADAS, POR LO QUE EXACTAMENTE MUESTRA PROBLEMAS DE AISLAMIENTO LOS CUALES SON DESACIERTOS DE LAS PRUEBAS TRADICIONALES
	POBRE. LIMPIEZA O REIMPREGNACIÓN ES REQUERIDA	BAJO	POBRE	ALTA CORRIENTE DE FUGA. PUEDE REQUERIRSE QUE SE LIMITE EL VOLTAJE DE PRUEBA. FALLA POTENCIAL DEL AISLAMIENTO DURANTE LA PRUEBA.	ALTA ACTIVIDAD DE DESCARGAS POSITIVAS INDICANDO UN TRACKING SUPERFICIAL
	INACEPTABLE. SE REQUIERE REPARACIÓN MAYOUR O REEMBONADO	BAJO	POBRE		ALTA ACTIVIDAD DE DESCARGAS NEGATIVAS INDICANDO VACÍOS INTERNOS CERCANOS A LOS CONDUCTORES
	CONDICIÓN CERCANA A LA FALLA, ARQUEO DE DESCARGAS PARCIALES CAUSADAS POR ACUMULACIÓN DE CARBÓN	MUY BAJO	MUY BAJO	CORRIENTE DE FUGA ALTA Y PROBABLE FALLA DURANTE LA PRUEBA	ACTIVIDAD DE DESCARGA PARCIAL MÍNIMA. EL ARQUEO DE DESCARGAS PARCIALES HA PROGRESADO AL PUNTO DONDE EL DAÑO PERMANENTE OCURRE



CONDUCTOR INTERNO DE COBRE

VACÍO EN EL AISLAMIENTO EXPERIMENTANDO DESCARGAS PARCIALES

SUPERFICIE EXTERNA DEL AISLAMIENTO

CONDUCTOR INTERNO DE COBRE

TRACKING (RAMALES) RESULTANTE DE LAS DESCARGAS PARCIALES

SUPERFICIE EXTERNA DEL AISLAMIENTO

Fuente: elaboración propia.

La segunda columna denomina la condición actual del aislamiento. La tercera, cuarta y quinta columnas indican los resultados esperados con los métodos de prueba tradicionales siguientes: prueba de resistencia de aislamiento, la prueba de índice de polarización y la prueba de alto potencial corriente directa. La quinta columna incluye los resultados esperados usando el método de detección de descargas parciales.

Para un aislamiento considerado Bueno o Marginal los resultados son similares para todos los métodos. Para aislamiento el cual es seco pero delaminado, los métodos de prueba tradicionales aquí indicados proporcionarían una falsa sensación de una condición aceptable; mientras que la prueba de detección de descargas parciales indicará la presencia de vacíos internos en el aislamiento. Condiciones de aislamiento pobre o inaceptable no pueden ser diferenciadas con los métodos tradicionales de prueba mencionados; mientras que la prueba de descargas parciales identifica las regiones en donde se pueden ubicar los vacíos en el aislamiento y proporciona una idea de las acciones correctivas apropiadas.

La prueba tradicional de alto potencial (Hi-Pot) puede causar fallas del aislamiento durante el período de prueba, perforándolo.

2.2.2. Selección de un sistema de detección de descargas parciales

Posteriormente a la toma de decisión por un sistema de detección de descargas parciales en línea, se inició el proceso de selección de la marca de los equipos a adquirir con base a tecnología, prestaciones y experiencia.

Se consultaron fuentes sobre el tema tales como el estándar IEEE 1434 y el IEEE 56 para comprender lo que un buen sistema de detección de descargas parciales debería ofrecer. En tales lecturas se encontró que un fabricante de equipos de detección de descargas parciales ha trabajado mucho en conjunto con la IEEE en la investigación sobre descargas parciales, tal fabricante se llama Iris Power al cual se invitó para que cotizara.

En total se cotizó con tres marcas del mercado internacional; tales cotizaciones y negociaciones están fuera del alcance de este documento. La marca elegida fue Iris Power por la tecnología que ofrece, la base de datos con que cuenta la cual asciende a 165 000 resultados de pruebas a más de 5 000 generadores y motores de gran tamaño y la experiencia que le respalda ya que cuentan con más de 30 años de desarrollo en el campo de las descargas parciales.

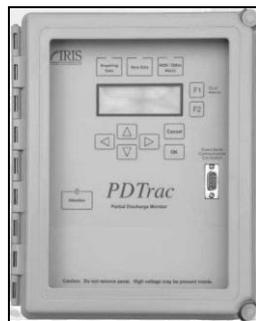
2.2.3. Diseño e instalación de un sistema de descargas parciales

Como se indicó a lo largo de la sección 2.1.6 de este documento, el instrumento que se debe elegir para la detección de descargas parciales es con base al método de separación del ruido eléctrico que se debe usar con base a la forma física de las terminales de salida del (de los) generador (es) y de la forma física de la conexión y cableado de este (os) hacia un bus o barra en donde se entrega la potencia generada.

Dado a que en Genor, los generadores se encuentran a más de 30 metros de la barra de conexión, como se indica en las secciones anteriores el tipo de instalación necesaria era la de un solo acoplador por fase.

“Para este tipo de instalación Iris Power tiene un instrumento digital específico el cual se llama PDTrac. El PDTrac es una pieza de ingeniería muy sofisticada que es realmente simple de usar, el diseño de la interface de usuario del instrumento es gran parte de esta facilidad de uso, se puede ver un equipo de estos en la figura 37, los botones frontales son usados para ingresarle toda la información que el instrumento necesita siempre y los datos recolectados pueden ser extraídos de este por medio de un software llamado PDTracPro. Su sistema es sensitivo a los mecanismos de falla más comunes en los devanados de estator, varios métodos de reducción del riesgo de falsas indicaciones se han diseñado e introducido dentro de su sistema”.⁵⁰

Figura 37. **Fotografía de un PDTrac de Iris Power**

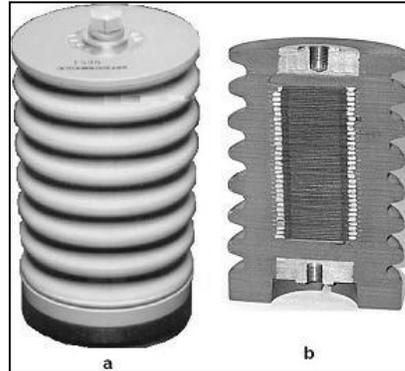


Fuente: planta Genor.

Los sensores específicos para esta instalación son del tipo acopladores capacitivos, los cuales son fabricados en epoxi mica (EMC por sus siglas en inglés) de 80 picofaradios para un voltaje nominal de 15 kilovatios, estos se pueden ver en la figura 38.

⁵⁰ PDTRAC. Install, Guide & User Manual. p. 8.

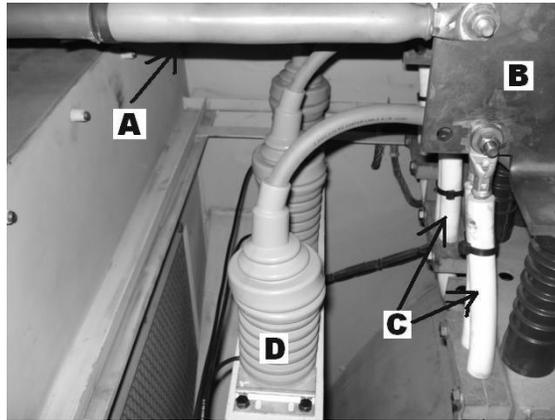
Figura 38. **Fotografía de un sensor EMC, sección de un sensor EMC de Iris Power**



Fuente: Installation Guide. Bus Couplers. (sl. Iris Power LP.2009.) p. 45.

En la instalación de un solo acoplador por fase, los sensores deben estar conectados lo más cercano posible a la conexión de las terminales del generador con las últimas bobinas del devanado del estator, como se puede ver en la figura 39. Los sensores fueron instalados en los cuatro generadores dentro de la caja de conexiones del generador y conectados sus extremos superiores a las terminales de salida del generador.

Figura 39. **Fotografía de la instalación de sensores en un generador**



- A) Cables de potencia de salida del generador
- B) Terminales del generador
- C) Cables de conexión a puntas de bobinas de estator
- D) Sensores EMC de Iris Power

Fuente: planta Genor.

Los extremos inferiores de los capacitores se conectaron a una caja de conexión como la que se puede ver en la figura 40, instalada en la parte exterior de los generadores, en esta caja es donde la parte inferior de cada uno de los capacitores se conectan a un nodo en donde está conectado un extremo de una resistencia de la cual el otro extremo está conectado a tierra, a este nodo de cada fase es donde se conecta el instrumento de detección de descargas parciales por medio de un cable coaxial.

Figura 40. **Fotografía de una caja de conexión instalada en el exterior de un generador**



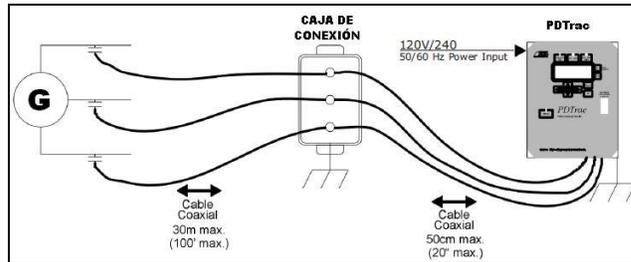
Fuente: planta Genor.

Entonces, en cada generador quedan montados y conectados permanentemente los sensores EMC y las cajas de conexión; el instrumento PDTrac es instalado itinerantemente en cada generador y conectado a él por medio de la caja de conexiones para realizar la recolección de datos durante el tiempo deseado.

2.2.4. Adquisición de datos de descargas parciales mediante el uso de interfase a computadora

Para que el instrumento PDTrac recolecte los datos de la detección de descargas parciales debe permanecer un tiempo conectado a la caja de conexiones del generador en prueba, como se puede apreciar en la figura 41.

Figura 41. Diagrama de conexión de PDTrac de Iris Power

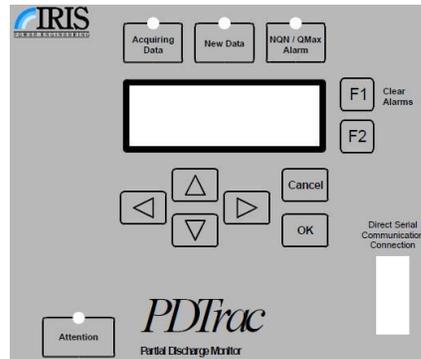


Fuente: PDTRAC. Install, Guide & User Manual. p. 76.

El PDTrac también es alimentado con 120 voltios de corriente alterna y se usa un UPS portátil que se conecta a un tomacorriente cercano. El PDTrac requiere de una pequeña parametrización para iniciar la recolección de datos por medio de los botones del panel frontal de este que se pueden apreciar en la figura 42.

En esta parametrización básica se ingresa la sensibilidad de medición del instrumento en un rango en microvoltios, se realiza el borrado de la memoria interna, se programan alarmas que se activan con base a valores límite de los que se recolecten y se activa el inicio de la recolección de datos.

Figura 42. **Panel frontal de PDTrac de Iris Power**



Fuente: PDTRAC. Install, Guide & User Manual. p. 74.

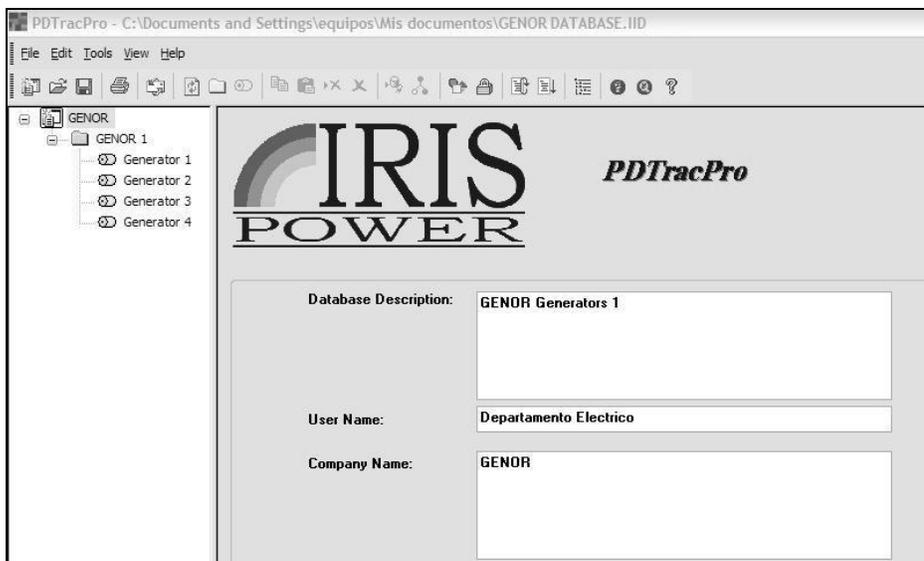
Los círculos blancos que se pueden ver en la parte superior de los cuatro cuadrados de color negro en la figura 42 son LED de indicación que tienen las siguientes funciones:

- **Acquiring Data:** se activa cuando el PDTrac está capturando datos, básicamente se activa cuando el PDTrac está en funcionamiento y el generador está en operación.
- **New Data:** se activa cuando el PDTrac tiene nuevos datos en su memoria interna.
- **NQN/QMax Alarm:** se activa si hay una alarma programada para valores altos de descargas parciales.
- **Attention:** se activa si hay alguna alarma propia del PDTrac, si este se sobrecalienta, si se llena la memoria o si el rango de medición está debajo de la magnitud de las descargas parciales.

Después de cumplir las horas deseadas de recolección de datos, al PDTrac se le descargan estos por medio de un interfase con una computadora portátil, para el PDTrac adquirido se utiliza un cable serial con conectores de 9 pines para RS-232 y el software PDTracPro que debe estar instalado en la computadora.

Para el presente proyecto, se creó una base de datos llamada Genor Database la cual se subdivide en cuatro folders, uno para generador, lo cual se aprecia en la figura 43.

Figura 43. **Pantalla inicial del software PDTracPro de Iris Power donde se visualiza la base de datos de Genor**



Fuente: Software PDTracPro de Iris Power.

Al seleccionar el folder de cualquier generador, se visualizan cuatro lengüetas, la primera llamada Information la cual al ser seleccionada despliega la información del generador la cual se ingresó cuando se creó la base de datos, ver figura 44.

Cuando se descargan los datos del PDTrac, se debe seleccionar el generador al que este está conectado ya que esta selección no es automática, se debe activar la conexión entre la computadora y el PDTrac usando la lengüeta Connection del software, aquí se encuentran parámetros básicos para lograr la comunicación, los cuales, después de ajustarse la primera vez ya no deberán cambiarse.

Figura 44. **Pantalla de generador 3, lengüeta Information**

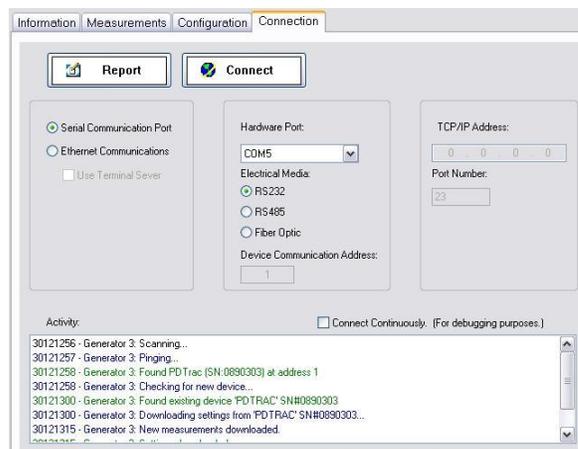
The screenshot displays the PDTracPro software interface. The title bar reads "PDTracPro - C:\Documents and Settings\equipos\Mis documentos\GENOR DATABASE.IID". The menu bar includes "File", "Edit", "Tools", "View", and "Help". The sidebar on the left shows a tree view under "GENOR" with sub-items "Generator 1", "Generator 2", "Generator 3", and "Generator 4". The main window has four tabs: "Information", "Measurements", "Configuration", and "Connection". The "Information" tab is active, showing a "Report" button and three sections of data entry fields:

- MACHINE INFORMATION:**
 - Machine Type: Combustion Turbine
 - Application: Power Generation
 - Manufacturer: Asea Brown Boveri
 - Serial Number: 4558400
 - Cooling System: Air Only
 - Installation Year: 1998
- RATINGS:**
 - Voltage Rating: 13.800 kV
 - Power: 14.450 MVA
 - Reactive Power: (empty) Var
 - Power Factor: (empty) (1.00 based)
 - Frequency: 60 Hz
 - Temperature Rise: 85 Celsius
 - Gas Pressure: (empty) psi-g
- WINDING INFORMATION:**
 - Re-Wind Year: No Date
 - Manufacturer: Asea Brown Boveri
 - Winding Type: Form Wound
 - Insulation Type: Epoxy Mica
 - Insulation Class: F

Fuente: Software PDTracPro de Iris Power.

Aquí mismo se encuentra un botón llamado Connect el cual al oprimirlo con el puntero se inicia la negociación del software con el PDTrac y al final del proceso quedan en línea, ver figura 45.

Figura 45. **Pantalla de generador 3, lengüeta Connect aquí se puede observar que ya está en línea**



Fuente: Software PDTracPro de Iris Power.

Una vez el PDTrac está en línea con la computadora y el software ya se podrán descargar los datos que en este almacenó durante la prueba, para lograrlo se selecciona la lengüeta Measurements, en esta lengüeta se almacenan todos los datos crudos de pruebas anteriores, actuales y futuras del generador seleccionado, ver figura 46.

Figura 46. **Pantalla de generador 3, lengüeta Measurements sublengüeta Trend Measurements**

Test #	Date (Y/M/...	Hour	A.	Measurement Status	Phase	Range	Avg NQN+	Avg NQN-	Avg
1482	2010.02.20	Daily	---	Ok	B	50mV to 850mV	291	221	2
1483	2010.02.20	Daily	---	Ok	C	50mV to 850mV	172	67	1
1484	2010.02.21	Daily	---	Ok	A	50mV to 850mV	163	8	1
1485	2010.02.21	Daily	---	Ok	B	50mV to 850mV	103	217	
1486	2010.02.21	Daily	---	Ok	C	50mV to 850mV	106	14	
1487	2010.03.19	Daily	---	Ok	A	50mV to 850mV	118	0	1
1488	2010.03.19	Daily	---	Ok	B	50mV to 850mV	105	210	
1489	2010.03.19	Daily	---	Ok	C	50mV to 850mV	103	0	
1490	2010.03.20	Daily	---	Ok	A	50mV to 850mV	157	7	1
1491	2010.03.20	Daily	---	Ok	B	50mV to 850mV	151	209	1
1492	2010.03.20	Daily	---	Ok	C	50mV to 850mV	87	32	
1535	2010.04.20	Daily	---	Ok	A	50mV to 850mV	200	45	1
1536	2010.04.20	Daily	---	Ok	B	50mV to 850mV	235	215	2
1537	2010.04.20	Daily	---	Ok	C	50mV to 850mV	139	113	1
1529	2010.05.19	Daily	---	Ok	A	50mV to 850mV	186	49	1
1530	2010.05.19	Daily	---	Ok	B	50mV to 850mV	245	229	2
1531	2010.05.19	Daily	---	Ok	C	50mV to 850mV	131	120	
1532	2010.05.21	Daily	---	Ok	A	50mV to 850mV	208	50	1
1533	2010.05.21	Daily	---	Ok	B	50mV to 850mV	246	234	2
1534	2010.05.21	Daily	---	Ok	C	50mV to 850mV	137	118	
1495	2010.05.22	0 h-1 h	---	Ok	A	50mV to 850mV	190	47	

Fuente: Software PDTracPro de Iris Power.

Para hacer la descarga de los datos se oprime el botón Download History y se inicia el proceso, una ventana emergente aparece mientras se realiza el proceso, figura 47.

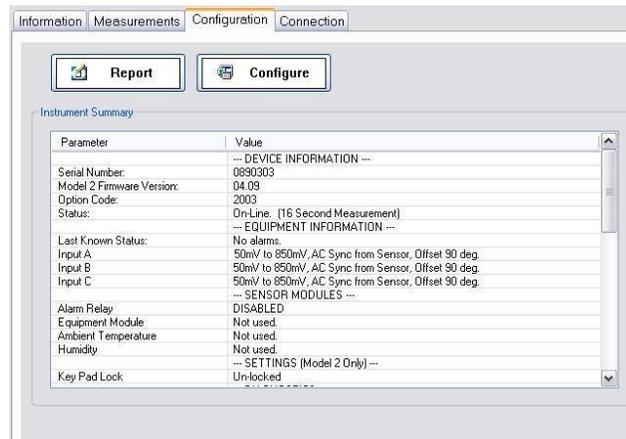
Figura 47. **Ventana emergente para la descarga de los datos guardados en el PDTrac**



Fuente: Software PDTracPro de Iris Power.

La última lengüeta de las cuatro que contiene el software PDTracPro es la de Configuration, figura 48, en donde se pueden observar los parámetros del PDTrac, en caso se quisiera cambiar la configuración se debería oprimir el botón Configure pero esto no es necesario cambiarse ya que una vez configurado el PDTrac ya no es necesario volverlo a hacer.

Figura 48. **Pantalla de generador 3, lengüeta Configuration la cual sólo se ve al estar en línea**

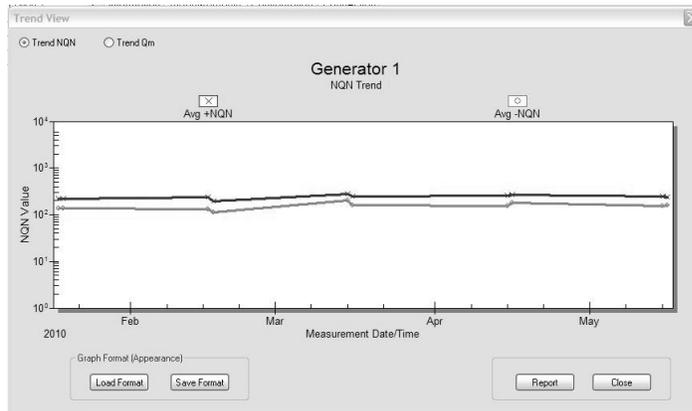


Fuente: Software PDTracPro de Iris Power.

Para procesar los datos y que estos sean de utilidad y fáciles de analizar e interpretar, el software PDTracPro permite generar gráficos (los términos NQN, Qm y PHA se mencionan a continuación pero serán explicados en la sección 2.2.5).

