

APLICACIÓN DE LA PRUEBA DE DESCARGAS PARCIALES AL
GENERADOR HIDRÁULICO DE 85 MW DELA CENTRAL
HIDROELÉCTRICA URRÁ I.

RODRIGO ERNESTO CORRALES TURIZO

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA

FACULTAD SECCIONAL DUITAMA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

DUITAMA

2017

APLICACIÓN DE LA PRUEBA DE DESCARGAS PARCIALES AL
GENERADOR HIDRÁULICO DE 85 MW DELA CENTRAL
HIDROELÉCTRICA URRÁ I.

RODRIGO ERNESTO CORRALES TURIZO

Trabajo de grado para optar el título de
Ingeniero Electromecánico

Director:

MSc. Juan Carlos Castro Galeano

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA

FACULTAD SECCIONAL DUITAMA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

DUITAMA

2017

Nota de aceptación:

Firma del jurado

Firma del jurado

Duitama, marzo 07 de 2017.

A DIOS

A MIS PADRES

A TODA MI FAMILIA

*A TODAS LAS PERSONAS QUE ME HAN APOYADO
INCONDICIONALMENTE PARA MI DESARROLLO
PROFESIONAL, COMO PERSONA DE BIEN Y PARA
ALCANZAR MIS SUEÑOS.*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Ingeniero Juan Carlos Castro Galeano, director de este trabajo y quien me ha brindado su orientación y aportes para el desarrollo de este proyecto.

A la empresa Urrá S.A. E.S.P. por brindarme la gran oportunidad de complementar mi formación profesional para el desarrollo de este trabajo en la Central Hidroeléctrica Urrá 1, poniendo a mí alcance diversas herramientas y muchas fuentes de información a través del personal que labora en la Central.

A todo el personal de EMEC S.A.S que labora en la Central Hidroeléctrica Urrá 1, quienes con su apoyo y experiencia aportaron directa e indirectamente en mi proceso de formación profesional durante el desarrollo de este trabajo.

A la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, por mi formación profesional, personal y moral. Por todos sus excelentes docentes que han contribuido a mi desarrollo intelectual para que hoy pueda aportar a la sociedad.

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	8
2	DESCRIPCIÓN DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA URRÁ 1	10
3	MATERIALES AISLANTES	13
3.1	PRINCIPALES PROPIEDADES DE LOS AISLANTES	14
3.1.1	Polarización por deformación.....	14
3.1.2	Polarización por orientación.....	14
3.2	Principales aislantes utilizados en generadores eléctricos de gran potencia.....	16
3.3	MECANISMOS DE ENVEJECIMIENTO DE LOS AISLAMIENTOS.....	21
3.4	PRUEBAS ELÉCTRICAS A LOS AISLANTES.....	23
3.4.1	Resistencia de aislamiento.....	23
3.4.2	Índice de polarización (IEEE 43-2013).....	27
3.4.3	Tangente Delta.....	29
3.5	FACTORES QUE AFECTAN LA RESISTENCIA DE AISLAMIENTO	33
3.5.1	Efecto de la condición de la superficie	33
3.5.2	Efecto de la humedad	34
3.5.3	Efecto de la temperatura	34
3.5.4	Efecto de la magnitud de la tensión de prueba	35
4	DESCARGAS PARCIALES.....	37
4.1	DEFINICIONES.....	38
4.1.1	Descarga Parcial (DP):.....	39
4.1.2	Corona:	39
4.1.3	Pulso de descarga parcial:	39
4.1.4	Descargas parciales continuas:	40
4.1.5	Carga aparente Q:.....	40
4.1.6	Tasa de repetición de impulsos n:.....	41
4.1.7	Polaridad de la descarga:.....	41

4.1.8	Corriente promedio de descarga I_t :	44
4.1.9	Ruido:	44
4.1.10	Alta frecuencia (AF):	45
4.1.11	Ancho de banda Δf :	45
4.1.12	Mayor magnitud que ocurre repetidamente (Q_m):	45
4.1.13	Ángulo de fase Φ_i , y tiempo de ocurrencia pulso t_i	46
4.1.14	Voltaje inicial de la descarga parcial:	46
4.1.15	Voltaje de extinción de la descarga parcial:	47
4.2	FUENTES DE DESCARGAS PARCIALES	47
4.3	PATRONES DE DESCARGAS PARCIALES EN FASE RESUELTA	52
4.3.1	Circuito de prueba:	52
4.3.2	Patrones de descargas parciales en fase resuelta IEEE 1434-2014.	54
5	APLICACIÓN DE LA PRUEBA	60
5.1	PARÁMETROS DEL GENERADOR	61
5.2	MEDIDAS DE SEGURIDAD Y PREPARACIÓN DEL EQUIPO	62
5.2.1	Equipo utilizado para la medición de las descargas parciales.	66
5.3	APLICACIÓN DE LA PRUEBA	69
5.3.1	Calibración (Según IEC 60270-2001):	69
5.3.2	Aplicación de las tensiones de prueba.	72
5.4	Análisis de resultados	80
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	83
6.1	Recomendaciones	84
7	BIBLIOGRAFÍA	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la CH Urrá 1.	10
Figura 2. Canal de descarga al río Sinú.....	11
Figura 3. Polarización por deformación.	14
Figura 4. Polarización por orientación.....	16
Figura 5. Hojuelas de mica.	18
Figura 6. Cintas de amarre y sujeción de cabezales de bobinas.	20
Figura 7. Aislamiento superficial.	23
Figura 8. Aislamiento transversal.....	24
Figura 9. Circuito equivalente del aislamiento.....	25
Figura 10. Circuito equivalente en paralelo para el aislamiento.....	30
Figura 11. Circuito equivalente en serie para el aislamiento.....	31
Figura 12. Ejemplo de defectos en el aislamiento.....	41
Figura 13. Polaridad de los pulsos respecto a la onda de la tensión.	42
Figura 14. Polaridad de pulsos y ubicación.	43
Figura 15. Sección transversal de una barra con descargas parciales.	49
Figura 16. Sección de aislamiento y circuito equivalente.....	51
Figura 17. Esquema de conexión IEC 60270	53
Figura 18. Patrón para descargas internas en aislamientos.	55
Figura 19. Patrón para Descargas en las ranuras.	56
Figura 20. Patrón para Descargas externas en el recubrimiento de control esfuerzo.	57
Figura 21. Patrón para Descargas entre barras y los dedos de presión del núcleo.	58
Figura 22. Patrón de la IEEE 1434 para Descargas en delaminación.	59
Figura 23. Medidas de seguridad tomadas en S/E 230 kV.	63
Figura 24. Diagrama unifilar de conexión del generador.	64
Figura 25. Desconexión del generador y el sistema de excitación.	65
Figura 26. Equipos utilizados en la aplicación de la prueba.	66

Figura 27. Esquema de conexión equipo Deltamaxx PDTech.....	67
Figura 28. Circuito de prueba con instrumento de calibración.	68
Figura 29. Conexión y calibración de los equipos.....	70
Figura 30. Instrumento de calibración (PDTech PDCAL20).....	71
Figura 31. Tensiones de prueba para la medición de las DPs.....	72
Figura 32. Descargas parciales medidas en la fase A.	74
Figura 33. Distribución de pulsos obtenidos en la fase B.	75
Figura 34. Distribución de pulsos obtenidos en la fase C.	77
Figura 35. Descarga corona en zona de alto gradiente de la barra.	78
Figura 36. Degradación del aislamiento en anillo sujetador de las cabezas de bobinas.	79
Figura 37. Degradación del aislamiento en el anillo sujetador de las cabezas de bobinas.	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales características de la mica.	19
Tabla 2. Características de la fibra de vidrio.	19
Tabla 3. Valores mínimos de IP. IEEE 43-2013.....	29
Tabla 4. Tensiones de prueba de resistencia de aislamiento..	36
Tabla 5. Datos técnicos del generador de la Central Hidroeléctrica Urrá 1.	61
Tabla 6. Resultados obtenidos en la fase A.....	73
Tabla 7. Resultados obtenidos en la fase B.....	75
Tabla 8. Resultados obtenidos en la fase C.	76
Tabla 9. Resultados de pruebas complementarias.	77
Tabla 10. Criterios de evaluación del Instituto Central de Investigación de la Industria de la Energía Eléctrica (CRIEPI).....	80

1 INTRODUCCIÓN

El desarrollo tecnológico que ha venido creciendo en forma exponencial en los últimos años, el notable aumento poblacional, la exigencia económica mundial y la modernización de las principales ciudades de Colombia, hacen necesario contar con sistemas confiables, que le permitan al país tener un grado de desarrollo competitivo en la economía mundial. La energía eléctrica se convierte así, en un pilar fundamental para el desarrollo industrial, tecnológico y social, siendo necesario contar con un sistema seguro, flexible y sobre todo confiable.

El generador eléctrico es una máquina síncrona la cual transforma energía mecánica en energía eléctrica, razón por la cual es uno de los equipos más importantes dentro del Sistema Interconectado Nacional (SIN) y requiere un alto índice de confiabilidad. Una falla de éste ocasiona inestabilidad en el sistema, reflejado como pérdida de potencia, fluctuaciones de tensión y frecuencia, que de acuerdo a su magnitud podrían sacar de servicio otros subsistemas que se encuentren interconectados, dando como resultado eventos catastróficos, comprometiendo el correcto funcionamiento del mismo.

El capítulo 1 presenta una breve descripción de la Empresa Urrá S.A. E.S.P. y la Central Hidroeléctrica.

En el capítulo 2 se hablará acerca de los aislamientos entre los devanados, uno de los factores que inciden directamente en el correcto funcionamiento de un

generador eléctrico. Se hará mención de las pruebas de diagnóstico más comunes aplicados a estos.

En el capítulo 3 se hablará acerca de las descargas parciales (DP) y su efecto sobre los aislamientos de un generador, debido a que la presencia de estas resultan perjudiciales para la su buen rendimiento. Se mencionan así los fundamentos teóricos acerca de este fenómeno.

El capítulo 4 describe los procedimientos que se siguieron para aplicar la prueba de medición de descargas parciales al generador hidráulico, las medidas de seguridad tomadas y la preparación de los equipos involucrados en la prueba.

El capítulo 5 muestra los resultados obtenidos en la prueba, la interpretación de dichos resultados y los criterios referidos a las normas correspondientes.

En el capítulo 6 se relacionan las conclusiones y recomendaciones de acuerdo a los resultados obtenidos, así como las medidas correctivas sugeridas para los defectos encontrados.

2 DESCRIPCIÓN DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA URRÁ 1

URRÁ S.A.E.S.P. es una empresa de servicio público mixta del orden nacional, constituida como sociedad anónima de carácter comercial, sometida al régimen jurídico establecido en las leyes 142 y 143 de 1994, con domicilio principal en la ciudad de Montería.

La central hidroeléctrica Urrá I, propiedad de Empresa Urrá S.A. E.S.P. está localizada al sur del Departamento de Córdoba al noroccidente colombiano como se muestra en la figura 1, con una distancia de 110 kilómetros desde Montería (ciudad capital), y 30 kilómetros desde el municipio de Tierralta, área de influencia directa del complejo hidroeléctrico.

Figura 1. Ubicación de la CH Urrá 1.



Fuente: Google maps.

La principal fuente de abastecimiento de agua de la central es el Río Sinú y sus afluentes que nacen en el Parque Nacional Natural Paramillo, cubierto en su mayor parte por bosque húmedo tropical con niveles de precipitación del orden de 3.000 mm/año, factores que contribuyen a mantener un caudal promedio de 340 m³/s. El río Sinú recorre 350 kilómetros desde el nacimiento hasta su desembocadura en el mar Caribe. La CH Urrá 1 además cumple la función de regular el caudal natural del río Sinú; en la figura 2 se muestra el canal de descarga desde las turbinas hacia el río Sinú.

Figura 2. Canal de descarga al río Sinú.



Fuente: El autor.

La capacidad instalada de la Central Hidroeléctrica URRÁ I es de 340 MW, distribuida en cuatro unidades de 85 MW cada una, con una energía media de 1.421 GWh/año y una energía firme anual de 930 GWh/año. La Central está conectada al nodo Cerromatoso, siendo la única hidroeléctrica de la Costa Norte Colombiana. URRÁ I, en conjunto con las centrales térmicas de la zona, integra el soporte energético de la región Caribe.¹ Esta central es operada por la empresa privada EMEC S.A.S, filial en Colombia de la compañía Power Machines, que agrupa a importantes fábricas rusas de equipos de centrales de generación.

La central hidroeléctrica Urrá 1, además de generar energía eléctrica para ser entregada al Sistema Interconectado Nacional SIN, cumple la función de regular el caudal aguas abajo del Río Sinú y así mantener el nivel ecológico ideal para los diferentes períodos climáticos del año, controlando y evitando posibles inundaciones a las poblaciones aledañas al río y garantizando la reproducción natural de las diferentes especies pertenecientes a este ecosistema.

Debido a la importancia que cumple dentro del desarrollo económico y social del país, la Central Hidroeléctrica Urrá 1 se ha convertido hoy día en una de las empresas más importantes dentro del esquema eléctrico de Colombia.

¹Disponible en: <http://www.urra.com.co>

3 MATERIALES AISLANTES

En este capítulo se destaca el papel importante que desempeñan los materiales aislantes dentro del funcionamiento de un generador eléctrico, cómo afecta su estado el buen funcionamiento de estos y los parámetros más importantes que se deben estudiar para diagnosticar las condiciones de los mismos.

“Aislante eléctrico o dieléctrico es aquel material que tiene una conductividad eléctrica tan baja que se puede despreciar la corriente eléctrica que circula a través de él. A esta pequeña corriente se le denomina Corriente de fuga. Se estima que el único aislante perfecto es el vacío, ya que su conductancia es nula y por él no circulan corrientes de fuga”².

La corriente de fuga se produce por el efecto de la *polarización del material*, que se puede explicar como un desplazamiento microscópico de las cargas positivas y negativas constituyentes, de su posición de equilibrio, por efecto de las fuerzas producidas por un campo eléctrico circundante sobre las cargas. “Tales movimientos son solo una fracción de un diámetro molecular en el material, pero el número total de partículas involucradas puede causar un cambio significativo en el campo eléctrico desde su valor en ausencia del material dieléctrico”³.

²TORRES-SÁNCHEZ, Horacio. Aislamientos eléctricos. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. Colección Dirección de investigación. ISBN: 9789587199567

³Ibid.

3.1 PRINCIPALES PROPIEDADES DE LOS AISLANTES

Un material aislante está constituido por moléculas polares y no polares. Una molécula no polar es aquella en la cual los centros de gravedad de los núcleos positivos y los electrones, normalmente coinciden, mientras que en una partícula polar no lo hacen; cada molécula polar es un pequeño dipolo eléctrico. La polarización dieléctrica se puede dar por las siguientes causas:

3.1.1 Polarización por deformación.

Se presenta cuando una partícula no polar o átomo, se somete a la influencia de un campo eléctrico, y se deforma convirtiéndose en un dipolo eléctrico (ver figura 3).

Figura 3. Polarización por deformación.



Fuente: El autor.

3.1.2 Polarización por orientación.

Se presenta en materiales que poseen dipolos eléctricos permanentes orientados aleatoriamente en ausencia de un campo eléctrico externo, pero que se orientan

hacia el vector de campo eléctrico aplicado, dependiendo de la magnitud del mismo (figura 4).

En la polarización por orientación, cuando se presentan giros de los dipolos eléctricos, los átomos del material se someten a fuerzas relativamente grandes, a las que se oponen fuerzas de fricción; estas fuerzas de fricción ocasionan pérdidas por polarización llamadas *pérdidas dieléctricas*.

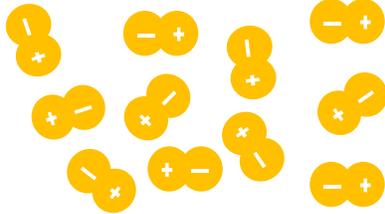
“Este comportamiento a nivel molecular en el material aislante, origina el flujo de pequeñas corrientes de fuga que pueden dañar de forma permanente el material, disminuyendo sus propiedades dieléctricas. La máxima intensidad de campo eléctrico que puede resistir un material sin sufrir daños permanentes como perforaciones o temporales como descargas, se denomina *Rigidez dieléctrica*, se expresa como un cociente entre la tensión de perforación del material y el espesor de la pieza aislante y es medida en kV/mm^4 ”.

La magnitud de la rigidez dieléctrica de un material se obtiene a través de ensayos normalizados de laboratorio, en los cuales se somete el material a niveles de tensión que se aumentan gradualmente hasta el punto que se produce rotura en el elemento de prueba. Grandes especialistas en el diseño y fabricación de máquinas eléctricas, coinciden en que *la vida de una máquina eléctrica es la vida del aislamiento*.

