

METODOLOGÍA DE DETECCIÓN DE DESCARGAS PARCIALES EN
GENERADORES ELÉCTRICOS, CABLES DE POTENCIA Y TRANSFORMADORES
DE POTENCIA USANDO EL MÉTODO ELECTROMAGNÉTICO

ESTEFANÍA ALEJANDRA HERNÁNDEZ CARVAJAL



INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA
PASCUAL BRAVO®

INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN ENERGÍA
MEDELLÍN
2022

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

Estefanía Alejandra Hernández Carvajal

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de Máster en Energía

Yuhan Arley Lenis Rodas
Doctor en Ingeniería Mecánica

Institución Universitaria Pascual Bravo
Facultad de Ingeniería
Maestría en Energía
Medellín
2022

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

Nota de Aceptación del Trabajo de Grado

En esta sección del documento se debe incluir la página en la que se ha registrado la nota obtenida luego de la exposición y las firmas de los docentes evaluadores. Esta página le será entregada al estudiante.

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

Dedicatoria

El

Camino que

Atravesé durante esta odisea, fue

Mucho más sencillo con tu

Increíble apoyo

Agradecimientos

Durante la realización de este documento hubo muchos contratiempos que solo pude afrontar porque tuve la fortuna de contar a mi lado con personas como:

Carlos, que siempre tuvo nuevas soluciones para cada problema y sin importar sus ocupaciones siempre sacó tiempo para asesorarme.

Yuhan, que, sin importar el resultado, siempre quiso ser parte del proceso.

A mi amigo incondicional y crítico inagotable que siempre insistió en acompañarme a pesar de mis buenos y malos momentos.

Mis amigos de clases, que siempre tuvieron palabras de apoyo y motivación.

Mi familia, que siempre me hizo parar para respirar y retomar el impulso.

Dios, que se encarga de reacomodar todas las situaciones una y otra vez para que todo resulte de la mejor manera.

Mi agradecimiento infinito para todos

Resumen

La verificación del estado del aislamiento de los activos críticos de generación de energía como lo son generadores, transformadores de potencia y cables de potencia es de vital importancia para predecir su estado actual, necesidades de intervención y su vida remanente, razones que garantizan la confiabilidad de los equipos y la realización de inversiones en los momentos adecuados. El monitoreo de descargas parciales es un procedimiento de mantenimiento predictivo que permite detectar la condición del aislamiento de los activos críticos de generación, por lo que se hace necesario identificar técnicas rápidas y de fácil ejecución que permitan el monitoreo de cables de potencia, transformadores de potencia y generadores.

Esta tesis aborda la mencionada problemática, brindando una solución práctica y económica (comparada con otros equipos de diagnóstico) para el diagnóstico de descargas parciales en activos críticos de generación a partir del método electromagnético. Durante el desarrollo, se empleó un sensor en generadores eléctricos, transformadores de potencia y cables de potencia con el que se detectaron las señales electromagnéticas generadas durante la operación de los mencionados activos. Se estableció la ubicación óptima de este sensor con la que se detectará con mayor precisión el origen de las descargas parciales, luego de ello, la medición tomada fue comparada con otras mediciones realizadas por métodos de detección de descargas parciales como acopladores capacitivos en generadores eléctricos, análisis de gases combustibles por Pentágono de Duval y descargas acústicas en transformadores de potencia y sensor de descargas parciales en cables de potencia, con el

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

fin de identificar la concordancia entre las señales adquiridas y establecer los criterios de aceptación y recomendaciones de acciones a seguir luego del análisis de la lectura de las descargas parciales.

Los resultados de los experimentos realizados en esta tesis permitieron definir un protocolo para la medición de descargas parciales replicable a los activos críticos de generación en centrales hidroeléctricas y térmicas a partir de la respuesta electromagnética, lo cual genera herramientas para la ejecución del ejercicio de toma de lecturas de descargas parciales y recomendaciones de acciones a tomar de acuerdo con el análisis de resultados.

Palabras Claves

Descargas parciales, activo crítico, electromagnético, aislamiento, transformador de potencia, generador eléctrico, cable de potencia.

Abstract

The verification of the state of the insulation of critical energy generation assets such as generators, power transformers, and power cables is of vital importance to predict their current state, and their intervention needs and remaining life, reasons that guarantee the reliability of equipment, and making investments at the right time. Partial discharge monitoring is a predictive maintenance procedure that allows detecting the insulation condition of critical generation assets, so it is necessary to identify quick and easy-to-execute techniques that enable monitoring of power cables, power transformers, and generators.

This thesis addresses the above problem, providing a practical and economical solution (compared to other diagnostic equipment) for diagnosing partial discharges in critical generation assets from the electromagnetic method. During the development, a sensor was used in electrical generators, power transformers, and power lines with which electromagnetic signals generated during the operation of the assets were detected. The optimal location of this sensor was established with which the origin of partial discharges will be discovered with greater precision, after that, the measurement taken was compared to others detected by partial discharge detection methods such as capacitive couplers in electric generators, Combustible gas analysis by the Duval Pentagon and acoustic discharges in power transformers and partial discharge sensor in power cables, to identify the concordance between the acquired signals and establish the acceptance criteria and recommendations of actions to follow after the analysis of the reading of partial discharges.

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

Results of the experiments carried out in this thesis allowed us to define a protocol to measure partial discharges replicable to the critical generation assets in hydroelectric and thermal power plants from the electromagnetic response, which generates tools for the execution of the decision-making exercise partial discharge readings and recommendations of actions to take according to the analysis of the results

Keywords

Partial discharges, critical assets, electromagnetic, insulation, power transformer, electric generator, power cable.

Tabla de contenido

1. Introducción	17
2. Descripción del Problema	20
3. Objetivos	22
3.1. Objetivo General.....	22
3.2. Objetivos Específicos	22
4. Marco Teórico y Estado del Arte	23
4.1. Mantenimiento de Generadores Eléctricos	23
4.1.1. <i>Plan de mantenimiento predictivo de generadores.</i>	24
4.1.2. Fallos en Generadores.....	26
4.1.2.1. <i>Fallas en el sistema de aislamiento del rotor.</i>	28
4.1.2.2. <i>Fallas en el sistema de aislamiento del estator.</i>	29
4.1.2.3. <i>Fallas eléctricas en el estator de máquinas síncronas.</i>	30
4.1.2.4. <i>Descargas parciales en el devanado del estator.</i>	30
4.1.3. Factores que definen la vida útil de los generadores.....	31
4.2. Mantenimiento de Transformadores de Potencia	32
4.2.1. Plan de mantenimiento predictivo de transformadores de potencia.....	32
4.2.2. Fallos en transformadores de potencia	35
4.2.3.1. <i>Relación entre vida útil de los transformadores de potencia y el envejecimiento de su aislamiento</i>	5
4.3. Mantenimiento de Cables de Potencia.....	7
4.3.2. Factores que definen la vida útil de los cables de potencia.....	9
4.3.2.1. <i>Relación entre la vida útil de los cables de potencia y el envejecimiento de su aislamiento</i>	11
4.4. Descargas Parciales.....	12
4.4.1. Generación de descargas parciales	13
4.4.1. <i>Circuito Equivalente de una Falla:</i>	14
4.4.1.1. <i>Circuito Equivalente de una Descarga Parcial</i>	16
4.4.2. Causas o fuentes que dan origen a una descarga parcial.....	21

4.4.2.1. Metodologías de detección de descargas parciales	25
4.4.3.1. Modos de falla en generadores	31
4.4.3. Descargas parciales en transformadores de potencia	33
4.4.3. Descargas parciales en cables de potencia	36
4.4.4. Detección de descargas parciales por el método electromagnético	37
4.4.5. Ancho de banda de detección de descargas parciales en generadores eléctricos, transformadores de potencia y cables de potencia	42
5. Metodología	45
5.1. Atenuación de las Descargas Parciales en función de la Longitud del Recorrido.....	52
5.2. Criterios de aceptación de las Descargas Parciales.....	53
6. Resultados	54
6.1. Ubicación del sensor para mejorar la precisión en la detección de descargas parciales.....	54
6.2. Relación de las técnicas actuales de detección de descargas parciales en generadores eléctricos, transformadores de potencia y cables de potencia con la técnica de detección electromagnética	58
6.2.1. Medición de descargas parciales con sensor electromagnético en la central hidroeléctrica N.1.	59
6.2.1.1. Descargas parciales en generadores eléctricos.....	59
6.2.1.2. Descargas parciales en transformadores de potencia	63
6.2.1.3. Descargas parciales en cables de potencia	67
6.3. Análisis de resultados	75
6.4. Protocolo para la medición de las descargas parciales en generadores eléctricos, transformadores de potencia y cables de potencia a partir de la respuesta electromagnética	80
7. Conclusiones, recomendaciones y trabajo a futuro	91
7.1. Conclusiones	91
7.2. Recomendaciones	94
7.3. Trabajo a Futuro.....	94
8. Bibliografía.....	95
9. Anexos	103
9.1. Pruebas de descargas parciales realizadas en la Central Térmica N.1.....	103
9.1.1. Cromatografía de gases del transformador de potencia.....	103

9.1.2. Descargas parciales acústicas en el transformador de potencia	104
9.2. Pruebas de descargas parciales realizadas en la Central Hidroeléctrica N.1.	105
9.2.1. Cromatografía de gases de los transformadores de potencia	105
9.2.2. Detección de descargas parciales por acopladores capacitivos en el generador eléctrico	107
9.2.3. TIP-UP en generadores eléctricos	111
9.3.1.1. Prueba de TIP-UP (<i>Tangente delta</i>): Generadores eléctricos	111
9.2.4. Termografía de cables de potencia.....	115
9.3. Costo de la instalación de acopladores capacitivos para la realización de pruebas de descargas parciales.....	118

Lista de Tablas

Tabla 1 Gases combustibles	35
Tabla 2 Estadística de fallos de transformadores en EE. UU. entre 1983 y 1988 (Rodríguez D. L., 2012)	35
Tabla 3 Valoración del estado del papel de acuerdo con el grado de polimerización (Gustavo Jiménez-Araya, 2016)	7
Tabla 4 Variaciones Permisibles para Análisis de Descargas Parciales (Turcios, 2011)	20
Tabla 5 Ejemplo de estadísticas de $Q_{m\acute{a}x}$ (Turcios, 2011)	21
Tabla 6 Ensayos de Descargas Parciales On-Line vs. Off-Line (Turcios, 2011)	28
Tabla 7 Diagnóstico de DP (IRIS Power, 2013)	29
Tabla 8 Parámetros para Comparación entre Muestras de PD (IRIS Power, 2013)	31
Tabla 9 Características de Descargas Parciales en Generadores (IRIS Power, 2013)	32
Tabla 10 Mecanismos de Falla más Comunes en el Aislamiento (Turcios, 2011)	33
Tabla 11 Características de Descargas Parciales en Transformadores (Victor Sokolov, Recuperado en 2021)	36
Tabla 12 Características de Descargas Parciales en Cables de Potencia (Neier, 2015)	37
Tabla 13 Intervalos de Frecuencia de detección de Descargas Parciales en Activos Críticos de Generación de Energía	43
Tabla 14 Especificaciones de Hardware. Sensor PRY-CAM (Group, 2020)	50
Tabla 15 Especificaciones de Hardware. Unidad de adquisición PRY-CAM (Group, 2020)	51
Tabla 16 Atenuación de un pulso de descargas parciales en función de la longitud del recorrido (Mor, 2012)	52
Tabla 17 Clasificación inicial de la condición de un equipo (Cardoso, 2017)	53
Tabla 18 Medición de descargas parciales en transformador de potencia con sensor electromagnético	56
Tabla 19 Comparación de métodos de detección de descargas parciales usados en la Central Térmica N.1	57
Tabla 20 Resultados de medición de descargas parciales en generador eléctrico U1	60
Tabla 21 Resultados de medición de descargas parciales en generador eléctrico U2	61
Tabla 22 Comparación de métodos de detección de descargas parciales usados en los generadores eléctricos de la central hidroeléctrica N.1.	62
Tabla 23 Resultados de medición de descargas parciales en transformador de potencia U1	64
Tabla 24 Resultados de medición de descargas parciales en transformador de potencia U2	65
Tabla 25 Comparación de métodos de detección de descargas parciales usados en los transformadores de potencia de la central hidroeléctrica N.1.	66
Tabla 26 Resultados de medición de descargas parciales en los empalmes de los cables de potencia U1	68
Tabla 27 Resultados de medición de descargas parciales en los empalmes de los cables de potencia U2	69
Tabla 28 Comparación de métodos de detección de descargas parciales usados en los empalmes de los cables de potencia de la central hidroeléctrica N.1.	70
Tabla 29 Resultados de medición de descargas parciales en los cables de potencia U1	71
Tabla 30 Resultados de medición de descargas parciales en cables de potencia U2	72
Tabla 31 Comparación de métodos de detección de descargas parciales usados en los cables de potencia de la central hidroeléctrica N.1.	73
Tabla 32 Diferencia de magnitud de las descargas parciales tomadas por el método electromagnético y los acopladores capacitivos	76
Tabla 33 Resumen de resultados de medición de descargas parciales en la C.H. N.1.	80
Tabla 34 paso a paso actividades de detección de descargas parciales por método electromagnético	86
Tabla 35 Cromatografía de gases en transformador de potencia central térmica N.1.	103
Tabla 36 Resultados de cromatografía de gases en los transformadores de potencia de la C.H. N.1.	106

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

<i>Tabla 37 Lectura de Descargas Parciales en la fase R del generador de la unidad 1 de la C.H. N.1.</i>	<i>_____ 107</i>
<i>Tabla 38 Lectura de Descargas Parciales en la fase S del generador de la unidad 1 de la C.H. N.1.</i>	<i>_____ 108</i>
<i>Tabla 39 Lectura de Descargas Parciales en la fase T del generador de la unidad 1 de la C.H. N.1.</i>	<i>_____ 108</i>
<i>Tabla 40 Lectura de Descargas Parciales en la fase R del generador de la unidad 2 de la C.H. N.1.</i>	<i>_____ 109</i>
<i>Tabla 41 Lectura de Descargas Parciales en la fase S del generador de la unidad 2 de la C.H. N.1.</i>	<i>_____ 110</i>
<i>Tabla 42 Lectura de Descargas Parciales en la fase T del generador de la unidad 3 de la C.H. N.1.</i>	<i>_____ 110</i>
<i>Tabla 43 Tendencia de prueba tangente delta y TIP-UP generador U1</i>	<i>_____ 112</i>
<i>Tabla 44 Tendencia de prueba tangente delta y TIP-UP generador U2</i>	<i>_____ 113</i>
<i>Tabla 45 Termografía Cables de Potencia</i>	<i>_____ 116</i>
<i>Tabla 46 Termografía en empalmes de cables de potencia</i>	<i>_____ 117</i>

Lista de Figuras

<i>Figura 1 Distribución de fallas en generadores a partir de 20MW adaptado de (ABB Group, 2013)</i>	28
<i>Figura 2 Tipos de falla en estatores. Adaptado de (ABB Group, 2013)</i>	29
<i>Figura 3 Estadística de fallos de transformadores en EE. UU. entre 1983 y 1988 (Rodríguez D. L., 2012)</i>	36
<i>Figura 4 Modelo de un aislante sólido con falla (Turcios, 2011)</i>	15
<i>Figura 5 Circuito eléctrico equivalente para un aislante sólido con falla (Turcios, 2011)</i>	15
<i>Figura 6 Circuito eléctrico equivalente para un aislante sólido con falla (Turcios, 2011)</i>	16
<i>Figura 7 Descargas Parciales Internas y Externas (MW Megavattios., 2018)</i>	19
<i>Figura 8 Componentes fundamentales de un sistema de medición de Descargas Parciales. Adaptado de (Herrera, 2015)</i>	22
<i>Figura 9 Ejemplo de diagrama de fase resuelta. Tomadas del software PDView de IRIS Power</i>	24
<i>Figura 10 Ejemplo de gráfico de Análisis de Polaridad de Pulsos. Tomadas del software PDView de IRIS Power</i>	25
<i>Figura 11 Acopladores Capacitivos de Descargas Parciales para Máquinas Rotativas (ALTANOVA GROUP, Recuperado en 2021)</i>	30
<i>Figura 12 Acopladores de ranura de estator Iris Power (SSC) (Qualitrol Defining Reliability, 2018)</i>	30
<i>Figura 13 Circuito de prueba para medición sin toma capacitiva en transformadores de potencia (Gómez-Ramírez, 2018)</i>	34
<i>Figura 14 Circuito de calibración para medición de DP en transformadores de potencia con toma capacitiva (Gómez-Ramírez, 2018)</i>	35
<i>Figura 15 Circuito de calibración para medición de DP en transformadores de potencia sin toma capacitiva (Gómez-Ramírez, 2018)</i>	35
<i>Figura 16 Defecto en cable de potencia (J. Singsathien, 2017)</i>	36
<i>Figura 17 Campos de radiación electromagnética alrededor de fuente electromagnética radiante (Chalaki, 2020)</i>	37
<i>Figura 18 Ubicación de los condensadores por fase para separar descargas parciales del ruido eléctrico (IEEE, 2006)</i>	40
<i>Figura 19 Representación gráfica de la configuración de la central de generación N.1.</i>	46
<i>Figura 20 Equipo de monitoreo de descargas parciales GuardII+</i>	46
<i>Figura 21 Equipo medidor de aislamiento M4100</i>	47
<i>Figura 22 Equipo de localización acústica de descargas parciales PDL 650</i>	47
<i>Figura 23 Zonas de falla en Pentágono de Duval (Transequipos S.A., 2020)</i>	48
<i>Figura 24 Sensor de descargas parciales y su unidad de sincronización</i>	49
<i>Figura 25 ubicación del sensor de descargas parciales en el transformador de potencia</i>	55
<i>Figura 26 Diferencia de magnitud de las descargas parciales tomadas por el método electromagnético y los acopladores capacitivos</i>	76
<i>Figura 27 Pentágonos 1 y 2 - Cromatografía de gases en transformador de potencia</i>	103
<i>Figura 28 Ubicación de los sensores para detección de descargas parciales</i>	105
<i>Figura 29 Análisis de cromatografía de gases en transformadores de potencia de la C.H. N.1. por Pentágono de Duval</i>	106
<i>Figura 38 Tendencia de prueba tangente delta y TIP-UP generador U1</i>	112
<i>Figura 39 Tendencia de prueba tangente delta y TIP-UP generador U2</i>	114
<i>Figura 32 Instalación de acopladores capacitivos en generador de la central térmica N.1.</i>	119

Lista de Abreviaturas

ABREVIATURA	SIGNIFICADO
<i>V</i>	<i>Voltios</i>
<i>kV</i>	<i>Kilo Voltios</i>
<i>MW</i>	<i>Megavatios</i>
<i>kVA</i>	<i>Kilovatios</i>
<i>MVA</i>	<i>Mega voltio amperios</i>
<i>kPa</i>	<i>Kilo Pascales</i>
<i>mV</i>	<i>Milivoltios</i>
<i>PD/DP</i>	<i>Partial Discharges / Descargas parciales</i>
<i>rpm</i>	<i>Revoluciones por minuto</i>
<i>f.e.m.</i>	<i>Fuerza Electromotriz</i>
<i>A.C</i>	<i>Corriente Alterna</i>
<i>B-H</i>	<i>Densidad de Flujo Magnético – Fuerza de Campo Magnético</i>
<i>PVC</i>	<i>Policloruro de Vinilo</i>
<i>SF6</i>	<i>Hexafluoruro de Azufre</i>
<i>XLPE</i>	<i>Polietileno Reticulado</i>
<i>PILC</i>	<i>Plomo Aislado con Papel</i>
<i>HDPE</i>	<i>Polietileno de Alta Densidad</i>
<i>EPR</i>	<i>Etileno Propileno</i>
<i>DC</i>	<i>Corriente Directa</i>
<i>ELCID</i>	<i>Electromagnetic Core Imperfection Detection</i>
<i>Q_m</i>	<i>Magnitud pico de descargas parciales en mV medidos a una tasa de repetición de 10 pulsos por segundo</i>
<i>GIS</i>	<i>Gas Insulated Substations</i>

1. Introducción

El mantenimiento de los equipos es de vital importancia para conocer y garantizar la vida útil de los mismos, es por eso por lo que, se hace necesario definir rutinas de mantenimiento preventivo y predictivo que brinden la información suficiente para conocer los activos y las tendencias de su operación, más cuando estos activos son de alto costo para las empresas y tienen un retorno de inversión calculado a largo plazo. En la generación de energía eléctrica se cuenta con equipos de potencia de criticidad alta, los cuales deben brindar cierta confiabilidad que permita garantizar la atención de la demanda de energía siempre que sea solicitado, es por eso que activos como generadores eléctricos, transformadores de potencia y cables de potencia o también llamados activos críticos son sometidos de forma permanente a estudios y seguimientos que permitan conocer el estado actual y brindar proyecciones tanto económicas como de mantenimiento que deriven en la toma de decisiones acertadas sobre su funcionamiento y tiempos de reposición.