Para hacer un gráfico de tendencias se selecciona la lengüeta Measurements, figura 46, posteriormente la sublengüeta Trend Measurements, se seleccionan datos de diferentes fechas pero de la misma fase del generador (Phase A, B o C) y se oprime el botón View/Report. Como resultado se despliega una ventana emergente en donde se ve la gráfica de tendencia de cantidad numérica normalizada (NQN) de polaridad positiva en rojo y de polaridad negativa en verde, figura 49.

Figura 49. Gráfico de tendencia de NQN



Fuente: Software PDTracPro de Iris Power.

En esta misma ventana emergente en la esquina superior izquierda se puede elegir la gráfica de tendencia de Qm (magnitud de pico) que al igual que la de NQN (cantidad numérica normalizada) en rojo se ve la polaridad positiva y en verde la de polaridad negativa.

Para hacer un gráfico PHA (análisis de la altura de pulsos) se selecciona la lengüeta Measurements, figura 46, posteriormente la sublengüeta 2D Measurements, figura 50.

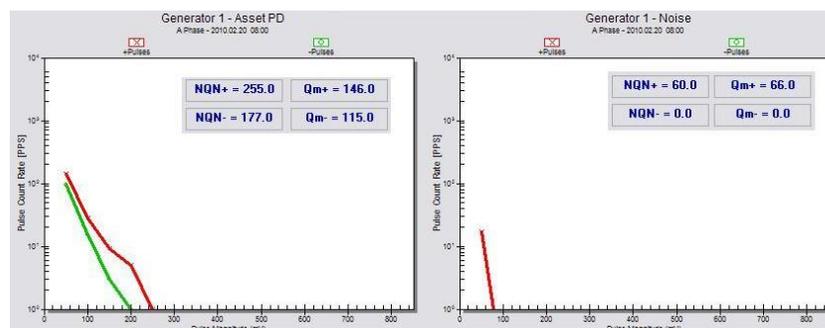
Figura 50. Pantalla de generador 3, lengüeta Measurements
sublengüeta 2D Measurements

Test #	Date (Y/M/D)	Time	Alarm Status	Measur...	Phase	Freq	Cycles	Range	Mach NQN
166	2010.05.15	23:58	...	Ok	C	60	60	50mV to 850...	60
165	2010.05.15	23:58	...	Ok	B	60	60	50mV to 850...	92
164	2010.05.15	23:58	...	Ok	A	60	60	50mV to 850...	180
163	2010.05.17	05:00	...	Ok	C	60	60	50mV to 850...	62
162	2010.05.17	05:00	...	Ok	B	60	60	50mV to 850...	82
161	2010.05.17	05:00	...	Ok	A	60	60	50mV to 850...	217
160	2010.04.15	23:58	...	Ok	C	60	60	50mV to 850...	57
159	2010.04.15	23:58	...	Ok	B	60	60	50mV to 850...	90
158	2010.04.15	23:58	...	Ok	A	60	60	50mV to 850...	255
157	2010.04.16	23:38	...	Ok	C	60	60	50mV to 850...	55
156	2010.04.16	23:38	...	Ok	B	60	60	50mV to 850...	77
155	2010.04.16	23:38	...	Ok	A	60	60	50mV to 850...	255
154	2010.03.15	23:57	...	Ok	C	60	60	50mV to 850...	62
153	2010.03.15	23:57	...	Ok	B	60	60	50mV to 850...	60
152	2010.03.15	23:57	...	Ok	A	60	60	50mV to 850...	230
151	2010.03.16	17:07	...	Ok	C	60	60	50mV to 850...	65
150	2010.03.16	17:07	...	Ok	B	60	60	50mV to 850...	75
149	2010.03.16	17:07	...	Ok	A	60	60	50mV to 850...	225
148	2010.02.16	23:58	...	Ok	C	60	60	50mV to 850...	67
147	2010.02.16	23:58	...	Ok	B	60	60	50mV to 850...	75
146	2010.02.16	23:58	...	Ok	A	60	60	50mV to 850...	200

Fuente: Software PDTracPro de Iris Power.

Se hace doble click sobre una fila de los datos que se quieren analizar y se despliega una ventana emergente en donde se encuentra la gráfica PHA (análisis de la altura de pulsos) de esos datos, también se puede observar el valor instantáneo de NQN (Cantidad Numérica Normalizada) y Qm (Magnitud de Pico) en sus dos polaridades.

Figura 51. Gráfico PHA



Fuente: Software PDTracPro de Iris Power.

2.2.5. Interpretación de datos que pueden obtenerse por el sistema de detección de descargas parciales

Después de instalados los dispositivos y de recolectar datos durante un período de tiempo es necesario interpretar la información que pueden proporcionar estos. “El fabricante Iris Power utiliza las siguientes definiciones para las características de las descargas parciales en generadores que se vieron en la sección 2.1.4”.⁵¹

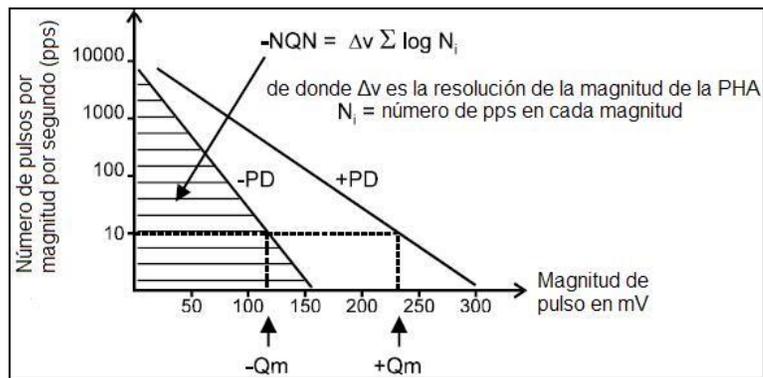
NQN, significa por sus siglas en inglés Cantidad Numérica Normalizada, el cual es una cantidad de descargas parciales que es proporcional a la totalidad de descargas parciales medidas por un sensor en una fase. El NQN (Cantidad Numérica Normalizada) positivo y negativo se refiere a la actividad total de pulsos positivos y negativos respectivamente de descargas parciales. En síntesis NQN (Cantidad Numérica Normalizada) es un indicador de la condición promedio del aislante en el devanado del estator.

Qm significa por sus siglas en inglés Magnitud de Pico, lo cual es la magnitud de los pulsos para una categoría fundamental de pulsos (medida directamente) que tiene una razón de repetición de 10 pulsos por segundo y corresponde al pico de la actividad de descargas parciales. Qm (Magnitud de Pico) es un indicador de que tan severas son las descargas parciales en la parte más deteriorada del devanado. Qm (Magnitud de Pico) positivo y negativo se refiere a la actividad pico de las descargas parciales de los pulsos positivos y negativos respectivamente.

⁵¹ PD Seminar Module 3. p. 30 - 39.

NQN (Cantidad Numérica Normalizada) y Qm (Magnitud de Pico) son calculados con base a la gráfica de PHA, que por sus siglas en inglés significa Análisis de la Altura de Pulsos. La gráfica de PHA (Análisis de la Altura de Pulsos) representa la relación entre la magnitud de los pulsos y la cantidad de repeticiones de esos pulsos para polaridades negativa y positiva de los conteos de descargas parciales.

Figura 52. **Sumario de variables de descargas parciales**



Fuente: PD Seminar, Basic PD Theory Detection of PD, PD characteristics. p. 22.

Como se puede ver en la figura 52 el eje horizontal de estas gráficas es una representación lineal de los pulsos mientras que el eje vertical es una representación logarítmica del número de los pulsos por segundo. El PDTrac diferencia las señales que tienen características de descargas parciales y las de ruido y genera una gráfica PHA para cada tipo de señales. Para los propósitos, Qm (Magnitud de Pico) y NQN (Cantidad Numérica Normalizada) son derivados de los datos de los resultados y son valorados para comparación entre generadores y para tendencias a través del tiempo.

El primer paso para el análisis de datos es el de comparar los resultados de la prueba reciente con el resultado de cualquier prueba previa, las gráficas de tendencias de NQN (Cantidad Numérica Normalizada) y Qm (Magnitud de Pico) pueden proveer una representación gráfica del progreso de los mecanismos de envejecimiento del aislamiento. Por ejemplo, si estas tendencias indican que se duplica la actividad de descargas parciales cada seis meses, es una indicación fuerte de un desarrollo muy rápido de uno o varios mecanismos de falla.

Cuando una línea de tendencia se realiza para varios resultados de descargas parciales a través de un período de tiempo en una fase de un generador, será obvio que esta mostrará variaciones de subidas y bajadas entre pruebas sucesivas. Sin embargo, mientras el aislamiento se envejece, existirá una elevación en el tiempo en esta tendencia de descargas parciales fácilmente visibles.

El proceso de envejecimiento es un proceso muy lento y debido a esto no se espera que haya cambios tan súbitos en los resultados de las descargas parciales. La condición del aislamiento puede ser evaluada, sin embargo, el tiempo para la falla no puede ser predicho. Una falla inmediata es normalmente resultado de una fuente inusual de un sobreesfuerzo del aislamiento tal como descarga electroatmosférica, sincronización fuera de fase o sobrecalentamiento severo.

También es posible comparar aproximadamente los resultados de una máquina con resultados de muchas máquinas similares, pero debe compararse únicamente resultados en donde se usa el mismo método y el mismo tipo de sensores e instrumentos, basándose en análisis estadísticos, los tipos de generadores (marcas, tamaños, potencias, etcétera) no parece tener un gran impacto en los niveles de descargas parciales y aunque los diferentes tipos de aislamiento tienen diferentes tipos de mecanismos de fallas, en estas comparaciones no parecen tener mucha diferencia en todos los niveles de descargas parciales.

La tabla V muestra datos estadísticos de valores de Qm (Magnitud de Pico) de la gran base de datos de Iris Power, las únicas condiciones idénticas que tienen los generadores de donde salieron estos datos es que son generadores enfriados por aire, el uso de un solo sensor por fase y el uso de PDTrac para capturar los datos.

Tabla V. **Sumario estadístico de valores Qm según base de datos de Iris Power**

	2-5kV	6-9kV	10-12kV	13-15kV	16-18kV	>19kV
25%	8	26	29	53	44	25
50%	25	70	74	122	77	80
75%	67	152	181	245	160	162
90%	235	273	382	477	285	469

Fuente: PD Seminar-Module 3. p. 38.

La tabla V muestra los promedios de los rangos de voltaje y los rangos del 25 to, 50 avo, 75 to y 90 avo percentil, por ejemplo, el 25 to percentil es la magnitud de Qm para el cual el 25% de los resultados de pruebas de generadores están debajo de ese valor, similarmente para el 50 avo, 75 to y el 90 avo percentil. Normalmente, debe haber preocupación si para un devanado de un generador el Qm (Magnitud de Pico) es mayor al del 90 avo percentil y si está aumentando. Los niveles típicos de comparación son:

Ilegible < 25%

Bajo < 50%

Típico < 75%

Moderado < 90%

Alto > 90%

Los datos que conciernen a este proyecto son los sombreados en gris en la tabla V.

La alta magnitud de las descargas parciales indica el grado de deterioro que puede tener el aislamiento y la frecuencia de las descargas parciales en pulsos por segundo indica la cantidad de vacíos en el aislamiento lo cual es un índice del grado del proceso de deterioro del aislamiento. La combinación de ambas en altos grados indicaría un deterioro actual alto y un acelerado proceso de deterioro.

Al analizar las gráficas PHA (Análisis de la Altura de Pulso), se puede discernir entre la relación magnitud pps (pulsos por segundo) de Qm (Magnitud de Pico). Magnitudes menores al del percentil 50 avo son irrelevantes siempre que estén por debajo de las 1 000 pulsaciones por segundo.

Magnitudes mayores al del percentil 75 to son relevantes siempre que estén por arriba de los 300 pulsos por segundo; pero son irrelevantes si están por debajo de los 100 pulsos por segundo. Magnitudes mayores al del percentil 90avo son relevantes siempre que estén por arriba de los 100 pulsos por segundo y hay que poner especial atención si la frecuencia aumenta.

En el análisis de las tendencias, Qm (Magnitud de Pico) debería estar entre el percentil 50 avo y el 75 to para dar por aceptable el aislamiento. Valores por debajo del percentil 50 avo vuelven irrelevante el resultado. Valores mayores al del percentil 75 to requerirían de mayor atención y de mayor frecuencia en las pruebas de descargas parciales para determinar la velocidad de deterioro. Valores mayores al del percentil 90 avo darían indicio de una posible falla y se debería considerar la reparación programada del aislamiento.

Los valores de NQN (Cantidad Numérica Normalizada) por el hecho de ser una proporcionalidad de la actividad total de descargas parciales, se puede considerar alarmante si sus valores son el doble o más de los de Qm (Magnitud de Pico) cuando Qm (Magnitud de Pico) es mayor al valor del percentil 75 to.

Para reducir las descargas parciales pueden realizarse algunos mantenimientos en el generador tales como: limpiezas del estator, reparación de cuñas de bobinas, barnizado y curado y reparación de las capas de aislamiento sometidas a mayores esfuerzos de voltaje. La única que se realiza como práctica común de todas estas es la de la limpieza del estator, cualquier otra se debería llevar a cabo sólo cuando se detecta alta actividad de descargas parciales y los mecanismos de falla ocurren en el exterior del aislamiento, si las descargas parciales están dentro del aislamiento o cerca del cobre, ninguna reparación es efectiva más que el reembobinado completo del estator.

Con base a todos los datos indicados en esta sección los cuales utiliza Iris Power y a lo indicado en la sección 2.1.5.3 de este documento se puede determinar el proceso de falla que tiene el aislamiento de los generadores.

2.2.6. Diseño y desarrollo de un programa de mantenimiento predictivo con base a detección de descargas parciales en línea

Básicamente, el único tiempo que se requiere que los generadores estén sin funcionar y en total disponibilidad es para la instalación de los sensores lo cual se realizó en dos días para cada generador, después de que arribaran los componentes del proyecto; después de eso no se requiere de un programa ante el departamento de operaciones para llevar a cabo las pruebas ya que, como se ha indicado, las pruebas no son invasivas y no requieren que el generador esté fuera de línea, es más, el generador bajo prueba debe estar en operación en condiciones normales.

Las pruebas a realizar, gracias a la disponibilidad del personal, se decidió que fueran de 48 horas para cada generador de forma mensual durante los primeros cinco meses, esto para tener una buena base de inicio. Posteriormente se decidiría, con base al estado del aislamiento de los generadores, la frecuencia de las siguientes pruebas. El programa de mantenimiento para los primeros meses quedó según la tabla VI.

Tabla VI. **Programa de pruebas para los primeros cinco meses**

	Ene-10	Feb-10	Mar-10	Abr-10	May-10
Generador 1	18 y 19	16 y 17	15 y 16	15 y 16	15 y 16
Generador 2	20 y 21	18 y 19	17 y 18	17 y 18	17 y 18
Generador 3	22 y 23	20 y 21	19 y 20	19 y 20	19 y 20
Generador 4	24 y 25	22 y 23	21 y 22	21 y 22	21 y 22

Fuente: elaboración propia.

De los datos que se recolectaron en las pruebas, se hicieron las gráficas de:

- PHA de la primera y última prueba de cada fase de cada generador, para visualizar diferencias después de un período de tiempo.
- Tendencias de \pm NQN (cantidad numérica normalizada) para cada fase.
- Tendencias de \pm Qm (magnitud de pico) para cada fase.

Estas se presentan en las siguientes secciones.

2.2.7. Resultados de pruebas y diagnóstico de estado del aislamiento de generadores con base a interpretación de estos

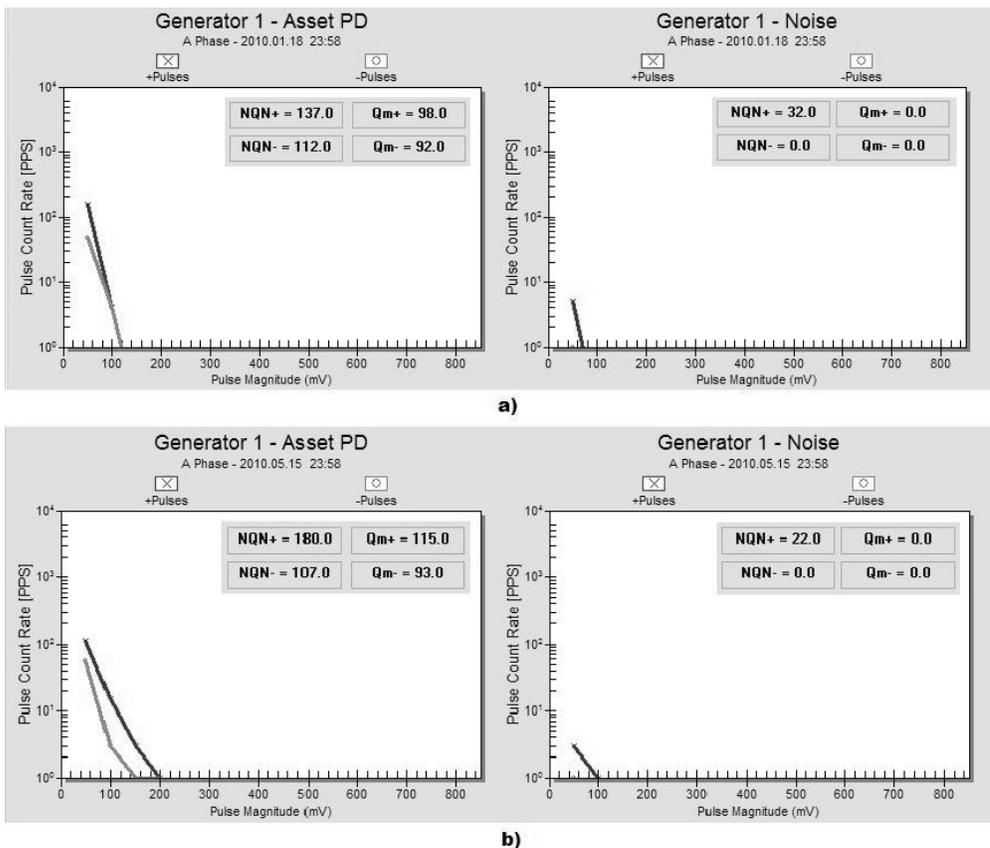
En las siguientes páginas se presentan los resultados de las pruebas de descargas parciales en línea obtenidos durante el desarrollo del programa de mantenimiento predictivo indicado en la sección 2.2.5.

2.2.7.1. Generador 1

- Fase A

En la figura 53 se puede ver el PHA de mayo respecto al de enero. Con base a la sección 2.2.6 se puede ver un leve incremento de pulsos positivos de magnitud entre 125 y 200 microvoltios pero irrelevante ya que tienen menos de 10 pulsos por segundo, la actividad de pulsos negativos no tuvo variación.

Figura 53. PHA para fase A del generador 1, a) enero, b) mayo

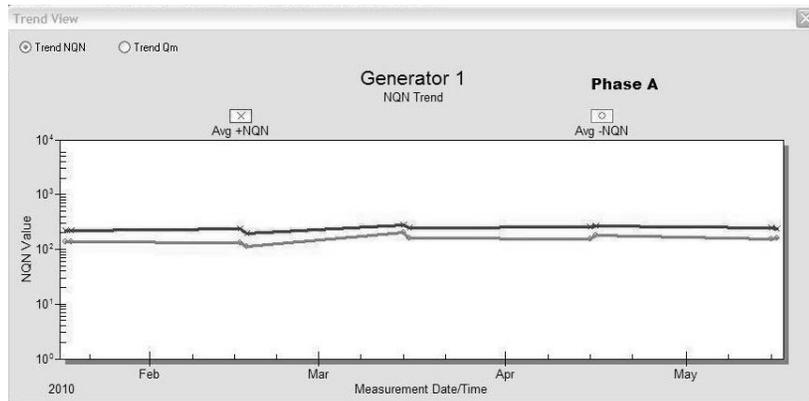


Fuente: Software PDTracPro de Iris Power.

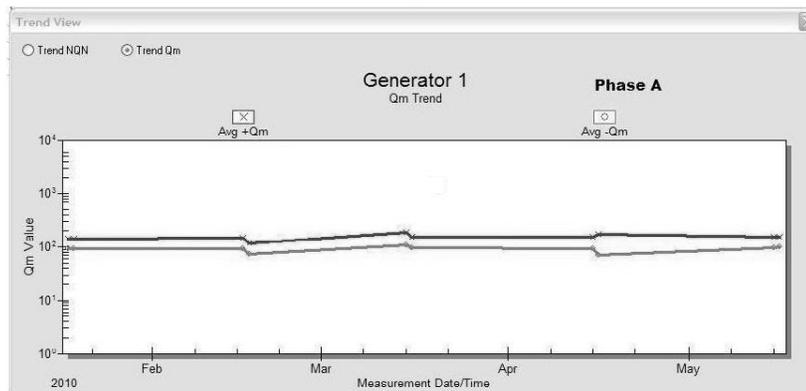
También en la figura 54 se pueden ver las tendencias de NQN (Cantidad Numérica Normalizada) y Qm (Magnitud de Pico) las cuales se analizan también con base a la sección 2.2.5. La tendencia NQN (Cantidad Numérica Normalizada) positiva es bastante estable y oscila levemente entre 200 y 300, la tendencia NQN (Cantidad Numérica Normalizada) negativa es también muy estable con valores menores y una ligera oscilación entre 100 y 200. No se ven elevaciones que den indicios de posibles fallas en el aislamiento. La tendencia Qm (Magnitud de Pico) positiva virtualmente se mantiene estable cercano a un valor de 100, la tendencia de Qm (Magnitud de Pico) negativa está por debajo de 75 por lo que es irrelevante.

La fase A del generador 1 muestra que está con actividad de descargas parciales bajas, según la tabla V se encuentra dentro del rango percentil 50 avo. Predomina el mecanismo de falla de delaminación del aislamiento cerca del núcleo, pero es en un grado de envejecimiento normal.