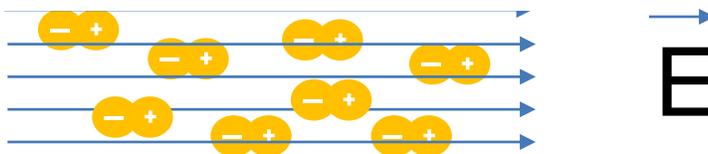
⁴TORRES-SÁNCHEZ, Horacio. Aislamientos eléctricos. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. Colección Dirección de investigación. ISBN: 9789587199567

Figura 4. Polarización por orientación.

a) partículas en estado natural.



b) Partículas en presencia de un campo eléctrico.



Fuente: El autor.

3.2 Principales aislantes utilizados en generadores eléctricos de gran potencia

Los elementos aislantes que se han usado a lo largo del tiempo en las maquinas eléctricas, han venido presentado mejoras en su fabricación y aplicaciones gracias a las investigaciones y a los avances tecnológicos que cada día permiten mejorar sus características. Estos materiales se pueden clasificar en *barnices, cintas aislantes, resinas epóxicas, láminas aislantes, placas aislantes, cordones aislantes de amarre, pinturas conductoras y semiconductoras, etc.* Se dispone ahora de nuevos materiales, como las *resinas sintéticas tipo epóxica, la fibra de vidrio;* conservándose la *mica*, por sus excelentes características dieléctricas y de

protección contra el efecto corona, ya sea en forma de cinta, en hojuelas o en polvo.

“*Los barnices* se utilizan como recubrimiento final del núcleo, de los devanados del estator y de los polos del rotor, para protegerlos de la humedad y sustancias contaminantes. Para reparar el aislamiento del laminado del núcleo se utilizan barnices clase H, que soportan altas temperaturas, poseen excelentes propiedades de flexibilidad y adhesión y se curan al calor o a temperatura ambiente”⁵.

De acuerdo al autor⁶ para la fabricación o reparación de los aislamientos, se utilizan las *resinas* como medio aglutinante de las capas de cintas de mica y fibra de vidrio, lográndose con esto un aislamiento homogéneo, libre de cavidades y con una buena característica anticorona.

“Dentro de las cintas aislantes, la *cinta de mica* constituye el material de aislamiento básico de las bobinas de generadores por sus altas propiedades dieléctricas, térmicas, resistencia al efecto corona, etc. Se aplica traslapada al 50% y sobre una primera capa de cinta de fibra de vidrio; la cantidad de capas aglutinadas con resina epóxica depende de los niveles de tensión del generador, por ejemplo, un voltaje de 13,8 kV fase-fase necesita alrededor de 13 capas de cinta de mica de espesor de 0.007 in. Normalmente se pone una o dos capas de

⁵ RODRÍGUEZ HIDALGO, Rafael Gustavo. Procedimientos de mantenimiento de los bobinados y núcleo de los generadores de centrales Pisayambo, Agoyan y Esmeraldas....

⁶ IBid.

cinta de fibra de vidrio al final, para darle una adecuada resistencia mecánica y protección al conjunto”⁷.

“La *mica* es un material muy delicado y viene en hojuelas o escamas, o en forma de láminas; requiere de una fina cinta de fibra de vidrio o de papel como refuerzo, para proporcionarle una adecuada resistencia mecánica, flexibilidad y espesor uniforme. Es de fácil aplicación, aún en los sitios de las bobinas de diseño complicado”⁸. En la figura 5 se muestra el aspecto de la Mica utilizada en la CH Urrá 1. Esta imagen fue tomada gracias a la cortesía del grupo de mantenimiento eléctrico que realizaba reparaciones a uno de los generadores de la Central Urrá 1.

Figura 5. Hojuelas de mica.



Fuente: Tomada en Central Hidroeléctrica Urrá 1.

Algunas características técnicas de la mica se muestran en la tabla 1:

⁷RODRÍGUEZ HIDALGO, Rafael Gustavo. Procedimientos de mantenimiento de los bobinados y núcleo de los generadores de centrales Pisayambo, Agoyan y Esmeraldas....

⁸ Ibid.

Tabla 1. Principales características de la mica.

Cinta de Mica	
Resistencia eléctrica	0,650 a 1,1 kV/mm
Temperaturas de trabajo	165 a 180 °C
Espesores	0,0045 a 0,007 in.

Fuente: RODRÍGUEZ HIDALGO, Rafael Gustavo. Procedimientos de mantenimiento de los bobinados....

La cinta de fibra de vidrio tiene grandes propiedades mecánicas, adicionales a las eléctricas y térmicas, por lo que su uso, básicamente, es de protección mecánica del aislamiento principal. Algunos tipos de cintas se muestran en la tabla 2:

Tabla 2. Características de la fibra de vidrio.

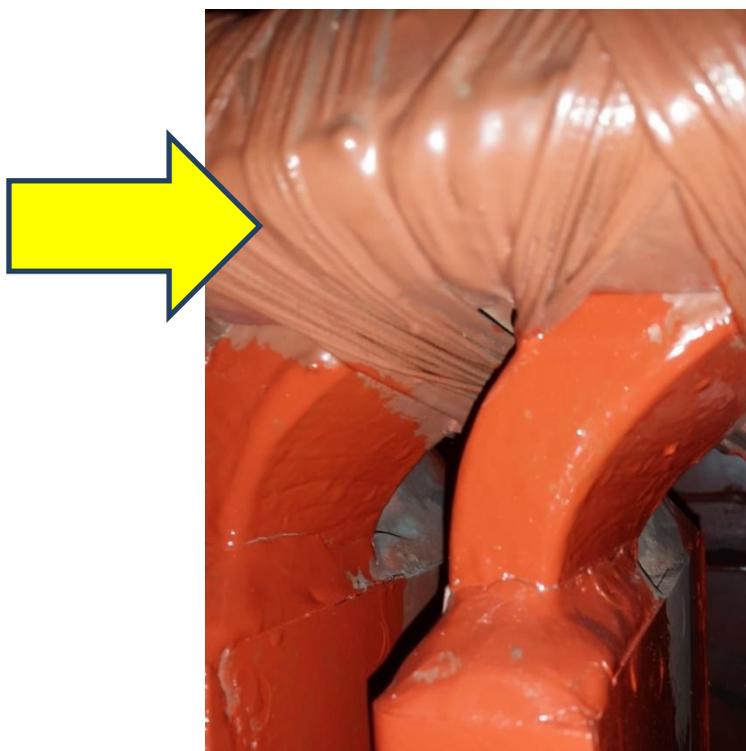
Cinta de fibra de vidrio	Temperaturas de trabajo
Vidrio barnizado con poliéster	130 °C
Vidrio barnizado con epóxica	155 °C
Vidrio barnizado con silicón	180 °C
Vidrio - Mylard - Epoxi	155 °C
Vidrio - Rubber - Silicón	180 °C

FUENTE: RODRÍGUEZ HIDALGO, Rafael Gustavo. Procedimientos de mantenimiento de los bobinados....

Otro tipo de cinta utilizada también es la Cinta de Mylard, la cual es una cinta de poliéster con una gran resistencia dieléctrica y mecánica.

“Existen cintas y cordones de fibra de vidrio tratados con resinas especiales, a base de poliéster, que se curan con la temperatura. Resisten temperaturas de hasta 155 °C, vienen en cordones de 1 a 5 mm de diámetro y en cintas de 1/2 a 1 pulgada de ancho”⁹. Estas se emplean para hacer sujeciones y amarres en los cabezales de las bobinas o barras del generador como se muestra en la figura 6.

Figura 6. Cintas de amarre y sujeción de cabezales de bobinas.



Fuente: Tomada al generador de Central Hidroeléctrica Urrá 1.

⁹ RODRÍGUEZ HIDALGO, Rafael Gustavo. Procedimientos de mantenimiento de los bobinados....

3.3 MECANISMOS DE ENVEJECIMIENTO DE LOS AISLAMIENTOS.

Los materiales aislantes se utilizan en las máquinas eléctricas para garantizar el aislamiento eléctrico entre los diferentes componentes de éstas. Suelen ser los elementos más importantes y delicados debido a su sensibilidad a exigencias mecánicas, térmicas y dieléctricas. Por esta razón es importante tener en cuenta tres propiedades fundamentales a la hora de elegir estos materiales:

- ✓ Propiedades eléctricas
- ✓ Propiedades mecánicas
- ✓ Propiedades físico-químicas

Siendo las propiedades eléctricas una de las más importantes, que a su vez está estrechamente ligada con las demás, y la resistencia a la temperatura una propiedad altamente importante dentro de las propiedades mecánicas y físico-químicas del material.

Los esfuerzos de envejecimiento pueden ser definidos por grupos genéricos¹⁰:

- Mecánico
- Térmico
- Eléctrico
- Ambiental

¹⁰RODRÍGUEZ HIDALGO, Rafael Gustavo. Procedimientos de mantenimiento de los bobinados...

“En servicio, uno o más de estos esfuerzos puede predominar y puede presentarse en estado estacionario, transitorio o cíclico. El esfuerzo puede actuar sinérgicamente, puede ser aplicado secuencialmente o simultáneamente”¹¹.

Como lo explica el autor¹², las fallas originadas por razones mecánicas son una de las principales causas de la ruptura del aislamiento. El esfuerzo mecánico resulta de las fuerzas electromagnéticas presentes durante la operación normal, arranques y paradas, sincronización inapropiada del generador y/o cortocircuitos.

Para contrarrestar estos efectos, se implementan elementos que absorban la energía de las vibraciones de la barra, como cuñas y rellenos laterales de materiales aislantes, en las diferentes ranuras del núcleo entre la superficie barra-núcleo. Cuando estas fuerzas no son restringidas por medio de sistemas de soporte en la ranura, pueden originar:

- Fisuramiento en el aislamiento a tierra
- Abrasión en el aislamiento de los conductores o soleras
- Abrasión en el sistema de control de esfuerzo de la ranura

El envejecimiento térmico se presenta cuando la temperatura del aislamiento es alta, lo suficiente como para provocar una degradación irreversible de las propiedades físicas del aislamiento.

¹¹ TORO, Juan Carlos; Mecanismos de degradación de aislamientos- Aislamientos sólidos eléctricos en grandes máquinas rotativas [diapositivas]. Jornada técnica en CH Urrá 1. 2013.

¹²TORO, Juan Carlos; Mecanismos de degradación de aislamientos- Aislamientos sólidos eléctricos en grandes máquinas rotativas [diapositivas]. Jornada técnica en CH Urrá 1. 2013.

3.4 PRUEBAS ELÉCTRICAS A LOS AISLANTES

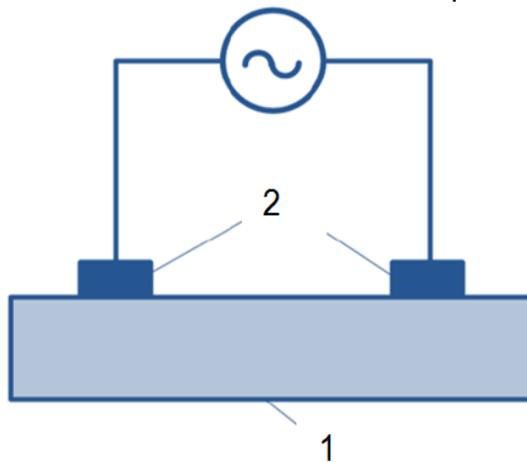
3.4.1 Resistencia de aislamiento.

Como se había mencionado anteriormente, un material aislante tiene una conductividad eléctrica muy baja. Esta oposición al flujo de corriente a través de él se denomina *resistencia de aislamiento*, y es medida en la dirección que se tiene que asegurar el aislamiento, siendo una de las propiedades eléctricas más importantes del material.

La corriente de fuga en un aislamiento (I_L) sigue dos caminos: Uno sobre la superficie del material, como se muestra en la figura 7, y el otro a través del material aislante, como se muestra en la figura 8, en donde 1 es el material aislante y 2 el electrodo de prueba para ambos casos.

Figura 7. Aislamiento superficial.

(1 Material aislante; 2 electrodos de prueba).

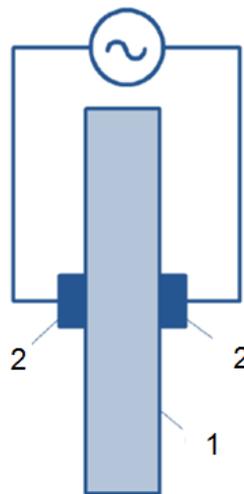


FUENTE: RODRÍGUEZ POZUETA, Miguel Ángel. Aislantes y conductores utilizados en las máquinas eléctricas

La *resistividad de aislamiento transversal o volumétrico* se mide en $M\Omega\text{cm}^2/\text{cm}$ y su valor corresponde a la resistencia que opone el material a ser atravesado por un flujo de corriente cuando se aplica tensión en sus extremos opuestos (figura 8). Este valor varía dependiendo de las condiciones físicas, mecánicas y ambientales del material.

Figura 8. Aislamiento transversal.

(1 Material aislante; 2 electrodos de prueba).

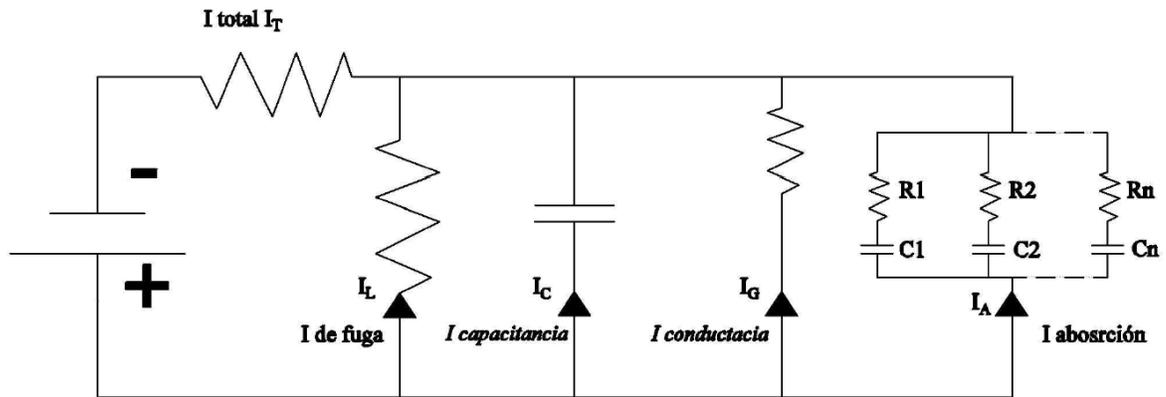


FUENTE: RODRÍGUEZ POZUETA, Miguel Ángel. Aislantes y conductores utilizados en las máquinas eléctricas

La *resistividad de aislamiento superficial* es medida en $M\Omega/\text{cm}^2$ y es debida a la resistencia que ofrece la superficie del material al paso de corriente, cuando se aplica tensión entre dos puntos de dicha superficie. Este valor es inversamente proporcional al estado de suciedad que posee el material, ya que disminuye con la presencia de residuos como grasas, polvo, etc., sobre la superficie del mismo.

En la medición de la resistencia de aislamiento de un material, se presentan varios fenómenos que se representan a través del circuito equivalente mostrado en la figura 9, cuyo esquema muestra que la corriente total I_T es igual a la suma de cuatro corrientes diferentes como son: corriente superficial de fuga (I_L), corriente de capacitancia geométrica (I_C), corriente de conductancia (I_G) y la corriente de absorción (I_A).

Figura 9. Circuito equivalente del aislamiento.



Fuente: IEEE 43-2013.

“Cuando un campo de tensión continua se aplica repentinamente a través de un sistema de aislamiento del devanado del estator, se genera lentamente una acumulación de carga eléctrica que se produce en las interfaces debido a la diferencia en las *permisividades* y *conductividades* de los materiales dieléctricos contiguos que forman las interfaces. En primer lugar, una división de tensión rápida se establece a través de los dos dieléctricos de tope en la interfaz debido a

su diferencia en la permitividad. Esto se manifiesta por una corriente capacitiva casi instantánea, I_C , cuya duración es demasiado corta como para influir en la magnitud de la corriente total y por lo tanto no influye en la medición de la resistividad (aproximadamente un minuto)¹³.