Para los activos críticos de generación las rutinas de mantenimiento predictivo se enfocan en hacer seguimiento al estado y comportamiento del aislamiento desde el momento de la adquisición del equipo (Juan Carlos Toro Londoño, 2005), pues este es el aspecto de mayor importancia para la predicción de su vida útil. Una de las rutinas de mantenimiento establecidas para definir la condición del aislamiento de los activos críticos mencionados son la medición de las descargas parciales, las que se pueden expresar como una ruptura eléctrica parcial en el aislamiento de dos conductores que se encuentran a

diferente potencial o una consecuencia de las concentraciones locales de tensión eléctrica en el aislamiento o en la superficie del aislamiento (TF, 2003).

Las descargas parciales ocurren bajo condiciones normales de operación (Juan Carlos Toro Londoño, 2005) pues solo se requiere de 5kV para que se empiecen a presentar este tipo de fenómenos. Si bien el estudio y diagnóstico de aislamiento por las medidas de las descargas parciales es netamente empírico, algunas empresas han logrado establecer límites de comportamiento de las descargas parciales que muestran la necesidad de realizar estudios mayores sobre el estado del aislamiento tanto en rangos de voltaje como en rangos de Coulomb y también indican los rangos en los que a pesar de presentar descargas parciales, estas no requieren de intervención del activo, por ejemplo, la empresa Iris Power quien en el documento titulado “Interpretation of PD Results – Electrical Rotating Machine Stator Windings” muestra que en los rangos de tensión entre 0 – 500mV las descargas parciales no representan peligro para el activo, mientras que las descargas parciales mayores a 500mV indican que es necesario analizar el estado del activo para verificar el estado de su aislamiento su vida útil (IRIS Power, 2013).

Existen diferentes tipos de descargas parciales las cuales están asociadas a los materiales de que están fabricados los aislamientos o las geometrías de las interfases (TF, 2003) por lo que cada equipo estudiado se debe analizar de forma independiente; además, ya que la presencia de descargas parciales acelera el proceso de degradación del aislamiento, se recomienda tener prácticas que permitan la detección oportuna de fallas evidenciables mediante las descargas parciales para el ahorro de dinero en mantenimiento y evitar paradas forzadas de máquina.

Considerando la anterior problemática, el propósito de esta tesis es desarrollar una metodología que permita la detección y caracterización de descargas parciales con el método electromagnético. Con esta se garantizarán: su monitoreo en línea, procedimientos no invasivos en los activos críticos, una fácil ejecución de la prueba y reducción de costos. Además, será accesible a cualquier centro de trabajo y equipo que requiera este tipo de inspección. Durante el desarrollo del documento se mostrará la metodología de investigación, el diseño de experimentos, el análisis de resultados y la comparación de la metodología sugerida en la tesis con metodologías existentes de detección de descargas parciales, esta información permitirá comprobar la veracidad de la información tomada con la metodología propuesta y la factibilidad para el uso de esta.

2. Descripción del Problema

Uno de los aspectos más importantes de los sistemas eléctricos de potencia es el aislamiento, ya que su estado es, en mayor parte, el que determina la vida útil residual de los equipos (Ulises Manassero A. Z., 2015). Dado lo anterior y siguiendo los estándares internacionales, a los activos como generadores eléctricos, transformadores de potencia y cables de potencia se le realizan una serie de pruebas que evalúan la condición del aislamiento, pues, para la segura operación de equipos que funcionan con altas tensiones eléctricas se debe de contar con adecuados sistemas de aislamiento eléctrico.

Una de las pruebas realizadas para determinar el estado del aislamiento de un equipo es la llamada prueba de Descargas Parciales, la cual como su nombre lo indica es la medición de los niveles de descargas eléctricas que aún no son completas, es decir, son pequeños arcos eléctricos sin la suficiente energía como para generar una falla franca. Las descargas parciales son un fenómeno que se presentan en activos de potencia que operan con tensiones iguales o superiores a los 5kV (IEC (International Electrotechnical Commission), 2016), este fenómeno puede indicar el estado de un aislamiento eléctrico y de cómo se puede ir degradando este en el tiempo.

Las descargas parciales se presentan por malos procesos en la manufacturación de los aislamientos eléctricos que generan cavidades o burbujas de aire (voids) en el aislamiento de equipos tales como generadores eléctricos, transformadores de potencia y cables de potencia. Estas descargas con el tiempo van degradando o “envejeciendo” los aislamientos hasta que llega el momento en el que la descarga parcial da paso a una falla por arco

eléctrico que hace que el equipo salga de servicio intempestivamente, lo cual conlleva consigo los altos costos por reparaciones e indisponibilidad del activo. Por motivos como el mencionado anteriormente, se establecen buenas prácticas de ingeniería como es medir desde el momento de la puesta en servicio los niveles de descargas parciales con que opera la máquina, esta medición se debe repetir periódicamente para intentar establecer si los niveles de descargas parciales medidos han variado con el tiempo comparándose con los valores iniciales y basándose en niveles señalados por estándares internacionales, también se puede saber qué tanto ha sido afectado el aislamiento por motivo de las descargas parciales para poder tomar decisiones acertadas en el corto, mediano y largo plazo. La detección oportuna de la presencia de descargas parciales permite prepararse para una posible intervención o acción preventiva del equipo, de ahí la necesidad de contar con técnicas precisas, de fácil implementación, no invasivas y que no requieran sacar los activos de servicio. Los equipos para la detección de descargas parciales usados en la actualidad son de alto costo, requieren la interpretación de resultados por expertos, instalación de elementos que alteran el diseño de los equipos exponiendo el aislamiento original y creando un posible punto de falla a futuro. La técnica propuesta de detección de descargas parciales por método electromagnético presenta respuestas respecto a los inconvenientes descritos, pues el equipo usado para la detección electromagnética es de un costo considerablemente inferior a los equipos mencionados anteriormente, es un procedimiento no invasivo, de fácil manejo y transporte lo que permite la evaluación de los elementos deseados y la interpretación de resultados para la detección de descargas se convertiría en una tarea más sencilla.

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Desarrollar una metodología de medición de descargas parciales en generadores eléctricos, transformadores de potencia y cables de potencia más económico y simple de implementar que los métodos usados actualmente, a partir del método electromagnético.

3.2. Objetivos Específicos

1. Establecer la ubicación del sensor que permita detectar con mayor precisión el origen de las descargas parciales en generadores eléctricos, transformadores de potencia y cables de potencia.
2. Relacionar las técnicas actuales de detección de descargas parciales en generadores eléctricos, transformadores de potencia y cables de potencia con la técnica de detección electromagnética.
3. Definir un protocolo para la medición de descargas parciales replicable a los activos críticos de generación a partir de la respuesta electromagnética.

4. Marco Teórico y Estado del Arte

4.1. Mantenimiento de Generadores Eléctricos

El mantenimiento debe enfocarse en la disponibilidad de los equipos (Díaz R. O., 2017), por lo tanto, se efectúan investigaciones y equipos de medición que permitan prevenir fallas o reducir el impacto que estas provocan en los activos. Lo anterior hace alusión al mantenimiento predictivo, el cual, a diferencia del mantenimiento correctivo y preventivo, enfoca los recursos en la determinación del estado actual del equipo y la proyección a futuro.

Con la implementación del mantenimiento predictivo se pueden obtener las siguientes ventajas:

- Incremento de la seguridad de la central: el monitoreo de los generadores, pueden detectar potenciales fallas que pueden llegar a poner en peligro al personal de la central.
- Reducción de los costos de mantenimiento: al hacer seguimiento apropiado a la condición real del generador, puede reducirse el inventario de repuestos y con ello una reducción de costos.
- Vida útil de la máquina: un monitoreo continuo óptimo de la máquina puede garantizar la operación hasta que la condición indique la finalización de la vida útil.
- Mayor disponibilidad del generador: el mantenimiento predictivo óptimo permite reducir las paradas programadas a aquellas que sean estrictamente necesarias.

4.1.1. Plan de mantenimiento predictivo de generadores.

Desde el punto de vista eléctrico, el análisis del mantenimiento predictivo de los generadores se enfoca en el estado del aislamiento, sin embargo, es necesario tener presente ciertas variables que en conjunto permiten tener más información del estado general actual de la máquina y la garantía para la continuidad en su tarea:

- Temperatura de operación
- Voltaje de operación
- Corrientes de operación
- Salidas forzadas de la máquina
- Velocidades de operación
- Inspección visual
- Generación/absorción de potencia reactiva
- Edad del generador

Complementando la información anterior, se realizan pruebas eléctricas predictivas acordes al plan de mantenimiento que se tenga en el centro de trabajo con el fin de tomar información de los parámetros de funcionamiento de la máquina. Las pruebas eléctricas rutinarias realizadas a los generadores estudiados en este documento son:

- Factor de Potencia o Tangente delta: permite identificar defectos que afectan la condición del aislamiento de la máquina (IEEE Power Engineering Society, 2000).

- Capacitancia: permite identificar defectos que afectan la condición del aislamiento de la máquina (IEEE Power Engineering Society, 2000).
- Caída de Tensión AC en Rotor Completo: brinda parámetros de condición del rotor (Omicron Energy, 2020).
- Resistencia Óhmica de Devanados: permite identificar existencia en problemas de conexión o daños en el cobre de los devanados.
- Resistencia de Aislamiento: permite estimar el grado de humedad, la contaminación y por lo tanto la integridad del aislamiento de los devanados (IEEE Power and Energy Society, 2013).
- Índice de Polarización: detecta posibles fugas de corriente e indica de forma general la condición del aislamiento en el estator (IEEE Power and Energy Society, 2013).
- Relación de Absorción Dieléctrica: detecta posibles fugas de corriente e indica de forma general la condición del aislamiento en el rotor (Omicron Energy, 2020).

Además del resultado de las pruebas ejecutadas, el seguimiento de las tendencias de los resultados de estas brinda información para identificar el envejecimiento del aislamiento y cambios críticos que requieren intervenciones o inspecciones adicionales.

Otras pruebas que se suelen realizar a los generadores son:

- Descargas Parciales: permite una clara detección de los puntos débiles del sistema de aislamiento (IEEE Standards, 2014).
- Descarga Corona: tipo de descarga parcial que se produce alrededor de un conductor cuando la tensión alcanza un valor que ioniza el aire circundante (Real

Academia de Ingeniería). Esta prueba permite evidenciar la degradación del aislamiento mediante polvillo blanco por la generación de ozono creado por la disrupción eléctrica en el aire y evidenciado en las cabezas de bobinas del estator

- ELCID: permite establecer un índice de condición del núcleo del estator, verificando la correcta aislación entre las laminaciones de este (INDUCOR INGENIERÍA S.A., Recuperado en 2021).
- Ring Test: permite determinar cortos circuitos entre láminas del núcleo del estator (Omicron Energy, 2020).
- Caída de Tensión AC por polos: permite detectar fallas entre espiras (Omicron Energy, 2020).
- Caída de Tensión DC por polos: permite detectar fallas entre espiras (Omicron Energy, 2020).
- Corrientes de eje: determina el estado del aislamiento de los cojinetes en una máquina y detectar la presencia de potencial en el eje (Omicron Energy, 2020).

4.1.2. Fallos en Generadores

El diseño de los generadores eléctricos es desarrollado con alta resistencia a esfuerzos eléctricos, mecánicos, térmicos y ambientales, por lo cual es común que estas máquinas tengan una vida útil de al menos treinta años en trabajo continuo. Aunque esto no exime al generador de sufrir fallas que se pueden prevenir conociendo los mecanismos de deterioro y

efectuando planes de mantenimiento que permitan implementar acciones preventivas que eviten sus salidas por falla (Arturo García. Oscar Reyes, 1998).

Algunos de los modos de falla en los generadores son:

- Desajuste de las bobinas del estator en las ranuras.
- Contaminación del generador.
- Propagación de fracturas en las cuñas del rotor
- Desconexión o falla de las resistencias equipotenciales.
- Defectos en las conexiones o en el aislamiento de los anillos de cabezales.
- Pérdida de sujeción mecánica del estator, aflojamiento del núcleo.
- Fallas de los sistemas de enfriamiento del generador.
- Daños por condiciones anormales de operación.

El estudio de estadísticas de falla para máquinas rotativas con potencia nominal mayor a 20MW publicado por IEEE TRANSACTION ON INDUSTRY APPLICATIONS vol 35 en julio de 1999 y presentado por ABB muestra que en este tipo de generadores la mayor tasa de fallas se da en el devanado del estator, seguido por los cojinetes y el 21% de las fallas están asociadas al rotor, factores externos y en menor ocurrencia, los ejes de acoplamiento:

DISTRIBUCIÓN DE FALLAS EN GENERADORES DESDE 20MW

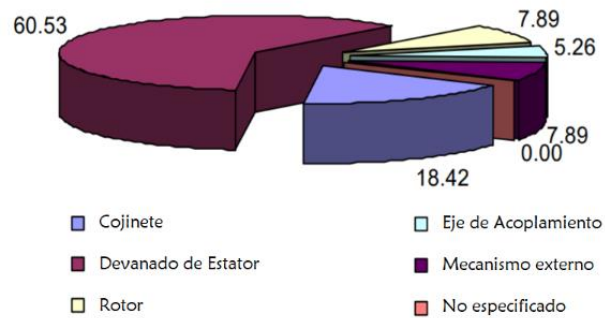


Figura 1 Distribución de fallas en generadores a partir de 20MW adaptado de (ABB Group, 2013)

4.1.2.1. Fallas en el sistema de aislamiento del rotor.

La temperatura de los devanados desgasta los materiales aislantes con el paso del tiempo y su velocidad está ligada a las propiedades térmicas de los materiales y las temperaturas a las que son sometidos. Las causas del envejecimiento térmico en los rotores de polos salientes pueden ser variadas entre ellas se encuentran (Michael Steven Castillo Monsalve, 2016):

- Los ciclos de arranque y parada que se presenta en los generadores.
- La sobrecarga o altas temperaturas del aire que llevan a las temperaturas de funcionamiento muy por encima de los valores de diseño.
- Refrigeración inadecuada.
- El uso de materiales que tienen propiedades térmicas inadecuadas y por consiguiente una tasa de deterioro a un ritmo inaceptable, cuando se opera dentro de los límites de temperatura de diseño.
- Sobreexcitación de los devanados del rotor durante largos periodos de tiempo.

- Corrientes de secuencia negativa en bobinas del estator debido a desequilibrio de tensión del sistema. Lo que conduce a corrientes circulantes en el rotor.

4.1.2.2. Fallas en el sistema de aislamiento del estator.

El tipo del sistema de aislamiento del generador y su tipo de enfriamiento afectan en forma diferente la degradación del aislamiento del generador. Todos los materiales usados tienen temperatura límite de funcionamiento (Michael Steven Castillo Monsalve, 2016).

Las estadísticas de fallas en los estatores son mostradas por ABB en el análisis donde se indica que por partes iguales la edad y la humedad son los mayores causantes de fallas en los estatores de generadores, seguidos por otros tipos de fallas, altas vibraciones, alta temperatura, mala ventilación, sobrecargas, baja lubricación, tensión anormal y por último la frecuencia anormal.

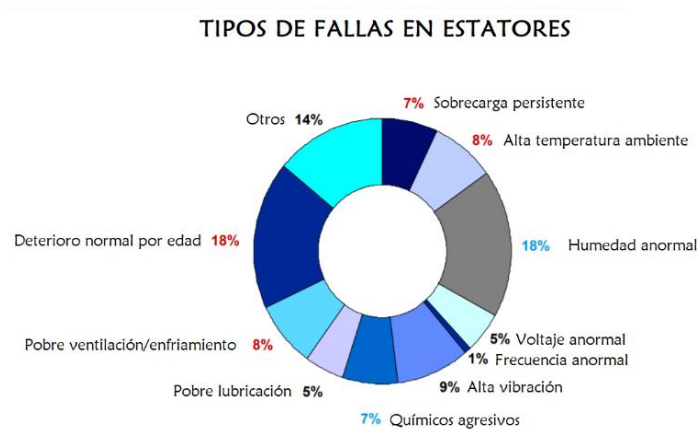


Figura 2 Tipos de falla en estatores. Adaptado de (ABB Group, 2013)

4.1.2.3. Fallas eléctricas en el estator de máquinas síncronas.

El aumento de la corriente (corto circuitos) en la máquina produce vibraciones que afectan los acoplamientos llegando a desplazar la ubicación del devanado en las ranuras. Las consecuencias de los cortocircuitos dependen de la naturaleza y la duración de estos, sus orígenes pueden ser (Michael Steven Castillo Monsalve, 2016):

- Por deterioro o perforación del aislamiento del devanado.
- Por problemas mecánicos.
- Por sobretensiones.
- Por factores humanos.

4.1.2.4. Descargas parciales en el devanado del estator.

Las descargas parciales son descargas eléctricas que cortocircuitan solo parcialmente el material aislante que se encuentra entre dos puntos a diferente potencial, se manifiestan como pulsos de corrientes en un circuito externo (Michael Steven Castillo Monsalve, 2016). Dado que la mayoría de las fallas en los generadores son eléctricas (Michael Steven Castillo Monsalve, 2016), se ha demostrado la importancia del seguimiento del comportamiento de las descargas.

4.1.3. Factores que definen la vida útil de los generadores

La vida útil de las máquinas eléctricas está determinada por los materiales aislantes utilizados, estos materiales son afectados por muchos factores como son (Turizo, 2017):

- Estrés térmico: debido a la operación a temperaturas más altas que el sistema de aislamiento puede soportar de manera segura (con un aumento de 8 a 10 grados en la temperatura los materiales aislantes reducen su vida a la mitad).
- Estrés eléctrico: a corto o largo plazo más alto que el sistema de aislamiento pueda soportar de manera segura.
- Estrés mecánico: por movimiento o vibración debido a condiciones anormales de operación.
- Contaminación del estator y el aislamiento por suciedad o humedad.
- Diseño inadecuado, procesos de control de calidad de fabricación o aplicación de material.

4.1.3.1. Relación entre vida útil de los generadores y el envejecimiento de su aislamiento.

En términos de temperatura de trabajo, la vida útil del aislamiento se puede asociar al envejecimiento gradual del aislante que se irá resecaando, perdiendo poco a poco el poder aislante hasta que no soporte más tensión aplicada y se produzca el corto circuito (Robles, 2012).

4.2. Mantenimiento de Transformadores de Potencia

Con el fin de garantizar la disponibilidad de los transformadores en el proceso de generación, se deben realizar estudios de la operación y análisis de su estado actual por medio de rutinas de mantenimiento preventivo y predictivo.

4.2.1. Plan de mantenimiento predictivo de transformadores de potencia

Para obtener todas las variables de operación que aporten información que permita identificar el estado actual del transformador, se hace necesario conocer:

- Porcentaje de carga.
- Temperatura máxima permitida.
- Estado actual del aislamiento externo.
- Estado del papel de aislamiento.
- Estado actual del aceite.
- Porcentajes de humedad asociado a los transformadores.
- Edad del transformador.
- Estado del disecador de sílica.

Adicional a la información anterior, se realizan pruebas eléctricas predictivas de acuerdo con el plan de mantenimiento que se tenga en la central con el fin de tomar información de los parámetros de funcionamiento de la máquina. Las pruebas eléctricas y químicas realizadas a los transformadores de potencia estudiados en este documento son:

Eléctricas:

- Resistencia de Aislamiento: permite estimar el grado de humedad contenido en el papel aislante de los devanados.
- Índice de Polarización: relación entre la resistencia de aislamiento a los diez minutos y la resistencia de aislamiento a un minuto.
- Análisis de Respuesta a Barrido de Frecuencia – SFRA: detecta fallos en los devanados o en el núcleo, obteniendo una curva de respuesta característica para cada paso de frecuencia y para cada bobina.
- Espectroscopía Dieléctrica en el Dominio de la Frecuencia – DFR: permite medir las propiedades dieléctricas de un transformador en un rango amplio de frecuencias.
- Factor de Potencia del Aislamiento: muestra el grado de humedad y/o contaminación del aislamiento.
- Capacitancia del Aislamiento: muestra las variaciones en la disposición física de los devanados.
- Relación de transformación: se verifica la relación matemática entre la cantidad de espiras en el devanado primario y el devanado secundario.
- Impedancia de Cortocircuito y Reactancia de Fugas: permite identificar daños físicos en el devanado del transformador.
- Desmagnetización del núcleo: evita que el núcleo magnetizado cause altas corrientes de entrada cuando el transformador se está energizando.
- Descargas Parciales: permite una clara detección de los puntos débiles del sistema de aislamiento.