Figura 54. Tendencias de NQN y Qm de la fase A del generador 1



a)



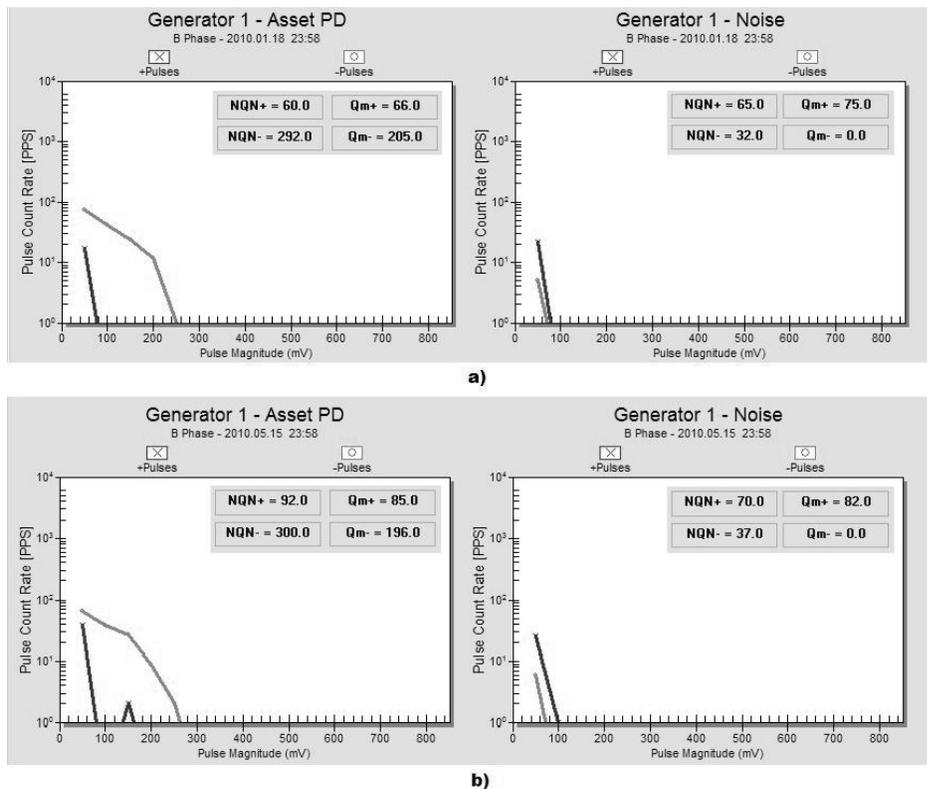
b)

Fuente: Software PDTracPro de Iris Power.

- Fase B

En la figura 55 se puede ver el PHA de mayo respecto al de enero. Con base a la sección 2.2.5 los pulsos positivos se ven estables en el rango de 80 milivoltios para abajo pero aparecen una muy pequeña actividad de descargas parciales en el rango de 140 y 160 milivoltios la cual es irrelevante por el bajo valor de pulsos por segundo, la actividad de pulsos negativos muestra que esta fase tiene pulsos, aunque de muy baja cantidad de pulsos por segundo, de 260 milivoltios pero invariable en este período de tiempo, irrelevante por el bajo valor de pulsos por segundo.

Figura 55. PHA para fase B del generador 1, a) enero, b) mayo

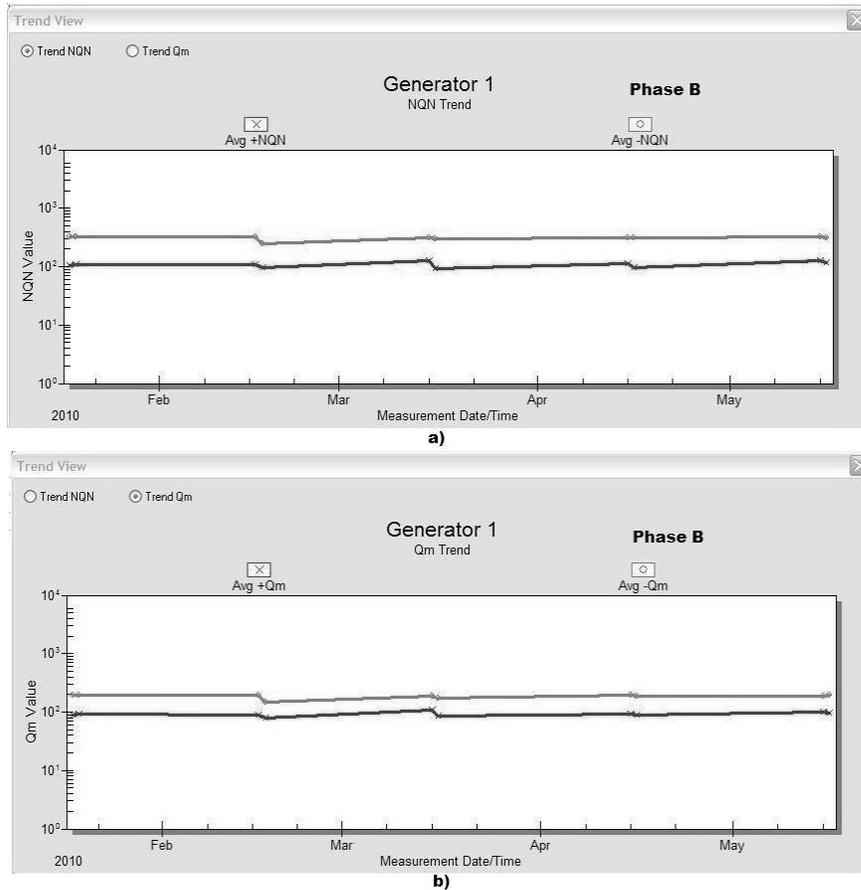


Fuente: Software PDTracPro de Iris Power.

También en la figura 56 se pueden ver las tendencias de NQN (Cantidad Numérica Normalizada) y Qm (Magnitud de Pico) las cuales se analizan también con base a la sección 2.2.5. La tendencia NQN (Cantidad Numérica Normalizada) positiva es bastante estable y oscila levemente entre 100 y 150, la tendencia NQN (Cantidad Numérica Normalizada) negativa es también muy estable con oscilación entre 200 y 275. No se ven elevaciones que den indicios de posibles fallas en el aislamiento. La tendencia Qm (Cantidad Numérica Normalizada) positiva es estable y oscila ligeramente cercano a un valor de 100, la tendencia de Qm (Cantidad Numérica Normalizada) negativa es estable y oscila ligeramente entre 100 y 125.

La fase B del generador 1 muestra que está con actividad de descargas parciales baja, según la tabla V se encuentra dentro del rango percentil 50 avo. Predomina el mecanismo de falla de delaminación cerca al cobre pero en un grado de envejecimiento normal.

Figura 56. Tendencias de NQN y Qm para la fase B del generador 1

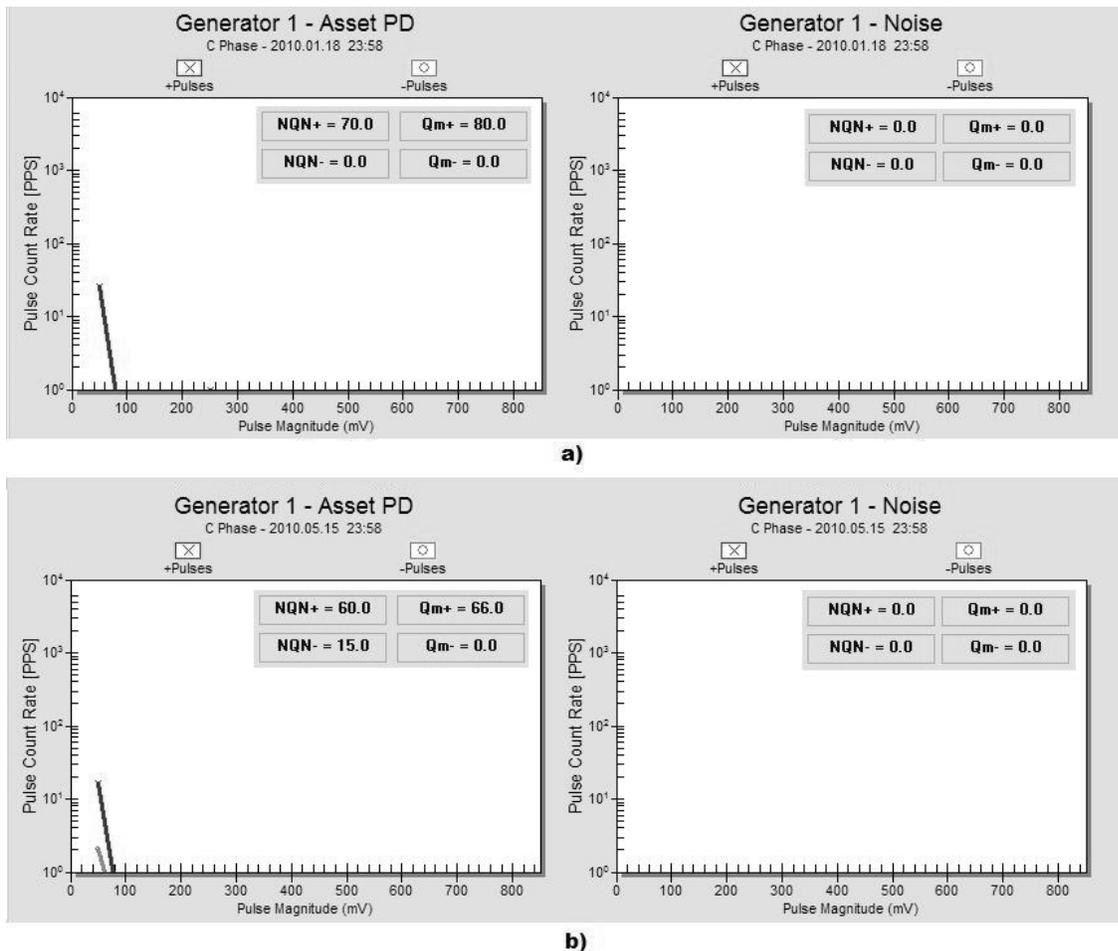


Fuente: Software PDTracPro de Iris Power.

- Fase C

En la figura 57 se puede ver el PHA (Análisis de la Altura de Pulsos) de mayo respecto al de enero. Con base a la sección 2.2.5 se puede ver el PHA (Análisis de la Altura de Pulsos) de mayo respecto al de enero. Los pulsos positivos y los pulsos negativos son de muy baja magnitud y la cantidad de pulsos por segundo, son irrelevantes.

Figura 57. PHA para fase C del generador 1, a) enero, b) mayo

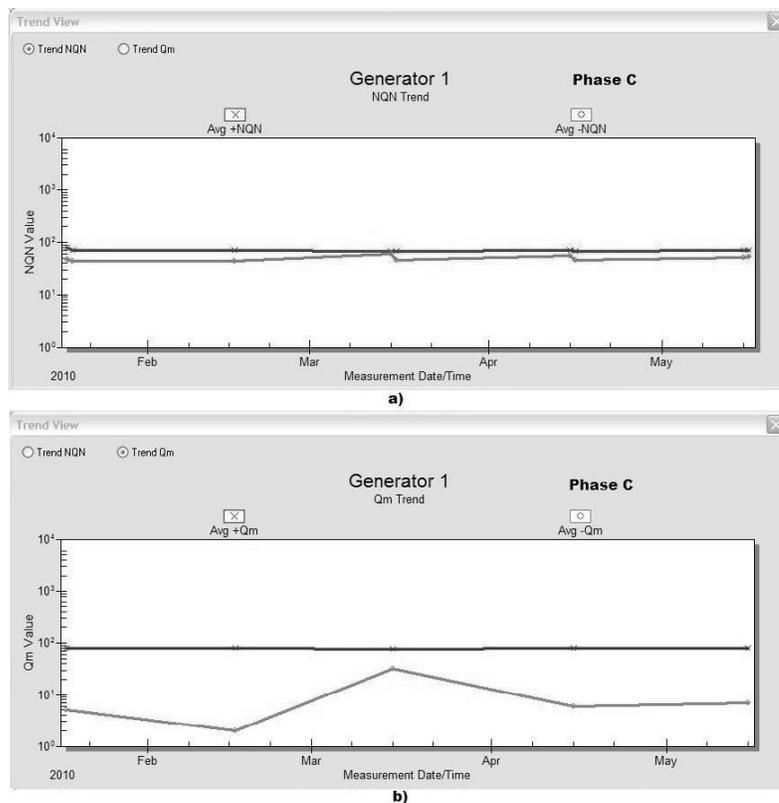


Fuente: Software PDTracPro de Iris Power.

También en la figura 56 se pueden ver las tendencias de NQN (Cantidad Numérica Normalizada) y Qm (Magnitud de Pico) las cuales se analizan también con base a la sección 2.2.5. Se aprecian las tendencias NQN (Cantidad Numérica Normalizada) positiva y negativas son bastantes estables y con una muy pequeña oscilación debajo del valor de 90.

No se ven elevaciones que den indicios de posibles fallas en el aislamiento. La tendencia Qm (Magnitud de Pico) positiva es muy estable y oscila ligeramente cercano a un valor de 100, la tendencia de Qm (Magnitud de Pico) negativa es oscilante pero por debajo del valor 75. La fase C del generador 1 muestra que está con actividad de descargas parciales bajas, con base a la tabla V se encuentra dentro del rango percentil 50 avo. Predomina el mecanismo de falla de delaminación del aislamiento cerca del núcleo, pero es en un grado de envejecimiento normal. Esta es la fase que tiene el aislamiento más saludable en este generador.

Figura 58. **Tendencias de NQN y Qm para la fase C del generador 1**



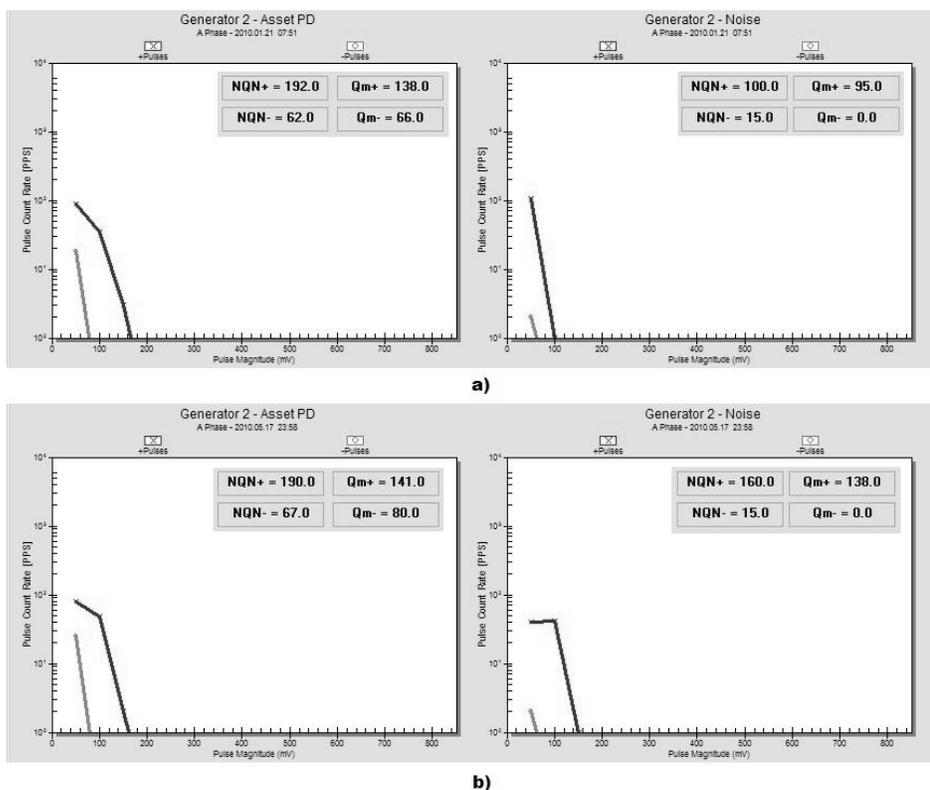
Fuente: Software PDTracPro de Iris Power.

2.2.7.2. Generador 2

- Fase A

En la figura 59 se puede ver el PHA (Análisis de la Altura de Pulsos) de mayo respecto al de enero. Con base a la sección 2.2.5 se aprecia que los pulsos positivos y negativos no sufren variación de magnitud y de cantidad de pulsos por segundo entre estas pruebas, aunque se puede ver que la actividad de pulsos positivos tiene el doble en magnitud que los pulsos negativos.

Figura 59. PHA para fase A del generador 2, a) enero, b) mayo

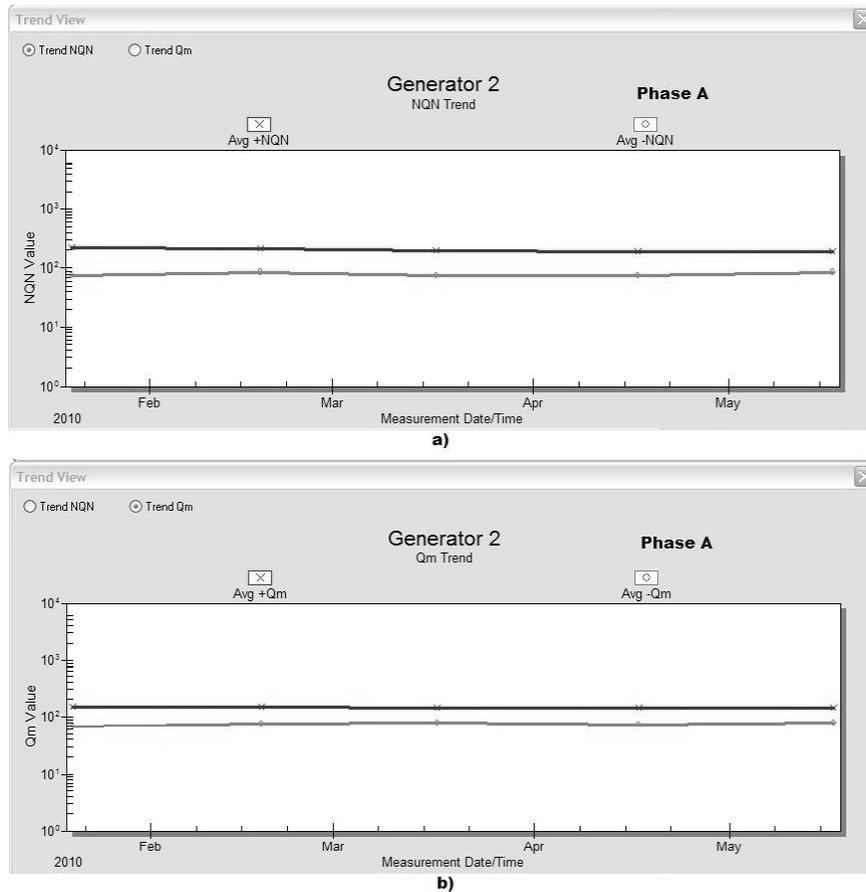


Fuente: Software PDTracPro de Iris Power.

También en la figura 60 se pueden ver las tendencias de NQN (Cantidad Numérica Normalizada) y Qm (Magnitud de Pico) las cuales se analizan también con base a la sección 2.2.5. La tendencia NQN (Cantidad Numérica Normalizada) positiva es muy estable y se mantiene próximo a un valor de 200, la tendencia NQN (Cantidad Numérica Normalizada) negativa es también muy estable con valores menores a 100. No se ven elevaciones que den indicios de posibles fallas en el aislamiento.

La tendencia Qm (Magnitud de Pico) positiva es estable cercano a un valor de 150, la tendencia de Qm (Magnitud de Pico) negativa es muy estable y ligeramente oscila de 80 a 95. La fase A del generador 2 muestra que está con actividad de descargas parciales baja, según la tabla V se encuentra dentro del rango percentil 50 avo. Predomina el mecanismo de falla de delaminación del aislamiento cerca del núcleo, pero es en un grado de envejecimiento normal.

Figura 60. Tendencias NQN y Qm de la fase A del generador 2

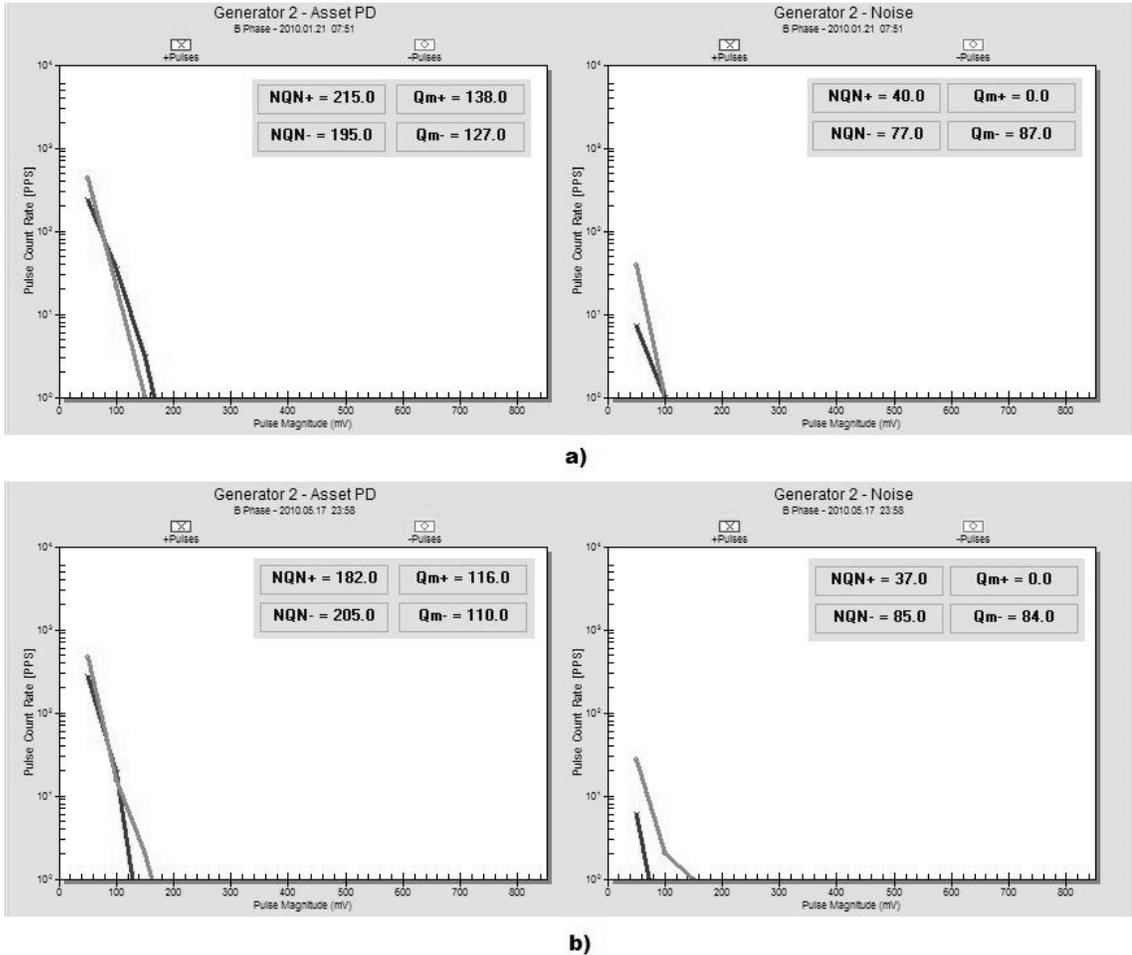


Fuente: Software PDTracPro de Iris Power.