La corriente de capacitancia geométrica I_C disminuye exponencialmente con una constante de tiempo igual al producto de la capacitancia del devanado y la resistencia del instrumento; las corrientes de fuga I_L y la corriente de conductancia I_G tienden a mantenerse constantes a través del tiempo mientras que la corriente de absorción decrece de manera exponencial e influye directamente en la medición de la corriente total I_T . Estas caídas de tensión, las corrientes y sus variaciones dentro de las diferentes interfaces de los sistemas de aislación en las máquinas rotativas, están condicionadas por las permisividades y conductividades de los diferentes materiales.

Dado que existe una multiplicidad de Interfaces diferentes dentro de los sistemas de aislamiento de un devanado de estator, el mecanismo de polarización interfacial general se puede describir solamente de manera adecuada por una distribución de los tiempos de relajación y, por consiguiente, no es posible representar el proceso de conducción en una barra de estator por un circuito R-C agrupado simplista. La distribución de los tiempos de relajación es tal que incluso la medición de 10 minutos cae todavía dentro del rango de corriente de absorción

¹³IEEE Std 43-2013; Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery.

(I_A). La corriente de absorción es una función inversa del tiempo, (t) y se expresa normalmente empíricamente como se muestra en la ecuación (1):

$$I_A = Kt^{-n} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Dónde:

I_A = Corriente de absorción.

K =Función de la tensión aplicada, la capacidad y el sistema de aislamiento particular de la barra de estator.

t =Tiempo

n =Un exponente que es una función característica del sistema de aislamiento.

Cabe destacar que el estudio del comportamiento en función del tiempo de los materiales y la respuesta de las corrientes por los tiempos de relajación y las divisiones de tensión en las interfaces de estos, están fuera del alcance de este trabajo.

3.4.2 Índice de polarización (IEEE 43-2013).

Variación del valor de la resistencia de aislamiento con el tiempo. El cociente de la resistencia de aislamiento en el tiempo t_2 dividido por la resistencia de aislamiento en el tiempo t_1 . Si no se especifican los tiempos t_2 y t_1 , estos se asumen como 10 minutos y 1 minuto, respectivamente. Esta prueba se aplica a los devanados

nuevos y en servicio que están recubiertos por aislamiento. Los valores mínimos aceptables del índice de polarización IP se dan de acuerdo con la tabla 3.

Tabla 3. Valores mínimos de IP. IEEE 43-2013

Clase de aislamiento	Mínimo valor de IP
Clase 105 (A)	1,5
Clase 130 (B) y superior	2,0

Fuente: IEEE 43-2013

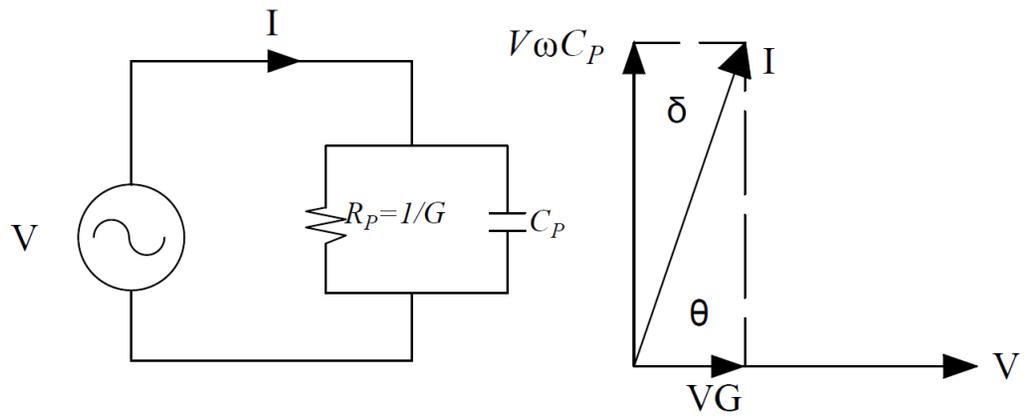
3.4.3 Tangente Delta.

La Tangente Delta es un parámetro dieléctrico muy importante a la hora de evaluar el estado de un sistema de aislamiento, ya que se refiere a las pérdidas dieléctricas que se desarrollan en el volumen de los materiales aislantes. Comprende el resultado neto de varios fenómenos que ocurren en el sistema de aislamiento.

Según define la literatura¹⁴, el circuito equivalente eléctrico de un sistema de aislamiento con una pérdida dieléctrica puede estar representado por cualquiera de las disposiciones de componentes pasivos, en paralelo o en serie. Ambas representaciones se dan en la Figura 10 y la Figura 11. El aislamiento está representado por un condensador sin pérdidas, y una resistencia representa la pérdida dieléctrica.

¹⁴ IEEE Std 43-2013; Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery.

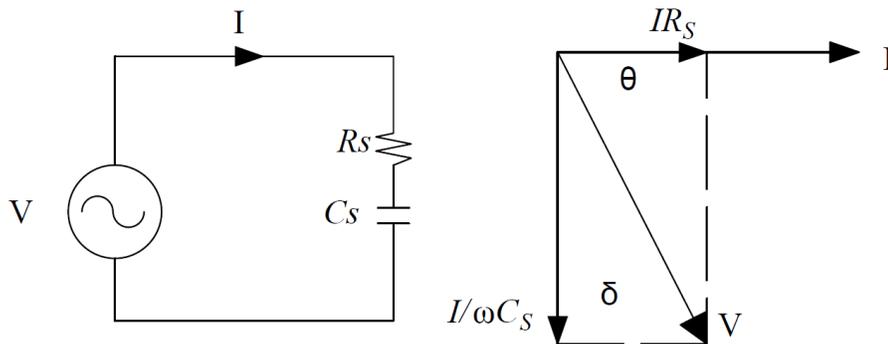
Figura 10. Circuito equivalente en paralelo para el aislamiento.



Fuente IEEE 286-2000

- C_P** es la capacitancia en paralelo
- G_P** es la conductancia equivalente en paralelo en CA
- R_P** es la resistencia equivalente en paralelo en CA
- X_P** es la reactancia en paralelo
- ω** es igual a $2\pi f$ (para una onda sinusoidal)
- θ** es el ángulo de fase

Figura 11. Circuito equivalente en serie para el aislamiento.



Fuente IEEE 286-2000

- C_S es la capacitancia en paralelo
- R_S es la resistencia equivalente en paralelo en CA
- X_S es la reactancia en paralelo
- ω es igual a $2\pi f$ (para una onda sinusoidal)
- θ es el ángulo de fase
- δ ángulo de pérdidas eléctricas

El factor de potencia corresponde a la proporción entre la potencia activa disipada en el aislamiento y la potencia aparente. También se expresa como el coseno del ángulo teta (θ), el cual corresponde a la diferencia angular entre la señal de tensión y corriente¹⁵ como muestra la ecuación 2:

$$FP = \cos\theta \quad \text{Ecuación (2)}$$

¹⁵CARANTÓN MUÑOZ, Aida Yubelly; Evaluación de vida útil residual de aislamiento compuesto de mica y resina.....

El factor de disipación “FD” corresponde a la tangente del ángulo de pérdidas dieléctricas “delta (δ)”, el cual también se puede expresar en función del ángulo teta como ($\delta = 90^\circ - \theta$).

$$FD = \tan\delta \quad \text{Ecuación (3)}$$

Para expresar el factor de disipación en función del factor de potencia, se tiene partir de la figura 11:

$$\tan\delta = \frac{1}{\tan\theta} = \frac{\cos\theta}{\sin\theta} \quad \text{Ecuación (4)}$$

Por identidades trigonométricas se sabe que $\sin^2\theta = 1 - \cos^2\theta$, entonces:

$$\tan\delta = \frac{\cos\theta}{\sqrt{1 - \cos^2\theta}} \quad \text{Ecuación (5)}$$

Teniendo en cuenta las ecuaciones (2) y (3) para FP y FD

$$FD = \frac{FP}{\sqrt{1 - FP^2}} \quad \text{Ecuación (6)}$$

Para expresar el factor de potencia en función del factor de disipación se tiene:

$$\cos\theta = \sin\delta \quad \text{Ecuación (7)}$$

$$\cos\theta = \sin\delta * \frac{\cos\delta}{\cos\delta} \quad \text{Ecuación (8)}$$

$$\cos\theta = \tan\delta * \frac{1}{\sec\delta} \quad \text{Ecuación (9)}$$

$$\cos\theta = \tan\delta * \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2\delta}} \quad \text{Ecuación (10)}$$

Teniendo en cuenta las expresiones de las Ecuaciones (2) y (3) para FP y FD respectivamente, se tiene:

$$FP = \frac{FD}{\sqrt{1+FD^2}} \quad \text{Ecuación (11)}$$

que expresa al factor de potencia FP en función del factor de disipación FD.

3.5 FACTORES QUE AFECTAN LA RESISTENCIA DE AISLAMIENTO

De acuerdo a la IEEE 43-2013 (Práctica recomendada para probar la resistencia de aislamiento de maquinaria eléctrica) los factores que afectan las condiciones de un aislamiento son las siguientes:

3.5.1 Efecto de la condición de la superficie

La corriente de fuga de la superficie (IL) depende de la presencia de material extraño, tal como aceite y/o polvo de carbono, en las superficies del devanado fuera de las ranuras. El polvo (o sales) en las superficies del aislamiento, que es normalmente no conductor cuando está seco, puede llegar a ser parcialmente conductor cuando se expone a la humedad o aceite, y, por tanto, pueden reducir la resistencia de aislamiento. Si el índice de resistencia de aislamiento o la polarización se reduce debido a la contaminación, por lo general puede ser restaurado a un valor aceptable mediante limpieza y secado.

3.5.2 Efecto de la humedad

Independientemente de la limpieza de la superficie, si la temperatura de bobinado está en o por debajo del punto de rocío del ambiente, una película de humedad se puede formar en la superficie de aislamiento, lo que puede reducir su resistencia o el índice de polarización. El efecto es más pronunciado si la superficie también está contaminada, o si hay grietas presentes en el aislamiento.

3.5.3 Efecto de la temperatura

El valor de resistencia de aislamiento para un sistema dado, en cualquier punto en el tiempo, varía inversamente, en forma exponencial, con la temperatura del devanado. Hay un contraste entre la dependencia de la temperatura de la resistividad de los metales y de los materiales no metálicos, especialmente los aislantes. En los metales, en los que hay numerosos electrones libres, una temperatura más alta introduce una mayor agitación térmica, lo que reduce el recorrido libre medio de movimiento de los electrones, con un consecuente aumento en la resistividad. Sin embargo, en los aisladores, un aumento de la temperatura suministra energía térmica, lo que libera los portadores de carga adicionales y reduce la resistividad. Esta variación de temperatura afecta a todos los componentes de la corriente identificados el numeral 2.4.1 (resistencia de aislamiento), a excepción de la corriente capacitiva geométrica.

El valor de resistencia de aislamiento de un devanado depende de la temperatura del devanado y el tiempo transcurrido desde la aplicación de la tensión. Por ejemplo, cuando la máquina se ha detenido, y la temperatura de operación es del orden de 90°C - 100 °C, la temperatura puede bajar significativamente durante 10 minutos y esto puede afectar el IP. Con el fin de evitar los efectos de la temperatura en el análisis de tendencias, las pruebas subsiguientes deben llevarse a cabo cuando el devanado está cerca de la misma temperatura que la prueba anterior.

3.5.4 Efecto de la magnitud de la tensión de prueba

La guía para las tensiones de prueba se presenta en la Tabla 4. El valor de la resistencia de aislamiento puede disminuir en cierta medida con un aumento de la tensión aplicada; sin embargo, para el aislamiento en buenas condiciones y en un estado completamente seco, se obtendrá sustancialmente la misma resistencia de aislamiento para cualquier prueba de tensión hasta el valor máximo de la tensión nominal.

Una disminución significativa en la resistencia de aislamiento con un aumento de la tensión aplicada puede ser una indicación de problemas de aislamiento.

Tabla 4. Tensiones de prueba de resistencia de aislamiento..

Tensión nominal del bobinado (V).	Tensión continua para la prueba de resistencia de aislamiento (V).
<1000	500
1000-2500	500-1000
2501-5000	1000-2500
5001-12000	2500-5000
>12000	5000-10000

Fuente: IEEE 43-2013.

Estos problemas pueden ser debidos a imperfecciones o fracturas del aislamiento, agravado por la presencia de suciedad o humedad; o los problemas pueden ser debidos a los efectos de la suciedad o la humedad por sí solos o como resultado de otros fenómenos de deterioro. El cambio en la resistencia es más pronunciado en los voltajes considerablemente por encima de la tensión nominal.

Las pruebas de resistencia de aislamiento e índice de polarización se pueden utilizar para registrar la tendencia del aislamiento de una máquina dada a través de los años, medida a condiciones uniformes en lo que se refiere a las variables controlables.

4 DESCARGAS PARCIALES

Este capítulo menciona los conceptos más importantes para el estudio de las descargas parciales para identificar claramente qué magnitudes se deben medir.

Un factor determinante en la vida y correcto funcionamiento de un generador eléctrico es el aislamiento de sus devanados. Si se presentara una falla en el aislamiento se podría presentar un cortocircuito entre sus devanados, lo que causaría graves daños siendo muy costosa su reparación.

“Las descargas parciales tienen su origen en las pequeñas cavidades de gas en los aislantes que se forman ya sea en el proceso de fabricación, entre cavidades conductor aislante, o ya sea por envejecimiento del aislamiento”¹⁶.

Existen dos métodos principales de realizar la medición de las descargas parciales en un aislamiento de una máquina eléctrica:

- ✓ Medición de descargas parciales en línea (Máquina conectada y en servicio)
- ✓ Medición de descargas parciales fuera de línea (Máquina fuera de servicio y desconectada)

Para ambos casos se presentan ventajas y desventajas entre un método y otro, siendo en el caso de las pruebas en línea una ventaja que estas muestran el

¹⁶ RODRÍGUEZ HIDALGO, Rafael Gustavo. Procedimientos de mantenimiento de los bobinados y núcleo de los generadores de centrales Pisayambo, Agoyan y Esmeraldas. Trabajo de grado Ingeniería Eléctrica. Quito. Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Eléctrica. 1997. 228 p.

comportamiento real de las descargas cuando la máquina está en servicio, pero que se hacen difíciles de identificar muchas veces por efectos de ruido o resultados superpuestos en las lecturas. Por otro lado, las pruebas fuera de línea hacen necesario sacar de servicio la unidad y desconectarla, pero permite controlar los niveles de tensión de la prueba y la interpretación de los resultados resulta menos complejo, ya que los niveles de ruido en las lecturas son muy bajos comparados con las pruebas en línea con la máquina en servicio.

Para realizar una correcta interpretación de los resultados obtenidos al aplicar la prueba, se requiere tener una fundamentación teórica acerca de las variables que intervienen en dicho proceso, esto es, tener claridad a cerca de: ¿Qué variables se deben medir?, ¿Cuáles parámetros hay que tener en cuenta?, ¿En qué unidades se miden las descargas parciales?, ¿Qué valores son tolerables si hay presencia de descargas parciales?, entre otras consideraciones de seguridad.

4.1 DEFINICIONES

A continuación se relacionan algunas definiciones tomadas de las normas **IEEE 1434-2014** y la **IEC60270-2000**.

4.1.1 Descarga Parcial (DP):

Descarga Parcial (DP) es el nombre dado a una descarga eléctrica que se localiza sólo parcialmente en el aislamiento entre los conductores y que puede o no ocurrir adyacente a un conductor. Son, en general, consecuencia de las concentraciones de esfuerzos eléctricos locales en el aislamiento o en la superficie de este. Generalmente, dichas descargas aparecen como pulsos que tienen una duración de mucho menos de 1 μ s. Las descargas parciales son a menudo acompañadas por la emisión de sonido, la luz, el calor y las reacciones químicas.

4.1.2 Corona:

"Corona es una forma de descarga parcial que se produce en medios gaseosos alrededor de los conductores que se encuentran alejados de aislamiento sólido o líquido. Corona no debe ser utilizado como un término general para todas las formas de DP".

4.1.3 Pulso de descarga parcial:

Impulso de corriente o de tensión que resulta de una descarga parcial que ocurre dentro del objeto bajo prueba. El pulso se mide utilizando circuitos detectores adecuados, que se han introducido en el circuito de prueba con el propósito de la prueba. Un tipo de fenómenos de descarga parcial se caracteriza por una ruptura tipo chispa. El pulso de descarga resultante detectado, tiene un tiempo de subida

corto, y su espectro de frecuencias puede extenderse hasta valores mayores o iguales a 100 MHz.

4.1.4 Descargas parciales continuas:

Descargas que se repiten a intervalos regulares, por ejemplo, en aproximadamente cada ciclo de una tensión alterna. Las descargas parciales son pulsos de corriente de alta frecuencia, los cuales se presentan en un material aislante debido a concentraciones de esfuerzos eléctricos, esfuerzos mecánicos y procesos físico-químicos, los cuales van alterando las características dieléctricas de los mismos.