Químicas:

- Rigidez Dieléctrica: permite identificar la presencia de agentes contaminantes que pueden ser representativos.
- Número de neutralización (Acidez): mide la acidez como consecuencia de la oxidación del aceite.
- Tensión Interfacial: permite detectar la presencia de productos de oxidación no detectables con la prueba de acidez.
- Relación de Análisis entre Tensión Interfacial y Acidez: permite calcular el Índice de Calidad (IC) del aceite.
- Factor de potencia o tangente delta: detecta contaminación en el aceite aislante.
- Contenido de Humedad: muestra la cantidad de agua presente en el aceite.
- Color: en conjunto con las otras pruebas, permite determinar el grado de deterioro del aceite.
- Cromatografía de Gases Disueltos en el Aceite: permite evaluar el estado del transformador en lo que se refiere a producción de arcos, descargas parciales, puntos calientes y deterioro del papel aislante. Se analizan los siguientes gases combustibles:

<i>GAS COMBUSTIBLE</i>	<i>SÍMBOLO</i>
<i>Hidrógeno</i>	H ₂
<i>Nitrógeno</i>	N ₂
<i>Oxígeno</i>	O ₂
<i>Monóxido de Carbono</i>	CO
<i>Dióxido de Carbono</i>	CO ₂
<i>Metano</i>	CH ₄
<i>Etano</i>	C ₂ H ₆
<i>Etileno</i>	C ₂ H ₄
<i>Acetileno</i>	C ₂ H ₂
<i>Otros</i>	101

Tabla 1 Gases combustibles

4.2.2. Fallas en transformadores de potencia

La recomendación técnica IEEE C37.91-2000 muestra el estudio de 389 transformadores de potencia realizado en Estados Unidos en los años 80's que brindó la información suficiente para clasificar los modos de fallas de los transformadores de potencia (Rodríguez D. L., 2012).

<i>ELEMENTO</i>	<i>NÚMERO DE FALLAS</i>
<i>Bobinados</i>	144
<i>Cambiadores de Tomas</i>	85
<i>Terminales</i>	42
<i>Conexiones</i>	13
<i>Circuitos</i>	4
<i>Magnéticos</i>	
<i>Otros</i>	101
<i>Total</i>	389

Tabla 2 Estadística de fallos de transformadores en EE. UU. entre 1983 y 1988 (Rodríguez D. L., 2012)

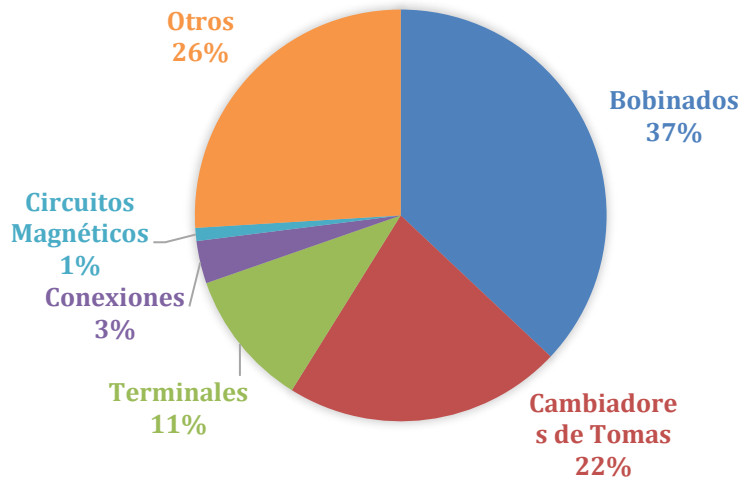


Figura 3 Estadística de fallos de transformadores en EE. UU. entre 1983 y 1988 (Rodríguez D. L., 2012)

De lo anterior, se puede inferir que los fallos encontrados en los transformadores estudiados se pueden tratar como fallos exteriores y fallos interiores.

Las Fallos externos: Son los que se producen fuera de la máquina, y pueden ser:

- Sobrecargas: La sobrecarga se produce cuando la condición de equilibrio térmico en la máquina se establece a una temperatura tal que provoca la degradación de los dieléctricos que aíslan los conductores o las chapas que forman el núcleo magnético del transformador.
- Cortocircuitos: Cuando se produce un cortocircuito, además del efecto térmico que produce dicha intensidad en los devanados, aparece un elevado esfuerzo electrodinámico entre conductores que puede producir daños mecánicos en la máquina.

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

- **Sobretensiones/Reducciones de frecuencia:** Cuando el valor del flujo magnético alcanza la zona de saturación en la curva B-H del material utilizado para la construcción del circuito magnético, el consumo de intensidad aumenta, incrementando las pérdidas del transformador.
- **Condiciones ambientales adversas:** El incremento de la temperatura ambiente o por un fallo en el sistema de refrigeración reduce la vida útil de un dieléctrico.
- **Ciclos de trabajo:** En determinadas condiciones de explotación, como emergencias o condiciones ambientales muy adversas, es necesario que el transformador opere durante un determinado periodo de tiempo por encima de sus características nominales.

Los fallos internos son producidos por alguno de los elementos de los que se compone el transformador.

- **Cortocircuitos entre espiras en la misma fase:** el fallo involucra únicamente unas pocas espiras.
- **Cortocircuitos entre espiras en fases distintas:** Son fallos menos frecuentes, pero más dañinos y problemáticos. Son fáciles de detectar.
- **Cortocircuitos monofásicos a tierra:** Los defectos de aislamiento entre fase y carcasa (puesta a tierra) debido al deterioro de los dieléctricos provoca la circulación de una intensidad de defecto hacia tierra.

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

- Defectos en el circuito magnético: Los defectos en el circuito magnético suelen producirse como resultado del deterioro del aislamiento y que es producido por un incremento excesivo de temperatura.
- Defectos en el conexionado/aisladores: Este tipo de defectos son producidos por conexiones en el aislador de entrada salida del transformador.
- Defectos en el sistema de refrigeración: Los defectos en el sistema de refrigeración comprenden todos aquellos fallos que afectan a la adecuada refrigeración del equipo.

Otro tipo de fallas se puede caracterizar como:

- Falla en el cambiador de tomas: que puede ser generada por *run-through*, falta de mantenimiento. Condensadores viejos y desgastados en el motor. Un uso regular que desgasta el resorte y lo hace más frágil hasta el punto de romperse y descompostura del motor en el cambiador debido a un voltaje excesivo (TECSA, 2018).
- Falla en el núcleo: generada por el sobrecalentamiento, daño en el aceite del transformador (TECSA, 2018).
- Falla en el tanque: ocurre cuando existe algún tipo de estrés ambiental, humedad alta o radiación solar (TECSA, 2018).
- Falla en el sistema de protección: sus componentes son el relé de Buchholz, la válvula de alivio de presión, protección contra sobrecargas y el relé de presión súbita (TECSA, 2018).

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

- **Falla del bushing:** ocurre debido a aflojamiento de los conductores causado por vibraciones en el transformador, una súbita subida de voltaje, la cual genera una descarga parcial que daña el bushing, rotura en los sellos del bushing que se originan por la presencia de agua, desgaste o pérdidas dieléctricas excesivas.

4.2.3. Factores que definen la vida útil de los transformadores de potencia.

El análisis de vida útil de los transformadores está relacionado con el proceso de envejecimiento, sin embargo, de acuerdo con diseño y propósito de la máquina también debe hacerse su evaluación. Por ello, la evaluación de la condición del transformador, mediante métodos de supervisión en y fuera de línea, se ha vuelto una estrategia clave para conocer el estado del equipo.

En el caso de los transformadores de potencia sumergidos en aceite, que son los analizados en este documento, se considera que su vida útil está ligada al papel. La degradación del aislamiento papel-aceite es dependiente de las condiciones térmicas, eléctricas, de la cantidad de agua y oxígeno, entre otros. Dos factores importantes en la reducción de la vida útil son (Promelsa, 2011):

- **Temperatura:** las altas temperaturas (por encima de los parámetros de diseño) degradan aislamientos sólidos y líquidos del transformador.

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

- Humedad: el ingreso de la humedad del ambiente al interior del transformador degrada los aislamientos sólidos y líquidos de este.

Una de las metodologías más confiables para estimar la vida útil residual de los transformadores de potencia, es por medio del grado de polimerización, el cual consiste en cuantificar el grado de polimerización de acuerdo con la degradación térmica del papel aislante producido por la ruptura de las cadenas moleculares de la celulosa. Diversos estudios han determinado que el grado de polimerización está directamente relacionado con el envejecimiento del papel aislante en transformadores en servicio.

4.2.3.1. Relación entre vida útil de los transformadores de potencia y el envejecimiento de su aislamiento

La “Vida Útil del Aislante” es: el tiempo total entre el estado inicial que se considera que el aislante es nuevo, y el final en el que la probabilidad de falla (por esfuerzo dieléctrico y/o electromecánico), en servicio normal, es elevada, algunos estudios y documentos técnicos indican que es posible obtener unas 180mil horas de operación durante la vida útil del papel aislante. Como se mencionó anteriormente, el estado del papel aislante del transformador permite obtener información importante para monitorear la vida útil del transformador. La degradación del aislamiento se puede producir por altas temperaturas, humedad, sobrecalentamientos o fallas internas en el transformador.

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

Las recomendaciones técnicas IRAM e IEEE (Ulises Manassero A. Z., 2015) han mostrado métodos para la evaluación del envejecimiento del transformador de potencia, uno de ellos es el modelo de Arrhenius-Dakin (G. Crespo-Sánchez, 2020), el cual lo evalúa de acuerdo con la fatiga térmica a la que pueden ser sometida los transformadores.

$$Vida\ Remanente = Ae^{B/T} \qquad \text{Ec. 4.3}$$

Donde:

A: Vida inicial [años]

B: Constante

T: Temperatura [°K]

La anterior ecuación expresa la dependencia del envejecimiento del aislamiento por la temperatura a la que está sometido el transformador, lo que permite definir la vida útil de este en función del tiempo (G. Crespo-Sánchez, 2020).

Es posible asociar el envejecimiento del aislamiento con la vida útil, pues el primero es causado por la alteración en los polímeros del papel, es decir, rupturas entre las cadenas de celulosa, por lo tanto, hay disminución del grado de polimerización y mientras más bajo sea el grado de polimerización, más baja es la vida útil residual del transformador, así como se observa en la siguiente tabla (Gustavo Jiménez-Araya, 2016):

<i>GRADO DE POLIMERIZACIÓN</i>	<i>ESTADO DEL PAPEL</i>
<i>>1000</i>	Prácticamente sin envejecer
<i>999 – 601</i>	Levemente envejecido
<i>600 – 401</i>	Envejecimiento medio
<i>400 – 251</i>	Acercándose a un envejecimiento crítico
<i>250 – 151</i>	Envejecimiento crítico
<i><151</i>	Extremadamente envejecido

Tabla 3 Valoración del estado del papel de acuerdo con el grado de polimerización (Gustavo Jiménez-Araya, 2016)

4.3. Mantenimiento de Cables de Potencia

Las acciones de mantenimiento de los cables de potencia están destinadas a mantener la función para la cual el equipo fue diseñado, además, un buen plan de mantenimiento preventivo y predictivo permitirá (Herculano Martínez & Maza Sánchez, Mexico):

- Evitar falla.
- Evitar daños al medio ambiente.
- Extender la vida útil de los cables.
- Evitar accidentes.
- Evitar pérdidas de producción.
- Minimizar el costo público.

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

Es importante hacer seguimiento del estado de los cables de potencia a partir de su modo de operación, parámetros de diseño e inspecciones visuales. Algunas actividades de mantenimiento predictivo que son tenidas en cuenta para el diagnóstico del estado actual de los cables de potencia se mencionan a continuación:

- Factor de Potencia o Tangente delta (δ) y Capacitancia: permite evaluar la humedad y detectar el deterioro en el aislamiento o puntos débiles (Omicron, Recuperado en 2021).
- Descargas Parciales: las descargas parciales son roturas dieléctricas locales de una pequeña parte del aislamiento eléctrico que puede generar daños a la capa semiconductora de los cables, empalmes y terminales (Omicron, Recuperado en 2021).
- Termografía: registra la intensidad de la radiación en la zona infrarroja del espectro electromagnético y la convierte en una imagen visible, lo que permite verificar el estado de los elementos analizados de acuerdo con sus diferencias de temperatura o a su temperatura normal de operación (FLIR, Recuperado en 2021).

4.3.1. Fallas en cables de potencia

Una tarea crítica dentro del mantenimiento es la detección rápida y certera de fallas en los cables de potencia. Las fallas en los cables se producen cuando el estrés térmico local es mayor que la rigidez dieléctrica local del material aislante ya sea en el interior del mismo cable o en sus terminales y empalmes (García Peñaloza, 2015). Los tipos de falla más comunes en los cables de potencia son:

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

- Daños mecánicos al cable o a la cubierta derivados de falta de cuidado en una excavación.
- Daños a la pantalla metálica por corrosión o por vibración
- Ingreso de agua a los empalmes.
- Esfuerzo mecánico excesivo causado por temblores, asentamientos del suelo, ciclos térmicos, entre otros.
- Envejecimiento térmico del aislamiento.
- Arborescencias eléctricas: son finos canales de erosión que se propagan a través del material desde un punto de inicio.
- Arborescencias de agua: son comunes en los aislamientos tipo XLPE y son generados por pequeñas concentraciones de humedad y crecen por el estrés eléctrico operativo.

4.3.2. Factores que definen la vida útil de los cables de potencia

Un cable puede tener una vida útil de alrededor de 30 años (L. Agudelo-Vélez, Recuperado en 2021), y esta está directamente relacionada con su aislamiento, y este a su vez está relacionada con la temperatura, es decir, al operar sobre la temperatura máxima de diseño se reduce la vida útil.

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

Las sobrecargas y los cortocircuitos pueden llegar a hacer perder el 10% de la vida útil de los cables de potencia. Rifalddi y Sibabonian (Sirabonian, 2011) explican este fenómeno durante estados transitorios y suponiendo que el calor del efecto Joule es acumulado en el cable, con la siguiente expresión:

$$\frac{\rho}{\pi * r^2} * I^2 = h * 2\pi r(\theta - \theta_{amb}) + \pi r^2 c \frac{d\theta}{dt} \quad \text{Ec. 4.4}$$

Donde:

ρ : Resistividad del conductor

r : Radio del conductor

I : Corriente a través del conductor

c : Acumulación de calor en el conductor

θ_{amb} : Temperatura ambiente

θ : Temperatura del conductor

Que al ser aplicada subdividiendo el tiempo en intervalos, puede determinarse la pérdida de vida útil correspondiente a un ciclo determinado de sobre carga.

4.3.2.1. Relación entre la vida útil de los cables de potencia y el envejecimiento de su aislamiento

La vida útil del cable es directamente proporcional a la conservación del aislamiento del cable y cuando este último es sometido a ciertos factores que aceleran su envejecimiento, se reduce la vida útil del cable de potencia. El envejecimiento del aislamiento de los cables de potencia está dado por factores como (L. Agudelo-Vélez, Recuperado en 2021):

- Estrés Térmico: altas Corrientes a través del conductor por condiciones operativas y ambientales.
- Estrés eléctrico: producido comúnmente por defectos de fabricación como por ejemplo contaminantes, cavidades en el aislamiento, protuberancias, mala instalación de chaquetas, entre otras.
- Arborescencias de agua: cavidades microscópicas dentro del aislamiento producidas por humedad en el ambiente, contaminación e impurezas
- Químicos: agentes químicos como hidrocarburos, aceites, fertilizantes e incluso agua pueden causar deformaciones o protuberancias en el aislamiento y generan estrés eléctrico.
- Corrosión de la Pantalla Metálica: producido por el ingreso de humedad a través de la chaqueta del cable de potencia. Estrés Eléctrico en Terminales: dado generalmente por rocesos inadecuados de fabricación en los que se permite el ingreso de humedad y/o contaminantes.

4.4. Descargas Parciales

Las descargas parciales, conocidas también por sus siglas en inglés como PD (Partial Discharges), son un fenómeno eléctrico en el cual se presenta cortocircuito del aislamiento entre conductores y que no puede ser adyacente a un conductor (CENELEC, 2000), este fenómeno recibe su nombre ya que no hay una ruptura total del aislamiento y este puede seguir cumpliendo su función (Turcios, 2011), sin embargo, las afectaciones propias de la operación y exposiciones a diferentes tipos de estrés a las que está sometido el aislamiento, pueden convertir las descargas parciales en descargas totales. También, la degradación natural del aislamiento en un activo puede dar origen a pequeñas cavidades en el aislamiento, estas cavidades logran desarrollar una diferencia de potencial en donde el campo eléctrico excede la rigidez dieléctrica del sistema de aislamiento, que como consecuencia darán origen a una descarga parcial, como lo menciona Aparicio (Aparicio, 2015).

M. Wang indica que el estudio de las descargas parciales brinda herramientas para conocer el comportamiento de equipos como generadores, transformadores y cables de potencia y predecir la vida útil estos, ya que el aislamiento es su principal componente, por lo cual se puede decir que del comportamiento de las descargas parciales se definen en gran medida la salud dieléctrica del aislamiento (M. Wang, A. J., 2002). El conocimiento del comportamiento de las descargas parciales en los diferentes tipos de aislamiento, brinda herramientas para identificar los niveles de estrés a los que puede ser sometido un activo (Shugg, Handbook of electrical and electronic insulating materials. IEEE Press., 1995). Dado lo anterior, muchas empresas se dedican a estudiar las descargas de sus activos por medio de monitoreo continuo, desencadenando planes de acción

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

a seguir, con el fin de disminuir los niveles de descargas parciales presentes en sus activos y ampliar la vida útil residual del equipo intervenido (Oscar Núñez-Mata, 2018).

Turcios en su tesis menciona los efectos físicos que se pueden generar en el aislamiento al estar sometido a descargas parciales (Turcios, 2011):

- Transitorio brusco de corriente (emisión conducida).
- Emisión electromagnética (emisión radiada).
- Ruido normal y ultrasonidos (emisión acústica).
- Aumento de temperatura debido a pérdidas.
- Medida de las mismas pérdidas ($\tan \delta$).
- Emisión ultravioleta (emisión luminosa).
- Emisión de ozono (cambio químico).

4.4.1. Generación de descargas parciales

En los espacios contenidos de cualquier material ionizable, puede moverse un electrón libre o un ion negativo, adquiriendo energía dinámica que hace que al electrón o ion colisionarse con una molécula neutra, libere un electrón de esta por el impacto. Al repetirse continuamente esta acción, se liberan más electrones, produciendo así un efecto avalancha. (Turcios, 2011).

El movimiento de electrones negativos en las direcciones del electrodo positivo producen campo eléctrico en el gas ionizable. El movimiento de los iones es dirigido por la fuerza que ejerce el campo eléctrico entre las cargas libres y la masa en cada electrón negativo.

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

Las moléculas que pierden un electrón continúan siendo positivas y se mueven más lentamente hacia el lado negativo del electrodo, y esta nube de iones positivos representa una carga de espacios que reduce la rigidez dieléctrica de los electrones liberados por las colisiones, lo que ocasiona, entre otros efectos, la desaceleración del proceso de ionización y cuando la intensidad del campo alcanza un valor menor al valor en el que empezó la ionización, no se generan más electrones por avalancha.

Cuando la carga de espacio desaparece, la intensidad del campo eléctrico en la región aumenta y cuando este valor alcance el valor al que se comenzó la ionización, se repite el proceso de avalancha.

Teniendo en cuenta lo anterior, las descargas parciales son generadas a partir de la ionización producida por el gas concentrado en cavidades del aislamiento, esta concentración viene dada por la presencia de campo eléctrico causado por la menor constante dieléctrica del medio gaseoso respecto del medio aislante (Turcios, 2011).

4.4.1. Circuito Equivalente de una Falla:

Si se tiene un aislante sólido con una falla, como el mostrado en la figura 4 en donde a representa la capacidad del aislante sin falla, b representa la capacidad en serie con la cavidad y c es la capacidad equivalente de la cavidad.