- Fase B

En la figura 61 se puede ver el PHA de mayo respecto al de enero. Con base a la sección 2.2.5 se puede ver un pequeño desplazamiento de la gráfica de los pulsos positivos en disminución, lo que parecería que hubo una limpieza del devanado. La actividad de pulsos negativos no tuvo variaciones relevantes.

Figura 61. PHA para fase B del generador 2, a) enero, b) mayo

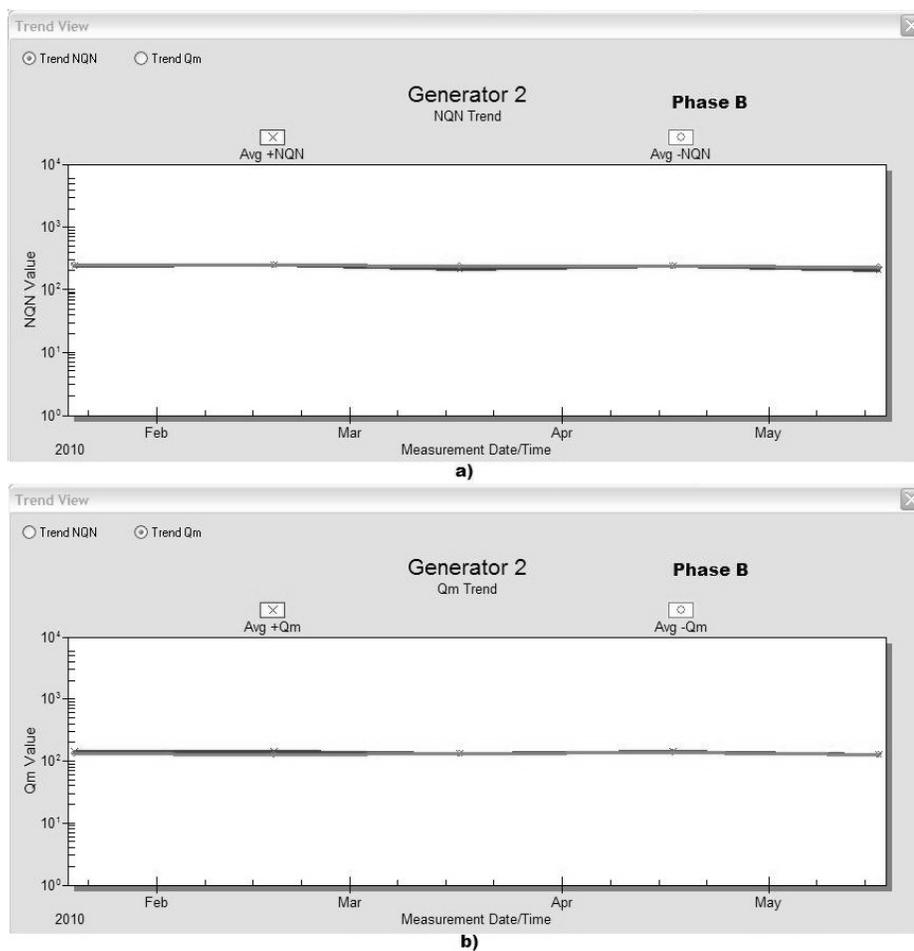


Fuente: Software PDTracPro de Iris Power.

También en la figura 62 se pueden ver las tendencias de NQN (Cantidad Numérica Normalizada) y Qm (Magnitud de Pico) las cuales se analizan también con base a la sección 2.2.5. Las tendencias NQN (Cantidad Numérica Normalizada) positiva y negativa son casi idénticas, muy estables entre los valores de 200 y 250.

No se ven elevaciones que den indicios de posibles fallas en el aislamiento. Las tendencias de Qm (Magnitud de Pico) positiva y negativa virtualmente son iguales y estables cercano a un valor de 120. La fase B del generador 2 muestra que está con actividad de descargas parciales baja, según la tabla V se encuentra dentro del rango percentil 50 avo. Predomina el mecanismo de falla de delaminación dentro del aislamiento, pero es en un grado de envejecimiento normal.

Figura 62. Tendencias NQN y Qm de la fase B del generador 2

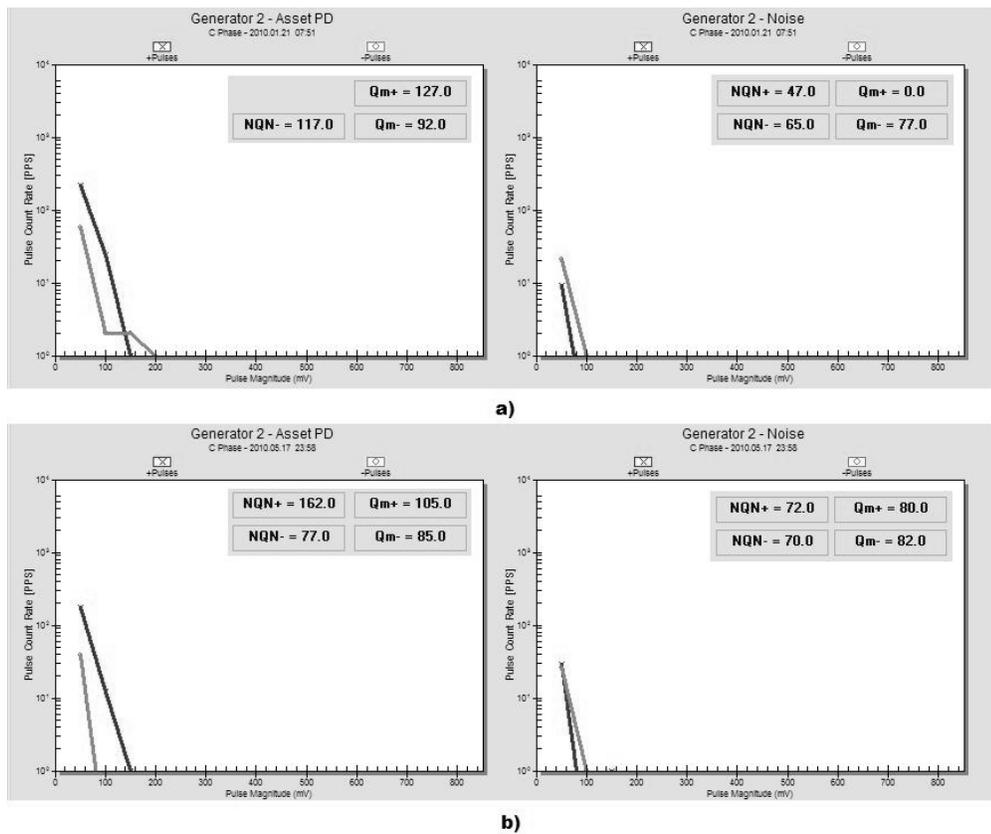


Fuente: Software PDTracPro de Iris Power.

- Fase C

En la figura 63 se puede ver el PHA (Análisis de la Altura de Pulsos) de mayo respecto al de enero. Con base a la sección 2.2.5 se puede ver que los pulsos positivos se mantienen estables y dentro de valores bajos, los pulsos negativos no sufren variación, se presentaron pulsos de 150 milivoltios con una cantidad de pulsos por segundo de 1 y de 200 milivoltios con una cantidad de pulsos por segundo cercano al cero, los cuales son irrelevantes.

Figura 63. PHA para fase C del generador 2, a) enero, b) mayo

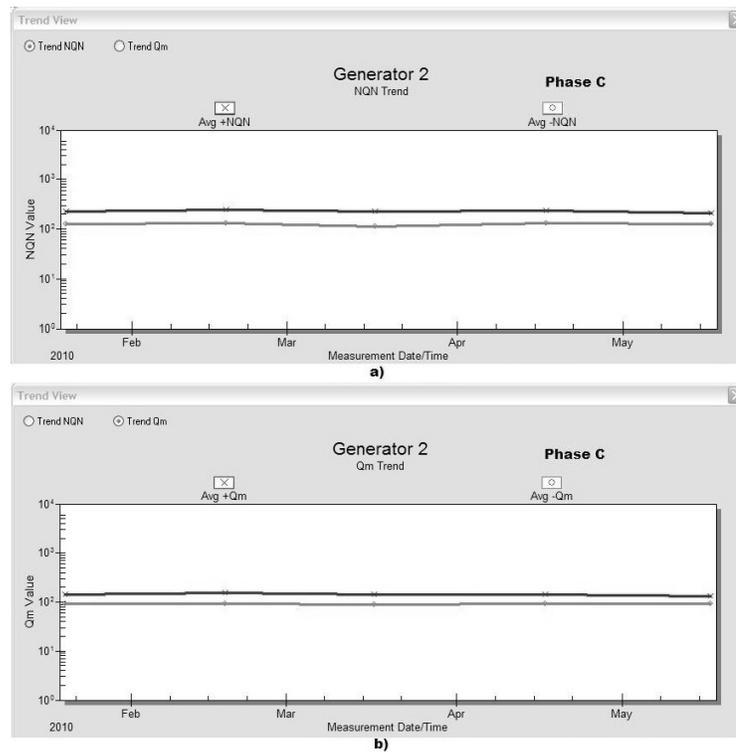


Fuente: Software PDTracPro de Iris Power.

También en la figura 64 se pueden ver las tendencias de NQN (Cantidad Numérica Normalizada) y Qm (Magnitud de Pico) las cuales se analizan también con base a la sección 2.2.5. La tendencia NQN (Cantidad Numérica Normalizada) positiva es bastante estable y oscila entre 200 y 250, la tendencia NQN (Cantidad Numérica Normalizada) negativa es también muy estable con pequeña oscilación entre 120 y 150. No se ven elevaciones que den indicios de posibles fallas en el aislamiento. La tendencia Qm (Magnitud de Pico) positiva virtualmente se mantiene estable cercano a un valor de 150, la tendencia de Qm (Magnitud de Pico) negativa está por debajo de 100.

La fase C del generador 2 muestra que está con actividad de descargas parciales bajas, según la tabla V se encuentra dentro del rango percentil 50avo. Predomina el mecanismo de falla de delaminación del aislamiento cerca del núcleo, pero es en un grado de envejecimiento normal.

Figura 64. Tendencias NQN y Qm de la fase C del generador 2



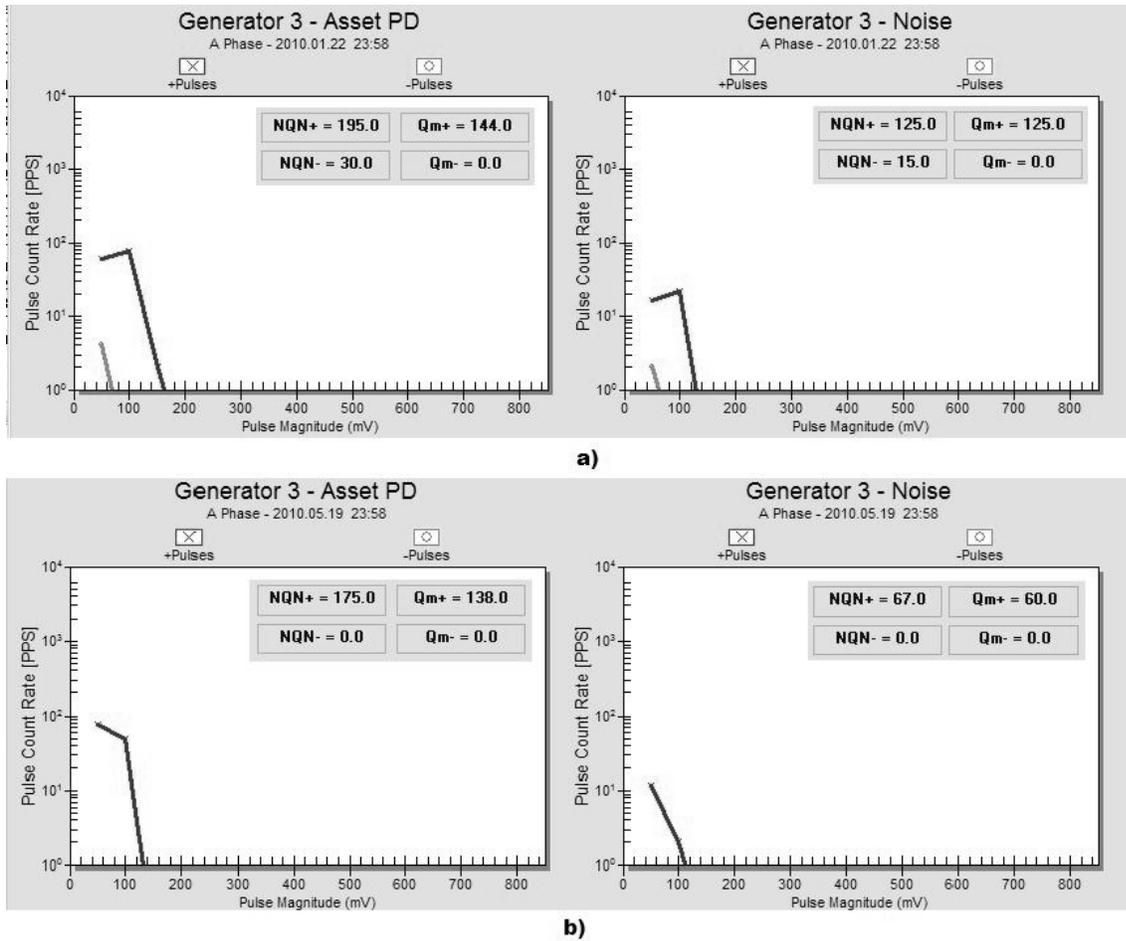
Fuente: Software PDTracPro de Iris Power.

2.2.7.3. Generador 3

- Fase A

En la figura 65 se puede ver el PHA (Análisis de la Altura de Pulsos) de mayo respecto al de enero. Con base a la sección 2.2.5 se determina que los pulsos positivos se reducen a valores irrelevantes, lo que parecería una limpieza del generador y los pulsos negativos desaparecen.

Figura 65. PHA para fase A del generador 3, a) enero, b) mayo

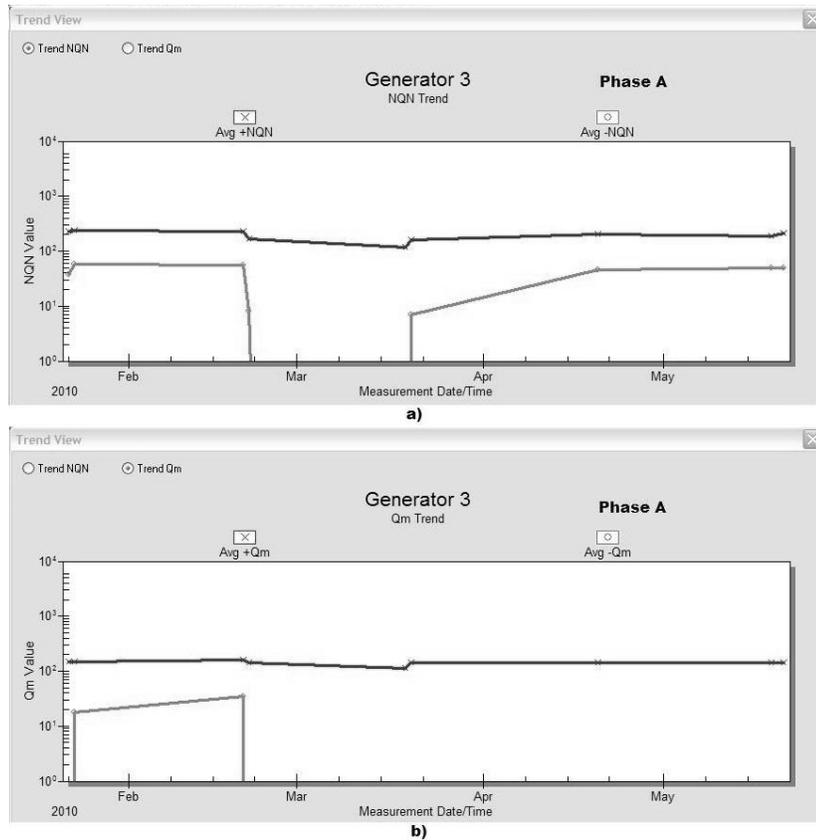


Fuente: Software PDTracPro de Iris Power.

También en la figura 62 se pueden ver las tendencias de NQN (Cantidad Numérica Normalizada) y Qm (Magnitud de Pico) las cuales se analizan también con base a la sección 2.2.5. La tendencia NQN (Cantidad Numérica Normalizada) positiva es oscilante entre 150 y 250, la tendencia NQN (Cantidad Numérica Normalizada) negativa tiene varios puntos de inflexión y de febrero a marzo se vuelven cero, no es relevante ya que permanecen por debajo de 100 en todas estas variaciones. No se ven elevaciones que den indicios de posibles fallas en el aislamiento.

La tendencia Qm (Magnitud de Pico) positiva es un poco estable con ligera oscilación entre 150 y 200, la tendencia de Qm (Magnitud de Pico) negativa está por debajo de 100 y desaparece después de la prueba de febrero. La fase A del generador 3 muestra que está con actividad de descargas parciales bajas, según la tabla V se encuentra dentro del rango percentil 50 avo. Predomina el mecanismo de falla de delaminación del aislamiento cerca del núcleo, pero es en un grado de envejecimiento normal.

Figura 66. Tendencias NQN y Qm de la fase A del generador 3

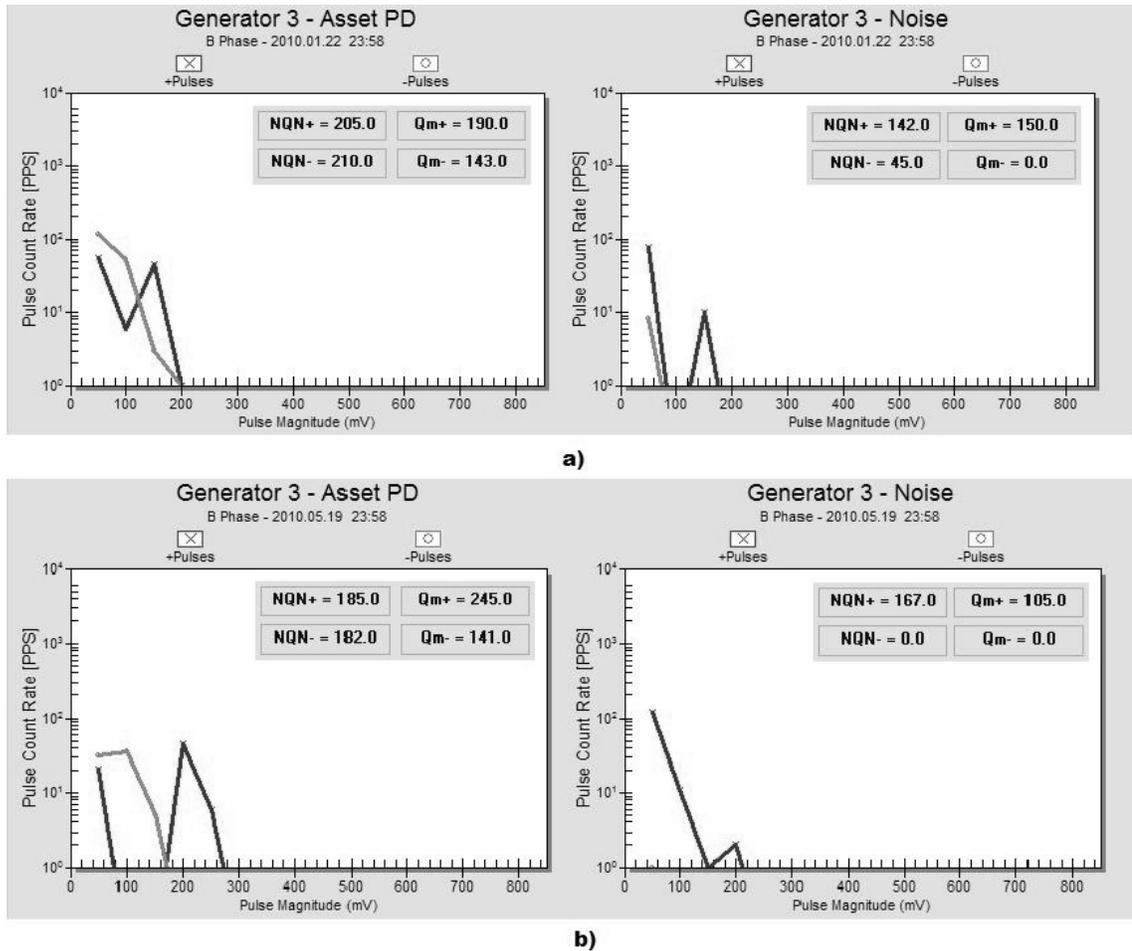


Fuente: Software PDTracPro de Iris Power.

- Fase B

En la figura 67 se puede ver el PHA (Análisis de la Altura de Pulsos) de mayo respecto al de enero. Con base a la sección 2.2.5 PHA (Análisis de la Altura de Pulsos) de mayo se determina que los pulsos positivos aumentan en magnitud pero permanecen constantes en su cantidad de pulsos por segundo, los pulsos negativos tienen una ligera disminución por lo cual se puede considerar que se mantienen similares.

Figura 67. PHA para fase B del generador 3, a) enero, b) mayo



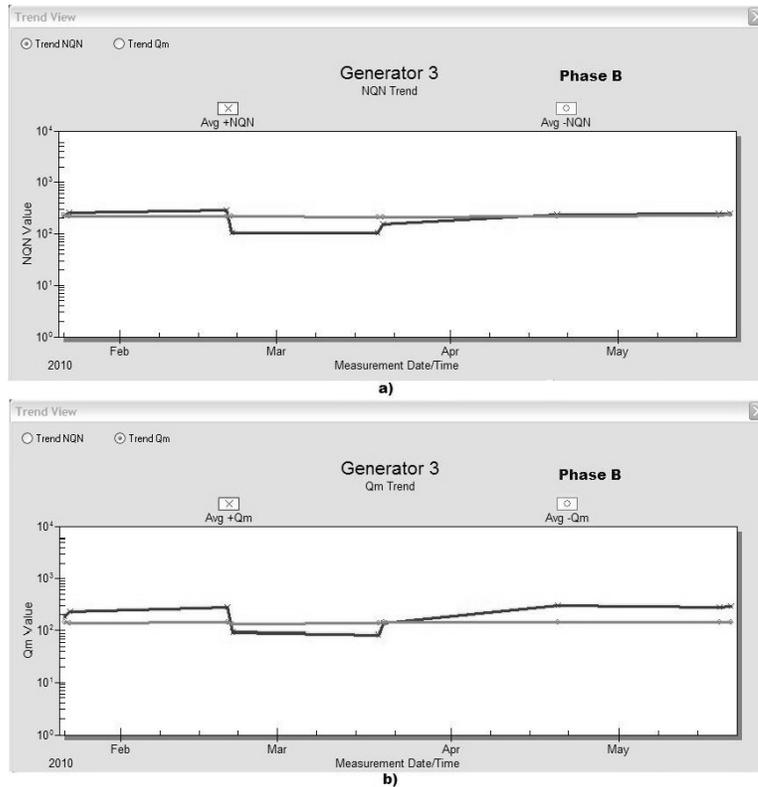
Fuente: Software PDTracPro de Iris Power.