4.1.5 Carga aparente Q:

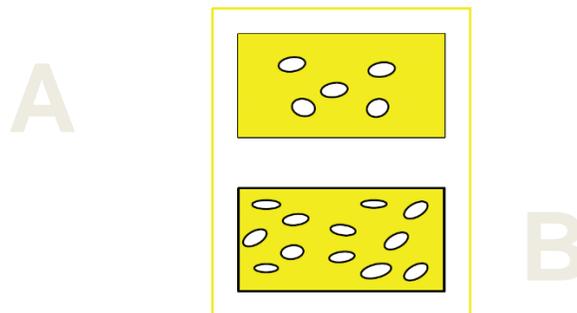
La carga aparente (Q) de un impulso de descarga parcial es esa carga que, si se inyecta dentro de un tiempo muy corto entre los terminales del objeto de prueba en un circuito especificado, daría la misma lectura en el instrumento de medición como el pulso mismo de corriente de descarga parcial. La carga aparente se expresa generalmente en picocoulombs (pC).

4.1.6 Tasa de repetición de impulsos n:

Relación entre el número total de impulsos de descargas parciales registradas en un intervalo de tiempo seleccionado y la duración de este intervalo de tiempo. Su magnitud es proporcional al número de vacíos o *huecos* por unidad de volumen en el aislamiento. La figura 12 muestra una idea de la diferencia entre una tasa de repetición de pulsos de descargas parciales, donde el segmento A presenta un menor número de *huecos* en el aislamiento, lo que se ve reflejado en una menor cantidad de pulsos por segundo.

Figura 12. Ejemplo de defectos en el aislamiento.

Tasa de pulsos de repetición, $B > A$.



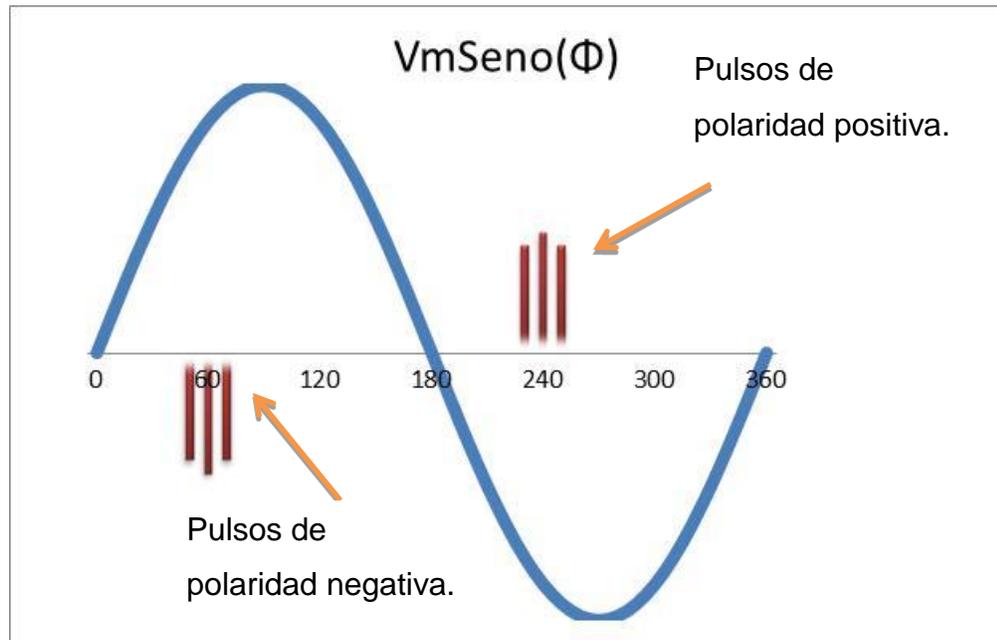
Fuente: RODRÍGUEZ HIDALGO, Rafael Gustavo. Procedimientos de mantenimiento de los bobinados y núcleo de los.....

4.1.7 Polaridad de la descarga:

Se refiere a la ubicación de la descarga respecto al ángulo de la onda de tensión aplicada. Esta relación permite estimar la ubicación del vacío dentro del

aislamiento, respecto al referente a tierra, o lo que es lo mismo, a la ubicación dentro del aislamiento, como muestra la figura 13:

Figura 13. Polaridad de los pulsos respecto a la onda de la tensión.



Fuente: RODRÍGUEZ HIDALGO, Rafael Gustavo. Procedimientos de mantenimiento de los bobinados y núcleo....

Se ha concluido por muchos autores¹⁷¹⁸ que las descargas parciales se pueden interpretar como impulsos de tensión, por lo tanto, durante el ciclo positivo de la onda, una descarga, o un cortocircuito parcial, resulta como un pulso negativo,

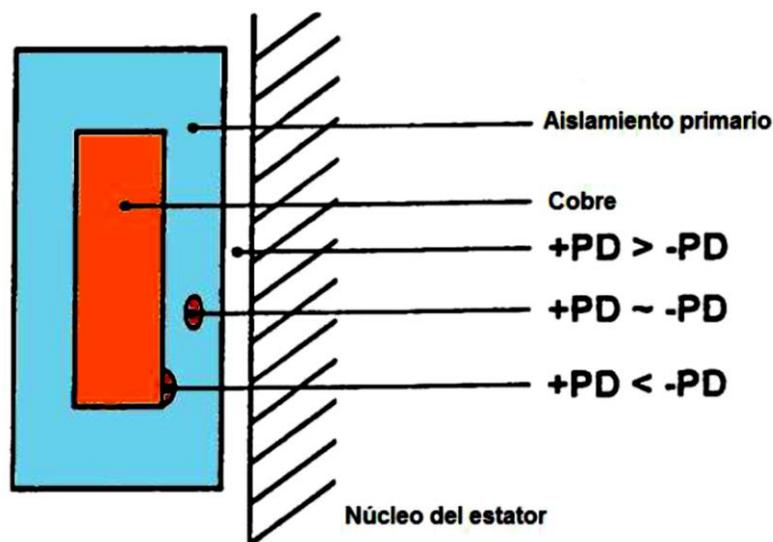
¹⁷RODRÍGUEZ HIDALGO, Rafael Gustavo. Procedimientos de mantenimiento de los bobinados y núcleo de los generadores de centrales Pisayambo, Agoyan y Esmeraldas. Trabajo de grado Ingeniería Eléctrica. Quito. Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Eléctrica. 1997. 228 p.

¹⁸ IEEE Std 1434TM 2014. Guía IEEE para la medición de descargas parciales en maquinaria eléctrica de CA.

orientado hacia abajo. Esto se refiere a una descarga parcial con una polaridad negativa, se produce durante el primer cuarto de ciclo del aumento de voltaje positivo aplicado en vacío. Durante el tercer cuarto de ciclo de la tensión negativa aplicada, un cortocircuito parcial resulta en pulso positivo, orientado hacia arriba. Esto se conoce como una descarga parcial con polaridad positiva.

Se muestra en la figura 14 un esquema con las polaridades de las descargas de acuerdo a su ubicación relativa del aislamiento y el núcleo del generador.

Figura 14. Polaridad de pulsos y ubicación.



FUENTE: Juan Carlos Toro. Ensayos de generadores síncronos de centrales eléctricas, Santiago de Cali. Laboratorio de Alta tensión. Universidad del Valle. Seminario internacional sobre ensayos eléctricos. Octubre 13 de 2016.

4.1.8 Corriente promedio de descarga I_t :

La suma de las magnitudes absolutas de las descargas individuales durante un cierto intervalo de tiempo, dividido por el intervalo de tiempo. Cuando las descargas se miden en culombios y el intervalo de tiempo en segundos, la corriente calculada estará en amperios:

$$I_t = \frac{\sum_{t_0}^{t_1} (Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n)}{t_1 - t_0} \quad \text{Ecuación (12)}$$

dónde:

I_t es la corriente promedio de descarga, [A]

t_0 es el tiempo de inicio, [s]

t_1 es el tiempo de finalización, [s]

Q_0, Q_1, Q_n son las cargas aparentes transferidas en un impulso de descarga parcial de 1 a n , [C].

4.1.9 Ruido:

Alteraciones no deseadas superpuestas sobre una señal útil, que tienden a ocultar contenido de información de la señal estudiada; esto es, toda señal detectada durante la medición de descargas parciales que no se originan en el objeto de prueba.

4.1.10 Alta frecuencia (AF):

Frecuencias desde 3 MHz a 30 MHz.

4.1.11 Ancho de banda Δf :

El rango de frecuencias dentro de la cual el rendimiento, con respecto a alguna característica, entra dentro de los límites específicos ($f_2 - f_1$).

Los valores recomendados para f_1 , f_2 y Δf son respectivamente:

$$30 \text{ kHz} \leq f_1 \leq 100 \text{ kHz}$$

$$f_2 \leq 500 \text{ kHz}$$

$$100 \text{ kHz} \leq \Delta f \leq 400 \text{ kHz}$$

4.1.12 Mayor magnitud que ocurre repetidamente (Qm):

El registro de la magnitud por un sistema de medición que responde a un tren de pulsos o la magnitud asociada con una tasa de repetición de impulsos por segundo. Una tasa de repetición de impulsos recomendada es de 10 impulsos por segundo.

“Esta cantidad da una idea de que tan severo es el deterioro en el peor punto del devanado”¹⁹.

4.1.13 Ángulo de fase Φ_i , y tiempo de ocurrencia pulso t_i

El ángulo de fase Φ_i y el tiempo de ocurrencia de un pulso de DP t_i es:

$$\Phi_i = 360 \left(\frac{t_i}{T} \right) \quad \text{Ecuación (13)}$$

Donde t_i es el tiempo medido entre la transición precedente positiva que va desde cero, a través de la tensión de prueba y el impulso de descarga parcial, y T es el período de la tensión de ensayo. El ángulo de fase se expresa en grados (°).

4.1.14 Voltaje inicial de la descarga parcial:

Voltaje aplicado a la que se observan las primeras descargas parciales repetitivas en el objeto de prueba, cuando la tensión aplicada al objeto se aumenta gradualmente desde un valor inferior a la que no se observan. Se expresa su magnitud como $\frac{1}{\sqrt{2}}$ veces el valor pico de la tensión alterna. Muchos factores pueden influir en el valor de la tensión de inicio, incluyendo la velocidad a la que se aumenta la tensión.

¹⁹ TORO, Juan Carlos; Ensayos en generadores sincrónicos de centrales eléctricas. Seminario internacional sobre ensayos eléctricos. Cali, Colombia. Octubre de 2016.

4.1.15 Voltaje de extinción de la descarga parcial:

La más alta tensión a la que ya no se produce descargas parciales por encima de cierta magnitud indicada. Muchos factores pueden influir en su valor, incluyendo la velocidad a la que se reduce la tensión.

El voltaje inicial de la descarga y el voltaje de extinción, son dos parámetros muy importantes al momento de analizar los resultados de las mediciones. Estos muestran claramente que niveles de tensión ocasionan la degradación del aislamiento por la presencia de las descargas en el mismo.

4.2 FUENTES DE DESCARGAS PARCIALES

“En la mayoría de las máquinas eléctricas de corriente alterna, hay numerosos sitios potenciales de descargas parciales. El diseño de máquinas, los materiales de construcción, los métodos de fabricación, las condiciones de operación y las prácticas de mantenimiento pueden afectar profundamente a la cantidad, ubicación, características, evolución y el significado de las mismas”²⁰.

Se puede definir la descarga parcial como un fenómeno de rotura dieléctrica el cual está confinado y se localiza en la región de un medio aislante que está entre dos conductores a diferente potencial, y que su ubicación y magnitud puede ser consecuencia de un aumento del campo eléctrico en un determinado espacio.

²⁰ IEEE 1432-2014. Guía IEEE para la medición de descargas parciales en maquinaria eléctrica de CA.

Este fenómeno se presenta debido a imperfecciones en el proceso de impregnación del material hacia los conductores durante la etapa de construcción, siendo este uno de los factores más incidentes dentro de la aparición de descargas parciales durante la vida útil del material.

Las descargas más comunes en un estator son las descargas internas que se produce en el interior de pequeñas cavidades atrapadas dentro del aislamiento a tierra. Esta actividad puede ser constantemente presente desde el primer día de la operación hasta el final de la vida, sin reducir la vida esperada de la máquina. “Se considera como la actividad de descargas parciales normal y es importante ser capaz de diferenciar entre esta actividad de otras descargas más perjudiciales”²¹.

Los esfuerzos mecánicos, eléctricos y las condiciones de trabajo sobre los aislamientos, pueden ser originadores de descargas parciales. Las descargas más típicas en los aislamientos de las barras de un generador, se presentan como en la figura 15: En la superficie de contacto entre la barra y el aislamiento (A), en la zona media del material aislante (B) o en la superficie del aislante (C).

Discontinuidades en el revestimiento semiconductor en las ranuras, altos valores de resistividad de la capa semiconductor, la porosidad, las separaciones, los defectos de impregnación de resina y los defectos de erosión o abrasión son causantes de la presencia de descargas parciales.

²¹ Tomado de la IEEE 1434-2014. Guía IEEE para la medición de descargas parciales en maquinaria eléctrica de CA.

cabo, y el retraso de tiempo estadístico. El tiempo de retraso estadístico representa el tiempo necesario para que un electrón libre aparezca dentro del espacio que se requiere para iniciar la avalancha de electrones, y la descomposición de la separación una vez que el voltaje aplicado a través del hueco alcanza un valor igual al valor de ruptura²². Si se retrasa la aparición del electrón libre, el potencial a través del vacío sigue aumentando sinusoidalmente hasta que este finalmente aparece y el evento de ruptura se inicia en algún valor superior a la tensión de ruptura nominal. La diferencia entre la tensión de ruptura real y la tensión de ruptura nominal del espacio es una cantidad estadísticamente variante y se conoce comúnmente como la *sobretensión* a través del hueco²³.

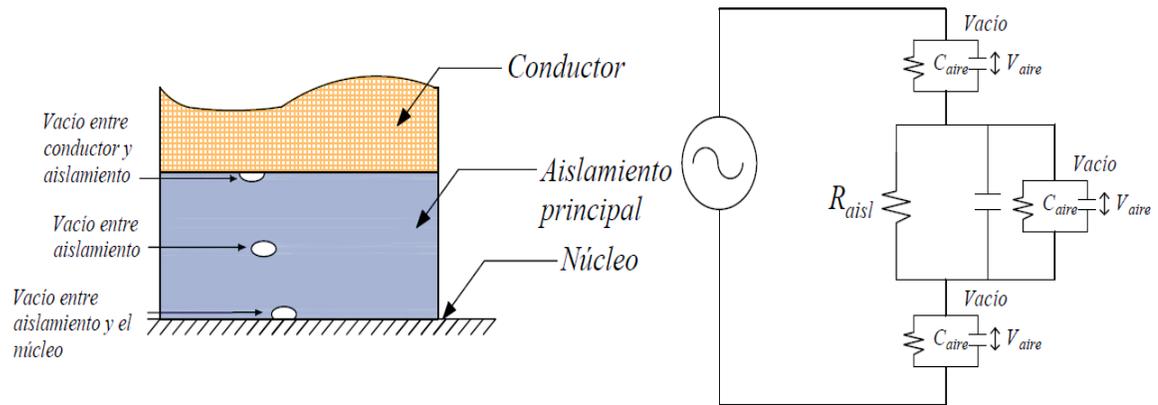
Debido a que una descarga parcial implica un flujo de electrones e iones a través de una pequeña distancia en un período finito de tiempo, una pequeña corriente fluye cada vez que se produce la descarga parcial. La corriente total se registrará por el transporte de un cierto número de picocoulombs de carga. El flujo de corriente crea un pulso de tensión en la impedancia del sistema de aislamiento. Uno de los principales medios de detección de descarga parcial es medir el pequeño impulso de tensión que acompaña a cada descarga parcial, o el impulso de corriente resultante.

La figura 16 muestra un esquema representativo del tipo de descarga y su circuito equivalente, de acuerdo a su ubicación respecto al aislamiento:

²² IEEE 1432-2014. Guía IEEE para la medición de descargas parciales en maquinaria eléctrica de CA.

²³ Ibid.

Figura 16. Sección de aislamiento y circuito equivalente.