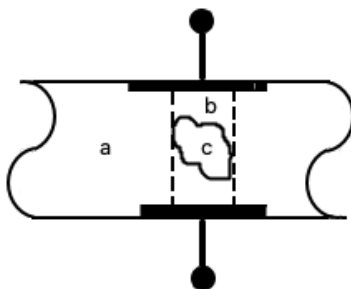


Figura 4 Modelo de un aislante sólido con falla (Turcios, 2011)

Lo anterior puede representarse por medio de un circuito equivalente, como el de la figura 5:

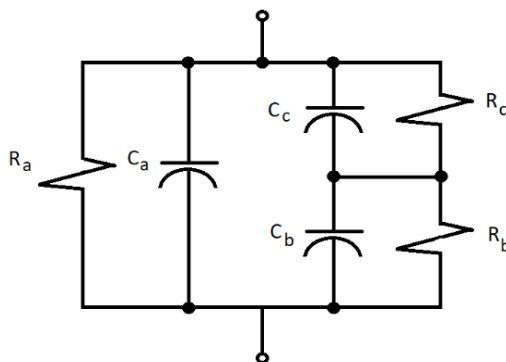


Figura 5 Circuito eléctrico equivalente para un aislante sólido con falla (Turcios, 2011)

Donde:

R_a y C_a representan la resistencia y capacitancia del aislante restante

R_b y C_b representan la resistencia. Capacitancia del aislante en serie con la cavidad

R_c y C_c representan la resistencia y la capacitancia de la cavidad

Como las resistencias son mucho más grandes comparadas con las reactancias capacitivas, se puede simplificar el circuito como se muestra en la figura 6:

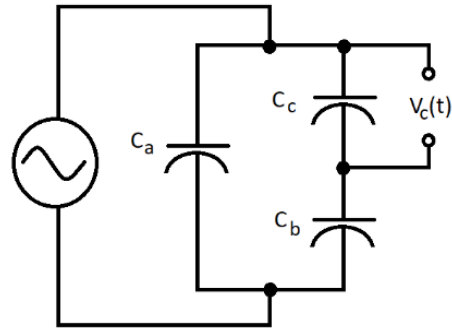


Figura 6 Circuito eléctrico equivalente para un aislante sólido con falla (Turcios, 2011)

Aplicando una tensión alterna al aislante, como la que se muestra a continuación:

$$v_c t = v_m * \text{sen} \omega t \quad \text{Ec. 4.5}$$

Usando el método de divisor de tensión en capacitores se puede obtener la diferencia de potencial de los bornes de la cavidad con la ecuación:

$$v_c t = \frac{C_b}{C_b + C_c} v_m * \text{sen} \omega t \quad \text{Ec. 4.6}$$

4.4.1.1. Circuito Equivalente de una Descarga Parcial

Si se tiene una descarga parcial en vacío, se puede mostrar el circuito equivalente como un capacitor compuesto de un material dieléctrico sólido o líquido entre dos electrodos A y B, y una cavidad de gas, la cual representa una imperfección en el aislante como un pequeño hueco,

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

rupturas, delaminación o contaminación. La distribución del campo eléctrico dentro de esta prueba es modelada por capacitancias parciales concentradas tal como las presenta Pacheco (Pacheco, 2007).

Las líneas de campo eléctrico dentro de las cavidades se representan por C_c y estas empiezan o terminan en las paredes de la cavidad lo cual forma las dos capacitancias C'_b y C''_b dentro del dieléctrico. Las líneas de campo fuera de la cavidad están representada por la ecuación 4.5:

$$C_a = C'_a + C''_a \quad \text{Ec. 4.7}$$

Debido a las dimensiones reales de la geometría utilizada, y como:

$$C_b = \frac{C'_b C''_b}{C'_b + C''_b} \quad \text{Ec. 4.8}$$

La magnitud de la capacitancia será controlada por la desigualdad:

$$C_a \gg C_c \gg C_b \quad \text{Ec. 4.9}$$

La magnitud con la que se evalúan las descargas parciales tiene una relación directa con el tamaño de la cavidad del aislamiento o lo que es lo mismo, con la gravedad del daño. Las descargas parciales se pueden medir en las siguientes unidades, según lo definido en (Unitronics electric, 2019).

- Milivoltios (mV): medida directa. Aplicable a objetos inductivos. Usado en normas

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

americanas, un ejemplo es la IEEE Std 1434-2014 que es la Guía para la Medición de Descargas parciales en Máquinas Eléctricas de Corriente Alterna.

- PicoCulombios (pC): medida directa. Usado en normas europeas como por ejemplo el estándar IEC 60270 Técnicas de pruebas en alta tensión – Medición de descargas parciales.

La determinación de la afectación del estado del aislamiento respecto al comportamiento de las descargas parciales que se hayan generado en este se puede determinar por medio de pulsos por segundo y polaridad.

- Los pulsos por segundo (pps): Conteo de pulsos en la unidad de tiempo. También se puede denominar la cantidad de cavidades en un aislante.
- Polaridad, ángulo de fase: respecto a la frecuencia de red. Cada una de las características tiene relación con la ubicación de los huecos, es decir con el tipo de daño.

El predominio de los pulsos, es decir, cuando una de las polaridades es mayor en 50% aproximadamente que la otra polaridad, indica otros mecanismos de degradación del aislamiento como, por ejemplo:

- Polaridades similares: si la magnitud y la cantidad de las descargas parciales de ambas polaridades son diferentes, esto es dado por lo general, por la presencia de huecos en el aislamiento.
- Descargas parciales tipo corona: las descargas corona pueden apreciarse sin equipo de medición pues producen luces y sonido y ocurren cuando el campo eléctrico rompe la

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

separación o el aislamiento que da el aire, provocando así la descarga. Esta es el único tipo de descarga que se puede apreciar sin equipo de medición debido a que produce olor, luces y sonido.

- Descargas parciales internas: se presentan en el interior del aislante sólido en forma de burbujas de gas (Rivero, 2015), como se puede observar en la figura 7.
- Descargas Parciales Superficiales: se producen en huecos gaseosos que dejan las superficies abiertas frente a materiales aislantes sólidos; las ionizaciones son perpendiculares al campo aplicado. Son típicas de contaminación en pasa tapas y aisladores (Rivero, 2015).

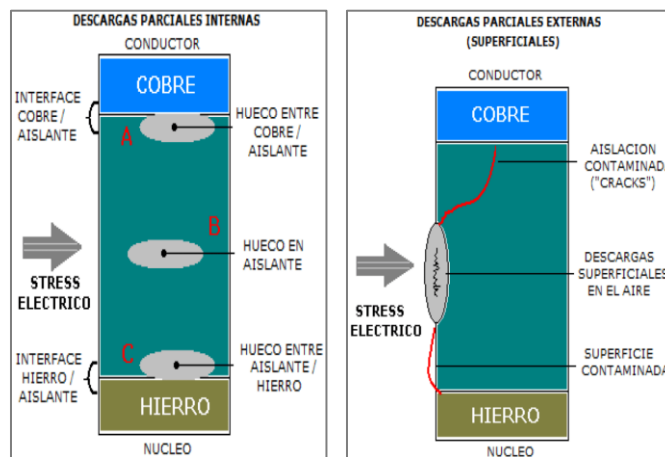


Figura 7 Descargas Parciales Internas y Externas (MW Megavattios., 2018)

También es importante conocer la cantidad y la magnitud de las descargas parciales, pero conocer la tendencia del comportamiento de las descargas parciales en el tiempo permite ver la rapidez del deterioro del aislamiento. Es recomendable hacer seguimiento de las descargas parciales cada seis meses cuando no se tienen equipos que permitan la medición en línea de estas, pero si al revisar las tendencias se encuentra un rápido cambio del comportamiento (medida

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

actual respecto a medida anterior), es necesario aumentar la frecuencia de toma de las descargas parciales a cada tres meses. Turcios indica que, para hacer una adecuada verificación de las tendencias de las descargas parciales, es necesario procurar que las condiciones operativas del equipo inspeccionado sean similares entre las mediciones, también de acuerdo con la siguiente tabla (Turcios, 2011):

<i>PARÁMETRO</i>	<i>TOLERANCIA</i>
<i>Tensión</i>	± 200V
<i>Carga</i>	± 10%
<i>Potencia Activa MW</i>	± 10%
<i>Potencia Reactiva MVAR</i>	± 10%
<i>Temperatura Interna</i>	± 5°C
<i>Presión de gas (si aplica)</i>	± 30 kPa
<i>Modo de Operación</i>	Carga Nominal

Tabla 4 Variaciones Permisibles para Análisis de Descargas Parciales (Turcios, 2011)

La tabla anterior muestra las variaciones de parámetros permisibles para hacer un correcto seguimiento de las descargas parciales del equipo al momento de hacer la medición.

La evaluación del comportamiento de las descargas parciales en un activo se recomienda comparando sus valores contra elementos con características similares de diseño y operación. Incluso hay algunos fabricantes de equipos de medición que brindan bases de datos con lecturas. Por ejemplo, en la tabla dos se muestran valores de descargas parciales promedio en generadores eléctricos enfriados por aire, con sensores capacitivos de 80pF en arreglo diferencial, de acuerdo con la tensión nominal de diseño de este. (ver tabla 5):

<i>TENSIÓN NOMINAL</i>	<i>13kV – 15kV</i>	<i>16kV – 18kV</i>
<i>Promedio</i>	168	457
<i>Máximo</i>	3396	3548
<i>25%</i>	9	145
<i>50%</i>	79	269
<i>75%</i>	180	498
<i>90%</i>	362	1024

Tabla 5 Ejemplo de estadísticas de $Q_{\text{máx}}$ (Turcios, 2011)

En la tabla 5, según lo recomendado por Turcios (Turcios, 2011), se indican los valores promedio de cantidades en mV de descargas parciales que se pueden presentar en máquinas eléctricas entre 13kV y 18kV desde el 25% la carga nominal hasta su carga nominal.

4.4.2. Causas o fuentes que dan origen a una descarga parcial

Desde el momento de su fabricación el aislamiento puede contener burbujas (voids) o grietas en el interior, además, durante la operación, el mismo está expuesto a impurezas y elementos mecánicos que deterioran el aislamiento de forma natural. Sin embargo, se han determinado cuatro tipos de estrés a los que está o puede estar sometido el aislamiento y que en futuro pueden dar origen o aumentar la magnitud de las descargas parciales (Shugg, Handbook of electrical and electronic insulating materials, 1995), estos son:

- Estrés eléctrico: cambio rápido de carga debido a la actividad eléctrica.

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

- Estrés mecánico: torsión y compresión del material aislante.
- Estrés térmico: temperatura de ambiente máxima o mínima de trabajo.
- Estrés químico: entorno al que está sujeto el aislante.
- Defectos en la fabricación del aislamiento.

Los sistemas para medición de descargas parciales, por lo general se conforman por un circuito sensor/detector de pulsos (CD, Z_{mi}), un dispositivo de acoplamiento (C_k) y una unidad de procesamiento y almacenamiento (MI), como se muestra en la figura 8.

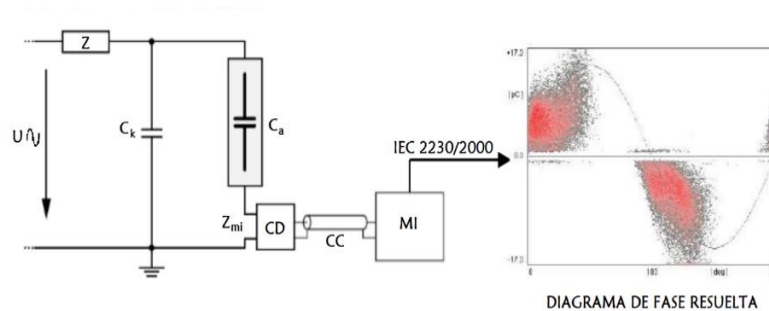


Figura 8 Componentes fundamentales de un sistema de medición de Descargas Parciales. Adaptado de (Herrera, 2015)

Donde la impedancia Z actúa como filtro evitando que los pulsos provenientes de la fuente de alto voltaje alcancen el circuito detector.

No es posible medir directamente la respuesta eléctrica real de una descarga parcial, por eso, se mide la carga aparente, conocida también como una proporción de la amplitud del pico de la señal o cuasi-integración de la señal que es detectada como pulsos de corriente que generan una caída de tensión en la impedancia de detección, la mencionada señal es una oscilación transitoria

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

donde el valor pico es considerado proporcional al área del pulso de entrada (descarga parcial).

La relación entre mV_{pico}/pC se establece con un procedimiento de calibración del instrumento de medida, entregando, el valor de la carga aparente de la señal medida (Turcios, 2011).

La salida del sistema de medición de descargas parciales, mostrado en la figura 9, es la visualización del comportamiento de las descargas parciales a través de los diagramas de fase resuelta y gráfica de análisis de polaridad pulsos (Ulises Manassero A. Z., 2015). Diversas empresas han realizado estudios que permiten caracterizar el estado del aislamiento y el modo de falla que se puede estar desarrollando debido al comportamiento de las descargas parciales en el aislamiento del equipo estudiado.

Los diagramas de fase resuelta y de pulsos indican la cantidad y el nivel de las descargas parciales presentes en el aislamiento y el nivel y la posible ubicación de las descargas parciales respectivamente. El primer diagrama mencionado surge de la transformación de los pulsos adquiridos del dominio del tiempo al dominio de las fases, es decir, se convierte la onda de tensión en un solo ciclo de fase desde 0° hasta 360° , representado en una gráfica 2D que muestra el número de pulsos en escala de colores y no como coordenada, al graficar la carga aparente de cada pulso en función del ángulo y del número de pulsos.

Este tipo de diagrama permite ver la fuente de las descargas parciales de acuerdo con los patrones que se generan en este diagrama. Desde 1978 investigadores como Tamaka y Okamoto desarrollaron sistemas que permitían analizar el método de los parámetros estadísticos para medir

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

el grado del deterioro del sistema de aislamiento dado por afectaciones por descargas parciales y arborizaciones eléctricas (Herrera, 2015).

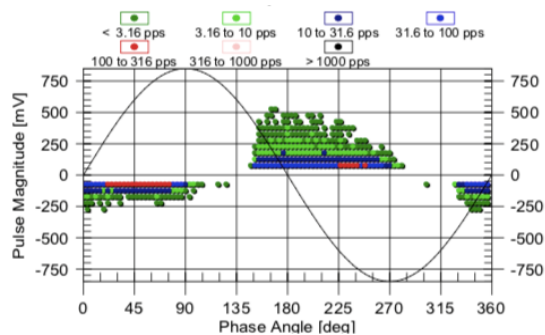


Figura 9 Ejemplo de diagrama de fase resuelta. Tomadas del software PDView de IRIS Power

Los diagramas de fase resuelta permiten determinar los siguientes parámetros (Herrera, 2015):

1. Carga Promedio:

$$q_m^\pm = \frac{Q^\pm}{N^\pm} \quad \text{Ec. 4.10}$$

Donde

Q^\pm : Es la suma de todas las cargas en todas las ventanas de fase

N^\pm : Número total de descargas en semiciclo positivo o negativo respectivamente

2. Carga máxima:

$$q_{max}^\pm = \max(q_1, q_2, \dots, q_i) \quad \text{Ec. 4.11}$$

Para todas las cargas ocurridas en el semiciclo positivo y negativo

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

3. Repetición:

$$n^{\pm} = \frac{N^{\pm}}{T} = N^{\pm}f \quad \text{Ec. 4.12}$$

Que se puede considerar con el número total de las descargas parciales en el semiciclo positivo y negativo que ocurren en una unidad de tiempo de referencia, para este caso es el periodo de la forma de onda del voltaje de prueba $1/f$.

Por otra parte, la predominancia de la polaridad de las descargas parciales permite identificar diferentes mecanismos de degradación del aislamiento y el ángulo en el que se generan las descargas parciales de acuerdo con la onda de tensión de referencia (Turcios, 2011).

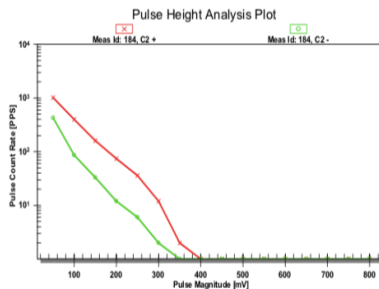


Figura 10 Ejemplo de gráfico de Análisis de Polaridad de Pulsos. Tomadas del software PDView de IRIS Power

4.4.2.1. Metodologías de detección de descargas parciales

Desde los años 40 se ha estudiado la inspección de descargas parciales online, logrando captar las señales de las descargas parciales mas no determinar su ubicación o cuantificar la magnitud de la descarga, llevando esto, a contar con varias metodologías aplicadas para la detección de

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

descargas parciales, algunas de estas metodologías se presentan a continuación y son detalladas por Rey (Rey, 2014):

- Técnicas ópticas: detección de la luz producida como resultado de varios procesos durante la descarga (ionización, excitación y recombinación). Uno de los inconvenientes de esta técnica es que el espectro óptico para una descarga parcial no siempre es el mismo, ya que la intensidad de la descarga y algunos factores como la temperatura y la presión del sistema aislante pueden modificar la longitud de onda de luz emitida. Este procedimiento es invasivo.
- Técnicas de emisión acústica: las descargas parciales también se manifiestan como ondas mecánicas que se propagan a través del medio aislante, uno de los inconvenientes de esta técnica es que solo puede ser usada en transformadores de potencia ya que las ondas mecánicas solo se transmiten por aceite. Este procedimiento es no invasivo.
- Técnicas químicas, Análisis Disuelto de Gases – DGA: Análisis de los gases generados internamente en el transformador, al existir descargas parciales hay un aumento considerable de Hidrogeno, uno de los inconvenientes de esta técnica es que solo puede ser usada en transformadores de potencia ya que los gases se generan por la descomposición de la molécula de aceite. Este procedimiento es no invasivo.
- Técnicas de Radiofrecuencia: las descargas parciales generan ondas electromagnéticas con rangos de frecuencia entre los kHz y los GHz, con un adecuado filtro pasa bandas, esta técnica cuenta con alta sensibilidad y confianza. Este procedimiento es no invasivo.

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

- Técnicas eléctricas: basado en el estándar IEC 60270, con la instalación de acopladores capacitivos en el equipo que se quiere analizar, es posible determinar las descargas parciales generadas en el (Rey, 2014).

El monitoreo de las descargas parciales se puede definir como la comprobación periódica de parámetros de descargas previamente definidos y es posible realizar esta comprobación de forma offline, online discontinua u online continua (Rodríguez D. L., 2012). Este monitoreo se realiza conectando el equipo de diagnóstico a unos sensores durante el análisis, mientras el equipo fuera de servicio es llevado a tensión nominal con la ayuda de una fuente externa. Este monitoreo no es muy recomendado pues no es posible medir ciertas magnitudes con el equipo fuera de servicio.

El monitoreo online no continuo definido se realiza conectando el equipo de diagnóstico a unos sensores durante el análisis, el monitoreo online se puede hacer con el equipo en servicio.

El monitoreo online continuo es aquel que se realiza manteniendo de forma permanente sensores que miden descargas parciales durante la vida útil del equipo, obteniendo de forma constante el análisis de la tendencia de su estado y favoreciendo el reconocimiento de desviaciones en fase temprana. En la siguiente tabla, podemos ver la comparación entre los ensayos de descargas parciales on-line (continuo y no continuo) y off-line (Turcios, 2011).

OFF-LINE	ON-LINE
<i>La máquina está fuera de servicio y desconectada del sistema</i>	<i>Se puede ensayar sin interrumpir el servicio</i>
<i>Se necesita una fuente de alta tensión externa y grande</i>	<i>No se precisa una fuente de alta tensión externa</i>
<i>Ensayo relativamente caro</i>	<i>Ensayo económico y que ahorra tiempo</i>
<i>Solo hay estrés eléctrico. No es sensible a descargas en ranuras/barras sueltas debidas a fuerzas electromagnéticas (no aparecerían descargas por vibraciones, ni al encoger el cobre y aislamiento)</i>	<i>Se dan todas las situaciones normales de servicio: eléctricas, mecánicas, térmicas y electromagnéticas habituales del generador en servicio. Aparecen fuerzas no presentes off-line. Resultados más reales</i>
<i>Todo el devanado estatórico desde fase a neutro está sujeto a tensión nominal (pueden aparecer descargas parciales en zonas no sujetas a potencial elevado)</i>	<i>Solo las barras terminales están expuestas al voltaje nominal</i>
<i>El sitio de descargas puede encontrarse con una sonda de corona</i>	<i>Identifica lugares con descargas parciales en cada fase/paralelo</i>

Tabla 6 Ensayos de Descargas Parciales On-Line vs. Off-Line (Turcios, 2011)

Empresas como *Iris Power* (IRIS Power, 2013) han realizado detallados estudios que generaron amplias bases de datos usadas como guía para las comparaciones de las descargas parciales medidas lo que permite identificar los posibles tipos de fallas que se tengan en los activos analizados. Además de los anterior, la periodicidad de la toma de muestras de las descargas parciales permite determinar la tendencia del comportamiento de la evolución de las descargas entre un periodo y otro periodo de toma de muestras para el análisis. La tabla 8 muestra los posibles comportamientos de las descargas parciales desde la primera medición (Línea base) y durante toda la vida útil del aislamiento del activo analizado.