También en la figura 62 se pueden ver las tendencias de NQN (Cantidad Numérica Normalizada) y Qm (Magnitud de Pico) las cuales se analizan con base a la sección 2.2.5.

La tendencia NQN (Cantidad Numérica Normalizada) positiva tiene una reducción de un valor de 300 a 125 después de la prueba de febrero, pero después de la prueba de marzo se recupera y permanece casi estable cerca de un valor de 200, la tendencia NQN (Cantidad Numérica Normalizada) negativa es estable con valores entre 200 y 225. No se ven elevaciones que den indicios de posibles fallas en el aislamiento.

La tendencia Qm (Magnitud de Pico) positiva tiene una reducción de un valor de 300 a 90 después de la prueba de febrero, pero después de la prueba de marzo inicia una escalada hacia valores cercanos a 300, la tendencia de Qm (Magnitud de Pico) es muy estable cerca. La fase B del generador 3 muestra que está con actividad de descargas parciales medianas, según la tabla V se encuentra dentro del rango percentil 75 avo. Predomina el mecanismo de falla de delaminación del aislamiento cerca del núcleo, pero es en un grado de envejecimiento normal.

Figura 68. **Tendencias de NQN y Qm de la fase B del generador 3**

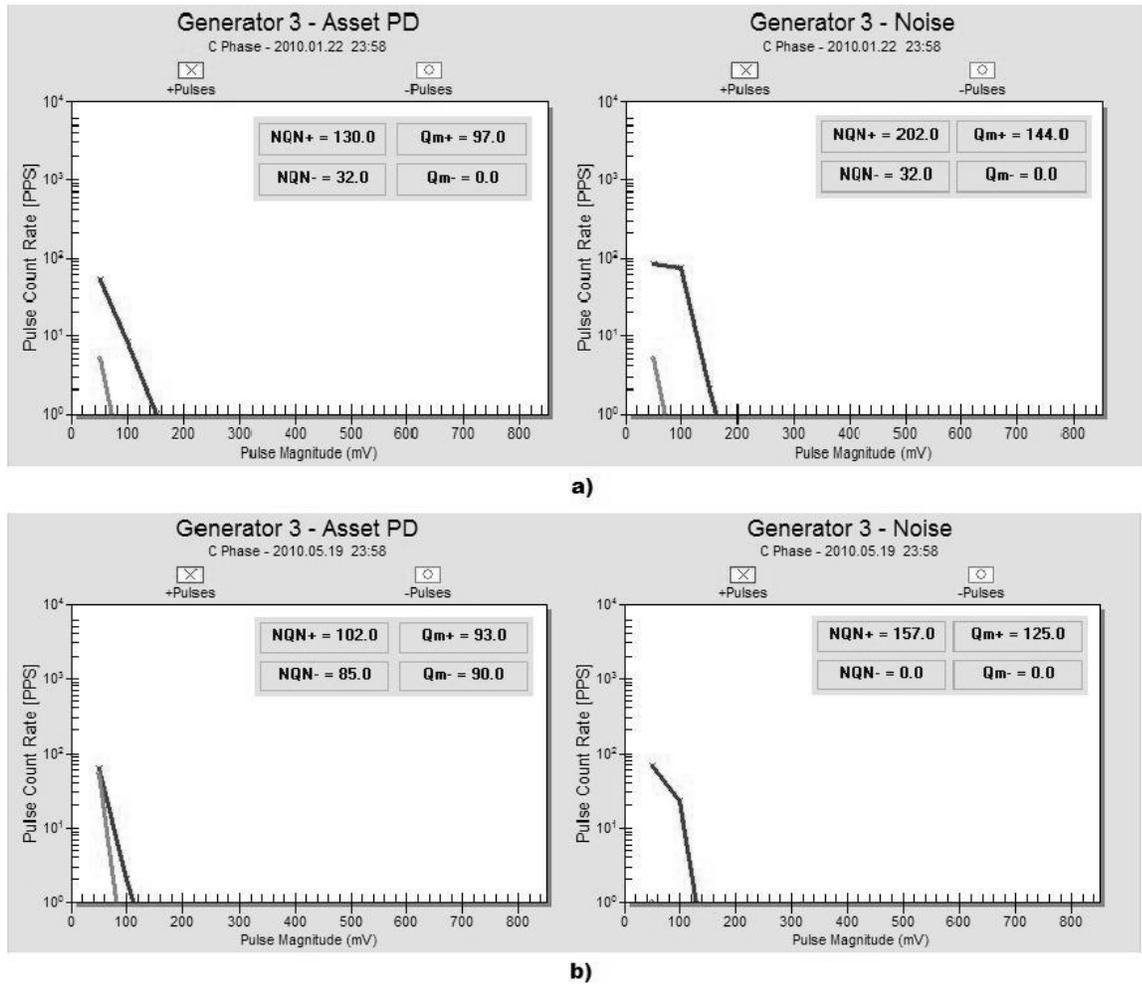


Fuente: Software PDTracPro de Iris Power.

- **Fase C**

En la figura 69 se puede ver el PHA (Análisis de la Altura de Pulsos) de mayo respecto al de enero. Con base a la sección 2.2.5 se determina que el PHA (Análisis de la Altura de Pulsos) de mayo respecto al de enero. Los pulsos positivos se reducen en magnitud, lo que parecería una limpieza del generador, los pulsos negativos tienen un ligero incremento en la cantidad de pulsos por segundo pero menor a 70 por lo que se estiman irrelevantes.

Figura 69. PHA para fase C del generador 3, a) enero, b) mayo

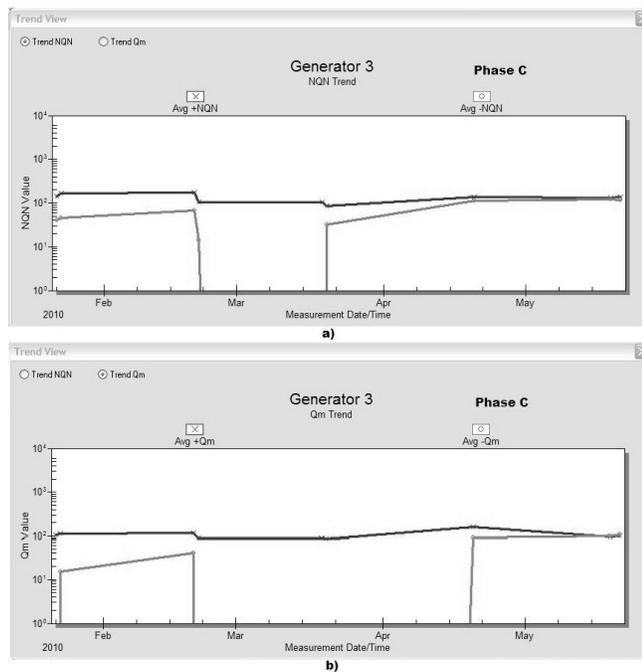


Fuente: Software PDTracPro de Iris Power.

También en la figura 62 se pueden ver las tendencias de NQN (cantidad numérica normalizada) y Qm (magnitud de pico) las cuales se analizan también con base a la sección 2.2.5.

La tendencia NQN (Cantidad Numérica Normalizada) positiva oscila entre 100 y 200, la tendencia NQN (Cantidad Numérica Normalizada) negativa tiene varios puntos de inflexión y de febrero a marzo se vuelven cero, no es relevante ya que permanecen por debajo de 130 en todas estas variaciones. No se ven elevaciones que den indicios de posibles fallas en el aislamiento. La tendencia Qm positiva oscila entre valores de 100 y 150, la tendencia de Qm negativa está por debajo de 100 y desaparece desde la prueba de febrero hasta la prueba de abril. La fase C del generador 3 muestra que está con actividad de descargas parciales bajas, según la tabla V se encuentra dentro del rango percentil 50 avo. Predomina el mecanismo de falla de delaminación del aislamiento cerca del núcleo, pero es en un grado de envejecimiento normal.

Figura 70. **Tendencias de NQN y Qm de la fase C del generador 3**



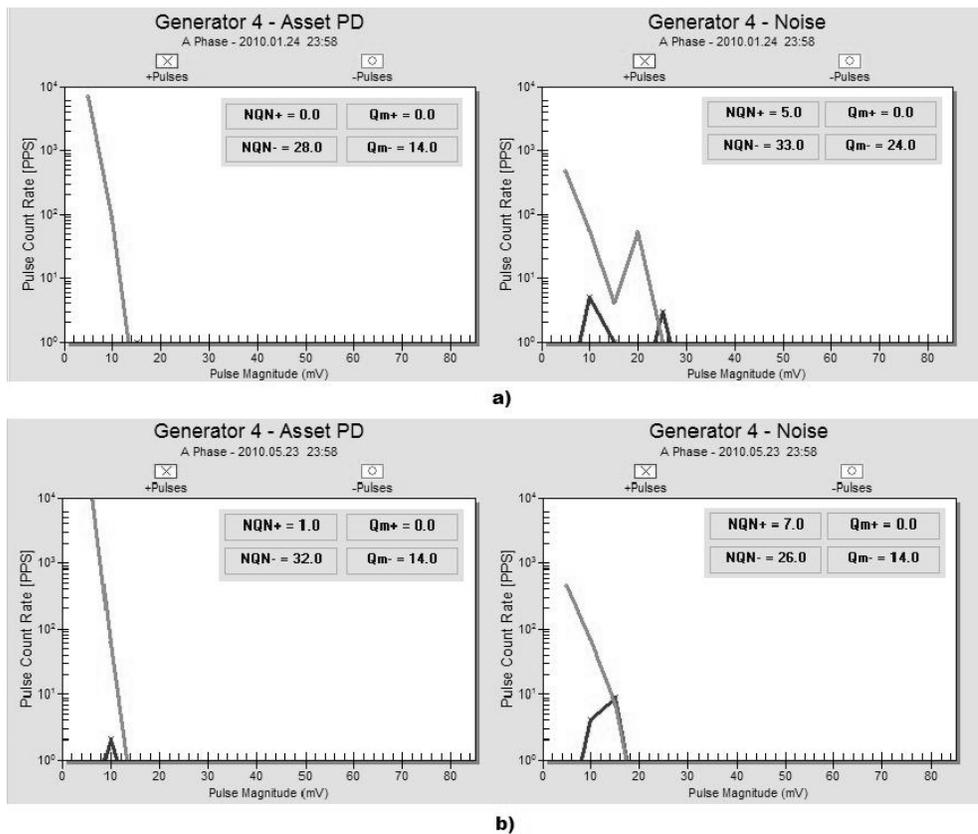
Fuente: Software PDTracPro de Iris Power.

2.2.7.4. Generador 4

- Fase A

En la figura 71 se puede ver el PHA (Análisis de la Altura de Pulsos) de mayo respecto al de enero. Con base a la sección 2.2.5 se determina que los pulsos positivos virtualmente son cero, los pulsos negativos tienen bastantes pulsos por segundo pero con magnitudes menores a 15 milivoltios (notese la escala diferente del eje horizontal).

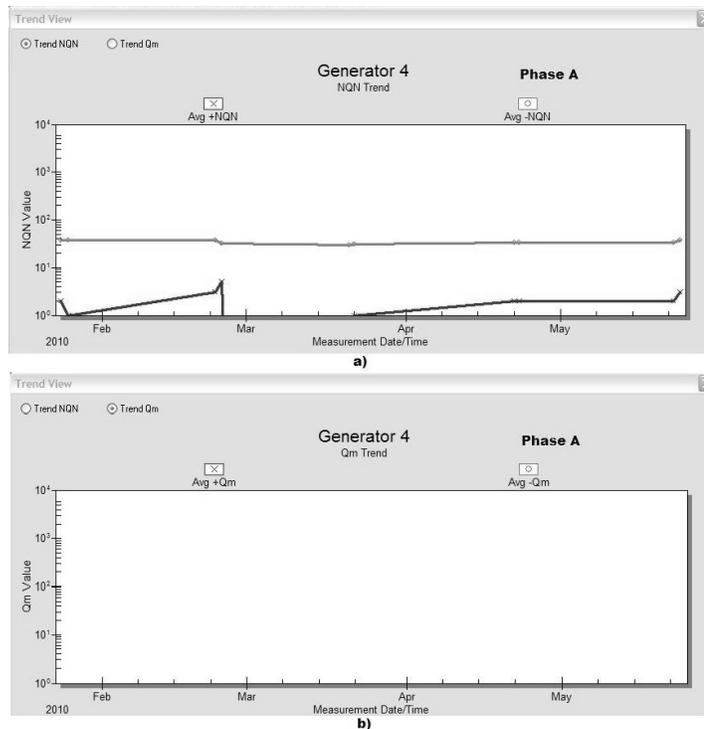
Figura 71. PHA para fase A del generador 4, a) enero, b) mayo



Fuente: Software PDTracPro de Iris Power.

También en la figura 62 se pueden ver las tendencias de NQN (Cantidad Numérica Normalizada) y Qm (Magnitud de Pico) las cuales se analizan también con base a la sección 2.2.5. La tendencia NQN (Cantidad Numérica Normalizada) positiva es bastante estable y permanece por debajo de 10 por lo que es irrelevante, la tendencia NQN (Cantidad Numérica Normalizada) negativa permanece debajo de 50 por lo que es irrelevante. No se ven elevaciones que den indicios de posibles fallas en el aislamiento. Las tendencias Qm (Magnitud de Pico) positivas y negativas son cero. La fase A del generador 4 muestra que está con actividad de descargas parciales muy bajas, según la tabla V se encuentra debajo del rango percentil 25avo.

Figura 72. **Tendencias de NQN y Qm de la fase A del generador 4**

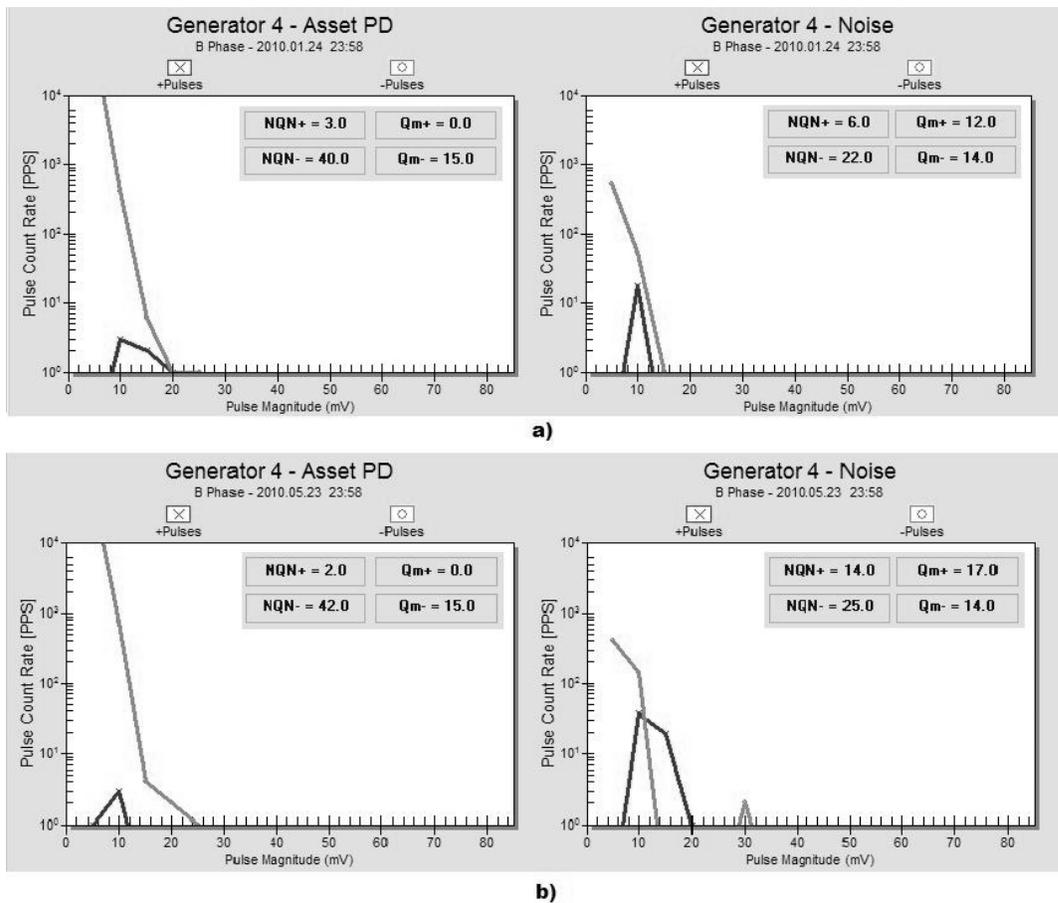


Fuente: Software PDTracPro de Iris Power.

- Fase B

En la figura 73 se puede ver el PHA (Análisis de la Altura de Pulsos) de mayo respecto al de enero. Con base a la sección 2.2.5 se determina que los pulsos positivos virtualmente son cero, los pulsos negativos tienen bastantes pulsos por segundo pero con magnitudes menores a 25 milivoltios (notese la escala diferente del eje horizontal).

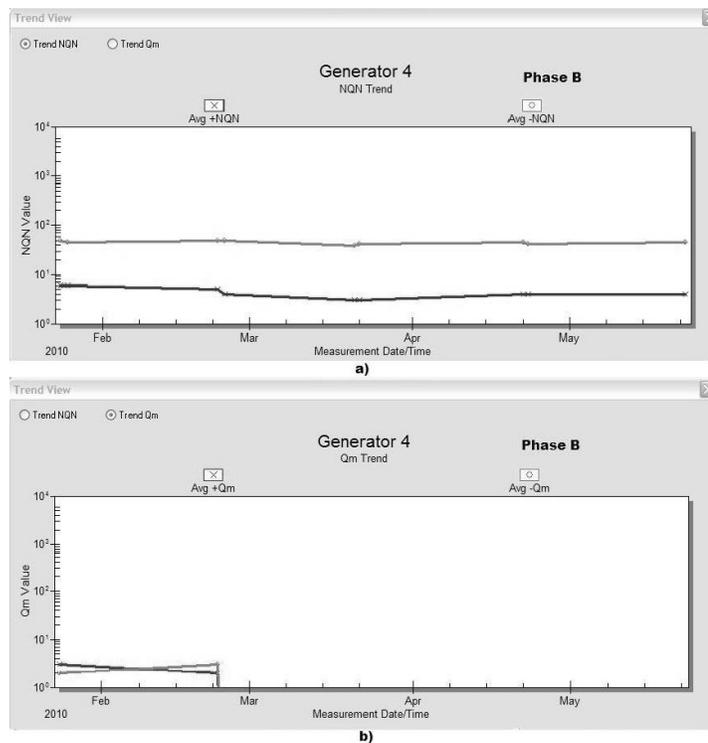
Figura 73. PHA para fase B del generador 4, a) enero, b) mayo



Fuente: Software PDTracPro de Iris Power.

También en la figura 62 se pueden ver las tendencias de NQN (Cantidad Numérica Normalizada) y Qm (Magnitud de Pico) las cuales se analizan también con base a la sección 2.2.5. La tendencia NQN (Cantidad Numérica Normalizada) positiva es bastante estable y permanece por debajo de 10 por lo que es irrelevante, la tendencia NQN (Cantidad Numérica Normalizada) negativa permanece debajo de 50 por lo que es irrelevante. No se ven elevaciones que den indicios de posibles fallas en el aislamiento. Las tendencias Qm (Magnitud de Pico) positivas y negativas virtualmente son cero. La fase B del generador 4 muestra que está con actividad de descargas parciales muy bajas, según la tabla V se encuentra debajo del rango percentil 25avo.

Figura 74. **Tendencias de NQN y Qm de la fase B del generador 4**

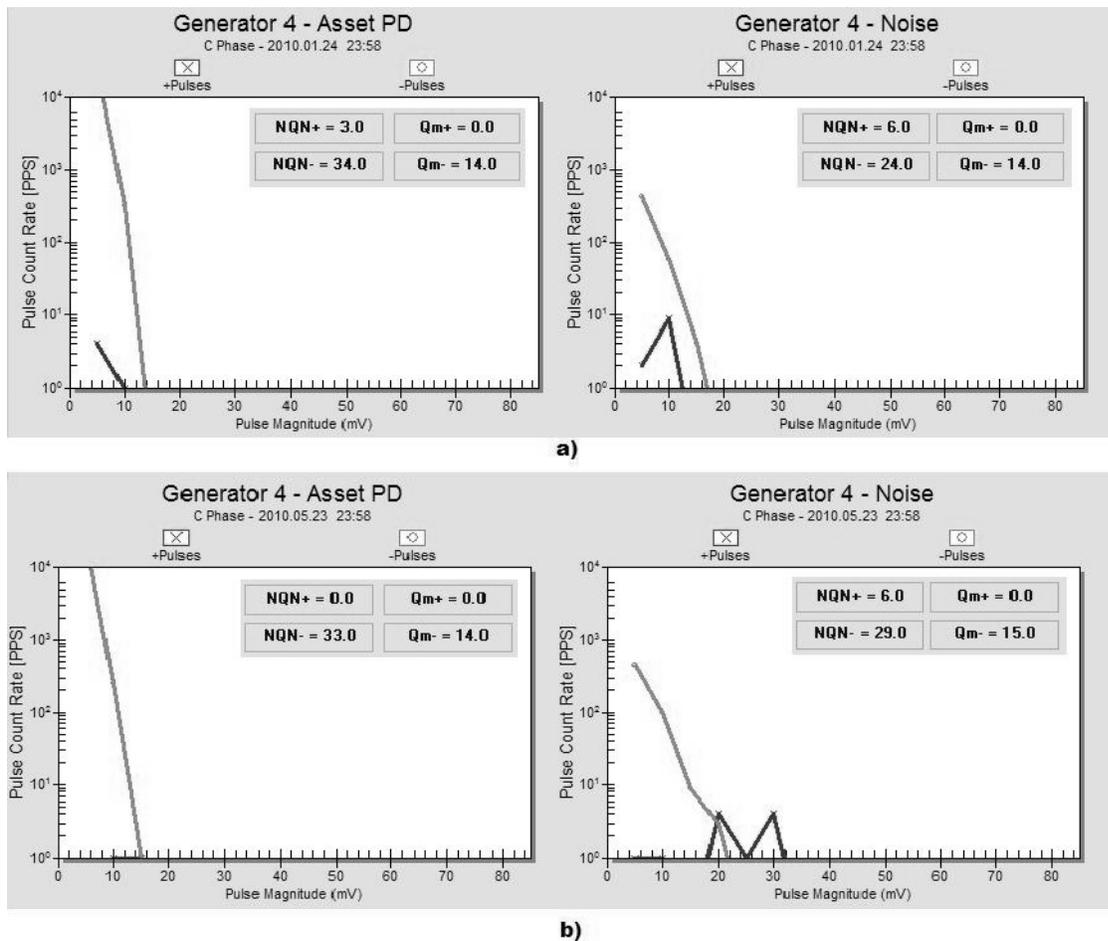


Fuente: Software PDTracPro de Iris Power.