Fuente: RODRÍGUEZ HIDALGO, Rafael Gustavo. Procedimientos de

Estas cantidades se miden en circuitos opuestos a la fuente de descarga parcial. El impulso de tensión se puede detectar por medio de condensadores de alta frecuencia, que normalmente están conectados a la terminal de fase o en otro lugar en el devanado. El condensador tiene una alta impedancia a la frecuencia de la fuente de tensión, pero aparece como una baja impedancia a los pulsos de voltaje de descargas parciales de alta frecuencia. Alternativamente, un transformador de corriente de alta frecuencia puede ser instalado en el cable que conecta el neutro de la máquina a la impedancia de puesta a tierra, en los conductores de fase o en otros lugares adecuados para detectar los pulsos de corriente que acompañan a la descarga parcial. La salida de los condensadores o el transformador de corriente, son pulsos de tensión o de corriente que se puede medir con un osciloscopio, analizador de espectro, o analizador de altura de pulso.

Las variaciones de estos métodos se pueden utilizar para las pruebas en línea y fuera de línea.

4.3 PATRONES DE DESCARGAS PARCIALES EN FASE RESUELTA

Esta sección muestran las distribuciones de pulsos que han sido adoptados como patrones para las descargas parciales en generadores y máquinas eléctricas de gran potencia, de acuerdo a las normas **IEEE 1434-2014: Guía para la medición de descargas parciales en maquinaria eléctrica CA**, y reconocidas por la **IEC 60270-2001: Técnicas de prueba de alto voltaje - Mediciones de descargas parciales**.

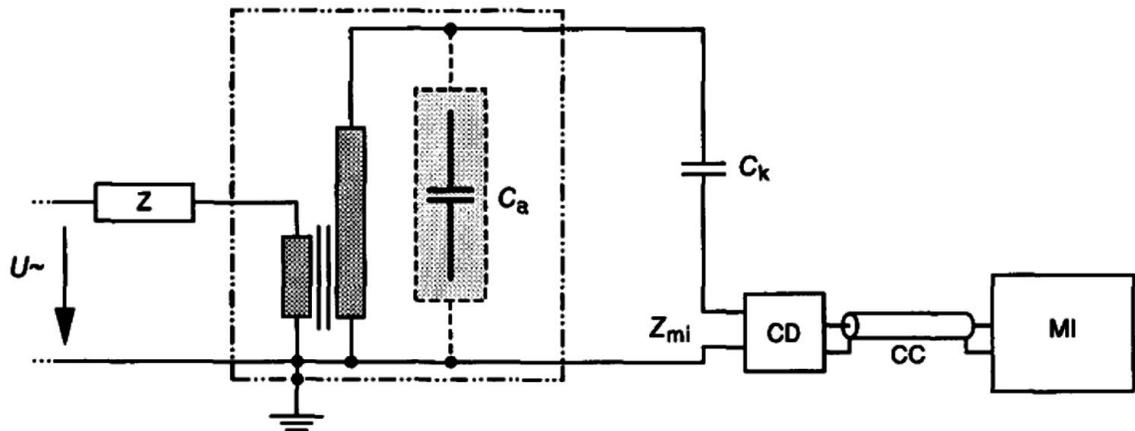
Según la norma²⁴, estos patrones aplican para barras de estatores a 13,8 kV aislados con cinta de mica epoxi rica en resina y equipados con una capa de control de la tensión en los brazos extremos inmediatamente adyacentes a la ranura.

4.3.1 Circuito de prueba:

Los circuitos de prueba normalizados para la medición de descargas parciales están compuestos principalmente por los siguientes componentes, como se muestra en la figura 17:

²⁴ IEEE 1432-2014. Guía IEEE para la medición de descargas parciales en maquinaria eléctrica de CA.

Figura 17. Esquema de conexión IEC 60270 .



Componentes del circuito:

U~ Tensión de alimentación

Z Filtro

Ca Objeto de prueba

Ck Capacitor de acople

Zmi Impedancia de entrada al sistema de medida

CD Dispositivo de acople

CC Cables de conexión

MI Instrumento de medida

- ✓ Un transformador elevador
- ✓ Un objeto de prueba (en nuestro caso cada devanado de las fases del generador), el cual se representa por un capacitor C_a .
- ✓ Un capacitor de acoplamiento C_k de baja inductancia, cuyo nivel de descargas parciales debe ser lo suficientemente bajo para no influir en los resultados del análisis.

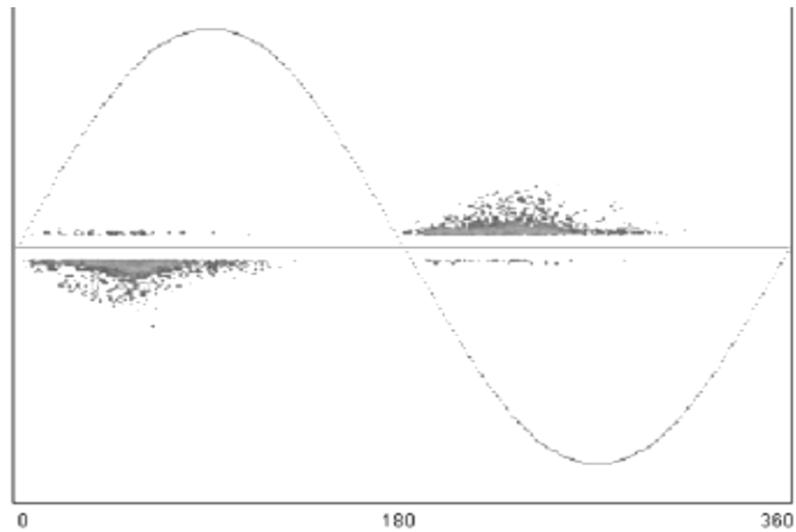
- ✓ Un sistema de medición con su respectiva impedancia de entrada
- ✓ Una fuente de alta tensión con un nivel de ruido lo suficientemente bajo.
- ✓ Conectores para alta tensión
- ✓ Un filtro el cual sirve para separar el ruido que puede provenir de la fuente de alimentación, de las mediciones de descargas parciales del elemento de prueba.

El transformador elevador permite entregar la tensión nominal del generador para la prueba, además permite reducir los ruidos provenientes de la red externa. El capacitor de acople cumple un papel fundamental en el desarrollo de la prueba, brindando una baja impedancia a las señales de descargas parciales hacia el circuito de detección. El sistema de medición se encarga de amplificar y transforma las señales de las descargas parciales, permitiendo así que el software las procese y adquiera dicha información.

4.3.2 Patrones de descargas parciales en fase resuelta IEEE 1434-2014.

La figura 18 muestra el patrón característico para un tipo de descarga interna del material, o lo que es también llamado delaminación del material aislante. Para este tipo de descargas, la distribución de pulsos negativos y positivos, tienden a ser de magnitudes similares ($DP+ \approx DP-$), y su amplitud de bajo a intermedio y redondeada en cada semiciclo de la onda.

Figura 18. Patrón para descargas internas en aislamientos.

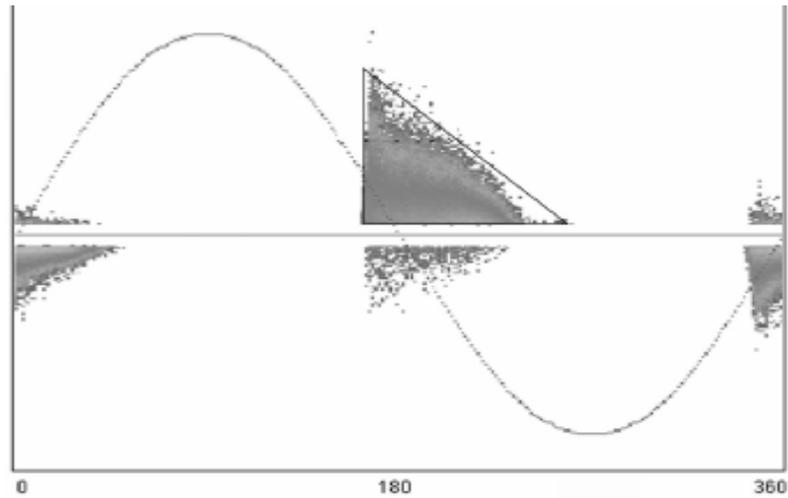


FUENTE: IEEE 1434-2014 Guía para la medición de descargas parciales en maquinaria eléctrica CA

En la figura 19 se puede observar que los pulsos DP +> DP-. La forma triangular característica durante el semiciclo negativo es indicativa de las descargas de ranura. Su amplitud es intermedia²⁵. Este tipo de descarga se presenta cuando hay deterioro de la protección anticorona, por acción de vibraciones y/o desajustes en los espacios entre las barras y las ranuras del núcleo del estator.

²⁵ Ibid.

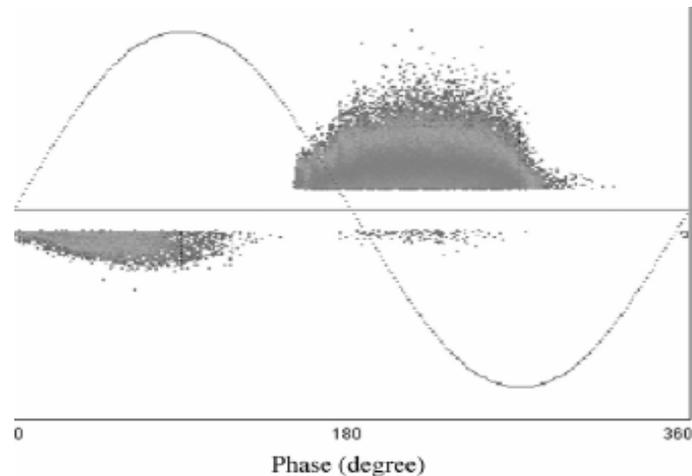
Figura 19. Patrón para Descargas en las ranuras.



FUENTE: IEEE 1434-2014 Guía para la medición de descargas parciales en maquinaria eléctrica CA.

Cuando los pulsos son de predominancia positiva (PD +> PD-), la asimetría de las descargas durante el semiciclo negativo son generalmente más redondeado que las DP en ranuras. Amplitud: de intermedio a alto. Este tipo de descarga se presenta en la figura 20.

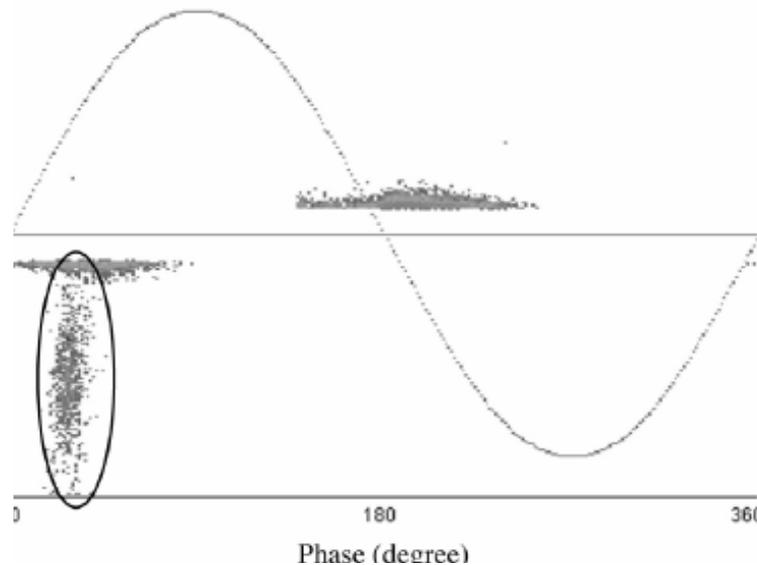
Figura 20. Patrón para Descargas externas en el recubrimiento de control esfuerzo.



FUENTE: IEEE 1434-2014 Guía para la medición de descargas parciales en maquinaria eléctrica CA

Otra forma de distribución para las descargas se ilustra en la figura 21. Cuando hay deficiencia en los aislamientos entre barras adyacentes, ya sea por erosión del barniz dieléctrico, o por aflojamiento de los rellenos laterales de las barras, es posible que se presenten descargas entre las barras, lo que contribuiría a un envejecimiento acelerado del aislamiento principal. Este tipo de descargas se caracterizan por mostrar formas de nubes horizontales con amplitudes media a alta. Por lo general “nubes” vertical aparece durante el semiciclo positivo en torno a los 30 grados a 40 grados (algunas veces también se observan en ambos semiciclos). Amplitud: muy alta.

Figura 21. Patrón para Descargas entre barras y dedos de presión del núcleo.



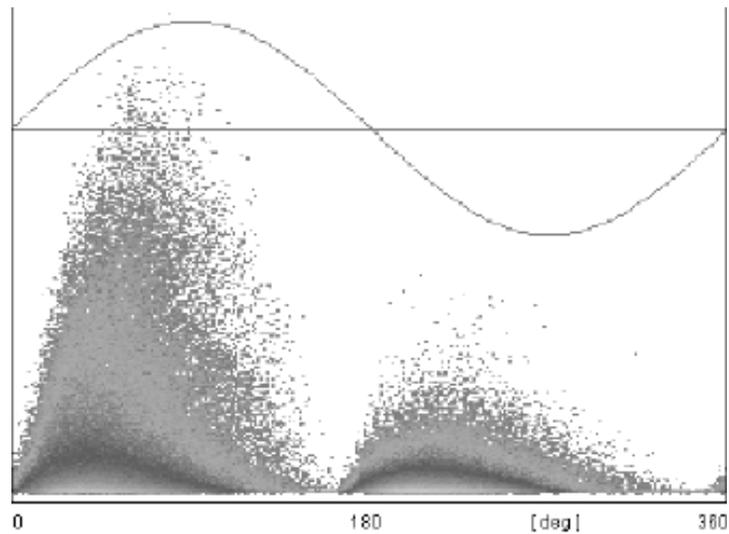
FUENTE: IEEE 1434-2014 Guía para la medición de descargas parciales en maquinaria eléctrica CA.

Dentro las de las principales distribuciones de pulsos establecidas como patrones de descargas parciales, también se destacan las mostradas en la figura 22. Esta distribución muestra una forma característica en la que la predominancia de pulsos negativos son mayores (DP-> DP+), siendo una forma característica de descargas de delaminación del material.

“Las delaminaciones del aislamiento a tierra que se desarrollan como resultado de la mala operación de la máquina, el envejecimiento térmico, la vibración de la barra y la erosión de las descargas parciales pueden presentar características muy diferentes de las características de las cavidades en un aislamiento nuevo. Los sitios de descarga parcial también pueden estar presentes o desarrollarse en

la interface entre el conductor el aislamiento a tierra, y entre el aislamiento a tierra y el tratamiento semiconductor sobre las superficies del bobinado del estator. Otros sitios potenciales de descargas parciales pueden ocurrir dentro de grietas de circunferencia, interrupciones mecánicas del aislamiento causadas por sobrecalentamiento, sitios de daño de impacto, fracturas de aislamiento y áreas desgastadas”²⁶.

Figura 22. Patrón de la IEEE 1434 para Descargas en delaminación.



FUENTE: IEEE 1434-2014 Guía para la medición de descargas parciales en maquinaria eléctrica CA.

²⁶ IEEE 1432-2014. Guía IEEE para la medición de descargas parciales en maquinaria eléctrica de CA.

5 APLICACIÓN DE LA PRUEBA

La medición de descargas parciales en el aislamiento del generador hidráulico de 85 MW de la central hidroeléctrica Urrá 1, fue aplicada por especialistas extranjeros de la empresa ABB por estar calificados y certificados para realizar este tipo de procedimientos y así garantizar un correcto desarrollo de la prueba, conforme a las normas establecidas para este procedimiento como son:

- IEEE Std 43-2013; Práctica recomendada para probar la resistencia de aislamiento de maquinaria eléctrica.
- IEEE Std 115-2009; Guía para procedimientos de prueba para máquinas síncronas.
- IEEE Std 1434-2014 Guía IEEE para la medición de descargas parciales en maquinaria eléctrica de CA.
- IEC 60270: 2001. Técnicas de ensayo de alto voltaje - Mediciones de descargas parciales.

Se verificó que el protocolo de aplicación de la prueba y las medidas de seguridad para las personas y los equipos fueran las adecuadas.

Siguiendo las instrucciones para la aplicación de la prueba de acuerdo a las normas mencionadas anteriormente, se inició con la identificación del equipo:

5.1 PARÁMETROS DEL GENERADOR

Para la ejecución de la prueba fue necesario proporcionar al personal de la empresa ABB, los datos operativos del historial de funcionamiento del generador, los cuales son información confidencial de Empresa Urrá S.A. E.S.P. con el fin de realizar un análisis estimado del tiempo de vida de los devanados.

La información técnica de las características del generador, se presentan en la tabla 5:

Tabla 5. Datos técnicos del generador de la Central Hidroeléctrica Urrá 1.