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

LÍNEA BASE ESTABLE ± 25	<i>No existen mediciones anteriores</i>	
EN AUMENTO LENTO	<i>La pendiente aumenta dentro de un rango esperado</i>	NA
TENDENCIA ASCENDENTE	<i>Pequeño pero notable pendiente de incremento durante varios periodos de tiempo</i>	<i>No es significativo, pero debe ser monitoreado con detalle</i>
TENDENCIA DESCENDENTE	<i>Pequeño pero notable incremento de la pendiente en varios periodos de tiempo</i>	
INCREMENTO SIGNIFICATIVO DISMINUCIÓN SIGNIFICATIVA	<i>incremento de la pendiente en un periodo de tiempo</i> <i>Decrecimiento de la pendiente en un periodo de tiempo limitado</i>	<i>Cambios significativos inusuales, deben ser monitoreados en detalle durante el siguiente ciclo de pruebas. Es recomendado aumentar la frecuencia de monitoreo</i>
DETERIORO RÁPIDO	<i>Rápido incremento (doble) de la pendiente de DP en un corto intervalo de tiempo</i>	
DESCONOCIDO	<i>Los valores de Q_m son demasiado volátiles para ser evaluados</i>	

Tabla 7 Diagnóstico de DP (IRIS Power, 2013)

4.4.3. Descargas parciales en generadores

Comúnmente se usan acopladores entre 80pF y ± 4 pF cumpliendo los requerimientos de la IEC 60034-27-2 para realizar el monitoreo de las descargas parciales en los generadores. Estos acopladores se instalan dentro del estator.

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético



Figura 11 Acopladores Capacitivos de Descargas Parciales para Máquinas Rotativas (**ALTANOVA GROUP, Recuperado en 2021**)

De igual manera se usan acopladores de ranura de estator que separan las descargas con los pulsos generados que ocurren en el núcleo por malas conexiones, es posible confundir las descargas parciales con ellos. Estos acopladores son instalados entre las barras “top” y “bottom” o directamente en la cuña.



Figura 12 Acopladores de ranura de estator Iris Power (SSC) (**Qualitrol Defining Reliability, 2018**)

Para el análisis de descargas parciales se comparan las mediciones realizadas anteriormente del mismo activo, por esto se debe velar por que los parámetros del activo analizado sean lo más similares posibles y/o de acuerdo con la tabla 8:

VOLTAJE	$\pm 2,5\%$	<i>Las descargas parciales incrementan con la tensión</i>
CARGA	$\pm 10\%$	<i>Si un equipo tiene descargas parciales asociadas a conexiones de bobinas sueltas, es común que aumenten las descargas al variar la carga del equipo</i>
POTENCIA ACTIVA	$\pm 10\%$	
POTENCIA REACTIVA	$\pm 10\%$	
TEMPERATURA DEL ESTATOR	$\pm 10^{\circ}\text{C}$	<i>La temperatura de operación afecta el volumen interno de las cavidades</i>
PRESIÓN DEL HIDRÓGENO	$\pm 5\text{psi}$	<i>La presión del gas impacta la tensión de ruptura dieléctrica lo que conlleva a aumentar las descargas parciales</i>
	$\pm 35\text{kpa}$	
	$\pm 0.35\text{bar}$	
HUMEDAD	Desconocida	<i>La humedad puede impactar en las descargas parciales especialmente en los finales o principio de las barras</i>

Tabla 8 Parámetros para Comparación entre Muestras de PD (**IRIS Power, 2013**)

La tabla anterior indica los máximos a los que debe estar sometido el equipo para poder dar una correcta trazabilidad a los datos obtenidos luego de la medición

4.4.3.1. Modos de falla en generadores

La forma más común de determinar el estado del aislamiento es a partir de los diagramas de fase resuelta, con estos diagramas se puede evidenciar la ubicación de las descargas parciales y los posibles modos de falla que estos representan, así como lo indica la tabla 9:

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

	TIPO	CAUSA	UBICACIÓN
DP Internas	<i>Cavidades internas</i>	<i>Defecto de fabricación</i>	<i>Devanado de alta tensión</i>
	<i>Delaminación interna</i>	<i>Defecto de diseño y fabricación</i>	
Descargas en Ranuras	<i>Delaminación entre conductor y aislamiento</i>	<i>Defecto de diseño y fabricación</i>	<i>Ranuras en el devanado de alta tensión</i>
	<i>Mecánicamente inducidas</i>	<i>Defecto de diseño, fabricación y mantenimiento</i>	
	<i>Defectos eléctricos en ranuras</i>	<i>Mantenimiento defectuoso</i>	
Cabezas de bobina	<i>Descargas de alta intensidad en ranuras</i>	<i>Defecto de diseño y fabricación</i>	<i>Cabezas de bobina</i>
	<i>Cabeza de bobina/Corona</i>	<i>Defecto de instalación y mantenimiento</i>	
	<i>Surface tracking</i>	<i>Deficiente mantenimiento</i>	
Arcos	<i>Descarga fase-fase</i>	<i>Defecto de instalación y mantenimiento</i>	<i>Ranura de salida</i>
	<i>Conductor averiado</i>	<i>Defecto de instalación y mantenimiento</i>	
	<i>Grietas en soldadura</i>	<i>Defecto de instalación y mantenimiento</i>	

Tabla 9 Características de Descargas Parciales en Generadores (IRIS Power, 2013)

Las variaciones de temperaturas o carga en el devanado pueden producir aumento o disminución de las descargas parciales en el devanado del estator. Si al aumentar la carga o la temperatura, las descargas parciales aumentan, se considera que hay un efecto positivo de estos factores, en el caso contrario, se considera un efecto negativo. Estas variaciones solo se pueden determinar con porcentajes de variación de temperatura de al menos 20% y de carga de al menos 40% (Turcios, 2011). Las afectaciones de las descargas parciales dadas mostradas por los efectos de la temperatura y la carga en el estator pueden mostrarse como (Turcios, 2011).

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

$$Q_m \downarrow + T^\circ \uparrow = \text{Deterioro térmico o debido al ciclo de carga} \quad \text{Ec. 4.13}$$

$$Q_m \uparrow + T^\circ \uparrow = \text{Deterioro de la capa de carburo de silicio} \quad \text{Ec. 4.14}$$

Los mecanismos de falla más comunes del aislamiento y las características de las descargas parciales que se producen se muestran en la tabla 11:

MECANISMOS DE FALLA	PRIORIDAD DE PREDOMINANCIA	EFECTO DE CARGA	EFECTO DE TEMPERATURA	ÁNGULO DE FASE
<i>Deterioro Térmico</i>	<i>Ninguno</i>	<i>Ninguno</i>	<i>Negativo</i>	<i>45° y 225°</i>
<i>Ciclos de Carga</i>	<i>Negativo</i>	<i>Negativo</i>	<i>Negativo</i>	<i>45°</i>
<i>Devanado flojo</i>	<i>Positivo</i>	<i>Positivo</i>	<i>Negativo</i>	<i>225°</i>
<i>Descarga a la ranura</i>	<i>Positivo</i>	<i>Ninguno</i>	<i>Negativo</i>	<i>225°</i>
<i>Mala impregnación</i>	<i>Ninguno</i>	<i>Ninguno</i>	<i>Negativo</i>	<i>45° y 225°</i>
<i>Contaminación</i>	<i>Ninguno</i>	<i>Ninguno</i>	<i>No Predecible</i>	<i>15°, 75°, 195° y 255°</i>
<i>Espacio inadecuado entre barras</i>	<i>Ninguno</i>	<i>Ninguno</i>	<i>No Predecible</i>	<i>15°, 75°, 195° y 255°</i>
<i>Interfase semiconductor y graduadora</i>	<i>Positiva</i>	<i>Ninguno</i>	<i>Positivo</i>	<i>225°</i>

Tabla 10 Mecanismos de Falla más Comunes en el Aislamiento (Turcios, 2011)

4.4.3. Descargas parciales en transformadores de potencia

Las descargas parciales pueden ocurrir en los transformadores de potencia sumergidos en aceite debido al envejecimiento del aceite, degradación del papel durante la operación, concentración excesiva de campo eléctrico en algunas zonas de la máquina, insuficiencias e imperfecciones en el proceso de secado e impregnación del aislamiento, así como a la presencia de impurezas (Samper, 2008). Mientras que en los transformadores secos se originan

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

principalmente por concentración de campo eléctrico, por el depósito de humedad e impurezas sobre el papel y por la degradación propia del aislamiento (por temperatura o edad del transformador) que generan descargas superficiales y como el aislamiento se encuentra directamente expuesto a los factores climáticos, agentes como la temperatura, la humedad y la presión atmosférica, afectan la actividad de las descargas parciales haciendo que puedan incrementarse hasta niveles peligrosos (Samper, 2008).

Todos los métodos de detección de descargas parciales en transformadores de potencia están basados en la detección de corrientes de impulso circulando en la conexión paralela de los capacitores C_k (capacitores de acople) y C_t (capacitores objeto de prueba). El estándar IEC transforma la señal a un valor en picoCoulombs pC (IEC, 2000), mientras que IEEE transforma la señal a un valor de Tensión de Radio Interferencia RIV_m que por lo general se mide en milivoltios (IEEE, 1999).

El circuito equivalente se muestra en la figura 13:

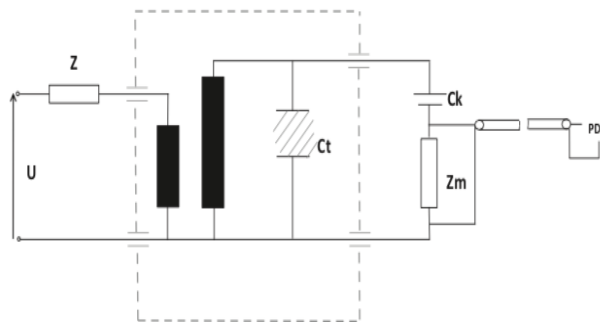


Figura 13 Circuito de prueba para medición sin toma capacitiva en transformadores de potencia (Gómez-Ramírez, 2018)

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

En el caso de los transformadores de potencia, la medida de impedancia es generalmente conectada en medio de los aisladores de alta tensión en la toma capacitiva a tierra, la figura 14 es una representación de ello.

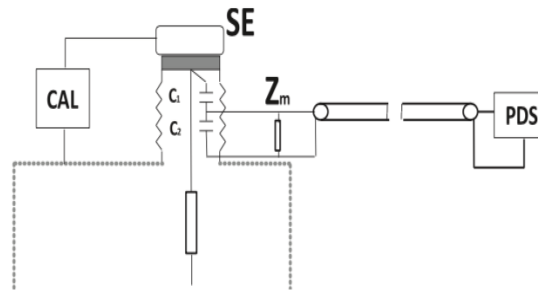


Figura 14 Circuito de calibración para medición de DP en transformadores de potencia con toma capacitiva (Gómez-Ramírez, 2018)

La figura 15 indica que, para un aislador sin toma capacitiva, se puede colocar un acople externo para la capacitancia de acople C_k y será conectada en paralelo con el aislador (Gómez-Ramírez, 2018).

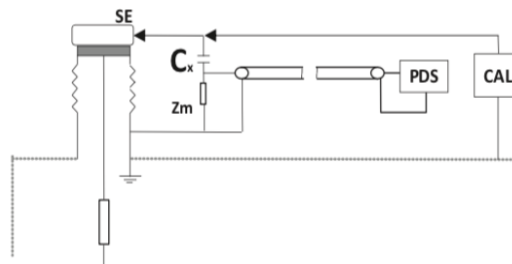


Figura 15 Circuito de calibración para medición de DP en transformadores de potencia sin toma capacitiva (Gómez-Ramírez, 2018)

La tabla 11 muestra las descargas parciales que se presentan en los componentes de los transformadores de potencia y las posibles causas asociadas a ellas.

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

<i>COMPONENTE</i>	<i>CAUSA</i>
<i>Núcleo y bobinas</i>	<i>Tensión de operación</i>
<i>Estructura aceite/papel</i>	<i>DP asociadas a cambios irreversibles en la condición del aislamiento</i>
<i>Bujes</i>	<i>Tensión de operación</i>
<i>LTC</i>	<i>Tensión de operación</i>
<i>Estructura General</i>	<i>Tensión inducida por el flujo magnético</i>

Tabla 11 Características de Descargas Parciales en Transformadores (Victor Sokolov, Recuperado en 2021)

4.4.3. Descargas parciales en cables de potencia

En el momento de presentarse descargas parciales en un punto del cable de potencia, este se divide en dos y viaja por el cable, las descargas por lo general se generan por la rotura del aislamiento del cable y de los accesorios de este, como empalmes y terminaciones. Estas fallas en el aislamiento de los cables pueden provocarse por su manipulación durante la instalación, desgaste del aislamiento por funcionamiento normal y por sometimiento a sobretensiones. De acuerdo con Mor et al. las descargas parciales se propagan a una velocidad de $160\text{m}/\mu\text{s}$ aproximadamente (Mor, 2012). En la tabla 12, se muestra las descargas parciales típicas que se encuentran en los cables de potencia y las acciones recomendadas para su manejo.

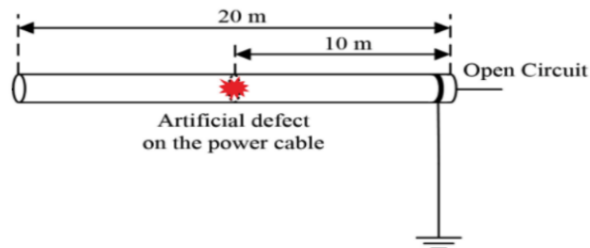


Figura 16 Defecto en cable de potencia (J. Singsathien, 2017)

<i>ESTADO</i>	<i>ACCIÓN REQUERIDA</i>
<i>Cable en buena condición</i>	<i>No requiere acciones</i>
<i>Arborizaciones de agua</i>	<i>Las concentraciones de descargas parciales deben ser analizadas</i>
<i>Ingreso de agua en las juntas</i>	<i>Resultados de DP considerados como amortiguados debido a la presencia de agua</i>
<i>Alto ingreso de agua en juntas</i>	<i>Reemplazo inmediato de la junta</i>

Tabla 12 Características de Descargas Parciales en Cables de Potencia (Neier, 2015)

4.4.4. Detección de descargas parciales por el método electromagnético

Un campo electromagnético producido por una descarga parcial se puede dividir en campo cercano y en campo lejano y el límite entre estas dos regiones se define por la longitud de onda de la fuente de radiación electromagnética que pueden presentarse en rangos de 300MHz hasta 3GHz (Mohammad Azadifar, 2020). El campo cercano está formado por campos multipolares, donde las intensidades de los campos eléctricos y magnéticos cambian independientemente entre sí haciendo que la medición en esas regiones sea más complicada.

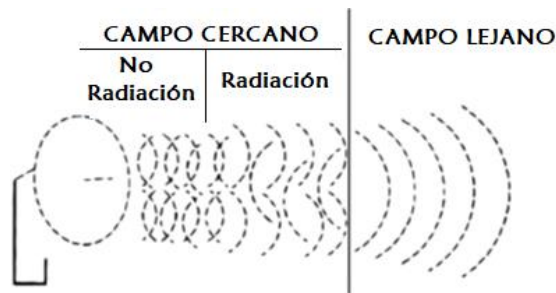


Figura 17 Campos de radiación electromagnética alrededor de fuente electromagnética radiante (Chalaki, 2020)

Es posible diferenciar los tipos de descargas parciales partiendo de la irradiación del campo magnético que genera, donde las características de frecuencia de estas varían de acuerdo con la velocidad de los electrones, los procesos de recuperación y las interrupciones en las corrientes de descarga (Chalaki, 2020), mientras que la densidad de potencia de la radiación electromagnética de las descargas parciales en una cavidad es proporcional con el nivel de carga almacenado en dicha cavidad (Fernando, 2012).

Los campos magnéticos generados por las descargas parciales se pueden representar como un impulso gaussiano o por medio de las ecuaciones de Maxwell como indica Azadifar et. al (Mohammad Azadifar, 2020), teniendo en cuenta que las ondas que divergen de la fuente de descargas parciales con invariancia de inversión del tiempo pueden converger nuevamente a ella creando una difracción focal limitada. Para aplicar el proceso de inversión de tiempo a la fuente de descargas parciales, se recomienda seguir los siguientes tres pasos:

- Medir las ondas electromagnéticas de la fuente de descargas parciales en una o varias ubicaciones (tiempo de avance). Se puede medir numérica o experimentalmente.
- Las formas de onda grabadas se invierten en el tiempo y se retro inyectan en el espacio de la solución en un entorno de simulación (paso de tiempo hacia atrás).
- Un criterio para localizar puntos focales creados por constructivos. La interferencia se utiliza para determinar la posición de la fuente original de descargas parciales. Para identificar el punto focal se pueden utilizar varios criterios como Campo máximo, entropía mínima, correlación cruzada.

Los primeros sistemas de monitoreo existen desde los años 70 en máquinas eléctricas rotativas. La separación de los pulsos de PD y ruido se hacía comparando los tiempos de llegada de los pulsos a los sensores conectados al equipo de medida. Esto se hacía instalando de forma permanente un par de condensadores (80pF para medidas online) por fase en los terminales de conexión de la máquina a la red (IEEE., 2009) (IEEE, 2012).

Las señales de descargas parciales pueden contener ruidos que deben ser eliminados o minimizados para tener un diagnóstico más claro del estado del aislamiento del equipo analizado, los ruidos de interferencia encontrados pueden incluir los siguientes tipos (Godoy, 2012):

- Armónicos o ruido de baja frecuencia que esta sincronizado generalmente a la frecuencia de alimentación de AV.
- Emisión continua AM (amplitud modulada) radios transmisores u otras señales radiadas continuas, normalmente a una frecuencia por debajo de 1MHz.
- Interferencia de pulso repetitivo (frecuentemente causada por tiristores o diodos) que ocurren generalmente en la misma posición de fase en ciclos sucesivos de tensión CA aplicado.
- Pulsos de ruido hechos al azar que pueden ser causados por la operación de interruptores.
- Señales de descargas parciales indeseables NO generadas en el componente de prueba.
- Ruido casi blanco que pueda ser relativo a las conexiones del sistema de tierras.

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

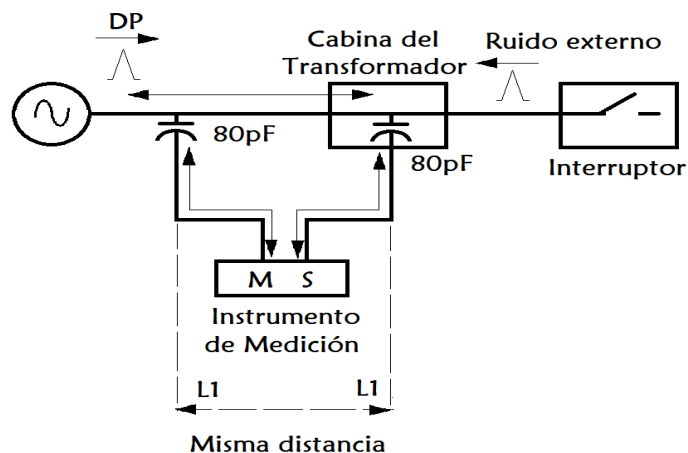


Figura 18 Ubicación de los condensadores por fase para separar descargas parciales del ruido eléctrico (IEEE, 2006)

En algunos centros de trabajo el condensador es instalado por fase cerca a los terminales del devanado del estator, otro condensador es instalado en cuba del transformador de potencia o en el interruptor de potencia de salida de la red. La diferencia del tiempo de llegada de los pulsos registrados en cada canal de adquisición se utiliza para distinguir el ruido de las PD. Siguiendo el esquema de la figura, si un pulso de PD sale del estator es detectado en primer lugar por la entrada M del instrumento de medición. Del mismo modo, un pulso externo siempre llegará primero a la entrada S del instrumento antes que a la entrada M. Conociendo los retardos entre los tiempos de llegada a cada canal (la distancia entre sensores es fija y conocida), con este procedimiento se puede determinar fácilmente si lo que estaba midiendo era un pulso de PD proveniente de un estator o por el contrario era un pulso o PD producido por alguna fuente externa (IEEE, 2006) (F.H, 1989).