- Fase C

En la figura 75 se puede ver el PHA de mayo respecto al de enero. Con base a la sección 2.2.5 se determina que los pulsos positivos virtualmente son cero, los pulsos negativos tienen bastantes pulsos por segundo pero con magnitudes menores a 15 milivoltios (notese la escala diferente del eje horizontal).

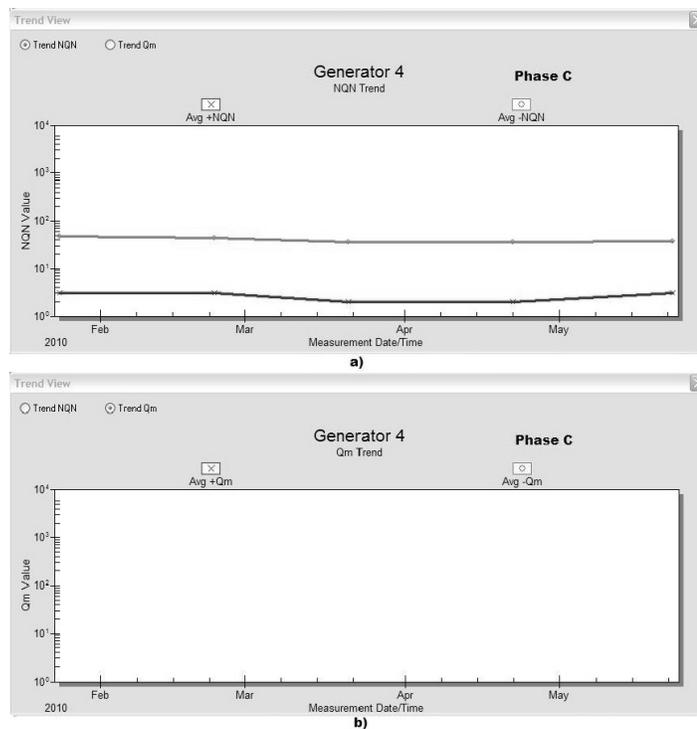
Figura 75. PHA para fase C del generador 4, a) enero, b) mayo



Fuente: Software PDTracPro de Iris Power.

También en la figura 76 se pueden ver las tendencias de NQN (Cantidad Numérica Normalizada) y Qm (Magnitud de Pico) las cuales se analizan también con base a la sección 2.2.6. La tendencia NQN (Cantidad Numérica Normalizada) positiva es bastante estable y permanece por debajo de 5 por lo que es irrelevante, la tendencia NQN (Cantidad Numérica Normalizada) negativa permanece debajo de 50 por lo que es irrelevante. No se ven elevaciones que den indicios de posibles fallas en el aislamiento. Las tendencias Qm (Magnitud de Pico) positivas y negativas virtualmente son cero. La fase C del generador 4 muestra que está con actividad de descargas parciales muy bajas, según la tabla V se encuentra debajo del rango percentil 25avo.

Figura 76. **Tendencias de NQN y Qm de la fase C del generador 4**



Fuente: Software PDTracPro de Iris Power.

3. FASE ENSEÑANZA - APRENDIZAJE

Para implementar y desarrollar el presente proyecto, personal de la planta fue capacitado en las materias necesarias, de tal forma se garantizaría el éxito de este como herramienta para el mantenimiento predictivo en la planta.

3.1. Capacitación de personal involucrado en el proyecto

Inicialmente se determinó que el personal que debería involucrarse en el proyecto, por su naturaleza, era principalmente el personal del Departamento de Mantenimiento Eléctrico.

Se analizó y consultó a cada uno para determinar las necesidades de capacitación dependiendo de sus conocimientos y de las aptitudes necesarias en el proyecto.

Se determinó que todo el personal del Departamento Eléctrico debería recibir, de parte de la empresa proveedora de los equipos de detección de descargas parciales las capacitaciones siguientes, con una duración de dos días cada una:

- Teoría de las descargas parciales.
- Manejo de equipo de detección de descargas parciales.
- Manejo de software para la captura y análisis de datos de descargas parciales.
- Interpretación de datos adquiridos de descargas parciales.

Además, se determinó que tres electricistas de planta deberían ser capacitados en cuanto al uso de computadoras y de Windows XP.

3.1.1. Capacitación sobre teoría de las descargas parciales

Este fue un entrenamiento base cero sobre las descargas parciales, los participantes fueron seis personas y los prerequisites para recibir esta capacitación eran:

- Conocimiento de la teoría eléctrica.
- Conocimiento y entendimiento de los componentes y función de las máquinas eléctricas rotativas.
- Conocimiento y entendimiento de situaciones relacionadas de trabajar con peligros potenciales eléctricos.

Los puntos tratados en este entrenamiento fueron:

- Se realizó un repaso del diseño de devanados de generadores y se recordaron los tipos de aislamiento de estos.
- Teoría básica de las descargas parciales, se enseñó sobre los mecanismos de falla y los procesos de falla, se enseñó sobre las descargas eléctricas y la física de las descargas parciales.
- Forma de detección de las descargas parciales, los sensores que se usan y se dio una previa de los equipos que las detectan.

3.1.2. Capacitación en el uso de computadoras y Windows para el personal que lo requiera

Tres electricistas no estaban relacionados al uso de computadoras por lo que recibieron una capacitación sobre el uso de computadoras y el ambiente Windows. Esta capacitación fue realizada por personal de la planta y se usaron como base los manuales de los cursos de Windows XP de Intecap. Los puntos tratados y enseñados fueron:

- Partes, funcionamiento y uso de las computadoras, dispositivos de ingreso de datos y de salida de datos, explicación de lo que es hardware, software y firmware.
- Introducción a Windows XP.
- Estructura de Windows.
- Tareas básicas en Windows XP.
- Configuraciones básicas en panel de control.
- Quitar y agregar programas en Windows XP.

3.1.3. Curso de manejo de equipo de detección de descargas parciales

En esta capacitación se tocaron los siguientes temas:

- Montaje y conexión permanente de sensores y cajas de conexiones en cada generador.
- Conexión recurrente de equipo PDTrac a cajas de conexiones en cada generador para la detección de descargas parciales y recolección de datos.
- Equipo PDTrac, construcción física, uso del panel frontal, modos de operación, precauciones de uso.
- Parametrización básica del PDTrac.
- Procedimientos de mediciones, pruebas en línea, recolección de datos y posibles errores.

3.1.4. Curso de manejo del software para la captura y análisis de datos de descargas parciales

En esta capacitación se enseñó sobre la forma de adquirir los datos provenientes del PDTrac después de que este recolecta los datos, lo cual se hace por medio de una computadora que se conecta a este y en la cual debe estar el software específico, los siguientes temas fueron tratados:

- Instalación de software PDTracPro
- Interface de usuario
- Conexión de PDTrac
- Descarga de datos
- Visualización de datos
- Graficado de datos

3.1.5. Capacitación sobre interpretación de datos adquiridos de descargas parciales

En esta capacitación se trató lo más importante del proyecto y básicamente de lo que el sistema no puede hacer por si solo, los temas tratados fueron los siguientes:

- Tipos de datos recolectados.
- Forma de pulsos clásicos de descargas parciales y forma de pulsos no clásicos.
- Tipos de descargas parciales con base a mecanismos de falla.
- Características de descargas parciales, polaridad, forma de pulsos y ángulo de pulsos.
- Interpretación, análisis de tendencias y comparaciones con máquinas similares.
- Condiciones de operación de los generadores.

4. FASE DE INVESTIGACIÓN: PLAN DE CONTINGENCIA

4.1. Objetivo general

Presentar un plan de las actividades que se deben realizar en caso de que ocurran las posibles contingencias que se pueden presentar en la planta Generadora Eléctrica del Norte.

4.1.1. Objetivos específicos

- Presentar las acciones que se deberían tomar en caso de un incendio.
- Presentar las acciones que se deberían tomar en caso de un terremoto.
- Presentar las acciones que se deberían tomar en caso de un huracán o tormenta tropical.

4.2. Introducción

La planta Generadora Eléctrica del Norte, como toda planta industrial, debe contar con planes para evitar o al menos minimizar el impacto negativo que puede ocasionar cualquier contingencia.

Esta se encuentra en Puerto Barrios, Izabal; prácticamente está al nivel del mar y cerca a las costas del mar Caribe, en estas zonas puede golpear huracanes o tormentas tropicales, además las lluvias torrenciales del invierno pueden provocar inundaciones por crecimientos de ríos debido a que el terreno es plano. Además, en el área de Izabal se encuentra la falla del Motagua, por lo que existe alguna posibilidad de sismos.

4.3. Marco teórico

A continuación, se presenta el plan de contingencias para la planta Generadora Eléctrica del Norte, en donde se presentan las acciones que se deben hacer antes, durante y después de una contingencia.

4.3.1. Bunker

Pequeñas moléculas, como aquellas del gas propano, nafta, gasolina para automóviles y combustible de jet tienen puntos de ebullición relativamente bajos y se separan al comienzo del proceso de destilación fraccionada. Los productos de petróleo más pesados, tales como el diésel, así como, el aceite lubricante, se precipitan más despacio y el bunker se ubica literalmente al fondo del barril; la única sustancia más densa que el combustible bunker es el residuo, que se mezcla con brea para pavimentar calles y sellar techos.

El combustible bunker es técnicamente cualquier tipo de combustible derivado del petróleo usado en motores marinos. Recibe su nombre (en inglés) de los contenedores en barcos y en los puertos en donde se almacena; cuando se usaban barcos a vapor se tenían bunkers de carbón, pero ahora lo mismos depósitos se usan para combustible bunker.

Se le conoce también como combustible C, bunker C o fueloil No. 6 debido a que es el más común, se usa el término combustible bunker como un sinónimo para fueloil No. 6 debido a su alta viscosidad requieren calentamiento, usualmente lograda por medio de un sistema de circulación continua a baja presión de vapor, antes de que el combustible sea bombeado desde el tanque de combustible bunker.

4.3.2. Aceite lubricante

El lubricante es una sustancia que introducida entre dos superficies móviles reduce la fricción entre ellas, facilitando el movimiento y reduciendo el desgaste.

El lubricante cumple variadas funciones dentro de una máquina o motor, entre ellas disuelve y transporta al filtro las partículas fruto de la combustión y el desgaste, distribuye la temperatura desde la parte inferior a la superior actuando como un refrigerante, evita la corrosión por óxido en las partes del motor o máquina, evita la condensación de vapor de agua y sella actuando como una junta en determinados componentes. La propiedad del lubricante de reducir la fricción entre partes se conoce como lubricación y la ciencia que la estudia es la tribología. Un lubricante se compone de una base, que puede ser mineral o sintética y un conjunto de aditivos que le confieren sus propiedades y determinan sus características.

Cuanto mejor sea la base menos aditivo necesitará, sin embargo, se necesita una perfecta comunión entre estos aditivos y la base, pues sin ellos la base tendría unas condiciones de lubricación mínimas.

4.3.3. Huracán y tormenta tropical

Consisten en vientos muy rápidos que soplan de forma circular alrededor de un centro de baja presión llamado ojo del huracán. Este centro se desarrolla cuando el aire cálido y saturado de las zonas de calmas ecuatoriales se eleva empujado por aire frío más denso, la presión atmosférica cae bruscamente mientras que la velocidad del aire aumenta.

La fuerza del huracán se evalúa con un índice o nivel entre 1 y 5.

Nivel 1: vientos (74 a 95 kilómetros), olas (4 y 5 pies), daños (moderados).

Nivel 2: vientos (96 a 100 kilómetros), olas (6 y 8 pies), daños (techos de lámina derribados).

Nivel 3: vientos (200 kilómetros), olas (9 y 12 pies), daños (techos, árboles postes de luz).

Nivel 4: vientos (250 a 300 kilómetros), olas (13 y 18 pies), daños (destructivos).

Nivel 5: vientos (más de 300 kilómetros), olas (más de 18 pies), daños (catastróficos).

4.3.4. Sismo o terremoto

Es una vibración de las diferentes capas de la tierra como producto de la liberación de energía, al fragmentarse, rozarse o quebrarse un bloque de la corteza terrestre. Las vibraciones pueden oscilar desde las que apenas son apreciables hasta las que alcanzan carácter catastrófico. En la actualidad se reconocen tres clases de terremotos: tectónicos, volcánicos y artificiales. Los tectónicos son los más devastadores (no predecibles), son tensiones creadas por los movimientos alrededor de doce placas, mayores y menores, que forman la corteza terrestre.

Los sismólogos han diseñado dos escalas de medida para describir de forma cuantitativa los terremotos:

- La escala de Richter mide la energía liberada en el foco de un sismo, es una escala logarítmica con valores entre 1 y 9,9 grados y se puede definir de la siguiente manera:
 - Menos de 3,5 grados: generalmente no se siente, pero es registrado por instrumentos.
 - De 3,5 a 5,4 grados: a menudo se siente, pero sólo causa daños menores.
 - De 5,5 a 6,0 grados: ocasiona daños ligeros a edificios.
 - De 6,1 a 6,9 grados: puede ocasionar daños severos en áreas donde vive mucha gente.
 - De 7,0 a 7,9 grados: terremoto mayor. Causa graves daños.
 - De 8 o mayor: gran terremoto. Destrucción total a comunidades cercanas.

- La escala de Mercalli, mide la intensidad de un temblor con graduaciones entre I y XII, se puede definir de la siguiente manera:
 - I: detectado sólo por instrumentos
 - II: sentido por personas en reposo
 - III: sentido dentro de un edificio

- IV: sentido en el exterior
- V: casi toda la gente lo siente
- VI: toda la gente lo siente
- VII: daño moderado en estructuras
- VIII: daño considerable
- IX : pánico general, grave daño
- X: destrucción seria en edificios bien construidos
- XI: casi nada queda en pie
- XII: destrucción total

4.3.5. Inundación

Una inundación es la ocupación por parte del agua de zonas que habitualmente están libres de esta, bien por desbordamiento de ríos y ramblas por lluvias torrenciales o deshielo o mares por subida de las mareas por encima del nivel habitual o por avalanchas causadas por maremotos.

Las inundaciones fluviales son procesos naturales que se han producido periódicamente y que han sido la causa de la formación de las llanuras en los valles de los ríos, tierras fértiles donde tradicionalmente se ha desarrollado la agricultura en vegas y riberas. En las zonas costeras los embates del mar han servido para modelar las costas y crear zonas pantanosas como albuferas y lagunas que, tras su ocupación atópica, se han convertido en zonas vulnerables.

4.3.6. Incendio

Un incendio es una ocurrencia de fuego no controlada que puede abrasar algo que no está destinado a quemarse. Puede afectar a estructuras y a seres vivos. La exposición a un incendio puede producir heridas muy graves como la muerte, generalmente por inhalación de humo o por desvanecimiento producido por la intoxicación y posteriormente quemaduras graves. Para que se inicie un fuego es necesario que se den conjuntamente estos tres factores: combustible, oxígeno y calor o energía de activación.

Las clases de fuego que existen son:

- Clase A: son los fuegos de materiales sólidos, generalmente de naturaleza orgánica, cuya combustión se realiza normalmente con la formación de brasas, como la madera, tejidos, goma, papel y algunos tipos de plástico.
- Clase B: son los fuegos de líquidos o de sólidos licuables, como el petróleo o la gasolina, pintura, algunas ceras y plásticos.
- Clase C: incendios que implican gases inflamables, como el gas natural, el hidrógeno, el propano o el butano.
- Clase D: incendios que implican metales combustibles, como el sodio, el magnesio, el potasio o muchos otros cuando están reducidos a virutas muy finas.

- Clase F: son los fuegos derivados de la utilización de derivados de aceites para cocinar. Las altas temperaturas de los aceites en un incendio excede con mucho las de otros líquidos inflamables, haciendo inefectivos los agentes de extinción normales.

4.3.7. Emergencia

Una emergencia es una situación fuera de control que se presenta por el impacto de un desastre. Cualquier suceso capaz de afectar el funcionamiento cotidiano de una comunidad, pudiendo generar víctimas o daños materiales, afectando la estructura social y económica de la comunidad involucrada y que puede ser atendido eficazmente con los recursos propios de los organismos de atención primaria o de emergencias de la localidad.

Aparece cuando, en la combinación de factores conocidos, surge un fenómeno o suceso que no se esperaba, eventual, inesperado y desagradable por causar daños o alteraciones en las personas, los bienes, los servicios o el ambiente, sin exceder la capacidad de respuesta de la comunidad afectada.

Se definen tres posibles estados de conducción que se producen en la fase de emergencia: prealerta, alerta y alarma.

4.3.8. Simulacro

Es un ensayo o ejercicio de cómo actuar en caso de una emergencia, para esto se sigue un plan previamente establecido, estudiado y conocido el cual se basa en la fisonomía del edificio o planta, en la cantidad de personal y en los peligros a los que se está expuesto.

Un simulacro pone a prueba la capacidad de respuesta del personal del edificio o planta y su ejercicio permite evaluar y retroalimentar los planes. Para acostumbrar al personal a adoptar las rutinas de acción más convenientes para reaccionar en caso de una emergencia.

Todo el personal de la planta, tanto los que están de turno como los que están de descanso deberán participar en un simulacro, con la finalidad de hacer un ejercicio lo más pegado a una contingencia real. Antes del simulacro se debe capacitar a todos los que participarán en él, tanto en lo que corresponde a los planes de emergencia, como las actividades particulares a realizar durante el simulacro.

El escenario de un simulacro debería ser:

- Apegarse a las condiciones reales en que pueda ocurrir un desastre.
- Realizar recorridos de reconocimiento por las áreas de operación del simulacro, consultar planos, elaborar croquis y determinar zonas que representen menores posibilidades de rescate, etcétera.
- Establecer áreas de seguridad exteriores e interiores que puedan ser reconocidas por las personas participantes.
- Especificar el lugar en donde iniciará la actividad, hacia donde se dirigirán los ocupantes de esa área y qué salidas utilizarán.
- Contemplar grados de dificultad en el desarrollo del simulacro.

4.4. Antecedentes

En este apartado se reconocen algunos datos importantes sobre la empresa como desde cuándo inicio operaciones y cuáles son las materias primas que utilizan para su funcionamiento.

4.4.1. Datos de la empresa

Generadora Eléctrica del Norte (Genor) inició operaciones en 1998, es una planta térmica que de acuerdo a la clasificación anterior está ubicada dentro de las Plantas de Motores Reciprocantes.

Genor tiene como actividad única la generación de energía eléctrica para lo cual cuenta con cuatro motores con su respectivo generador capaces de producir en su totalidad 42 megawatts; está ubicada en finca Buenos Aires, kilómetro 292 carretera al Atlántico, CA-9; en jurisdicción de Puerto Barrios, departamento de Izabal. Cuenta con 51 empleados entre los cuales se encuentra:

- Personal de operación (13)
- Personal de mantenimiento (19)
- Personal administrativo (8)
- Personal de almacenes (6)
- Personal de limpieza (5)

4.4.2. Materias primas

El combustible que utilizan los motores reciprocantes de Genor es el Fuel Oil #6, conocido comúnmente como bunker, el cual es almacenado inicialmente en dos tanques de almacenamiento de 7 860 barriles cada uno, antes de su uso en los motores, se le da un tratamiento el cual consiste en:

- Calentamiento.
- Reposado, para que el agua y sólidos queden en el fondo y puedan ser removidos.
- Separación, en donde el bunker es pasado por separadoras centrífugas para eliminarle minerales y agua, que tengan densidad diferente a la del bunker.
- Filtrado, para remover del bunker partículas de hasta 35 micrómetros.

Antes de entrar a la fase de separación el bunker se almacena temporalmente en dos tanques de 630 barriles cada uno. Después del proceso de separación el bunker se almacena temporalmente en otros dos tanques de 630 barriles cada uno, aquí el bunker permanece listo para ser bombeado hacia los motores en donde se le realiza el filtrado.

Además, del combustible, los motores utilizan aceite para su lubricación. El aceite nuevo es almacenado en un tanque de 20 000 litros y el aceite usado se almacena en otro tanque similar de 20 000 litros en donde se acumula para posteriormente ser enviado a una planta de reciclaje.

4.4.3. Aspectos legales

También se toman en cuenta los aspectos legales entre los que se pueden mencionar la Comisión Nacional para la Reducción de Desastres (CONRED), el Ministerio de trabajo y Previsión Social y el Instituto Guatemalteco de Seguridad Social.

4.4.3.1. Comisión Nacional para la Reducción de Desastres (CONRED)

En el artículo 3 inciso B) de la Ley de CONRED indica: organizar, capacitar y supervisar a nivel nacional, regional, departamental, municipal y local a las comunidades e instituciones, para establecer una cultura en reducción de desastres, con acciones claras antes, durante y después de su ocurrencia, a través de la implementación de programas de organización, capacitación, educación, información, divulgación y otros que se consideren necesarios.

4.4.3.2. Ministerio de Trabajo y Previsión Social, Dirección General de Previsión Social, Departamento de Higiene y Seguridad Ocupacional

En el capítulo 2, Artículo 4 del Reglamento de Higiene y seguridad indica: todo patrono o su representante, intermediario o contratista debe adoptar y poner en práctica en los lugares de trabajo, las medidas adecuadas de seguridad e higiene para proteger la vida la salud y la integridad corporal de sus trabajadores, especialmente en lo relativo a:

- Las operaciones y procesos de trabajo.
- Suministro, uso y mantenimiento de los equipos de protección personal.
- Las edificaciones, instalaciones y condiciones ambientales.
- La colocación y mantenimiento de resguardos y protecciones de las máquinas y de todo género de instalaciones.

Además, en el capítulo 3, Artículo 8 de este mismo reglamento indica: todo trabajador estará obligado a cumplir con las normas sobre higiene y seguridad, indicaciones e instrucciones que tengan por finalidad protegerle en su vida, salud e integridad corporal.