DATOS TÉCNICOS DEL GENERADOR	
PROPIETARIO	EMPRESA URRÁ S.A. E.S.P.
IDENTIFICACIÓN DEL EQUIPO	GENERADOR 04GTA
FABRICANTE	ELECTROSILA
MODELO/TIPO	CB1026/155-60 TB4
POTENCIA NOMINAL	92,7 MVA
TENSIÓN NOMINAL	13,8 kV
CORRIENTE NOMINAL	3880 A
FRECUENCIA	60 Hz
VELOCIDAD	120 r.p.m.
No DE POLOS	60
FACTOR DE POTENCIA	0,9
CLASE DEL AISLAMIENTO	F
TIPO DE AISLAMIENTO	Resina epóxica
AÑO DE FABRICACIÓN	1997
AÑO DE PUESTA EN SERVICIO	2000
TEMPERATURA Del DEVANADO	36°C
TEMPERATURA AMBIENTE	34°C

Fuente: Empresa Urrá S.A. E.S.P.

El generador eléctrico de la CH Urrá 1, está conectado en Y, con neutro aterrizado a tierra.

5.2 MEDIDAS DE SEGURIDAD Y PREPARACIÓN DEL EQUIPO.

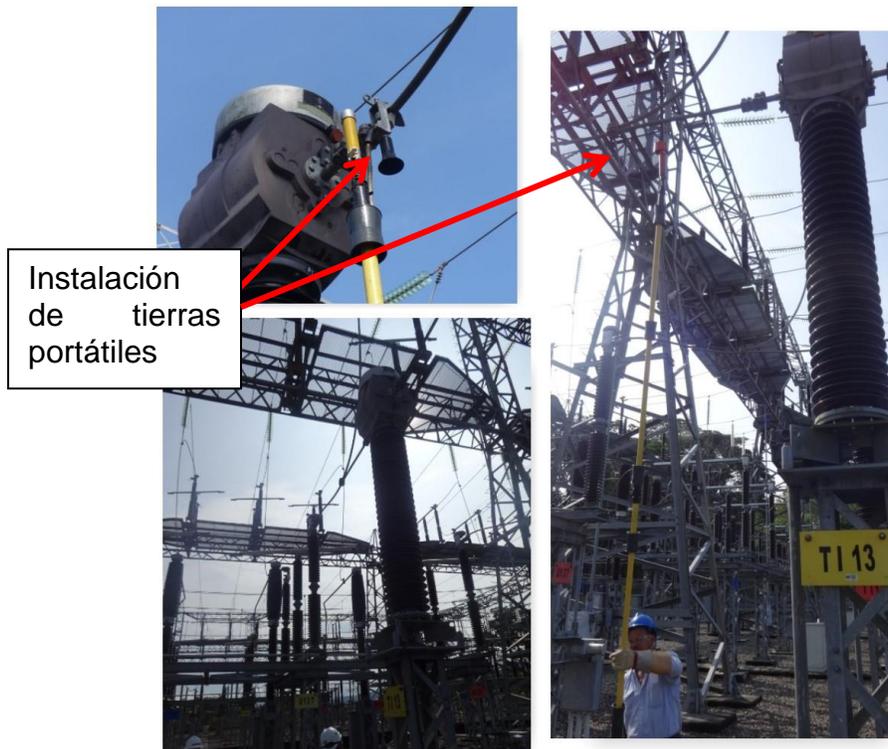
Para realizar la prueba, fue necesario tomar las siguientes medidas de seguridad:

- ✓ Consignar la Unidad generadora y su indisponibilidad durante la prueba, ante el Centro Nacional de Despacho CND.
- ✓ Delimitar con cinta de seguridad las áreas de trabajo.
- ✓ Despejar el campo de conexión de la unidad en la subestación 230 kV.
- ✓ Bloquear mecánicamente la turbina del generador, a través del distribuidor de la misma.
- ✓ Desconectar los transformadores de excitación y de los servicios auxiliares de la unidad. Conectar a tierra los anillos rozantes del sistema de excitación.
- ✓ Desconectar el generador eléctrico del bus de salida.
- ✓ Desconectar el punto común de las fases del generador en el neutro.

Como primera medida se consignó la unidad generadora ante el Centro Nacional de Despacho (CND), a través de una consignación nacional, para así cumplir con las exigencias establecidas en la ley eléctrica colombiana y el Código Nacional de Operación (CNO). Una vez autorizada las actividades de la consignación nacional, fue despejado el campo de conexión de la Unidad a la subestación 230 kV, conectando a tierra la bahía de conexión y de esta forma poder realizar la desconexión del generador de forma segura.

Adicionalmente, se realizó el bloqueo mecánico del distribuidor de la turbina, se desconectaron las salidas del generador hacia los transformadores de excitación y de servicios auxiliares de la unidad, se desconectaron las escobillas del sistema de excitación y se aterrizaron los anillos rozantes, como muestran la figuras 23, 24 y 25.

Figura 23. Medidas de seguridad tomadas en S/E 230 kV.

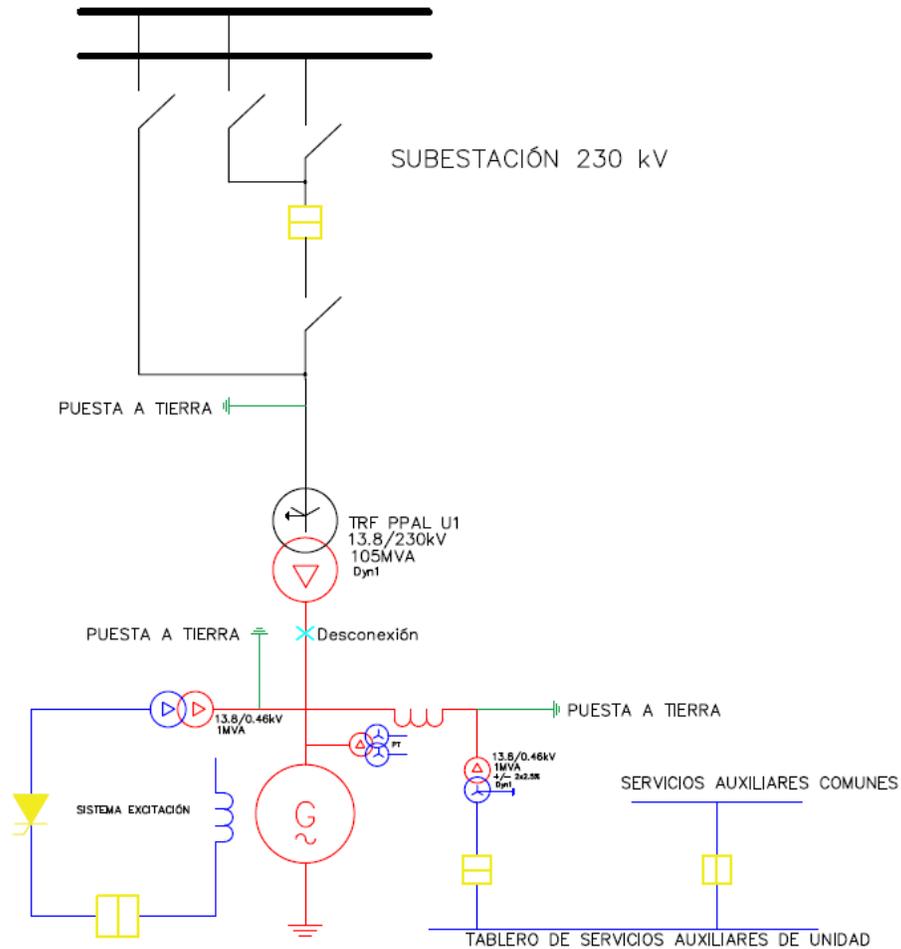


Fuente: Tomada en S/E Urrá 230 kV.

La figura 24 muestra un esquema equivalente del diagrama unifilar del generador y sus sistemas auxiliares y de excitación. Se observa en esta figura los puntos que

fueron conectados a tierra para realizar de manera segura la desconexión del generador en la línea de salida y el punto neutro.

Figura 24. Diagrama unifilar de conexión del generador.

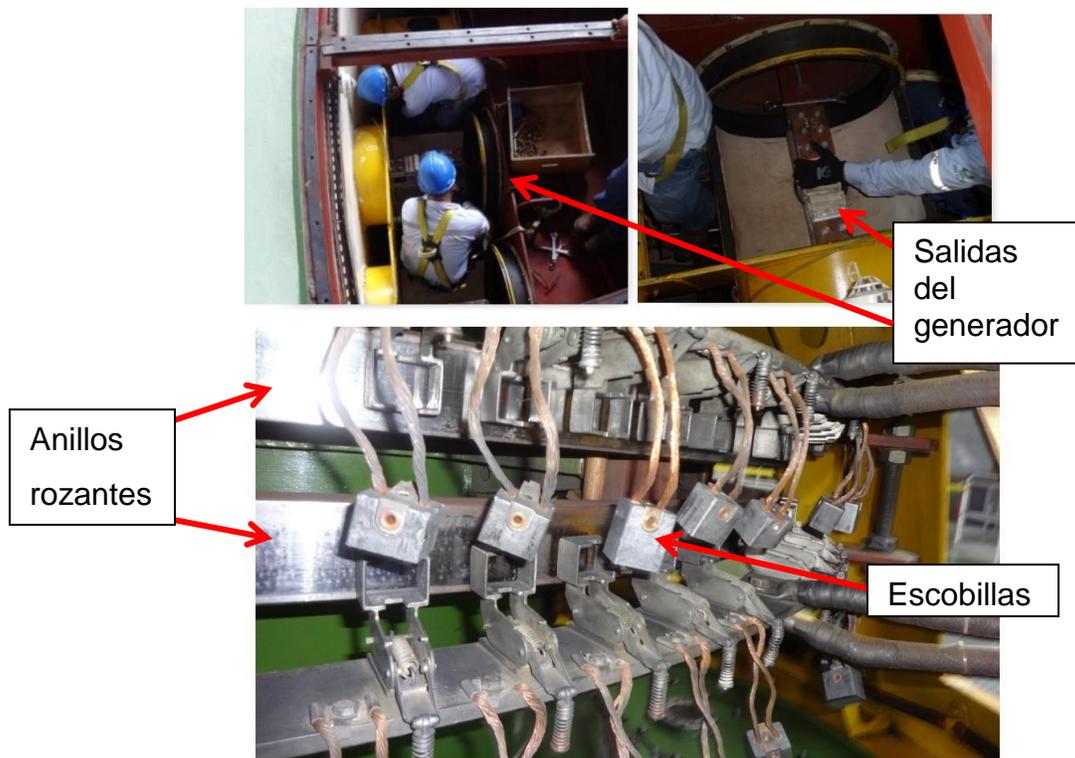


Fuente: Tomado de planos eléctricos de CH Urrá 1.

Con las anteriores medidas de seguridad se procedió a desconectar de forma segura el bus de salida del generador y la estrella del neutro por parte del personal

de mantenimiento eléctrico de la central. La figura 25 muestra al personal realizando estas actividades.

Figura 25. Desconexión del generador y el sistema de excitación.



Tomada en central Hidroeléctrica Urrá 1.

De esta forma establecieron las medidas de seguridad mínimas exigidas para realizar la prueba al generador.

5.2.1 Equipo utilizado para la medición de las descargas parciales.

La medición de las descargas parciales en el generador eléctrico, fue ejecutada por personal de la empresa ABB, quienes están calificados y son especialistas en la intervención de este tipo de máquinas.

Básicamente los equipos utilizados en la medición son:

- ✓ Instrumentos de acoplamiento para filtrar y adquirir las señales que deben ser analizadas e impedir el ingreso de señales indeseables.
- ✓ Equipos para calibrar los instrumentos que procesan las señales.
- ✓ Equipo de cómputo para el procesamiento y análisis de datos adquiridos en la medición.

Estos equipos se resumen en la figura 26:

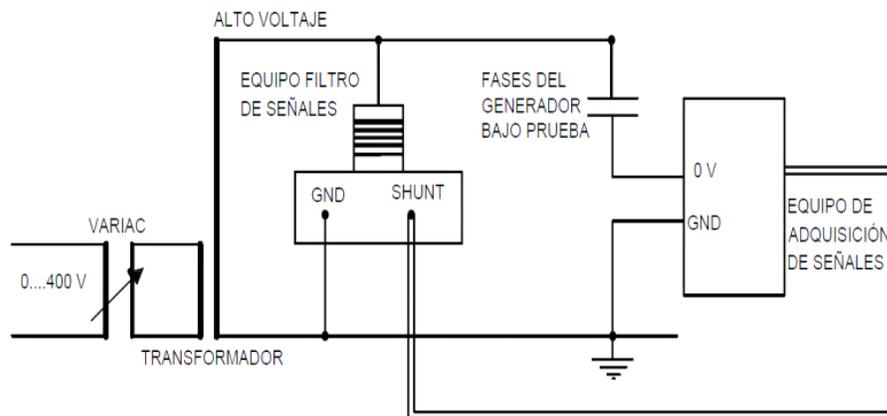
Figura 26. Equipos utilizados en la aplicación de la prueba.



Fuente: Catálogo de equipo Deltamaxx, Quailtrol Company.

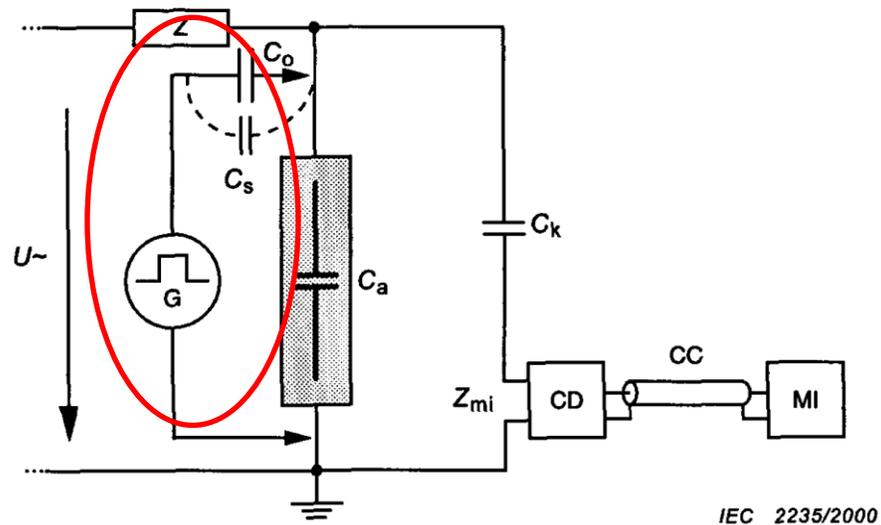
El esquema de conexión del equipo PDTech Deltamaxx™ se muestra en la figura 27, en la que se observa la conexión desde el transformador de alimentación hasta el equipo que adquiere y procesa los datos de las medidas obtenidas durante la prueba. “La conexión de todos los elementos se realizó de acuerdo a lo establecido en la norma IEC 60270-200, como se muestra en la figura 28. En esta se muestra el esquema de conexión del calibrador del circuito, el cual se conecta en paralelo con el objeto de prueba.

Figura 27. Esquema de conexión equipo Deltamaxx PDTech.



Fuente: Catálogo de equipo Deltamaxx, Quailtrol Company.

Figura 28. Circuito de prueba con instrumento de calibración.



Fuente: IEC 60270-2001.

Se puede observar el elemento de calibración representado por una fuente de pulsos G y una capacitancia C_o , paralelos al objeto de prueba C_a . Vale la pena señalar que la conexión y el procedimiento de calibración mostrado en la figura 28 se deben realizar con cada una de las fases del generador, y las fases que no se miden son conectadas a tierra.

Antes de realizar cualquier intervención de tipo eléctrico al generador, fue pertinente realizar una medición de resistencia de aislamiento a sus devanados, así como una inspección visual, para garantizar que las condiciones de los mismos fueran las adecuadas y garantizar la seguridad de los equipos al momento durante la prueba.