Actualmente existen sistemas de adquisición comerciales que utilizan esta técnica de medición con el fin de discriminar señales de ruido externo, logrando así evitar una mala interpretación de los resultados obtenidos durante los ensayos. Una limitación de esta técnica es que solo permite identificar y eliminar señales externas, siendo completamente imposible algún tipo de separación en caso de presentarse múltiples fuentes en el interior de la máquina que se está ensayando. Además, se requiere del uso de 2 canales de adquisición (y dos sensores) por fase, y unos algoritmos de identificación de parejas de pulsos detectados ciertamente complejos para la detección con la maquina en servicio (Rey, 2014).

En gran parte de la literatura consultada para la elaboración de este proyecto, se observaron estudios de descargas parciales por el método electromagnético en transformadores de potencia, en menores proporciones se encuentra para cables de potencia y por último para generadores. En publicaciones como las de Azadifar (Mohammad Azadifar, 2020), Sahan (Fernando, 2012), Karami (Hamidreza Karami¹, 2021) y Sena (Anderson J. C. Sena, 2021) son desarrolladas en su mayoría con sensores elaborados para realizar el estudio de descargas en un solo activo. En esta tesis no se presenta el desarrollo de prototipos de detección de descargas parciales. La empresa en la que se desarrolla el trabajo, buscando unificar y reducir costos, adquirió una herramienta que, aunque es originalmente diseñada para la detección de descargas parciales en cables, se valida su aplicabilidad también para generadores y transformadores, siempre que se sigan las recomendaciones presentadas en las siguientes secciones.

4.4.5. Ancho de banda de detección de descargas parciales en generadores eléctricos, transformadores de potencia y cables de potencia

En la literatura se puede encontrar diversos estudios como lo son los de Singsathien (J. Singsathien, 2017), J. Lopez-Roldan (J. Lopez-Roldan, 2008), Jian Li (Jian Li, 2012) y Davide Fabiani (Davide Fabiani, 2008), Roslizan (Roslizan N. D., 2020), entre otros, que mencionan los niveles de frecuencia en los que los sensores desarrollados captan descargas parciales, en la actualidad la técnica que cuenta con mayor práctica es la de detección en ultra alta frecuencia (por sus siglas en inglés UHF) ya que brinda alta sensibilidad y minimiza disturbios (Gouli Wang, 2001). Las diferentes investigaciones desarrolladas han permitido establecer los rangos de respuesta en frecuencia para los activos críticos de generación. Los elementos más estudiados en esta metodología son los transformadores de potencia, dejando en un segundo lugar a los cables de potencia y por ultimo los generadores eléctricos.

A continuación, en la tabla 13, se presenta el resumen de los estudios de valoración de descargas parciales a diferentes intervalos de frecuencia realizados a activos críticos de generación.

<i>ACTIVO</i>	<i>FRECUENCIA DE DETERMINACIÓN DE DESCARGAS PARCIALES</i>
<i>Transformadores</i>	500MHz a 1500MHz (Gouli Wang, 2001) Desde 300MHz o 400MHz (Sander Meijer, 2006) 600MHz a 1.5GHz (Sander Meijer, 2006) 0.5MHz a 1MHz (TF, 2003) 300 MHz a 1.5GHz (J. Lopez-Roldan, 2008) 300 MHz a 1.0 GHz (Jian Li, 2012) Desde 500MHz (H.R. Mirzaei, 2015)
<i>Cables</i>	300MHz a 800MHz (Eberhead Lemke, 2008)
<i>Motores de alimentación invertida</i>	10MHz a 800MHz (Davide Fabiani, 2008)

Tabla 13 Intervalos de Frecuencia de detección de Descargas Parciales en Activos Críticos de Generación de Energía

Con la información de la tabla anterior, podemos considerar que:

- Guoli Wang, et al., muestran que, en las pruebas realizadas en laboratorio, el sensor detectó las señales de descargas parciales evaluadas en el rango de frecuencia dado de 500 a 1500MHz (Gouli Wang, 2001).
- Sander Meijer et al., ilustran la aplicación del diagnóstico de descargas parciales a través de las pruebas de aceptación de transformadores con frecuencias desde 300MHz o 400MHz, pudiendo localizar descargas parciales en transformadores (Sander Meijer, 2006).
- S. Tenbohlen et al., logran en su estudio detectar y ubicar descargas parciales en transformadores en el intervalo de frecuencia de 600MHz a 1.5GHz (Sander Meijer, 2006).

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

- El Cigre, en el documento elaborado de reglas de diagnóstico de descargas parciales, indica que el intervalo de frecuencias 0.5MHz a 1MHz es el indicado para encontrar descargas parciales en transformadores de potencia (TF, 2003).
- J. López-Roldan et al., registran y analizan varios experimentos, logrando así ajustar la sensibilidad de su sensor de descargas parciales obteniendo resultados confiables comparados con el método eléctrico (J. Lopez-Roldan, 2008).
- Jian Li, et al., analizan seis tipos de aislamientos defectuosos con la técnica de análisis de ultra alta frecuencia con anchos de banda entre 300MHz y 1GHz encontrando resultados satisfactorios de medición de descargas parciales en transformadores (Jian Li, 2012).
- H.R Mirzaei, et al., muestran en su documento como desde los 500MHz inician la detección de las descargas parciales, además de mostrar un procedimiento con el cual pudieron ubicar el sensor de forma tal que obtuvieron la mayor confiabilidad en su actividad de detección de descargas parciales en transformadores (H.R. Mirzaei, 2015).
- E. Lemke, et al., en su trabajo desarrollado de medición de descargas parciales en cables de potencia muestra que es posible correlacionar los resultados de sus experimentos con las medidas tomadas con el método IEC (Eberhead Lemke, 2008).
- Davide Fabiani et al., logran medir las descargas parciales de un motor de forma eficiente (Davide Fabiani, 2008).

Las descargas parciales pueden manifestarse como una pequeña explosión que se encuentra típicamente entre 20kHz y 250kHz, aunque también hay emisiones en el rango audible (entre

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

100Hz y 20KHz) (IEC (International Electrotechnical Commission), 2016).

5. Metodología

Para el desarrollo de los experimentos, se tomó como muestra una central hidroeléctrica que tiene su casa de máquinas ubicada en caverna, por lo que la comunicación entre la casa de máquinas y la subestación se realiza por medio de cables de potencia. En la central hidroeléctrica N.1. se midieron las descargas parciales en los activos que se describen a continuación:

Central Hidroeléctrica N.1.: Central Hidroeléctrica de generación de energía con capacidad efectiva neta de 220MW, conformada por:

- Dos generadores sincrónicos con capacidad de 109MW cada uno
 - ✓ Tensión nominal 13,8 kV
 - ✓ Tipo de aislamiento: Clase F
 - ✓ Tipo de refrigeración: aire
 - ✓ Frecuencia: 60Hz
- Dos transformadores de potencia trifásicos con potencia de 104MVA cada uno
 - ✓ Frecuencia: 60Hz
 - ✓ Tensión de alta: 220kV
 - ✓ Tensión de baja: 13,8kV
- Seis cables de alta potencia con capacidad de 230kV cada uno
 - ✓ Cable 1x500 mm²

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

- ✓ Longitud 490 m
- ✓ Frecuencia: 60Hz
- ✓ Tres puntos de medición: principio del recorrido, empalme, final del recorrido

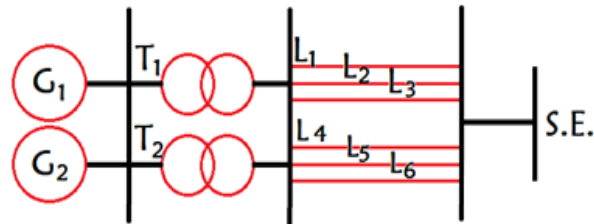


Figura 19 Representación gráfica de la configuración de la central de generación N.1.

Los generadores de la central hidroeléctrica N.1. actualmente cuentan con un sistema de monitoreo de descargas parciales en línea por medio de acopladores capacitivos instalados en el estator de cada una de las máquinas. Este sistema de descargas permite hacer la adquisición de datos desde la central y desde un acceso remoto determinado por medio de equipos Iris Power GuardII+ de la marca Qualitrol.



Figura 20 Equipo de monitoreo de descargas parciales GuardII+

Otro método para la determinación del desgaste del aislamiento y monitoreo de las descargas parciales usado en la central de generación se realiza a partir del seguimiento de las tendencias de

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

la diferencia entre el factor de potencia o tangente delta al 80% y al 20% de la capacidad neta de la máquina. Esta información se toma de manera anual con el equipo M4100 de la marca doble.



Figura 21 Equipo medidor de aislamiento M4100

El seguimiento de las descargas parciales de los transformadores de potencia de la central N.1., se realizan anualmente por medio de la detección de descargas parciales acústicas con el equipo PDL 650 de la marca Omicron.



Figura 22 Equipo de localización acústica de descargas parciales PDL 650

Además, la cromatografía de gases de los transformadores tomada semestralmente permite, por medio de la evaluación con el pentágono de Duval, evaluar el desarrollo de descargas parciales en los transformadores de potencia. Para este estudio, revisaremos las metodologías de identificación de fallas mostradas en la referencia técnica IEEE Std. C57.104 /2019.

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

El análisis de fallas por medio del pentágono de Duval se desarrolla a partir del análisis de cinco gases combustibles en los dos pentágonos primero por el uno y luego por el dos correspondiente al incremento de energía o temperatura de fallas que generan estos gases. Las fallas PD, D1, D2, T1, T2 y T3 pueden ser determinadas en el pentágono de Duval uno. Que se construye como se indica en el documento *The Duval Pentagon—A New Complementary Tool for the Interpretation of Dissolved Gas Analysis in Transformers* (Michael Duval and Laurent Lamarre, 2014).

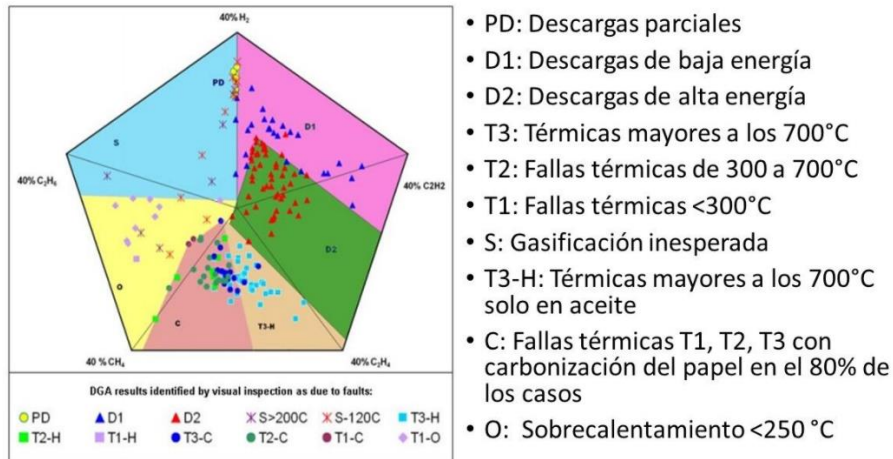


Figura 23 Zonas de falla en Pentágono de Duval (Transequipos S.A., 2020)

Para la realización de esta tesis se usará el sensor electromagnético portátil PRY-CAM, que, a partir de la onda electromagnética generada por las descargas parciales de los generadores, los transformadores y el cable de potencia, permite tomar la información y determinar si se tienen zonas con posible presencia de descargas parciales que requieran de atención o mayor frecuencia de supervisión. El sensor para medición de descargas parciales fue desarrollado para su aplicación en cables de potencia, patentado por Antonio Di Stefano, Roberto Candela, Giuseppe

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

Costantio, Giuseppe Fiscelli en junio de 2011 y tiene número de patente US20110156720A1

(Antonio Di Stefano, Recuperado en 2021)



Figura 24 Sensor de descargas parciales y su unidad de sincronización

Este sensor de descargas parciales es un equipo portable en forma de cámara que consiste en una unidad altamente integrada, que incluye el sensor electromagnético inalámbrico exclusivo para la detección de señales de descargas parciales y la sincronización de fase, una unidad de adquisición digital y una interfaz Wifi. Este equipo cuenta con una gama de diferentes sensores de descarga parcial.

Su diseño sencillo facilita la toma las muestras de descargas parciales de los equipos analizados, ya que simplemente se apunta o ubica cerca de un componente eléctrico (con la ayuda de una pértiga, si es necesario) e inmediatamente puede transmitir datos de las descargas parciales a una iPad a través del enlace Wi-Fi.

PRY-CAM PORTABLE: Especificaciones de Hardware

<i>SENSOR</i>	
<i>Tipo</i>	<i>Sensor electromagnético basado en una antena de banda ultra-ancha patentada, con un receptor de señal de sincronización de Corriente Alterna</i>
<i>Ancho de Banda</i>	<i>100 MHz con filtro de banda FM</i>
<i>Sensibilidad de DP</i>	<i>Desde 1pC</i>
<i>Sensibilidad de sincronización</i>	<i>Desde 150VAC</i>
<i>Frecuencia de sincronización</i>	<i>Desde 10Hz hasta 1kHz</i>
<i>Rango de trabajo</i>	<i>Desde 1cm hasta 200cm (dependiendo del nivel de actividad de las descargas parciales)</i>
<i>Fuente de alimentación</i>	<i>3.3V, 40mA</i>
<i>Peso</i>	<i>80gr aproximadamente</i>
<i>Dimensiones</i>	<i>70mm x 70mm x 70mm</i>

Tabla 14 Especificaciones de Hardware. Sensor PRY-CAM (Group, 2020)

PRY-CAM PORTABLE Hardware Specification

		<i>Unidad de Adquisición</i>
<i>Frecuencia de muestreo</i>		<i>200 MS/s</i>
<i>Resolución / Ancho de banda</i>		<i>8 bit / 100MHz</i>
<i>Ganancia / Trigger</i>		<i>Desde 0dB hasta 40Db / Digital</i>
<i>Resolución de sincronización</i>		<i>16 bit</i>
<i>Canal de DP</i>		<i>50Ω, 1.5V_{pp}</i>
<i>Canal de sincronización</i>		<i>1MΩ, 5V</i>
<i>Procesador</i>		<i>Capacidad de filtrado en tiempo real, ultra-preciso (resolución 5 ns)</i>
<i>Taza de repetición (forma de pulso de onda completa)</i>		<i>100.000 pps (aproximadamente 8.000 pps sobre Wi-Fi)</i>
<i>Taza de repetición (solo patrón)</i>		<i>Por encima de 50.000 pps</i>
<i>Interfaces</i>		<i>Wi-Fi 802, 11 b/g, data rate > 54Mbps</i>
<i>Sincronizador externo</i>		<i>Interfaz Wireless RF @868MHz/915MHz (opcional)</i>
<i>Modo de trabajo</i>		<i>Local, remoto y monitoreo</i>
<i>Fuente de alimentación</i>		<i>12 V, 200 mA</i>
<i>Batería/ Duración de batería</i>		<i>Li-Po 7.4 V, 2200 mAh / Aproximadamente 5 horas</i>
<i>Peso</i>		<i>Aproximadamente 500gr</i>
<i>Temperatura de trabajo</i>		<i>Desde -25 °C hasta 70 °C</i>
<i>Dimensiones</i>		<i>180 mm x 85 mm x 127 mm</i>
<i>Material de empaque (Case)</i>		<i>Fibra de carbón rugoso con protección IP64</i>

Tabla 15 Especificaciones de Hardware. Unidad de adquisición PRY-CAM (Group, 2020)

Las tablas 13 y 14 indican que el sensor para la toma de muestras de descargas parciales permite miles de adquisiciones de datos por segundo con una tasa de muestreo de hasta 200 MS/s, el sistema mide y almacena la forma de onda de cada señal individual medida y, por lo tanto, permite la separación de diferentes fuentes de señal basadas en una técnica de análisis de forma de onda conocida como clasificación de mapas. En consecuencia, el sensor de descargas parciales puede detectar descargas por debajo del nivel de ruido ambiente.

5.1. Atenuación de las Descargas Parciales en función de la Longitud del Recorrido

En estudios como el presentado por Rodrigo Mor (Mor, 2012) se indican que las descargas parciales se pueden detectar en una longitud de hasta 5 km con atenuaciones de los pulsos como el que se presenta en la tabla 16:

<i>LONGITUD DEL CABLE (m)</i>	<i>CARGA (%)</i>	<i>mV PICO (%)</i>
0	100	100
1000	93	27
2000	88	13
3000	76	8
4000	64	5
5000	42	3

Tabla 16 Atenuación de un pulso de descargas parciales en función de la longitud del recorrido (Mor, 2012)

Sin embargo, el fabricante del sensor electromagnético implementado en esta tesis, indica que la distancia máxima de detección de descargas parciales con el sensor electromagnético PRY-

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

CAM es de hasta 400 metros (Group, 2020), por lo que, para el desarrollo de esta tesis, no se realizarán mediciones mayores a la longitud indicada por los fabricantes.

5.2. Criterios de aceptación de las Descargas Parciales

Considerando la magnitud de la señal de Descargas Parciales, es posible hacer una clasificación inicial de la condición del equipo, considerando los intervalos mostrados en la tabla 17 presentada por González Cardoso (Cardoso, 2017):

<i>CLASIFICACIÓN DEL EQUIPO</i>	<i>MAGNITUD DE LA SEÑAL</i>
<i>Norma</i>	<i>20 – 200 mV</i>
<i>Norma con desviaciones</i>	<i>200 – 500 mV</i>
<i>Norma con desviaciones significativas</i>	<i>500-1000 mV</i>
<i>Fuera de norma</i>	<i>1000-5000 mV</i>
<i>Grave</i>	<i>>5000 mV</i>

Tabla 17 Clasificación inicial de la condición de un equipo (**Cardoso, 2017**)

La tabla 17 presenta cinco intervalos de clasificación de las magnitudes de descargas parciales que se pueden presentar en un activo, estos cinco criterios de evaluación se pueden presentar como Norma, Norma con desviaciones, Norma con desviaciones significativas, Fuera de norma y Grave.

Debido a que los experimentos se realizaron en generadores eléctricos, cables de potencia y transformadores de potencia de una central de generación de energía, no fue posible desarrollar

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

un diseño de experimentos aplicable a esta situación, pues cada experimento se realizó

considerando la disponibilidad a carga nominal de los activos analizados.

6. Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos durante el desarrollo de esta tesis organizados por objetivos específicos.

6.1. Ubicación del sensor para mejorar la precisión en la detección de descargas parciales

Con el fin de desarrollar el objetivo específico número uno de este trabajo: Establecer la ubicación del sensor que permita detectar con mayor precisión el origen de las descargas parciales en generadores eléctricos, transformadores de potencia y cables de potencia, se realizaron como ejercicio inicial, mediciones en el transformador de potencia de la Central Térmica N.1., el cual cuenta con las siguientes características:

- Transformador de potencia trifásico con potencia de 50MVA
 - ✓ Potencia: 50 MVA
 - ✓ Frecuencia: 60Hz
 - ✓ Tensión de alta: 115kV
 - ✓ Tensión de baja: 13,2kV

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

En el transformador se realizaron pruebas de cromatografía de los gases generados en el aceite aislante, pruebas de detección acústica de descargas parciales y pruebas con el sensor electromagnético usado para el desarrollo de esta tesis. El sensor electromagnético se usó en nueve posiciones diferentes en cada uno de los cuatro lados de la cuba del transformador, de la forma en la que lo muestran los puntos rojos en la figura 25:

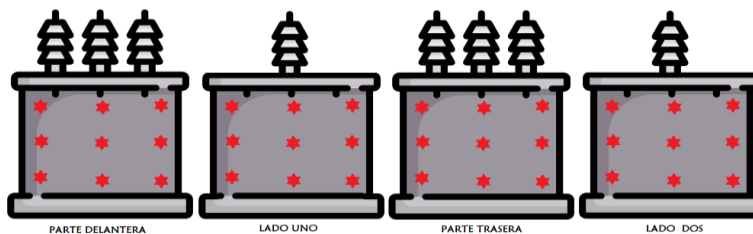


Figura 25 ubicación del sensor de descargas parciales en el transformador de potencia

La ubicación del sensor permitió determinar que su uso en la cuba del transformador afecta la medida de tal manera que el ruido perturba completamente su lectura impidiendo tomarla. Luego de evidenciar esta novedad, se procedió a instalar el sensor de descargas parciales y la unidad de sincronización externa en los cables de entrada del transformador de potencia, siendo esta medida una medida limpia y acorde con los resultados tanto de las descargas parciales tomadas con el método acústico como las determinadas con el análisis del pentágono de Duval, ambas mostradas en el numeral 8.1 del anexo.