Así mismo, estará obligado a cumplir con las recomendaciones técnicas que se le den en lo que se refiere al uso y conservación del equipo de protección personal que le sea suministrado, a las operaciones y procesos de trabajo y al uso y mantenimiento de las protecciones de maquinaria.

4.4.3.3. Instituto Guatemalteco de Seguridad Social (IGSS)

A continuación se mencionan algunos artículos del Reglamento General sobre Higiene y Seguridad en el Trabajo:

- Artículo 7 En los trabajos que se realicen en establecimientos comerciales, industriales o agrícolas, en los que se usan materias asfixiantes, tóxicas o infectantes o específicamente nocivas para la salud o en las que dichas materias puedan formarse a consecuencia del trabajo mismo, el patrono está obligado a advertir al trabajador el peligro a que se expone, indicarle los métodos de prevenir los daños y proveerle los medios de preservación adecuados.

- Artículo 28 Referente a motores. Debe procurarse que los motores estén en locales aislados de los lugares de trabajo y de no ser así, de acuerdo con la potencia de los mismos, debe rodearse de barreras u otros dispositivos, no permitiéndose al personal extraño al servicio de aquellos, la entrada en estos locales o en los recintos en tal forma limitados, prohibición que debe hacerse presente mediante avisos o carteles adecuados. Los motores directamente acoplados a las máquinas, deberán ser directamente protegidos si fuera necesario. Se exceptúan de estas medidas aquellos que no ofrezcan peligro alguno para las personas que puedan aproximarse a ellos.

4.4.4. Riesgos potenciales en la planta de Genor

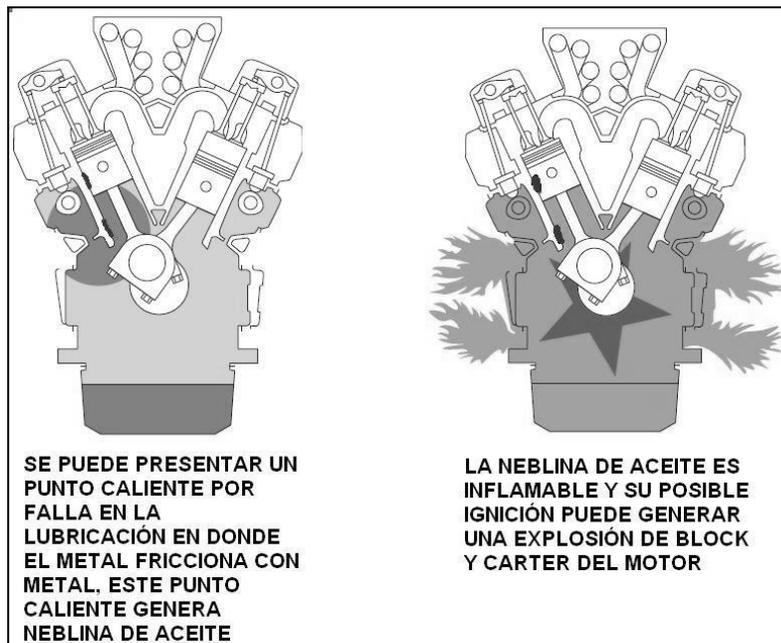
Se decidió realizar una investigación de los posibles riesgos existentes dentro de la planta Genor para clasificarlos y tener una solución viable para estos riesgos y contribuir con el resguardo de la empresa.

4.4.4.1. Investigación bibliográfica sobre contingencias en plantas de generación de energía eléctrica

Plantas térmicas de generación de potencia con base a motores de tipo reciprocante de combustible diésel o bunker presentan los siguientes posibles riesgos:

- Derrames de combustible o aceite lubricante: los cuales pueden suceder en las áreas de almacenamiento (tanques) por sobre nivel, en tuberías por daños a estas o sobrepresiones y en los mismos motores por fallas de empaquetaduras, tuberías flojas, quebradura de galerías y bombas.
- El sistema de lubricación de los motores mantiene un suministro continuo de aceite a presión a todas las partes móviles de estos: de esta forma siempre hay una capa de aceite entre las partes que se mueven relativamente, en caso de una falla en la lubricación se presenta fricción metal-metal y se generan puntos muy calientes, los cuales hacen evaporar el aceite que está en su entorno, esta neblina de aceite es altamente explosiva cuando se logra una proporción correcta en una mezcla con aire, el calor del motor puede iniciar la ignición y una consecuente explosión del motor, después de la explosión permanece fuego por el aceite lubricante y combustible que está en el motor.

Figura 77. **Corte transversal de un motor recíprocante, en donde se presenta un punto caliente**



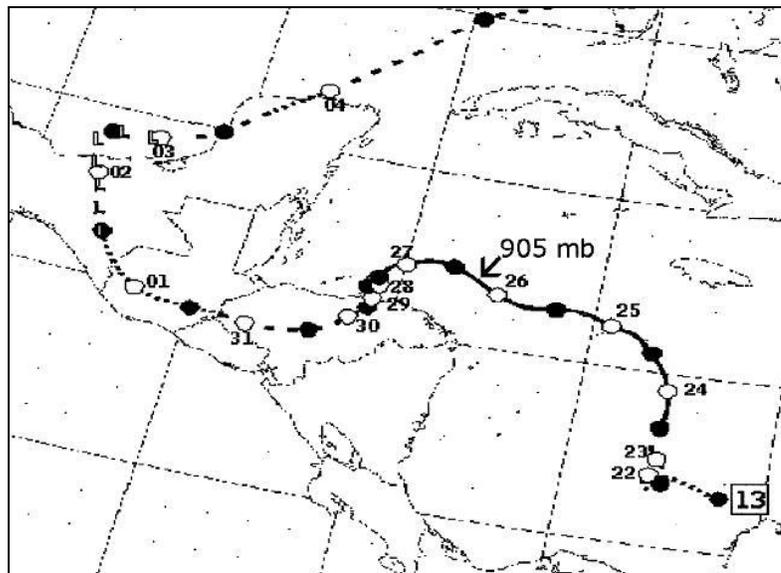
Fuente: KNIGHT, U. G. Power Systems in Emergencies. p. 131.

4.4.4.2. Contingencias ocurridas en Genor

En la historia de la planta se mencionan cuatro contingencias que han ocurrido, las cuales han sido del tipo natural, afortunadamente nunca ha habido contingencias del tipo incendio o derrames de gran magnitud, se mencionan a continuación:

- Huracán Mitch 1998: el cual a pesar de que no pasó exactamente sobre el área de Puerto Barrios, la cantidad de precipitación pluvial fue grande lo que ocasionó que los terrenos cercanos a la planta se inundarán, además de que los ríos también aportaron gran cantidad de agua a esta inundación debido a su desbordamiento. En este caso, en la planta se detuvieron los generadores, se cerraron todas las válvulas y se desactivaron casi todos los circuitos eléctricos dejando disponibles únicamente los de iluminación. La trayectoria de este huracán se muestra en la figura 78.

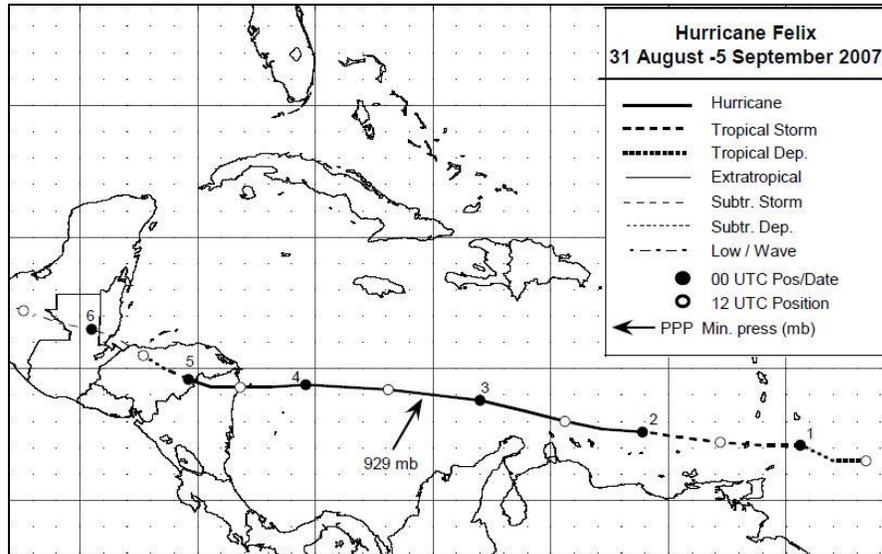
Figura 78. **Trayectoria del huracán Mitch del 13 de octubre al 4 de noviembre 1998**



Fuente: National Hurricane Center. www.nhc.noaa.gov. Consulta: enero de 2012.

- Temblor en Puerto Barrios de 6 grados Richter, 11 de julio 1999: este evento fue algo curioso ya que fue un sismo fuerte que solamente se sintió en Izabal, el epicentro fue en Puerto Barrios y del cual no hay mayor registro en el país, más que en algunos sitios en Internet. En esa ocasión se detuvieron los generadores, se abrieron los interruptores de alta tensión, se verificó el alineamiento de los generadores y la estructura de la planta y de la subestación.
- Huracán Félix, septiembre 2007: este huracán al pasar sobre el área de Izabal ya había perdido fuerza pero hubo mucha precipitación pluvial, lo que hizo que se inundaran los terrenos alrededor de Genor y un río que pasa cerca de la planta se desbordó inundando una parte de terreno de esta. En esta ocasión en la planta se detuvieron los generadores, se cerraron todas las válvulas y se desactivaron casi todos los circuitos eléctricos dejando únicamente disponibles los de iluminación. Posteriormente, se construyó una borda de casi 180 centímetros de altura alrededor de la planta para evitar este tipo de inundaciones.

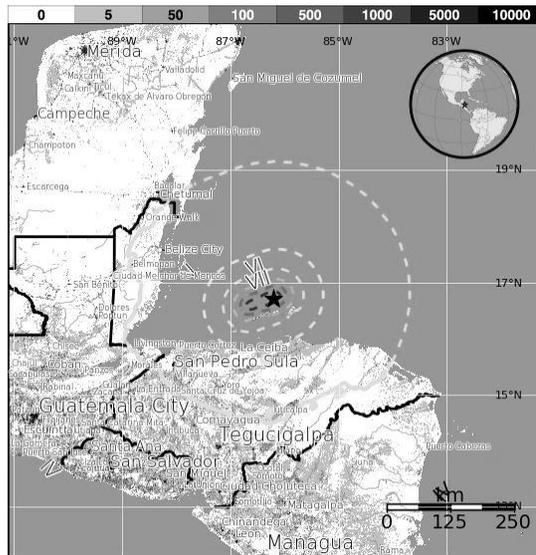
Figura 79. Trayectoria del huracán Felix 2007



Fuente: National Hurricane Center. www.nhc.noaa.gov. Consulta: enero de 2012.

- Terremoto en Honduras de 7,3 Richter, 28 mayo 2009: este terremoto tuvo su epicentro en el golfo de Honduras y en el país sólo se sintió en Izabal, Zacapa y Chiquimula. Se sintió muy fuerte y en la planta se detuvieron los generadores, se abrieron los interruptores de alta tensión, se verificó exhaustivamente el alineamiento y estado de los generadores-motores y la estructura de la planta y de la subestación. La figura 80 muestra el epicentro.

Figura 80. **Ubicación de epicentro de terremoto en Honduras en mayo 2009**

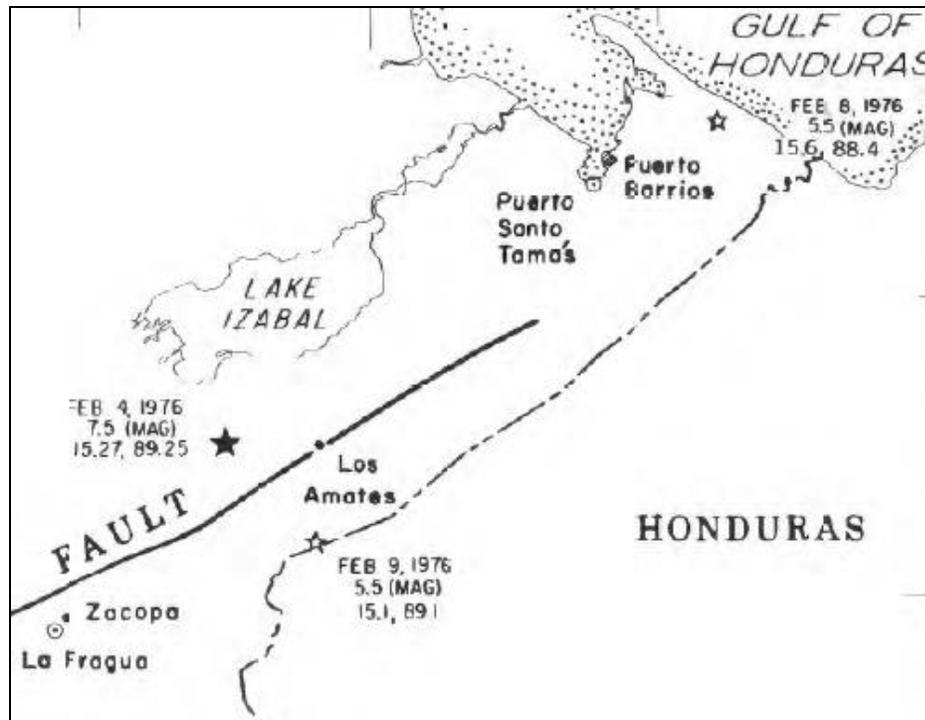


Fuente: USGS Earthquake Hazards, Earthquakes archive. <http://www.usgs.gov/>. Consulta: enero de 2012.

4.4.4.3. Contingencias ocurridas en el área de Izabal

Excluyendo las contingencias que han ocurrido en los once años de operación de la planta y que ya fueron mencionadas en la sección anterior, otra de las contingencias que se pudo investigar fue la del terremoto de 7,5 Richter del 4 de febrero de 1976, cuyo epicentro fue en el municipio de Los Amates a 95 kilómetros de Puerto Barrios, después del terremoto principal, hubo varias réplicas las cuales tuvieron epicentros en otros puntos siempre del departamento de Izabal, todo lo cual se aprecia en la figura 81.

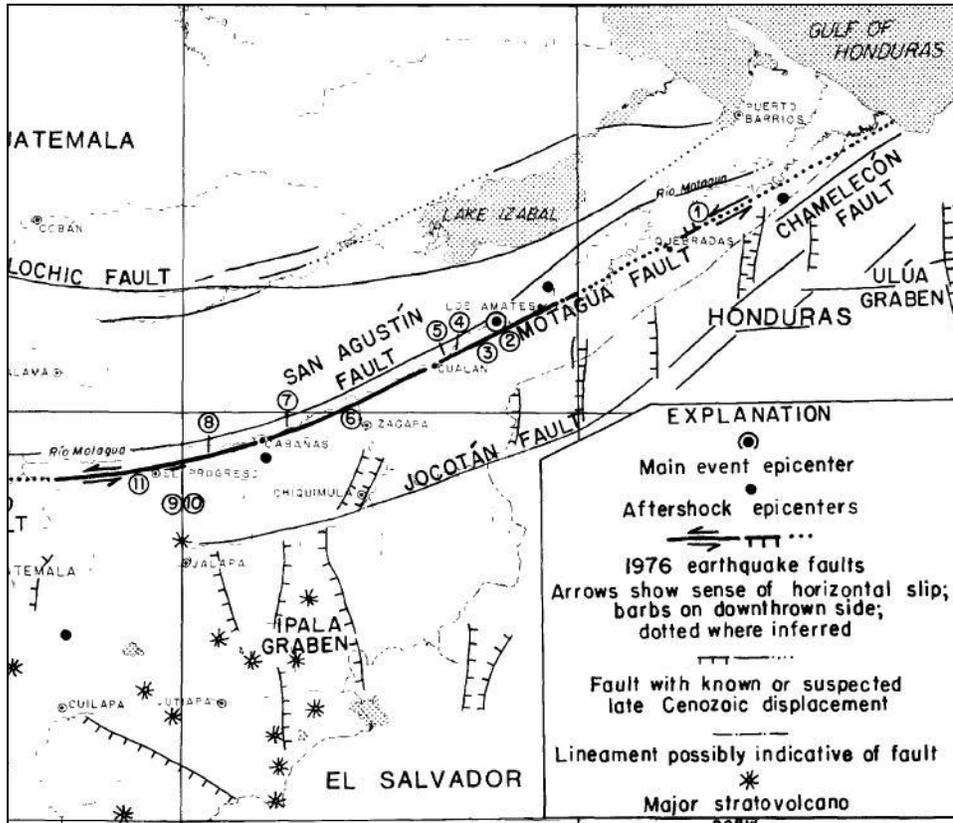
Figura 81. **Mapa de epicentros de terremotos y réplicas de sismos en 1976, la estrella negra muestra el terremoto mayor y las estrellas blancas las réplicas**



Fuente: ESPINOSA, A. F. The Guatemalan Earthquake of February 4, 1976, a Preliminary Report. p. 25.

El área de Izabal está propensa a sismos por el hecho de que por ella pasan muchas fallas geológicas como se puede ver en las figura 82.

Figura 82. Fallas geológicas en el área de Izabal



Fuente: ESPINOSA, A. F. The Guatemalan Earthquake of February 4, 1976, a Preliminary Report. p. 25.

4.5. Diseño de un plan de contingencias

Considerando los aspectos legales en donde existe la obligación por parte del patrono y empleados de buscar la preservación de la salud e instalaciones y considerando los riesgos potenciales a los que está expuesta la planta y sus alrededores, se presenta el siguiente plan de contingencia.

4.5.1. Formación de brigada

Brigada de Genor. Debe ser conformada por empleados motivados y correctamente entrenados los cuales deben ser responsables de asumir la ejecución de procedimientos operativos necesarios, para prevenir o controlar las emergencias que puedan presentarse en Genor (la planta), minimizar lesiones o muertes, daños y pérdidas que puedan ocasionar las contingencias en la planta; atender alguna lesión de personal en la que los primeros auxilios ejecutados correctamente y a tiempo pueden ser cruciales. Cada una de las posibilidades de supervivencia de las víctimas se reduce si el tiempo de respuesta, desde el conocimiento del desastre hasta la atención hospitalaria se prolonga.

La brigada debe realizar correctamente e insensiblemente las actividades en casos de emergencia para la que ha sido capacitada y entrenada. La brigada atiende la situación hasta la llegada de los cuerpos de socorro externo o profesionales capacitados para el control de la misma.

A continuación, se describe la forma en que se debería estructurar la brigada:

- Jefe de brigada, el cual como jefe de emergencia, toma el cargo y coordina todas las operaciones para asegurar la efectividad de estas. Al presentarse un caso de contingencia evaluará la situación y será él quien inicie el plan de emergencia.
- Jefe de ataque, el cual acude al lugar del siniestro y dirige las acciones para mitigarlo, debe ser el asesor del jefe de emergencia.

- Equipo de ataque, el cual debería ser conformado por un líder bombero y al menos 12 bomberos de los cuales deberá haber personal de cada turno de operación y de mantenimiento para que siempre haya gente capacitada en la planta.
- Equipo de bloqueo, el cual debería ser conformado por un líder de bloqueo y al menos 8 personas de las cuales deberá haber al menos uno de estos en cada turno de operación y mantenimiento, su principal responsabilidad es la de bloquear válvulas y aislar eléctricamente los circuitos.
- Equipo de primeros auxilios o Safety, el cual debería ser conformado por un líder Safety y al menos 8 personas, siempre con el cuidado de que haya al menos uno de estos en cada turno de operación y mantenimiento, su principal responsabilidad es la de tener conocimiento formal de primeros auxilios, tener temple e insensibilidad para no derrumbarse ante casos de emergencia personales, prestar socorro y primeros auxilios de forma correcta y pronta ante las necesidades que haya.
- Encargados de comunicaciones, el cual debería estar conformado por dos personas del equipo de bloqueo y su función sería la de centralizar toda la información que entre o salga de la planta durante y después de la contingencias, esto para evitar saturación, malos entendidos y comunicación no asertiva.

Además del personal de la brigada, todo el personal de la planta deberá completar los entrenamientos y simulacros.

4.5.2. Acciones inmediatas en todas las emergencias

- Evaluar la situación para determinar el tipo de situación. Responsable: todos.
- Como sea ordenado por el jefe de brigada o en su ausencia el líder de ataque, los integrantes del equipo de bloqueo detendrán los equipos y los desenergizarán, como sea necesario para limitar las posibilidades de amenazas y daños. La decisión de bloquear el equipo concreto y el instante en que se debe hacer será de acuerdo a la situación.
- Hacer la comunicación de la emergencia, tan pronto como sea posible y práctico. Responsable: equipo de bloqueo.
- Contar al personal que se encuentra en la planta, contratistas y visitantes. Responsable: líder bloqueo.
- Dirigir a otros empleados para realizar ciertas tareas o buscar la seguridad en ciertos lugares. Una persona debe ser designada para escoltar a los grupos de emergencia mientras estos van llegando a la planta. Responsable: personal Safety. Se debe tener disponibilidad a los teléfonos si hay bastante gente en la planta. La comunicación por radio debe estar libre para ser usada cuando se necesite. Responsable: líder bloqueo.
- El líder de bloqueo cuidará de la seguridad de la planta y de las comunicaciones. El acceso a la planta debe ser restringido de tal manera, que se admita únicamente al personal de la planta esencial y personal de emergencia.

- Si las personas están seriamente heridas, usar el conocimiento de primeros auxilios, como también las ayudas que están en la planta para determinar las respuestas apropiadas hasta que la ayuda profesional llegue a la planta. No intentar realizar primeros auxilios más allá del nivel de conocimiento. Cuando sea posible, minimizar movimientos que puedan herir a las personas. Responsable: equipo safety.
- Considerar la presencia de materiales peligrosos. Informar a todas las otras personas y personal de brigada de peligros potenciales.
- Evacuar la planta si es necesario usando las rutas de evacuación de personal, de lo contrario el personal de la brigada safety sugerirá la más segura y el personal de la brigada de bomberos realizará esta ruta. Responsables: jefe de emergencia, jefe de equipo safety, equipo bomberos, todos.

4.5.3. Acciones a realizar en caso de fuego y explosiones

- Si es posible, sin que se encuentre en peligro, tomar acciones inmediatas para detener las fuentes de fuego (por ejemplo, desenergizar los componentes eléctricos, cerrar las válvulas de combustible, etcétera). Responsable: equipo de bloqueo.
- Notificar a las organizaciones y al personal especificado en la sección 1 C. Responsable: equipo de bloqueo.
- Mientras se mantienen las comunicaciones por radio y sin arriesgarse, combatir el fuego, utilizando los equipos del sistema contra incendios que aplique. Responsable: equipo de bomberos.