5.3 APLICACIÓN DE LA PRUEBA

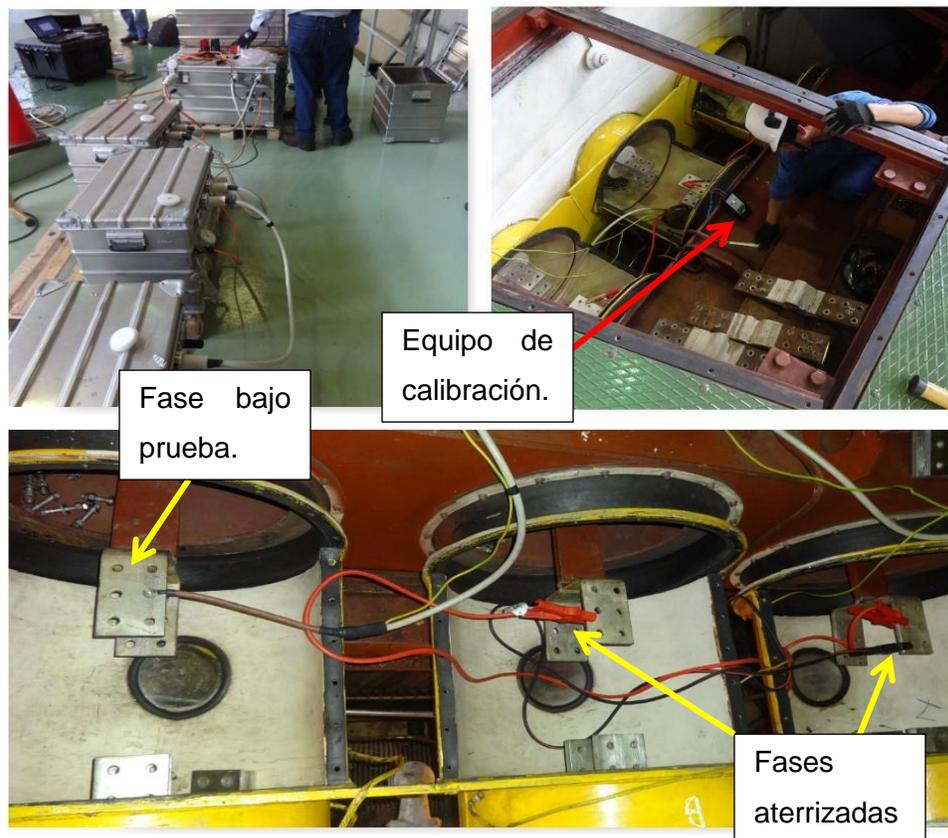
La medición de descargas parciales en el generador eléctrico de 85 MW de la Central hidroeléctrica Urrá 1 fue realizada con la unidad fuera de línea, y se realizó de acuerdo a los procedimientos descritos en las normas IEEE Std 1434-2014 e IEC 60270:2001 para este caso.

5.3.1 Calibración (Según IEC 60270-2001):

“El objetivo de la calibración es comprobar que el sistema de medición será capaz de medir la magnitud de las descargas parciales correctamente.

La calibración de un sistema de medición en el circuito de prueba completo se realiza para determinar el factor de escala k para la medición de la carga aparente. Como la capacitancia C_a del objeto de prueba afecta las características del circuito, se debe calibrar con cada nuevo objeto de prueba, a menos que se realicen ensayos sobre una serie de objetos similares con valores de capacitancia dentro del 110% de los valores medios”. En la figura 29 se muestran los equipos conectados y el instante en que se realiza la calibración de los equipos.

Figura 29. Conexión y calibración de los equipos.



Tomada en CH Urrá 1.

Como lo recomienda la norma IEEE1434-2014, las conexiones entre el equipo de medida y el devanado del generador eran de una longitud y un diámetro lo suficientemente adecuados para no producir descargas parciales al momento de aplicar la tensión de prueba, que pudieran alterar las medidas obtenidas en el generador.

Una vez que fue verificada la conexión correcta de los equipos, se procedió a realizar la calibración de los equipos de medida, esto para establecer que la

magnitud de la carga aparente de las descarga parcial asociados a estos fueran menores a **10 pC** como lo establece la norma IEEE1434-2014 y la IEC 60270-2001. También se configuró el ancho de banda de la frecuencia Δf para la medición:

$$10 < \Delta f < 100 \text{ Hz}$$

Para la prueba, se utilizó el calibrador *PDTech PDCAL20*, mostrado en la figura 30.

Figura 30. Instrumento de calibración (PDTech PDCAL20).



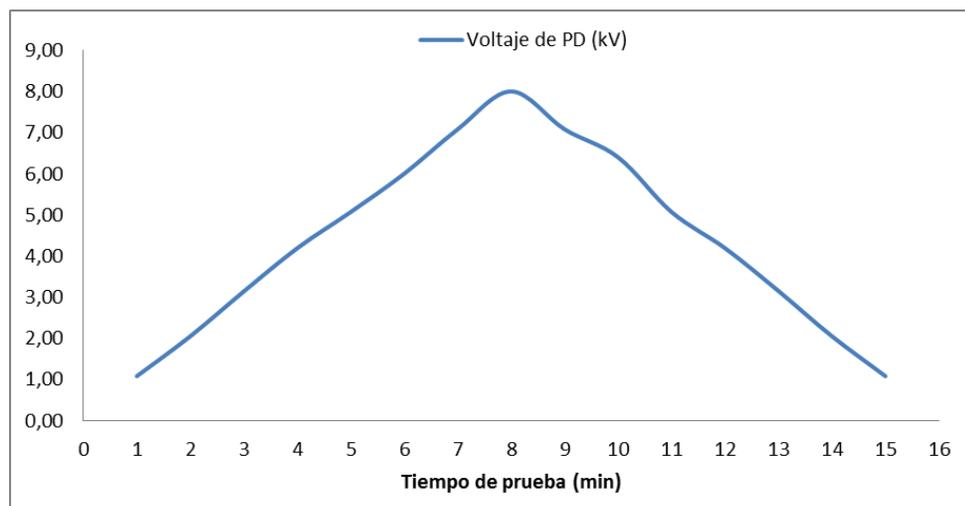
Fuente: Catálogo de equipo Deltamaxx, Quailtrol Company.

Los valores obtenidos fueron ingresados al Software integrado con el equipo de adquisición de datos, y de este modo se completó la preparación de los equipos.

5.3.2 Aplicación de las tensiones de prueba.

Las tensiones de prueba para la medición de las descargas parciales a través del sistema de control del equipo, inició con 1 kV y se fue aumentando gradualmente cada 1000 V hasta alcanzar la tensión nominal del generador de 7,97 kV \approx 8 kV. Los tiempos de aplicación de la tensión de prueba se realizó en intervalos de un minuto aproximadamente, tiempo en el cual se observó el aumento progresivo de las descargas parciales. En la figura 31 se observa la tendencia de las tensiones de prueba aplicadas a cada una de las fases del generador.

Figura 31. Tensiones de prueba para la medición de las DPs.



Fuente: El autor.

El software diseñado para la adquisición de los datos, registra todas las variables de forma automática. En las tablas 6 a 8 se muestran los resultados obtenidos para cada fase.

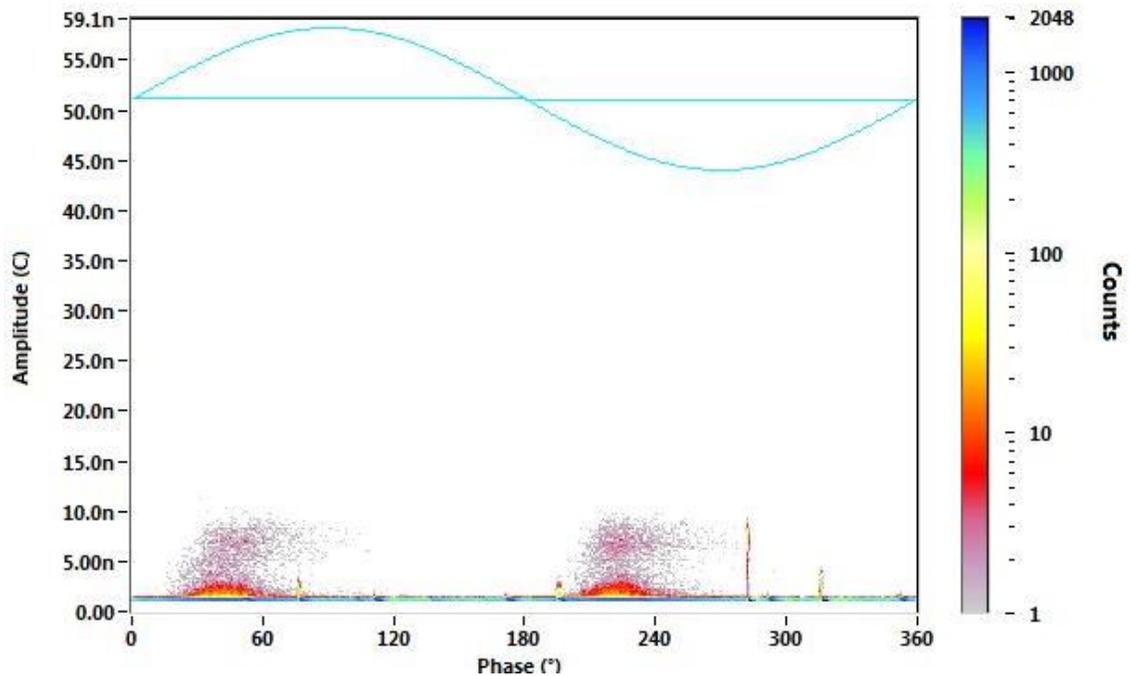
Tabla 6. Resultados obtenidos en la fase A

PD Voltage (kV)	Qm (nC)	Qapp (nC)	Frequ. (Hz)
1,15	7,39	7,39	59,98
2,09	6,73	6,90	59,98
3,14	6,90	7,06	60,01
4,14	6,73	7,23	59,97
5,08	6,41	6,41	59,97
6,12	7,06	7,06	59,95
7,15	6,41	6,57	59,96
7,99	6,90	6,90	60,01
8,00	7,06	7,06	59,99

Fuente: Resultados obtenidos por ABB.

Para la medición de descargas parciales de la fase A, se observó que a una tensión de 6,09 kV ya se mostraban algunos pulsos de descargas, aunque en una magnitud muy baja. Con la medición completa se estableció una tensión efectiva para el inicio de las descargas de 6,13 kV. Por la forma de la distribución mostrada en los resultados (Figura 32), se aprecia un comportamiento similar tanto para los pulsos con polaridad negativa, como para los pulsos de polaridad positiva, $PD + \approx PD-$, amplitud: de bajo a intermedio y redondeada similar en cada semiciclo, como lo sugiere el patrón de PD para *descargas internas en el aislamiento*.

Figura 32. Descargas parciales medidas en la fase A.



Fuente: Resultados de mediciones hechas por ABB.

Los resultados de la medición realizada a la fase B del generador registrados en la tabla 7, mostraron que el voltaje de inicio de las descargas se encuentra a 6,4 kV siendo aproximadamente el 80% del valor de la tensión nominal de la fase.

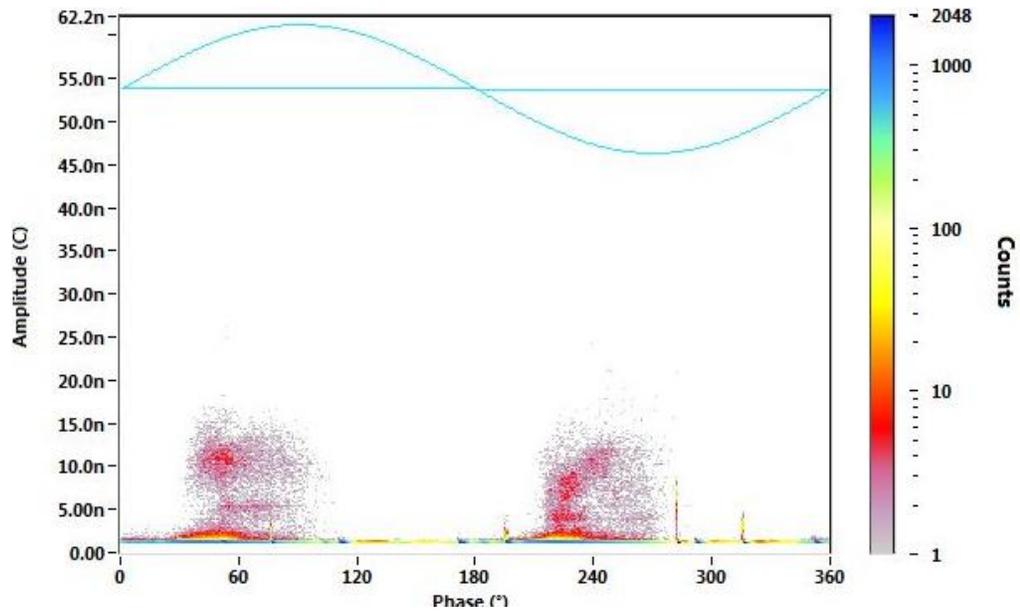
Se muestra en la figura 33 la distribución de pulsos para el devanado de la fase B, los cuales muestran un incremento significativo en la distribución de pulsos, respecto a la fase A.

Tabla 7. Resultados obtenidos en la fase B.

PD Voltage (kV)	Qm (nC)	Qapp (nC)	Frequ. (Hz)
1,08	7,60	7,60	60,00
2,05	6,57	6,57	59,98
3,14	6,22	6,39	59,95
4,19	6,74	6,74	60,02
5,07	6,57	6,57	59,99
6,00	6,57	6,57	59,97
7,08	10,50	12,10	59,98
7,99	9,85	9,85	60,01
8,00	11,10	12,40	60,02

Fuente: Resultados de mediciones hechas por ABB.

Figura 33. Distribución de pulsos obtenidos en la fase B.



Fuente: Resultados de mediciones hechas por ABB.

Para la fase C se obtuvo un voltaje de inicio de descargas de 6,13 kV y los resultados se presentan en la tabla 8. La distribución de los pulsos de descargas mostrada en la figura 34 para la fase C del generador, evidencia posibles fuentes diversas de descargas parciales, lo cual se comparó con las distribuciones patrones para ellas.

Tabla 8. Resultados obtenidos en la fase C.

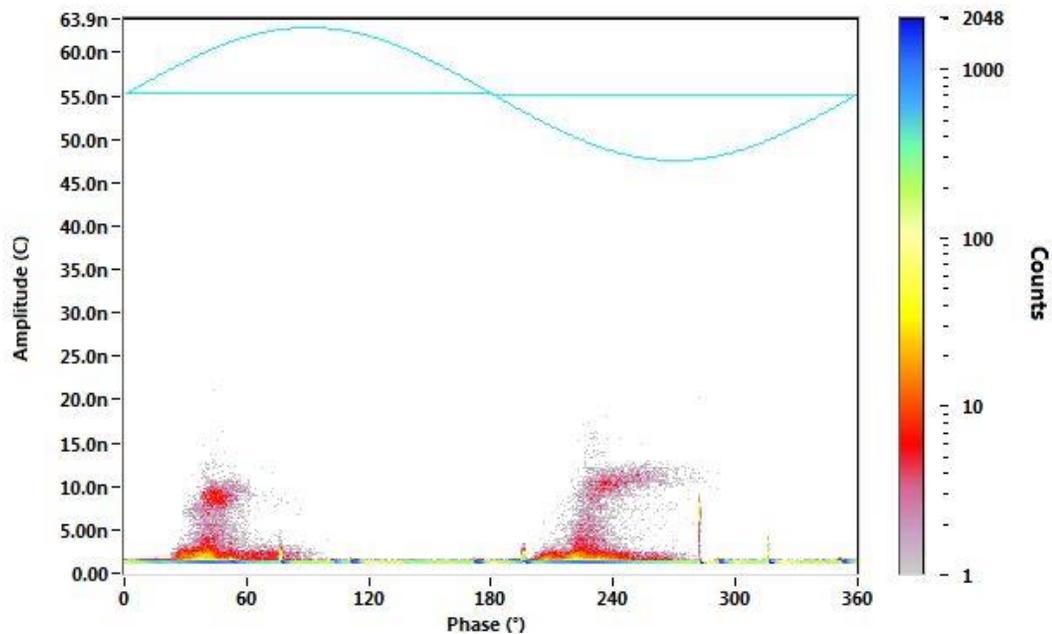
PD Voltage (kV)	Qm (nC)	Qapp (nC)	Frequ. (Hz)
1,08	7,45	7,45	59,98
2,11	6,39	6,39	59,99
3,18	7,10	7,10	59,98
4,04	6,39	6,39	60,01
5,02	6,56	6,74	59,97
6,19	6,56	6,56	59,96
7,02	6,39	6,56	60,04
8,00	6,92	6,92	59,99

Fuente: Resultados de mediciones hechas por ABB.

La distribución de pulsos mostrado en la figura 34 indica que hay una gran presencia de descargas parciales, respecto a la fase A. Estas mediciones fueron complementadas con otras mediciones, relacionadas en la tabla 9 las cuales sirven para confrontar los resultados de las mediciones de DP. El equipo de medición y adquisición de datos permitió realizar medidas de las cargas Q1, Q2 y Q3, los cuales permiten analizar el estado de los materiales a base de resinas que componen el aislamiento del devanado y su comportamiento eléctrico en presencia de tensiones de trabajo. Se resaltan en color rojo los valores de las

cargas de polarización de las resinas que se encuentran fuera del rango aceptable para estos.