La medición de descargas parciales con el sensor electromagnético fue realizada en cada una de las fases de los cables de entrada del transformador de potencia, mostrando como resultado la tabla 18, que muestra actividad de descargas parciales tipo Gap en la fase R, las cuales se

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

conocen por identificar diferencia de potencial entre dos elementos conductores, mientras que las fases S y T del transformador de potencia de la Central Térmica N.1. indican ruido, esto ocurre cuando las descargas parciales son de baja magnitud y el equipo de pruebas no permite detectarlas a lo largo del ciclo de corriente alterna. Estas conclusiones se establecieron de acuerdo con el método de análisis establecido por IRIS (IRIS Power, 2013)

DESCARGAS PARCIALES EN TRANSFORMADOR DE POTENCIA

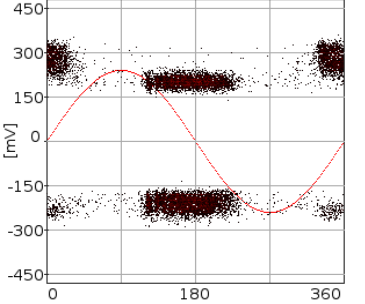
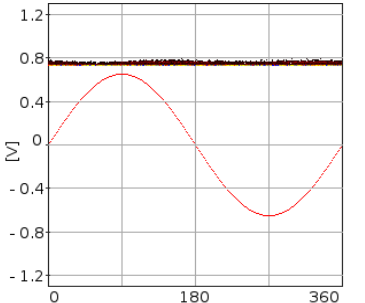
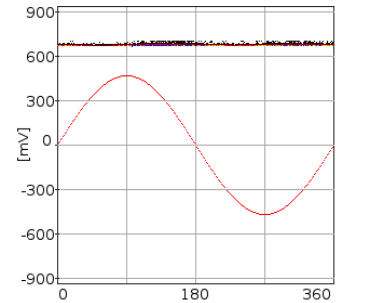
<i>Diagrama de Fase Resuelta</i>	<i>Conclusión</i>
	<p><i>la ubicación y la forma en la que se muestran las descargas parciales de la fase R, permite inferir que posiblemente estas descargas son tipo Gap</i></p>
	<p><i>El diagrama de descargas parciales indicada en la figura permite visualizar en la fase S “clústeres de banda ancha” o, ruido.</i></p>
	<p><i>El diagrama de descargas parciales indicada en la figura permite visualizar en la fase T “clústeres de banda ancha” o, ruido.</i></p>

Tabla 18 Medición de descargas parciales en transformador de potencia con sensor electromagnético

La comparación de los ejercicios de lectura de las descargas parciales por el método de Pentágono de Duval a partir de los resultados de la cromatografía de gases, el método de descargas parciales acústicas (Anexos 8.1.1 y 8.1.2) y el método electromagnético se presentan en la tabla 19:

<i>MÉTODO DE DETECCIÓN DE DESCARGAS PARCIALES</i>	<i>RESULTADO OBTENIDO</i>
<i>Electromagnético</i>	<i>Se evidencian descargas parciales</i>
<i>Acústico (Anexo 8.1.2.)</i>	<i>Se evidencian descargas parciales</i>
<i>Cromatografía de gases (Anexo 8.1.1.)</i>	<i>No se evidencian descargas parciales</i>

Tabla 19 Comparación de métodos de detección de descargas parciales usados en la Central Térmica N.1

La tabla 19 permite observar que los métodos acústico y electromagnético usados para medir las descargas parciales en el transformador de potencia, muestran la presencia de descargas parciales, encontrando por un método la ubicación de las descargas parciales y por otro método el posible tipo de falla en el transformador de potencia, mientras tanto, el análisis de cromatográfico de los gases generados en el aceite aislante del transformador de potencia no muestra actividad de descargas parciales.

Considerando que la actividad anterior puede desarrollarse de la misma manera en cables de potencia y generadores eléctricos, se puede concluir que el primer ejercicio realizado de toma de muestras de descargas parciales resuelve el primer objetivo específico de este documento:

“Establecer la ubicación del sensor que permita detectar con mayor precisión el origen de las

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

descargas parciales en generadores eléctricos, transformadores de potencia y cables de potencia”, encontrando que la ubicación óptima del sensor que cumpla con las distancias de seguridad en trabajos energizados se da en los cables de salida de los transformadores de potencia, barrajes de salida de los generadores eléctricos y en el terminales del inicio y el final del cable de potencia, siempre y cuando su longitud no supere los 400 metros. Para fines de esta actividad se decidió incluir los empalmes de los cables de potencia, ya que esta unión genera propensión a fallas en los cables de potencia.

6.2. Relación de las técnicas actuales de detección de descargas parciales en generadores eléctricos, transformadores de potencia y cables de potencia con la técnica de detección electromagnética

Para dar solución al segundo objetivo específico de esta tesis: “Relacionar las técnicas actuales de detección de descargas parciales en generadores eléctricos, transformadores de potencia y cables de potencia, con la técnica de detección electromagnética” se tomaron mediciones de descargas parciales en el punto más cercano a los barrajes de salida de los generadores eléctricos, el punto más cercano a los cables de salida de los transformadores de potencia y el punto más cercano a las conexiones de los cables de potencia con los transformadores de potencia y la subestación eléctrica, considerando el punto más cercano como aquel que permita un acercamiento cumpliendo las distancias de eléctricas de seguridad.

6.2.1. Medición de descargas parciales con sensor electromagnético en la central hidroeléctrica N.1.

En la central hidroeléctrica N.1. se realizó la medición de las descargas parciales con el sensor electromagnético en los generadores, transformadores de potencia y cables de potencia y a su vez se realizó la medición con los métodos tradicionales que se manejan en esta central y son presentados en el Anexo 8.2

6.2.1.1. Descargas parciales en generadores eléctricos

En los generadores eléctricos se tomaron mediciones de descargas parciales con el sensor electromagnético, mediciones de descargas parciales con los acopladores capacitivos que se encuentran instalados en los generadores del que se puede ver su análisis en el anexo 8.2.2. y por último se tomó la información de la variación histórica del TIP-UP, el cual se muestra en el anexo 8.2.3.

A continuación, en la tabla 20 se muestra el resultado de la medición de las descargas parciales por el método electromagnético del generador 1 de la central hidroeléctrica N.1.:

GENERADOR UNIDAD 1

<i>FASE</i>	<i>DIAGRAMA DE FASE RESUELTA</i>	<i>CONCLUSIÓN</i>
<i>FASE R</i>		<i>Contaminación</i>
<i>FASE S</i>		<i>Contaminación</i>
<i>FASE T</i>		<i>Contaminación</i>

Tabla 20 Resultados de medición de descargas parciales en generador eléctrico U1

GENERADOR UNIDAD 2

<i>FASE</i>	<i>DIAGRAMA DE FASE RESUELTA</i>	<i>CONCLUSIÓN</i>
<i>FASE R</i>		<i>Descargas superficiales y contaminación</i>
<i>FASE S</i>		<i>Descargas superficiales y contaminación</i>
<i>FASE T</i>		<i>Descargas superficiales y contaminación</i>

Tabla 21 Resultados de medición de descargas parciales en generador eléctrico U2

La medición de descargas parciales en el generador de la unidad 1 de la central hidroeléctrica N.1. se muestra en la tabla 20, y esta tabla permite notar la presencia de descargas parciales en las tres fases de este generador, mostrando en las fases R, S y T contaminación de acuerdo con el método de análisis establecido por IRIS (IRIS Power, 2013). En la tabla 21 se presentan los resultados de la evaluación de descargas parciales con la unidad de generación 2, evidenciando actividad de descargas parciales superficiales y contaminación en la fase R, S y T de acuerdo con el método de análisis establecido por IRIS (IRIS Power, 2013).

La tabla 22 es un resumen de los resultados encontrados en el análisis de descargas parciales por las diferentes metodologías de detección de descargas parciales aplicadas en los generadores de la Central Hidroeléctrica N.1., cumpliendo con ello la primera parte del segundo objetivo específico de esta tesis: “Relacionar las técnicas actuales de detección de descargas parciales en **generadores eléctricos...** con la técnica de detección electromagnética”.

<i>MÉTODO DE DETECCIÓN DE DESCARGAS PARCIALES</i>	<i>RESULTADO OBTENIDO</i>
<i>Sensor electromagnético</i>	<i>Se evidencian descargas parciales</i>
<i>Acopladores Capacitivos (Anexo 8.2.2.)</i>	<i>Se evidencian descargas parciales</i>
<i>TIP-UP (Anexo 8.2.3.)</i>	<i>No se evidencian descargas parciales</i>

Tabla 22 Comparación de métodos de detección de descargas parciales usados en los generadores eléctricos de la central hidroeléctrica N.1.

Los resultados presentados en la tabla 22 permiten identificar que la información tomada con el sensor electromagnético es coherente con la información tomada por medio de los acopladores

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

capacitivos instalados en los estatores de las unidades de generación 1 y 2, mientras que el comportamiento del TIP-UP no permite identificar actividad de descargas parciales.

6.2.1.2. Descargas parciales en transformadores de potencia

La determinación de las posibles descargas parciales existentes en el devanado de los transformadores de potencia de las unidades 1 y 2 de la Central Hidroeléctrica N.1., se realiza por medio de la comparación de los resultados obtenidos con el sensor electromagnético y el resultado del análisis cromatográfico de los gases generados durante la operación de los transformadores.

Las tablas 23 y 24 muestran el resultado de la medición de las descargas parciales por el método electromagnético en los transformadores de potencia de la Central Hidroeléctrica N.1., para que junto con el resultado del análisis de cromatografía de aceites por el Pentágono de Duval mostrado en el anexo 8.2.1. permitan dar cumplimiento a la segunda parte del segundo objetivo específico de esta tesis “Relacionar las técnicas actuales de detección de descargas parciales en **...transformadores de potencia...** con la técnica de detección electromagnética”.

TRANSFORMADOR DE POTENCIA UNIDAD 1

<i>FASE</i>	<i>DIAGRAMA DE FASE RESUELTA</i>	<i>CONCLUSIÓN</i>
<i>FASE R</i>		<i>Clusters de banda ancha</i>
<i>FASE S</i>		<i>Clusters de banda ancha</i>
<i>FASE T</i>		<i>Clusters de banda ancha</i>

Tabla 23 Resultados de medición de descargas parciales en transformador de potencia U1

TRANSFORMADOR DE POTENCIA UNIDAD 2

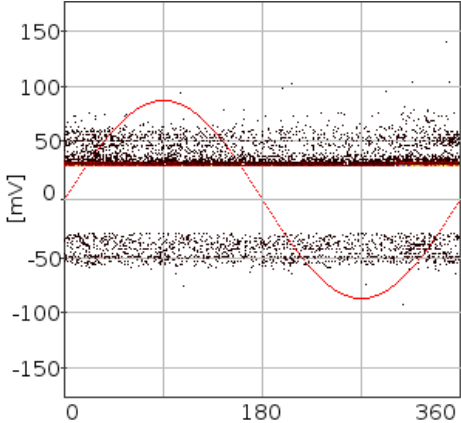
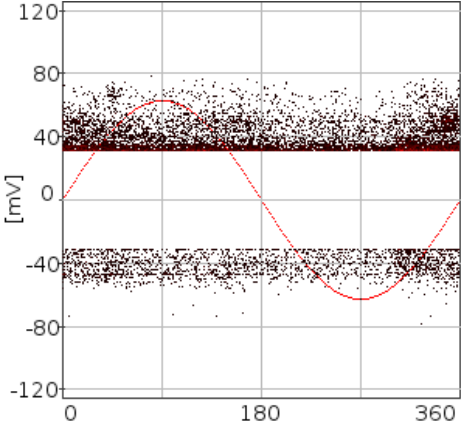
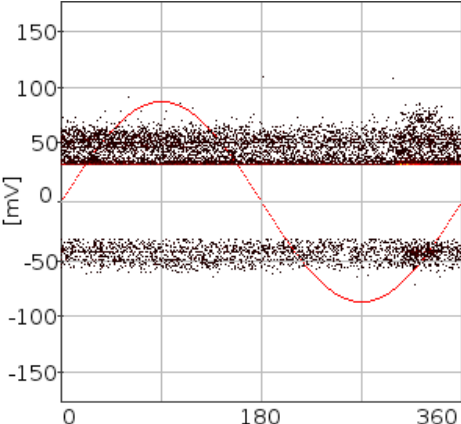
<i>FASE</i>	<i>DIAGRAMA DE FASE RESUELTA</i>	<i>CONCLUSIÓN</i>
<i>FASE R</i>		<i>Clusters de banda ancha</i>
<i>FASE S</i>		<i>Clusters de banda ancha</i>
<i>FASE T</i>		<i>Clusters de banda ancha</i>

Tabla 24 Resultados de medición de descargas parciales en transformador de potencia U2

Los resultados presentados en la tabla 23 permiten notar que en las tres fases de los transformadores de potencia de las unidades 1 y 2 no se detecta actividad de descargas parciales dentro de los rangos de lectura del sensor, lo cual ocurre cuando la magnitud de las descargas parciales es muy pequeña, por lo que el sensor lo interpreta como ruido o “clusters de banda ancha” de acuerdo con el método de análisis establecido por IRIS (IRIS Power, 2013). A continuación, en la tabla 25 se muestra el resultado de la comparación de los métodos de detección de descargas parciales en transformadores de potencia implementados en la Central Hidroeléctrica N.1.:

<i>MÉTODO DE DETECCIÓN DE DESCARGAS PARCIALES</i>	<i>RESULTADO OBTENIDO</i>
<i>Electromagnético</i>	<i>No se evidencian descargas parciales</i>
<i>Cromatografía de gases (Anexo 8.2.1.)</i>	<i>No se evidencian descargas parciales</i>

Tabla 25 Comparación de métodos de detección de descargas parciales usados en los transformadores de potencia de la central hidroeléctrica N.1.

La tabla 25 que contiene el resumen de los resultados de la medición de descargas parciales en los transformadores de potencia indican la coherencia entre los métodos de detección aplicados, permitiendo notar en cada uno de ellos la no presencia de descargas parciales detectables por los métodos implementados.

6.2.1.3. Descargas parciales en cables de potencia

Actualmente el seguimiento del estado del cable de potencia en cuanto a la calidad del aislamiento se realiza por medio de la toma de información de descargas parciales en los cables de potencia de las unidades 1 y 2 de la Central Hidroeléctrica N.1. con el sensor electromagnético, equipo que fue diseñado para el mantenimiento predictivo de cables de potencia, por lo que para dar solución a este numeral y a la tercera parte del objetivo específico número dos de esta tesis “Relacionar las técnicas actuales de detección de descargas parciales en **...cables de potencia** con la técnica de detección electromagnética” no es necesario generar comparación con otro método de medición. Sin embargo, para complementar la inspección de los cables de potencia, se procede a comparar estos resultados con la termografía realizada a los cables de forma simultánea cuyos análisis permite encontrar puntos calientes que lleven a posibles fallas o a sobrecargas en los cable de potencia. Los resultados de las termografías en los cables de potencia se consignan en el anexo 8.2.4.

Las tablas 26 y 27 presentan las descargas parciales tomadas con el sensor electromagnético en los empalmes de los cables de potencia de las fases R, S y T de las unidades 1 y 2, permitiendo identificar en ellos clústeres de banda ancha o actividad de descargas parciales no detectables por el sensor dado a su baja magnitud, esta interpretación se realiza de acuerdo con de con el método de análisis establecido por IRIS (IRIS Power, 2013).

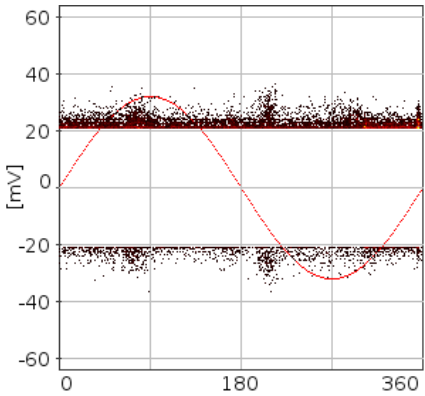
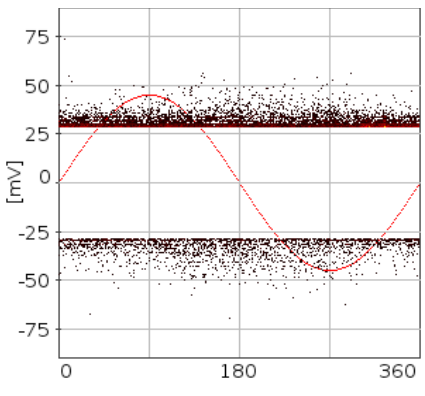
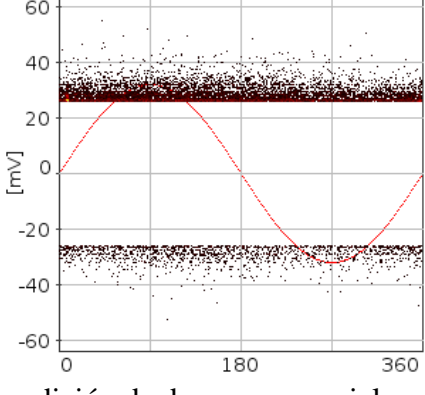
CABLE DE POTENCIA UNIDAD 1 - EMPALMES		
FASE	DIAGRAMA DE FASE RESUELTA	CONCLUSIÓN
FASE R		<i>Clusters de banda ancha</i>
FASE S		<i>Clusters de banda ancha</i>
FASE T		<i>Clusters de banda ancha</i>

Tabla 26 Resultados de medición de descargas parciales en los empalmes de los cables de potencia U1

CABLE DE POTENCIA UNIDAD 2 – EMPALME

<i>FASE</i>	<i>DIAGRAMA DE FASE RESUELTA</i>	<i>CONCLUSIÓN</i>
<i>FASE R</i>		<i>Clusters de banda ancha</i>
<i>FASE S</i>		<i>Clusters de banda ancha</i>
<i>FASE T</i>		<i>Clusters de banda ancha</i>

Tabla 27 Resultados de medición de descargas parciales en los empalmes de los cables de potencia U2

La termografía de los cables de potencia de los empalmes de las tres fases de la unidad 1 y 2 son presentados en la tabla 48 del anexo 8.2.4. y la comparación de este método de visualización de anomalías y la medición de descargas parciales en los empalmes de los cables de potencia, se presenta en la tabla 28:

<i>MÉTODO DE DETECCIÓN DE DESCARGAS PARCIALES</i>	<i>RESULTADO OBTENIDO</i>
<i>Electromagnético</i>	<i>No se evidencian descargas parciales</i>
<i>Termografía</i>	<i>No se evidencian posibles anomalías que impliquen fallas en los cables de potencia</i>

Tabla 28 Comparación de métodos de detección de descargas parciales usados en los empalmes de los cables de potencia de la central hidroeléctrica N.1.

La tabla 28 permite identificar coherencia entre los resultados obtenidos en las imágenes termográficas de los empalmes de cada una de las fases del cable, donde no se evidencian puntos calientes, sobrecargas o fisuras que permitan inducir a una posible falla del cable y el método de detección de descargas electromagnética, que muestra valores no detectables de descargas parciales.