- Ayudar a controlar el fuego retirando material que podría entrar en combustión. Responsables: equipo de bomberos.
- En caso de incendios forestales, preparar mangueras e hidrantes que cubran los perímetros amenazados; si es necesario, abrir malla perimetral para facilitar maniobras, controlar la dirección del viento. Se sugiere abrir una zanja perimetral que pueda aislar el peligro. Responsable: equipo de bomberos.

4.5.4. Acciones a realizar en caso de sismos

- Mantener actualizada la cadena de comunicación (líder safety).
- Mantener botiquín de primeros auxilios (líder safety) y botiquín familiar (todos).
- Ubicar siempre todo objeto pesado en los estantes inferiores o sobre el suelo, para evitar que caigan durante un sismo (Almacén & M.).
- Las zonas de evacuación y puntos de concentración en la planta, serán los siguientes: helipuerto y área de radiadores.
- Tener a la mano un radio de baterías y una linterna, así como, baterías de repuesto.
- Mantener sistema de luz de emergencia y señalización de salida (equipo de electricistas).

- Especial cuidado con el almacenamiento de productos químicos tóxicos o inflamables (Almacén & M.).
- Practicar simulacros e instrucción sobre este sistema (safety).

4.5.4.1. Durante un sismo

- Mantener la calma para actuar en forma segura, ordenada y rápida y motivar a las personas que están alrededor para hacer lo mismo.
- No salir corriendo.

El personal que se encuentra adentro del edificio de oficinas deberá:

- Alejarse de ventanas, estanterías, cuadros u objetos que puedan causar daños.
- Cubrirse la cabeza con sus brazos.
- Protegerse debajo de dinteles de puertas o de algún mueble sólido, como mesas, escritorios o ubicarse contra una pared interior (previamente identificados).
- Evaluar, no intentar salir corriendo del edificio durante un terremoto severo debido a las líneas de energía que puedan resultar derribadas, escombros cayendo del edificio, peligro con las gradas, etcétera.

El personal que se encuentra fuera del edificio deberá:

- Alejarse de estructuras altas, paredes, postes de luz, árboles y otros objetos que puedan caer.
- Si es posible dirigirse a un lugar abierto, puede ser el patio de parqueos, helipuerto, área de radiadores y cancha de fútbol

4.5.4.2. Después de un sismo

- Mantener la calma recordar que al perder la serenidad, se origina pánico y desorden.
- Chequear si hay personas heridas y suministrar primeros auxilios si es necesario.
- Evacuar el edificio. Dirigirse en forma ordenada a la zona de seguridad, previamente establecida y olvidar pertenencias.
- Recuento de personal (líder de bloqueo), evaluar peligro (no regresar al edificio hasta recibir la orden), determinar si hay lesionados y dar primeros auxilios, conseguir de inmediato la asistencia médica. (equipo safety).
- No salir a la calle hasta estar seguros que las mismas son transitables, evitar cruzar puentes dañados.
- No hacer llamadas telefónicas innecesarias.

- Desenergizar todos los motores y equipos eléctricos, cerrar todas las llaves para aislar los fluidos y el vapor, liberar el vapor que esté en las calderas, cerrar tanques de combustible. Responsable: equipo de bloqueo.
- Evaluar los daños en la planta, hacer un chequeo de estructuras, tuberías, edificios, alineamiento de motores y generadores. Aislar todo lo que esté dañado. Responsable: todos coordinados por el jefe de brigada.

4.5.5. Acciones a realizar en caso de huracán o tormenta tropical

A continuación, se presentarán algunas acciones recomendadas a realizar en caso de huracanes antes, durante y después de este fenómeno climatológico.

4.5.5.1. Antes del huracán o tormenta tropical

- Mantener la calma (todos).
- Mantener actualizada la cadena de comunicación (líder safety).
- Mantener botiquín de primeros auxilios (líder safety).
- Abastecimiento de agua y alimentos que no requieren preparación para 48 horas, baterías para linternas (safety's) y supervisor de almacén.
- Inspección de techos, puertas, ventanas y aleros, asegurar las partes flojas (equipo de bomberos y resto del grupo de mantenimiento).

- Asegurar objetos del exterior que pudieran salir volando (equipo de bomberos y resto del grupo de mantenimiento).
- Eliminar acumulación de desechos, trapos u otros que puedan tapan las canales o bajadas de agua (equipo de bomberos y grupo de mantenimiento).
- Colocar objetos pesados en los estantes inferiores o sobre el suelo, acomodar bien las cajas en cuarto de motores (grupo de almacén).
- Colocar registros de oficina valiosos en bolsas de nailon u otro (todos).
- Colocar cinta adhesiva en las ventanas (todos).
- Asegurar que todos los radios de la planta y linternas estén cargados (usuarios).
- Tener sintonizado el radio para escuchar noticias (personal de operación).
- Reporte de niveles de tanques de combustible en Genor y Genor Zolic.
- Mantener llenos los tanques de combustible de los automóviles y cargar las baterías de los celulares.
- Improvisar albergue en cuarto de inyección o taller de electricistas (equipo safety).
- Punto de concentración para recibir instrucciones y dirigirse al albergue es el cuarto de control de la planta.

- Escuchar por la radio llamadas de evacuación de CONRED y fuerzas de seguridad civiles y militares sobre albergues disponibles (equipo de bloqueo).
- Asegurarse de portar documentos de identificación (todos).
- Solicitar al INSIVUMEH boletines meteorológicos especiales vía fax. (equipo de bloqueo).
- Comunicarse a CONRED para solicitar información vía fax de albergues disponibles (equipo de bloqueo).
- Practicar simulacros e instrucción sobre este sistema (equipo safety).

4.5.5.2. Durante el huracán o tormenta tropical

- Mantener la calma (todos).

Advertencia de huracán (emitida por jefe de brigada)

- Organizar y escuchar boletines informativos vía radio o Internet (equipo de bloqueo) y reportar información a gerente de planta.
- Grupos de operación y mantenimiento, permitir al personal que tenga familia estar con ellos (supervisor con personal bajo cargo).

Alerta de huracán

- No hacer llamadas telefónicas innecesarias (todos).
- Examinar la situación y asegurar que todos los factores sean considerados, reducir riesgo potencial al personal (gerente de planta, líder safety).
- Como sea ordenado por el gerente de planta o en su ausencia supervisor de operaciones, el jefe de turno procederá a detener los equipos para evitar posibilidad de daños.
- El supervisor de turno cuidará de la seguridad de la planta. El acceso a la planta deberá ser restringido de tal manera que se admita únicamente al personal de planta o de emergencia (supervisor de turno/guardianía).
- Informar al supervisor de turno datos sobre nivel del río cercano a la planta (guardianía).
- Cerrar herméticamente todas las puertas (equipo de bloqueo).
- Acudir de inmediato al albergue designado.
- De ser necesario; evacuar la planta (si no es seguro el albergue). Un líder dirige la evacuación y otro la escolta, se debe disponer de teléfonos celulares y radios. La designación estará a cargo del jefe de brigada.

Aviso de huracán

- Mantener la calma, no prestar atención a rumores (todos).
- Permanecer en el interior del albergue.
- Sentarse sobre el suelo con la cabeza entre las rodillas.
- Permanecer en el interior del albergue, cuando pase el ojo del huracán, el viento puede retornar posiblemente con mayor fuerza (no salir a la intemperie).
- Escuchar el radio para recibir instrucciones de emergencia.
- Si hay personal herido, usar conocimientos de primeros auxilios, no realizar atención más allá del nivel de conocimientos (usar botiquín).

4.5.5.3. Después del huracán o tormenta tropical

- Mantener la calma (todos).
- No salir del albergue hasta asegurarse que no hay peligro.
- Observar si hay lesionados y dar primeros auxilios, si es necesario conseguir de inmediato la asistencia médica (equipo safety).
- El personal que se quedó fuera del albergue de la planta reportará su situación al jefe superior inmediato.

- Documentar en detalle todos los eventos tan pronto como sea posible, dibujos de las escenas, boletines u otros (equipo de bloqueo).
- Reporte accidentes (líder safety).
- Inspeccionar todos los edificios y sistemas de la planta, restringir áreas peligrosas, reportar defectos (jefe de brigada, líder de ataque, líder de bomberos y líder safety).
- Corregir defectos del sistema y condiciones inseguras (si es posible, no atender contra la seguridad) (grupo de mantenimiento).
- Iniciar limpieza de escombros y basura (todos).
- Revisar el sistema eléctrico, no conectar fuentes de energía hasta que todo éste seco (técnicos electricistas).
- No utilizar agua en sistema de uso sanitario sin antes revisar desagües.
- Revisar sistema de combustible (equipo de bloqueo).
- Monitorear existencias de combustibles (líder de ataque).

CONCLUSIONES

1. Con base a los resultados de las pruebas del generador 1 de Genor de la sección 2.2.8.1. y tomando los criterios de interpretación de datos de la sección 2.2.5. se determina que este generador tiene una actividad de descargas parciales de bajo a típico, el aislamiento está aceptable y no ha sufrido abusos en su operación durante estos 11 años.
2. Con base a los resultados de las pruebas del generador 2 de Genor de la sección 2.2.8.2. y tomando los criterios de interpretación de datos de la sección 2.2.5. se determina que este generador tiene una actividad de descargas parciales de bajo a típico, el aislamiento está aceptable y no ha sufrido abusos en su operación durante estos 11 años.
3. Con base a los resultados de las pruebas del generador 3 de Genor de la sección 2.2.8.3. y tomando los criterios de interpretación de datos de la sección 2.2.5. se determina que este generador en su fase B tiene la actividad de descargas parciales de típico a moderado, por lo que todo el generador se considera en este rango, no es alarmante ya que está entre los valores típicos para este tipo de máquinas, únicamente se resalta que es el generador menos aceptable de Genor.

4. Con base a los resultados de las pruebas del generador 4 de Genor de la sección 2.2.8.4 y tomando los criterios de interpretación de datos de la sección 2.2.5. se determina que este generador virtualmente no presenta actividad de descargas parciales, se indagó sobre el asunto a personal de Genor y se informó de que este generador entró en operaciones en septiembre de 2009 por lo que tiene menos de un año de operar.
5. No se observaron elevaciones de descargas parciales en estos 5 meses mientras duró el proyecto del Ejercicio Profesional Supervisado (EPS), lo que comprueba que los mecanismos de falla son lentos y permite espaciar más el tiempo entre las pruebas.
6. Los generadores 1, 2 y 3, según los criterios de interpretación de datos de la sección 2.2.5, tienen una actividad de descargas parciales muy baja, relativamente para el tiempo de operación que llevan, a pesar de que en donde se encuentran instalados la humedad relativa y la temperatura son constantemente altos, lo que haría suponer de que el sistema de enfriamiento no es suficiente para enfriarlos devanados satisfactoriamente.

7. El sistema de control de los generadores en Genor no permite que los generadores tomen carga de forma inmediata, más bien desde el momento que sincronizan toma 17 minutos para llegar a plena carga y al momento de apagarlo toma 10 minutos en bajar la carga hasta apagarse. Los generadores tienen en su placa de características una capacidad de 14,35 megavatios y el sistema de control de Genor no permite su utilización más allá de 10,6 megawatts y 6 megavatios lo cual equivale a 12,18 megavatios. Como conclusión estas dos condiciones permiten que los generadores no sufran los mecanismos de falla de deterioración térmica y Ciclos de Carga indicados en la sección 2.1.5.2. los cuales son lo más comunes en la operación de estas máquinas.

8. En las gráficas que se pueden ver a lo largo de la sección 2.2.8 se puede observar que las tendencias muestran subidas y bajadas en forma de oscilaciones pero los valores permanecen dentro de un rango y tendencia equivalentes a la condición actual de los generadores. Con base a todos los resultados de esta sección se puede concluir que predictivamente la falla más propensa a ocurrir es la del aislamiento groundwall debido a que la tendencia de incremento de las descargas parciales son mayores en su polaridad positiva que en la negativa.

9. Según los datos estadísticos de Iris Power de la tabla V de la sección 2.2.5, los generadores de potencia que trabajan en un rango de voltaje entre 13 y 15 kilovatios, el cual es el rango en el que trabajan los generadores de Genor, es el más propenso a actividad de descargas parciales.

10. Con este equipo para la detección de descargas parciales que se adquirió en la planta Genor y que fue base para este trabajo de Ejercicio Profesional Supervisado (EPS), se puede detectar la magnitud, la polaridad y las repeticiones por segundo de las descargas parciales, más no así el ángulo de estas. Los datos que se pueden detectar actualmente son suficientes para llevar un programa de mantenimiento predictivo a largo plazo con base a lo indicado en la sección 2.2.5.

RECOMENDACIONES

1. Considerar cambiar los parámetros del instrumento de detección de descargas parciales para que el rango de medición sea menor, ya que el utilizado, de 50 a 850 milivoltios es muy amplio y los generadores no presentan descargas parciales de gran magnitud.
2. Con base al estado de los generadores, según los resultados indicados en la sección 2.2.7, se debería considerar espaciar las pruebas a cada 6 meses.
3. Es importante mantener y respetar las rampas de subida y bajada de potencia que tiene el sistema de control actual de los generadores de Genor, eso ha tenido mucho que ver en la salud actual de los tres generadores más antiguos.
4. Tomar en cuenta que si ocurriera que, tomando como base los criterios de interpretación de datos de la sección 2.2.5, los valores de las descargas parciales llegarán a rangos altos, es ideal identificar exactamente el mecanismo de falla que se está desarrollando para intentar repararlo, para lograrlo, Iris Power también cuenta con otro tipo de instrumentos con los cuales es posible detectar el ángulo de incidencia de las descargas parciales además de los parámetros que detecta el instrumento de Genor.

5. Debido a que la actividad de descargas parciales se presenta únicamente en las bobinas que trabajan a un potencial muy alto respecto al neutro (potencial del núcleo) las cuales son entre el 15 y el 20% de las bobinas más próximas a las terminales del generador las que presentan actividad de descargas parciales. En caso de muy alta actividad de descargas parciales, una buena reparación sería utilizar las puntas usadas para el punto neutro como terminales del generador y las que eran las puntas usadas como terminales usarlas para hacer el punto neutro del generador, ya que las bobinas cercanas al neutro no tienen actividad de descargas parciales.

6. Evitar el uso de generadores que trabajen entre 13 y 15 kilovoltios en proyectos futuros, ya que estadísticamente son los que más actividad de descargas parciales pueden presentar.

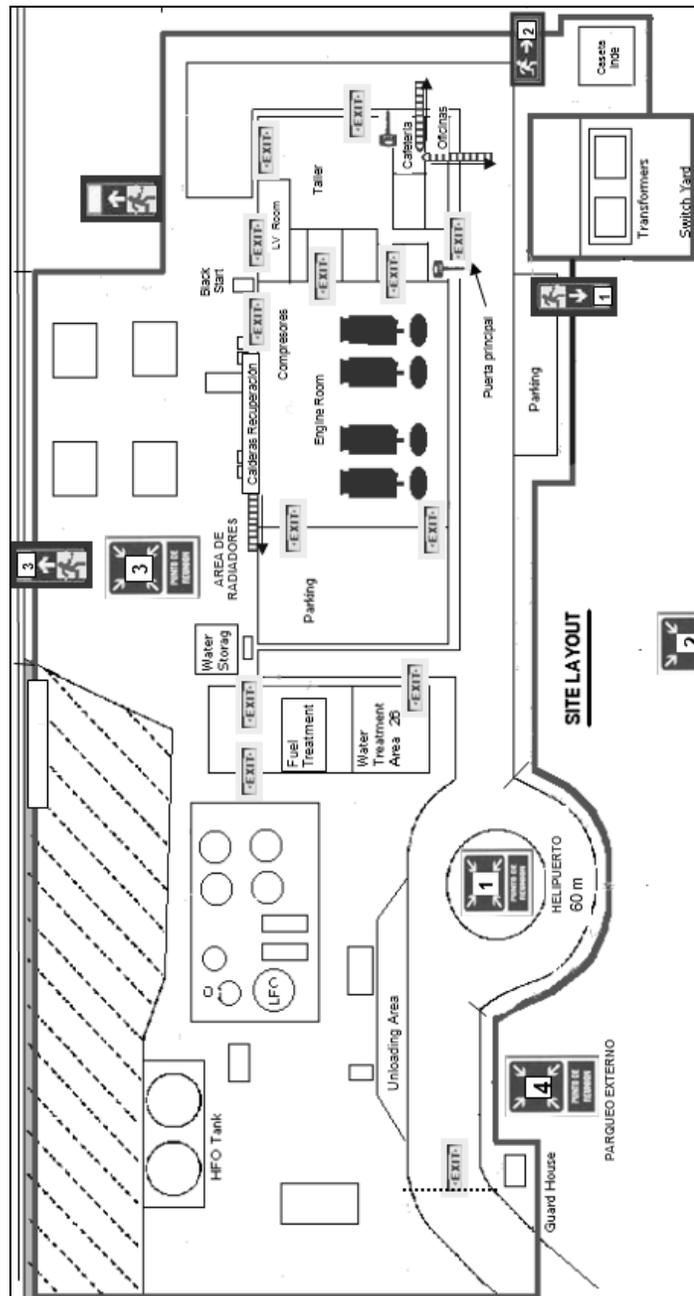
BIBLIOGRAFÍA

1. ABB. *Synchronous generators for diesel and gas engines. GB 02-2004.* Finlandia. ABB OY Electrical machines. 2001. 24 p.
2. BARRERO, Fermin. *Sistemas de energía eléctrica.* España: Thompson. 2004. 363 p.
3. BOLDEA, Ion. *Synchronous Generators (The Electric Power Engineering Series).* USA: Taylor & Francis Group LLC, 2006. 426 p.
4. DAVIS, T. *Protection of industrial power systems.* 2a ed. USA: Elsevier. 1996. 244 p.
5. Electrical machinery committee of the IEEE power engineering society. *IEEE trial-use guide to the measurement of partial discharges in rotating machinery.* USA: IEEE, 2000. 62 p.
6. _____. *Society. IEEE Standard test procedure for polyphase induction motors and generators.* USA: IEEE, 1996. 65 p.
7. ELMORE, Walter A. *Protective relaying theory and applications.* 2a ed. USA: Marcel Dekker, 2007. 425 p.
8. ESPINOSA, A. F. *The Guatemalan Earthquake of February 4, 1976, a preliminary report.* USA: United State Government printing officel. 1976. 103 p.

9. Synchronous Generators (The Electric Power Engineering Series). USA:
Taylor & Francis Group LLC, 2006. 426 p.

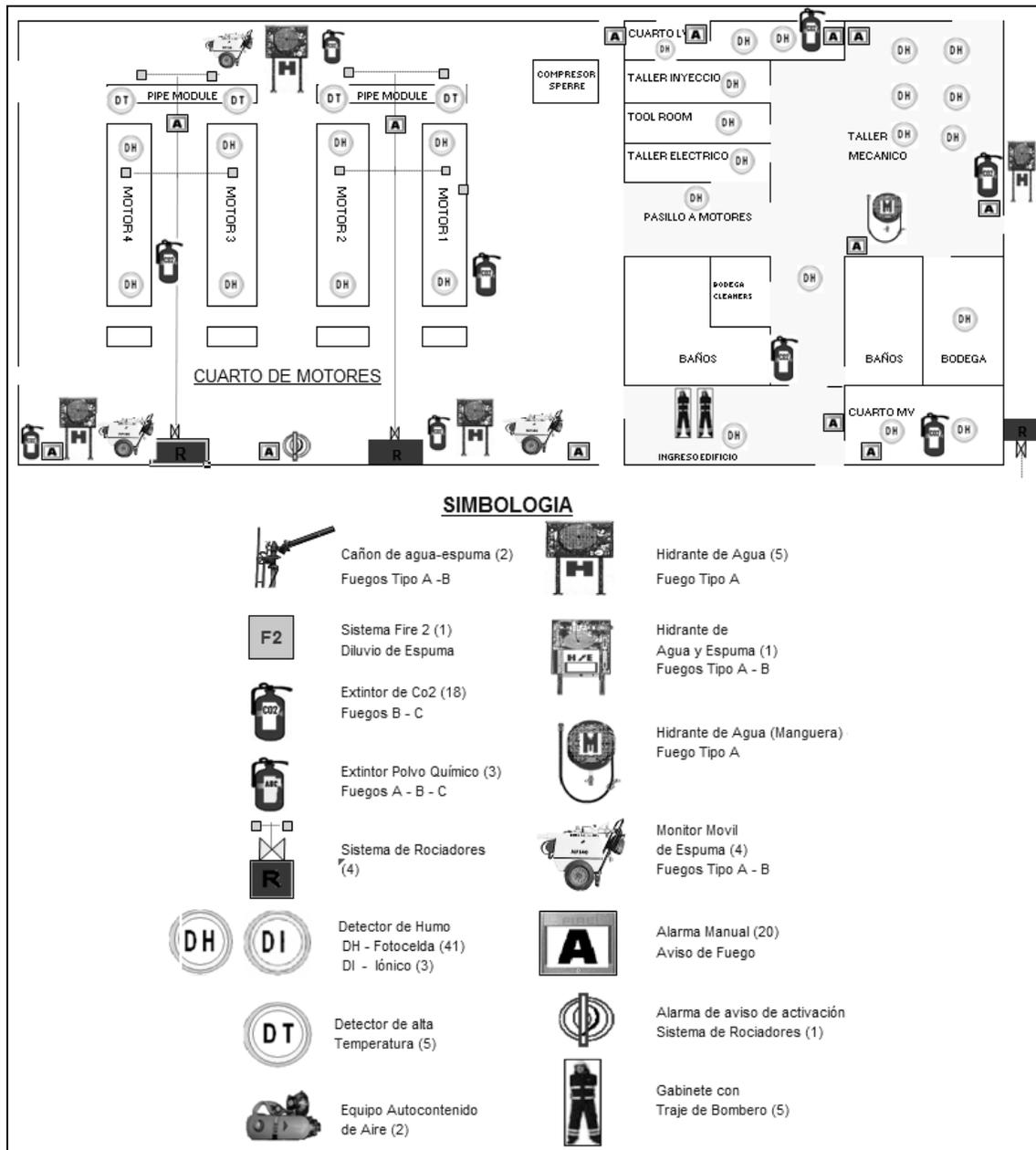
ANEXOS

Anexo 1. Plano de planta de rutas de evacuación y puntos de reunión



Fuente: Documentación planta Genor.

Anexo 2. Localización de equipo de emergencia



Fuente: Documentación planta Genor.