Figura 34. Distribución de pulsos obtenidos en la fase C.



Fuente: Resultados de mediciones hechas por ABB.

Tabla 9. Resultados de pruebas complementarias.

VALORES MEDIDOS A 5 kV	MEDIDAS POR FASES				RANGO NORMAL
	A	B	C	A-B-C	
Resistencia de aislamiento [MΩ]	719	706	720	287	-----
Índice de polarización	3,96	3,89	3,97	4,04	> 2
T1 (Tiempo constante de migración de iones) [seg]	15,58	15,57	15,57	7,44	10-30
T2 (Tiempo constante de relajación lenta) [seg]	113,17	113,06	112,73	111,1	65-150
T3 (Tiempo de polarización interfacial) [seg]	754,33	746,88	733,14	837,22	300-1000
Q1 (Migración Ión-Carga) [%]	20,39	20,38	19,9	19,63	< 7 %
Q2 (Relajación Carga-Lenta) [%]	15,43	15,31	14,99	17,16	< 10 %
Q3 (Polarización Carga - Interfacial) [%]	23,73	23,35	22,7	24,64	< 20 %
Q1/Q2	>100	>100	>100	>100	55-65 %
Q2/Q3	65,02	65,57	66,04	69,62	55-65 %

Fuente: Resultados de mediciones hechas por ABB.

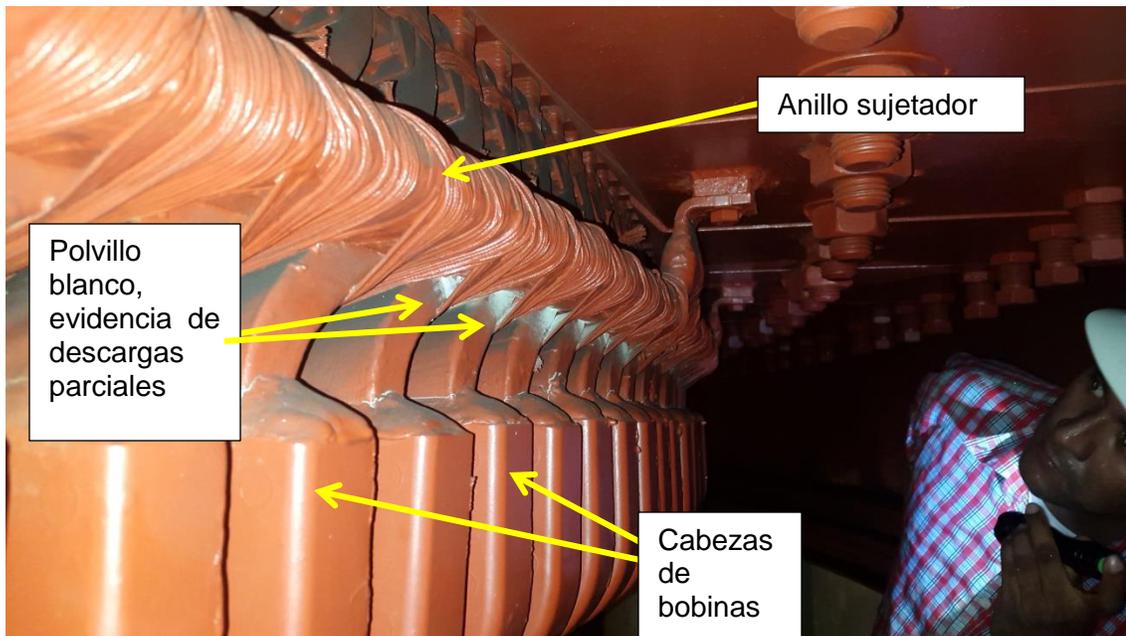
Además se realizó inspección visual a los devanados del generador, encontrando importantes hallazgos que indican físicamente la presencia de descargas superficiales, evidencian el estado de las superficies de los aislamientos y del núcleo. Esto permite confrontar los resultados de las mediciones de DP y de pruebas adicionales. Estas evidencias se presentan de la figura 35 a la figura

Figura 35. Descarga corona en zona de alto gradiente de la barra.



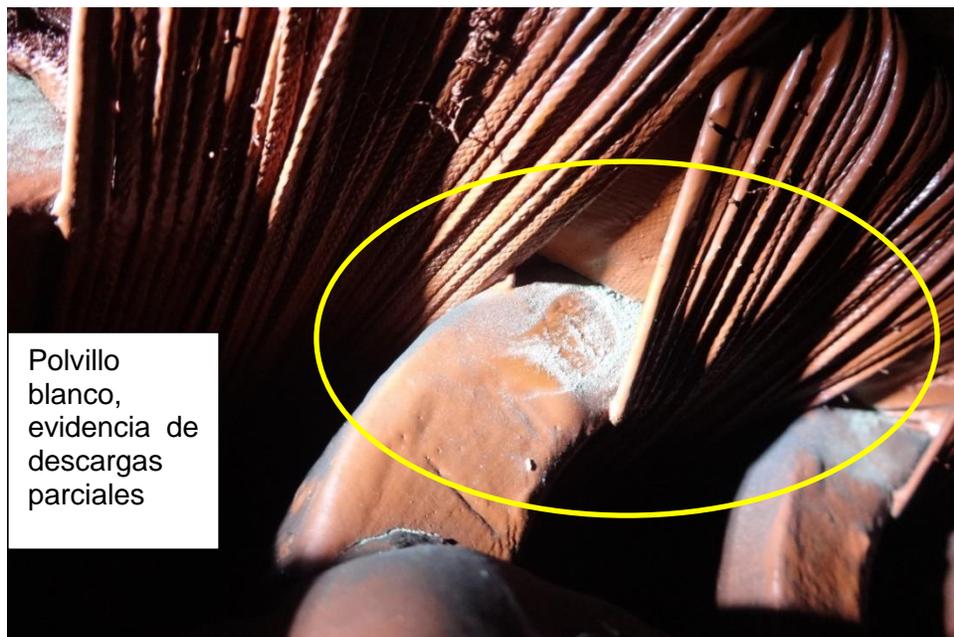
Tomadas al generador de la CH Urrá 1.

Figura 36. Degradación del aislamiento en anillo sujetador de las cabezas de bobinas.



Tomadas al generador de la CH Urrá 1.

Figura 37. Degradación del aislamiento en el anillo sujetador de las cabezas de bobinas.



Tomadas al generador de la CH Urrá 1.

5.4 Análisis de resultados.

La interpretación de los resultados obtenidos fue comparada con las bases de datos propiedad de la empresa ABB, en los que cuentan con abundante información relacionada con generadores de similares características. Esta información no fue proporcionada por ABB, pero sí realizaron una serie de conclusiones y recomendaciones para el generador.

Como fuente de referencia para los valores tolerables de descargas parciales no hay referencias precisas en la literatura relacionada con esta técnica de evaluación de aislamientos. Sin embargo se muestra en la tabla 10²⁷ los Criterios de evaluación del Instituto Central de Investigación de la Industria de la Energía Eléctrica **CRIEPI** por sus siglas en inglés (Central Research Institute of Electric Power Industry) respecto al nivel de descargas parciales que se registran en pruebas fuera de línea.

Tabla 10. Criterios de evaluación del Instituto Central de Investigación de la Industria de la Energía Eléctrica (CRIEPI).

Q_{máx} (nC) a 1.2 V_n	Estado del sistema aislante
≤10	Devanado en buen estado
De 10 a 30	Devanado con condiciones de continuar en servicio, con inspecciones y medidas preventivas.
> 30	Devanado en estado de deterioro crítico.

Fuente: Diagnóstico de Generadores Eléctricos de Potencia con Técnicas de Monitoreo en Línea y Fuera de Línea. Ignacio R. Campuzano Martínez

²⁷Campuzano Martínez, Ignacio R. Diagnóstico de Generadores Eléctricos de Potencia con Técnicas de Monitoreo en Línea y Fuera de Línea.

Es importante recalcar que *la medición de las descargas parciales por fase resuelta* al generador hidráulico de la central hidroeléctrica Urrá 1, permitió identificar aspectos importantes dentro del proceso de envejecimiento que experimentan los materiales aislantes durante su vida en servicio. Evidencia algunos aspectos en cuanto al estado real de los aislamientos, sus posibles defectos dieléctricos adquiridos durante su servicio y la causa probable de estos, así como su posible y más viable atención para ser atendidos durante las labores de mantenimiento del generador. Teniendo en cuenta lo anterior, los especialistas presentaron una serie de conclusiones obtenidas a partir del análisis de los resultados de las pruebas y su comparación con los patrones normalizados por la IEEE 1434-2014 y las bases de datos de la compañía ABB:

- ✓ Los patrones registrados de descargas parciales indican dominante actividad de descargas en espacios en los extremos de ranura con contribución de descargas en delaminación.
- ✓ La actividad de descargas parciales, como se observa desde los patrones de descargas parciales registrados y las magnitudes de la actividad de descarga, indican que no hay actividad de descarga en ranuras.
- ✓ Hay evidencia de almacenamiento de cargas en la superficie del devanado. Esto se evidenció en las inspecciones realizadas al generador, donde se pudo apreciar residuos de polvo asociado a las escobillas y posible vapor de aceite.
- ✓ Hay indicios en los patrones de descargas parciales, de descargas de vacíos a tierra en las áreas de extremos de ranuras, lo cual podría ser el resultado de

actividad de descargas parciales, en pequeños espacios no uniformes, entre las partes de salida de ranuras de los devanados y los dedos de presión de las abrazaderas de los extremos del núcleo del estator. La existencia de estas descargas es evidencia de daño, o podría resultar en un mayor daño del sistema de gradiente de tensión en las salidas de ranuras.

- ✓ Hay cierta evidencia de falta de contacto eléctrico de la capa exterior de los devanados (escudo de protección de corona). Este inadecuado contacto eléctrico puede ser atribuido a la presencia de resina de impregnación en áreas localizadas entre el escudo de protección de corona y la ranura y no debido a los daños del escudo de protección corona.
- ✓ Una vez los sitios de descargas parciales sean localizados, se debe llevar a cabo una evaluación para determinar la posibilidad de medidas que puedan ayudar a reducir el crecimiento de los daños relacionados.
- ✓ Las áreas de salida de ranura deben ser revisadas para detectar alguna evidencia de descargas parciales en las salidas de ranura. La parte de las áreas de las ranuras sin cuñas, deben ser inspeccionadas por algún signo de daño del escudo de protección corona usando un boroscopio.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Durante la ejecución de este trabajo se pudieron destacar varios factores de gran importancia en el estudio de las máquinas eléctricas, así como resaltar los aportes de los diferentes autores que ha estudiado este fenómeno a través de los años y que coinciden en varias ideas comunes. Se presentan así una serie de conclusiones:

- ✓ Por sí solas, la medición de descargas parciales no arrojan un resultado preciso de los posibles defectos presentados en los materiales aislantes, por lo que se hace necesario corroborar los resultados de las mediciones, con otras pruebas como resistencia de aislamientos, tangente delta e índice de polarización, entre otras.
- ✓ Los materiales aislantes están diseñados para tolerar cierto nivel de descargas parciales durante su operación, por lo que se hace necesario realizar mediciones periódicas para observar su tendencia a través del tiempo.
- ✓ La medición de descargas parciales por fase resuelta, es una muy aceptada herramienta de mantenimiento predictivo que permite evaluar con gran precisión el estado real de los aislamientos, ayudando a identificar procesos de degradación y envejecimiento en los mismos.
- ✓ Es muy beneficioso implementar la medición y monitoreo en línea de las descargas parciales, ya que así es posible identificar los problemas que se

puedan estar presentando en los devanados del generador, cuando este se encuentra en servicio y sincronizado al SIN.

- ✓ En Colombia aún la práctica de medición de las descargas parciales en los generadores se viene utilizando en muy poca medida, lo que muestra una probable falta de conocimiento amplio en este tema. Son pocas las centrales de generación que implementan la técnica de monitoreo de las descargas parciales.
- ✓ El estudio de descargas parciales puede ser examinado con mayor profundización en los cursos que estudian las máquinas eléctricas, de modo que se comprenda cómo los diferentes procesos operativos de una máquina interactúa con las características propias de los aislamientos y desarrollan procesos degenerativos en los sistemas de aislamiento de las mismas.

6.1 Recomendaciones

El análisis de los resultados de las medidas tomadas al generador, complementadas con pruebas adicionales de tangente delta y resistencia de aislamiento, así como la inspección realizada en el interior del mismo, permitieron tener una visión clara de las posibles causas de origen de fallas que se pueden presentar. Por lo tanto se plantearon una serie de recomendaciones para el mantenimiento de generador:

- ✓ Se debe prestar especial atención a las áreas de salidas de ranura para comprobar si hay daños en el Sistema de gradiente de tensión o para pequeños espacios libres no uniformes entre la parte de salida de ranuras de los devanados y los dedos de presión de las abrazaderas de los extremos del núcleo del estator.
- ✓ Una vez los sitios de descargas parciales sean localizados, se debe llevar a cabo una evaluación para determinar la posibilidad de medidas que puedan ayudar a reducir el crecimiento de los daños relacionados.
- ✓ Realizar prácticas de inspección periódicas, las cuales permitan identificar daños de las descargas relacionados con los resultados de esta prueba, el aumento de la de-laminación, el aumento de la despolimerización de la resina y también importante, el incremento de la contaminación en el devanado.

Como aspecto negativo para la realización de este trabajo, se destaca la imposibilidad de contar con los aspectos técnicos puntuales de los equipos de medición, ya que estos presentan una serie de modificaciones patentadas por la empresa ABB, quienes restringieron el acceso al detalle de los mismos. Sin embargo, los requerimientos principales de estos equipos cumplen los requisitos exigidos por las normas para la medición de las descargas parciales.

7 BIBLIOGRAFÍA

AGUIRRE, Luis Felipe; CORREA, Alejandro; VÉLEZ, Juan Carlos y APONTE, Guillermo. Montaje de la prueba de descargas parciales como técnica para el diagnóstico de aislamiento en cables eléctricos. Cali. Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. Grupo De Investigación en Alta Tensión. 2003.

B.J. Beggs; I.J. Kemp and A. Wilson. "Characterization of Discharge Phenomena in Voids". IEEE Int. Symp Electr. Insul., Toronto, pp. 145_148, 1990.

CARANTON MUÑOZ, Aida Yubelly; Evaluación de vida útil residual de aislamiento compuesto de mica y resina con base en pruebas de envejecimiento acelerado. Bogotá D.C. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. 2012.

HUDON, Claude; BÉLEC, Mario. Partial Discharge Signal Interpretation for Generator Diagnostics. Institut de Recherche Hydro-Québec IREQ. Quebec, Canada.

IEC 60270:2001. High-voltage test techniques—Partial discharge measurements.

IEEE Std 115-2009; Guide for Test Procedures for Synchronous Machines.

IEEE Std 1434TM 2014. Guide for measurement of partial discharges in AC electric machinery.

IEEE Std 43-2013; Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery.

IEEE Std 62.2TM 2004. Guide For Diagnostic Field Testing Of Electric Power Apparatus-Electrical Machinery.

PAOLETI, Gabe and GLUBEV; Alex. Partial Discharge Theory and Applications to Electrical Systems. Seattle: Cutler-Hammer Engineering Services. IEEE IAS Pulp and Paper Industry Conference..1999.

RODRÍGUEZ HIDALGO, Rafael. Procedimientos de mantenimiento de los bobinados y núcleo de los generadores de centrales Pisayambo, Agoyan y Esmeraldas. Quito-Perú. Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Eléctrica. 1997.

RODRÍGUEZ POZUETA, Miguel Ángel. Aislantes y conductores utilizados en las máquinas eléctricas. Universidad de Cantabria. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética.

S. Johnson, "Slot Discharge Detection Between Coil Surfaces and Core of High-Voltage Stator Windings", Trans. Amer. Inst. Electr. Eng. Vol. 70, pp. 1993_1997, 1951.

STONE, Greg C; BOULTER, Edward A.; COULBERT, Ian and DHIRANI, Hussein. Electrical insulation for rotating machines. Unites State of America: IEEE Press Press Series On Power Engineering. 2004.

TORO, Juan Carlos; Mecanismos de degradación de aislamientos- Aislamientos sólidos eléctricos en grandes máquinas rotativas. Jornada técnica en CH Urrá 1. Tierralta. 2013.

TORRES SÁNCHEZ, Horacio. Aislamientos eléctricos. Universidad Nacional de Colombia.