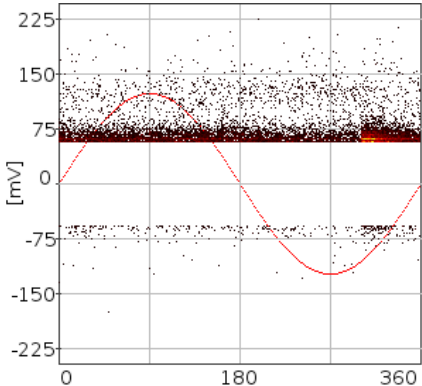
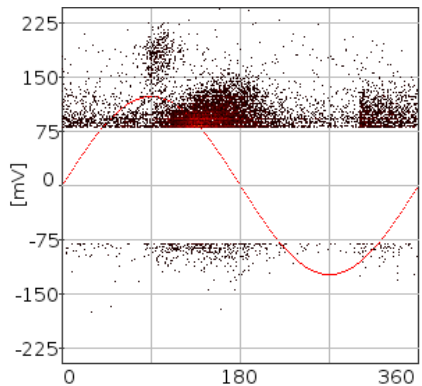
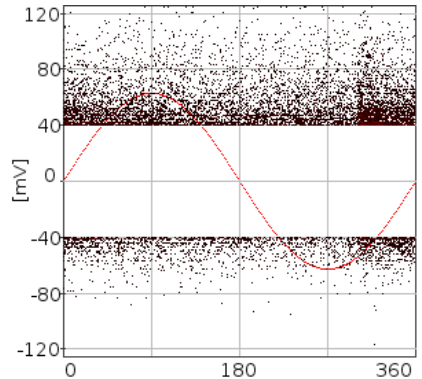
CABLE DE POTENCIA UNIDAD 1 – LLEGADA A SUBESTACIÓN		
FASE	DIAGRAMA DE FASE RESUELTA	CONCLUSIÓN
<i>FASE R</i>		<i>Clusters de banda ancha</i>
<i>FASE S</i>		<i>Descargas superficiales</i>
<i>FASE T</i>		<i>Clusters de banda ancha</i>

Tabla 29 Resultados de medición de descargas parciales en los cables de potencia U1

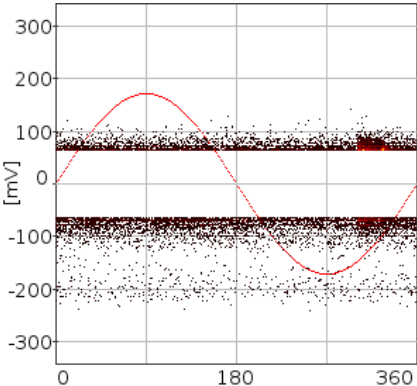
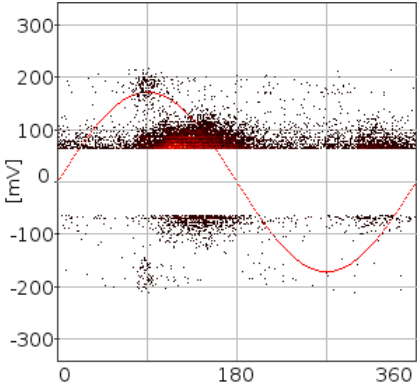
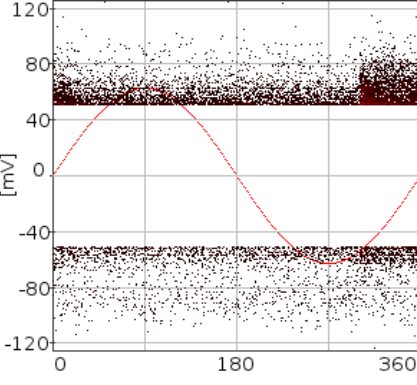
CABLE DE POTENCIA UNIDAD 2 – LLEGADA A SUBESTACIÓN		
FASE	DIAGRAMA DE FASE RESUELTA	CONCLUSIÓN
<i>FASE R</i>		<i>Clusters de banda ancha</i>
<i>FASE S</i>		<i>Descargas superficiales</i>
<i>FASE T</i>		<i>Clusters de banda ancha</i>

Tabla 30 Resultados de medición de descargas parciales en cables de potencia U2

Las tablas 29 y 30 permiten notar que las fases S de los cables de potencia de las unidades 1 y 2 muestran descargas parciales superficiales en magnitudes de hasta 225mV que según lo mencionado en la tabla 17 indican que estas descargas se encuentran dentro de la norma, pero con desviaciones. El valor de las descargas parciales no se considera crítico, por lo cual la recomendación que se sugiere es realizar seguimiento del comportamiento y la tasa de cambio en el tiempo. Las fases R y T de los cables de potencia de las unidades 1 y 2 muestran descargas parciales de magnitudes bajas y no detectables por el sensor electromagnético.

La termografía de los cables de potencia de las terminales de las tres fases de la unidad 1 y 2 son presentados en la tabla 47 del anexo 8.2.4. y la comparación de este método de visualización de anomalías y la medición de descargas parciales en los empalmes de los cables de potencia, se presenta en la tabla 31:

MÉTODO DE DETECCIÓN DE DESCARGAS PARCIALES	RESULTADO OBTENIDO
<i>Electromagnético</i>	<i>No se evidencian descargas parciales en las fases R y T Se evidencian descargas parciales superficiales de baja magnitud en las fases S</i>
<i>Termografía</i>	<i>No se evidencian posibles anomalías que impliquen fallas en los cables de potencia</i>

Tabla 31 Comparación de métodos de detección de descargas parciales usados en los cables de potencia de la central hidroeléctrica N.1.

La tabla 31 permite identificar coherencia entre los resultados obtenidos en las imágenes termográficas tomadas a los terminales de las fases R y T del cable, donde no se evidencian puntos calientes, sobrecargas o fisuras que permitan inducir a una posible falla del cable comparado con la medición de descargas parciales con el sensor electromagnético, sin embargo, este mismo resultado de la termografía fue obtenido para la fase S donde el método de detección de descargas electromagnética, que muestra posible actividad de descargas superficiales de baja magnitud en el cable de potencia, permite establecer una relación de resultados esperados con una ligera desviación. Es importante tener en cuenta que la termografía es un método de análisis térmico, mientras que la lectura de descargas parciales se realiza de acuerdo con el comportamiento electromagnético del activo.

El desarrollo de los numerales 5.3.1.1. “Detección de descargas parciales en generadores eléctricos”, 5.3.1.2. “Detección de descargas parciales en transformadores de potencia” y 5.3.1.3. “Detección de descargas parciales en cables de potencia” ilustrados en este capítulo, dan cumplimiento al segundo objetivo específico de esta tesis “Relacionar las técnicas actuales de detección de descargas parciales en generadores eléctricos, transformadores de potencia y cables de potencia, con la técnica de detección electromagnética”.

6.3. Análisis de resultados

En resumen, la evaluación de las descargas parciales en los activos de la Central Hidroeléctrica N.1., permite notar que la magnitud de las descargas parciales detectadas con el sensor electromagnético no genera valores de alarma que sugieran intervenciones próximas para la investigación de posibles fallas en progreso en los generadores eléctricos, transformadores de potencia y cables de potencia. La comparación de estos resultados con la lectura de las descargas parciales realizada por los métodos tradicionales específicos para cada activo, indica:

- Generadores eléctricos: la posición del sensor electromagnético afecta la magnitud de las descargas parciales mostrando estas hasta cinco veces por debajo del valor obtenido con los acopladores capacitivos, lo que implica la necesidad de reducir sus márgenes de clasificación del estado de los activos e implementar nuevas escalas de clasificación para ellos. En los generadores de la Central Hidroeléctrica N.1. se observa la necesidad de aumentar la frecuencia de medición de descargas parciales para estudiar su comportamiento a través del tiempo y determinar si la tasa de cambio indica aumento de la actividad de descargas, es decir, degradación del aislamiento, o si la magnitud de las descargas parciales es usual en los generadores eléctricos analizados.

A continuación, en la tabla 32 se presenta la comparación en la magnitud de las descargas parciales tomadas con los acopladores capacitivos y con el sensor electromagnético:

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

<i>UNIDAD</i>	<i>FASE</i>	<i>MAGNITUD ACOPLADORES CAPACITIVOS</i>	<i>MAGNITUD CON SENSOR ELECTROMAGNÉTICO</i>	<i>VARIACIÓN</i>
1	<i>Fase R</i>	750 mV	150 mV	5 veces
	<i>Fase S</i>	800 mV	150 mV	5.3. veces
	<i>Fase T</i>	500 mV	80 mV	6.2. veces
2	<i>Fase R</i>	1500 mV	120 mV	12 veces
	<i>Fase S</i>	600 mV	100 mV	6 veces
	<i>Fase T</i>	550 mV	120 mV	4.58 veces

Tabla 32 Diferencia de magnitud de las descargas parciales tomadas por el método electromagnético y los acopladores capacitivos

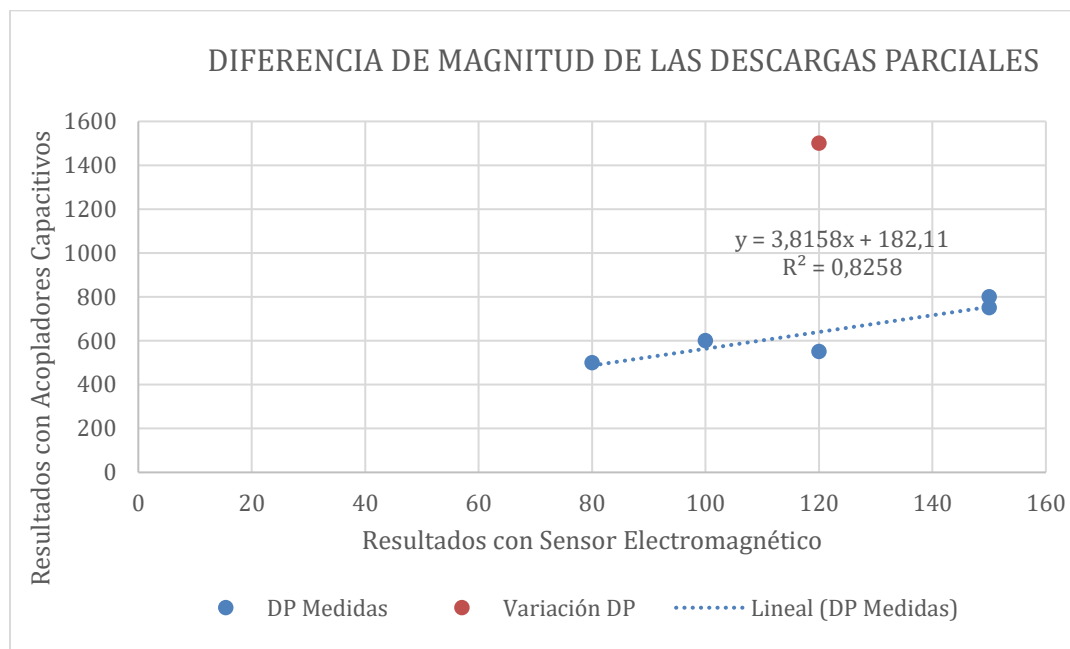


Figura 26 Diferencia de magnitud de las descargas parciales tomadas por el método electromagnético y los acopladores capacitivos

La tabla 32 permite notar que la variación de las descargas parciales en promedio tiene un valor de 5.4 veces de diferencia entre los valores de descargas parciales por medio de acopladores capacitivos y descargas parciales con el sensor electromagnético, mientras que la figura 26 muestra la ecuación que representa el comportamiento de las descargas parciales medidas por los dos métodos de medición empleados. El punto mostrado en la gráfica de color naranja y denominado “Variación DP” hace referencia a la fase R de la unidad 2, donde muestra una magnitud de descargas parciales de 1500 mV determinado con el método de acopladores capacitivos, mientras que con el sensor electromagnético se consiguió un valor de 120mV, es decir, una diferencia un poco mayor a 12 veces entre una medición y la otra. No es posible establecer la razón de la diferencia entre la correlación de estos datos respecto a los datos tomados en las demás fases de las unidades uno y dos, sin embargo, si se considera este punto como un caso aislado, se puede llegar al resultado mostrado en la ecuación 6.1:

$$y = 3.8158x + 182,11 \quad \text{Ec. 6.1}$$

Y un coeficiente de relación de Pearson

$$r^2 = 0,8258 \quad \text{Ec. 6.2}$$

La aplicación de la ecuación 6.1 demuestra que, si las descargas parciales medidas con el sensor electromagnético presentan valores iguales o superiores a 90mV, estos valores

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

se tomarán como valores de descargas con variaciones significativas por fuera de la norma, es decir, que a partir de este valor es necesario realizar seguimiento de las descargas parciales con equipos de detección específicos para el generador

- Transformadores de potencia: los resultados obtenidos luego de la medición de descargas parciales en transformadores de potencia muestran valores no perceptibles de descargas parciales, que al compararlos con los resultados obtenidos por medio del análisis de cromatografía de gases permiten concluir que no se encuentran valores de descargas que requieran mayor análisis y que el seguimiento de las descargas parciales debe ser en la periodicidad establecida para la medición de estos parámetros.
- Cables de potencia: Las descargas parciales en los cables de potencia de la Central Hidroeléctrica N.1. muestran valores no perceptibles en los empalmes, mientras que, en la longitud del cable, se pueden ver descargas superficiales en las fases S de las unidades de generación 1 y 2. Los niveles de descargas parciales detectados no representan valores de alarma que sugieran la intervención de activos, por lo contrario, se recomienda continuar con el monitoreo periódico establecido por los administradores de los activos.

La tabla 33 muestra el resumen de los resultados generales de la evaluación de las descargas parciales en los generadores eléctricos, transformadores de potencia y cables de potencia de la Central Hidroeléctrica N.1.:

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

CENTRAL HIDROELÉCTRICA N.1.

ACTIVO	COMPONENTE	FASE	RESULTADO	RECOMENDACIÓN
<i>Generador Eléctrico U1</i>	<i>Devanado del Estator</i>	R	<i>Se evidencia actividad de DP que requiere investigación</i>	<i>Aumento de la periodicidad de medición</i>
	<i>Devanado del Estator</i>	S	<i>Se evidencia actividad de DP que requiere investigación</i>	<i>Aumento de la periodicidad de medición</i>
	<i>Devanado del Estator</i>	T	<i>Se evidencia actividad de DP que requiere investigación</i>	<i>Aumento de la periodicidad de medición</i>
<i>Generador Eléctrico U2</i>	<i>Devanado del Estator</i>	R	<i>Se evidencia actividad de DP que requiere investigación</i>	<i>Aumento de la periodicidad de medición</i>
	<i>Devanado del Estator</i>	S	<i>Se evidencia actividad de DP que requiere investigación</i>	<i>Aumento de la periodicidad de medición</i>
	<i>Devanado del Estator</i>	T	<i>Se evidencia actividad de DP que requiere investigación</i>	<i>Aumento de la periodicidad de medición</i>
<i>Transformador de Potencia U1</i>	<i>Devanado</i>	R	<i>No se evidencia actividad crítica de DP</i>	<i>Monitoreo Periódico</i>
	<i>Devanado</i>	S	<i>No se evidencia actividad crítica de DP</i>	<i>Monitoreo Periódico</i>
	<i>Devanado</i>	T	<i>No se evidencia actividad crítica de DP</i>	<i>Monitoreo Periódico</i>
<i>Transformador de Potencia U2</i>	<i>Devanado</i>	R	<i>No se evidencia actividad crítica de DP</i>	<i>Monitoreo Periódico</i>
	<i>Devanado</i>	S	<i>No se evidencia actividad crítica de DP</i>	<i>Monitoreo Periódico</i>
	<i>Devanado.</i>	T	<i>No se evidencia actividad crítica de DP</i>	<i>Monitoreo Periódico</i>
<i>Cable de Potencia U1</i>	<i>Empalmes</i>	R	<i>No se evidencia actividad crítica de DP</i>	<i>Monitoreo Periódico</i>
	<i>Empalmes</i>	S	<i>No se evidencia actividad crítica de DP</i>	<i>Monitoreo Periódico</i>
	<i>Empalmes</i>	T	<i>No se evidencia actividad crítica de DP</i>	<i>Monitoreo Periódico</i>
<i>Cable de Potencia U2</i>	<i>Terminal - Llegada a Subestación</i>	R	<i>No se evidencia actividad crítica de DP</i>	<i>Monitoreo Periódico</i>
	<i>Terminal - Llegada a Subestación</i>	S	<i>Descargas parciales superficiales</i>	<i>Monitoreo Periódico</i>
	<i>Terminal - Llegada a Subestación</i>	T	<i>No se evidencia actividad crítica de DP</i>	<i>Monitoreo Periódico</i>

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

<i>ACTIVO</i>	<i>COMPONENTE</i>	<i>FASE</i>	<i>RESULTADO</i>	<i>RECOMENDACIÓN</i>
<i>Cable de Potencia U2</i>	<i>Empalmes</i>	<i>R</i>	<i>No se evidencia actividad crítica de DP</i>	<i>Monitoreo Periódico</i>
	<i>Empalmes</i>	<i>S</i>	<i>No se evidencia actividad crítica de DP</i>	<i>Monitoreo Periódico</i>
	<i>Empalmes</i>	<i>T</i>	<i>No se evidencia actividad crítica de DP</i>	<i>Monitoreo Periódico</i>
	<i>Terminal - Llegada a Subestación</i>	<i>R</i>	<i>No se evidencia actividad crítica de DP</i>	<i>Monitoreo Periódico</i>
	<i>Terminal - Llegada a Subestación</i>	<i>S</i>	<i>Descargas parciales superficiales</i>	<i>Monitoreo Periódico</i>
	<i>Terminal - Llegada a Subestación</i>	<i>T</i>	<i>No se evidencia actividad crítica de DP</i>	<i>Monitoreo Periódico</i>

Tabla 33 Resumen de resultados de medición de descargas parciales en la C.H. N.1.

6.4. Protocolo para la medición de las descargas parciales en generadores eléctricos, transformadores de potencia y cables de potencia a partir de la respuesta electromagnética

Luego de identificar la viabilidad del uso del sensor de electromagnético para la determinación de las descargas parciales en generadores eléctricos, transformadores de potencia y cables de potencia, es posible establecer un protocolo que brinde los parámetros básicos para la ejecución periódica del mantenimiento preventivo de los activos que en este documento se denominaron activos críticos de generación de energía. A continuación, se muestra el protocolo desarrollado para dar cumplimiento al tercer objetivo específico de esta tesis: “Definir un protocolo para la medición de descargas parciales replicable a los activos críticos de generación a partir de la respuesta electromagnética”.

Instructivo para Medición de Descargas Parciales

I-1. CONTEXTO

I-1.1. Objetivo

Describir el procedimiento para la medición de descargas parciales con el sensor electromagnético PRY-CAM en activos críticos de generación de energía

I-1.2 Alcance

La medida de descargas parciales indicada en este documento aplica para los generadores eléctricos, cables de potencia y transformadores de potencia de centrales de generación térmica e hidráulica.

I-1.3. Definiciones

- Descargas Parciales: son pequeños arcos eléctricos que ocurren cuando existen pequeñas cavidades dentro del aislamiento de activos que operan con alta tensión en corriente alterna.
- Sensor electromagnético: sensores que efectúan una conmutación electrónica mediante la presencia de un campo magnético externo, próximo y dentro del área sensible (WEG, Recuperado en 2021)
Nota 1: en este documento se entenderá sensor electromagnético como el equipo de detección de descargas parciales, PRY-CAM
- Activos Críticos: activos que tienen el potencial de impactar significativamente el logro de los objetivos de la organización (Standardization, 2014).
Nota 1: Los activos pueden ser críticos respecto a seguridad, medioambiente o desempeño y pueden estar relacionados con requerimientos legales, regulatorios o estatutarios.
Nota 2: Los activos críticos también pueden referirse a los activos necesarios para proveer servicios a clientes críticos.
Nota 3: Los sistemas de activos también pueden ser definidos como críticos de manera similar a los activos individuales.
Nota 4: en este documento se entenderán como activos críticos los generadores eléctricos, transformadores de potencia y cables de potencia

I-2. DESARROLLO

I-2.1. Generalidades

El monitoreo de las descargas parciales en activos como generadores, transformadores de potencia y cables de potencia, brindan herramientas para establecer la condición del aislamiento y programar acciones oportunas de mantenimientos preventivos, correctivos y reposición de activos. Con el fin de conocer las tendencias en el comportamiento de las descargas parciales en los activos, se recomienda que al menos se maneje una frecuencia de medición semestral.

Para la ejecución de la toma de mediciones de descargas parciales, es necesario planear con los administradores del activo dicho mantenimiento, de forma que se garantice que los equipos a inspeccionar estarán en operación en carga nominal. Procure que las inspecciones se realicen bajo las mismas condiciones de carga y temperatura del activo.

La medición de descargas parciales se realiza con un sensor electromagnético portable que consta de una cámara y un equipo para la sincronización de fase:



Ilustración 1 Sensor portable de descargas parciales

I-2.2. Protocolo de Medición de Descargas Parciales

Antes de realizar la medición de descargas parciales, verifique:

1. El activo debe estar energizado a carga nominal
2. Tome los valores de potencia activa, potencia reactiva, voltaje y temperatura del activo que será inspeccionado

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

3. Tome los valores de temperatura ambiente y humedad relativa del área donde se encuentra el activo.
4. Inspeccione visualmente el activo buscando:
 - señales de deterioro,
 - actividad corona,
 - ruidos, olores y/o vibraciones inusuales,
 - condiciones ambientales/de infraestructura que afecte o pueda afectar el activo
5. Tome nota y reporte cualquier deficiencia encontrada
6. Si la inspección revela la necesidad de un mantenimiento correctivo, tome nota y reporte que partes han sido afectadas
7. Tenga en cuenta que todas las actividades se realizarán con el equipo energizado en carga nominal

I-2.2.1. Medición de descargas parciales

Para la correcta medición de las descargas parciales en generadores eléctricos, transformadores de potencia y cables de potencia, siga las instrucciones dadas a continuación:

Generadores Eléctricos:

1. Sincronice el sensor con la unidad de sincronización externa en cualquiera de los tres modos:
 - Voltaje - Campo Eléctrico
 - Corriente - Campo Magnético (configuración recomendada)
 - Luz: Fuente de Luz Artificial
2. Ubique la unidad de sincronización externa paralela a cualquiera de las tres fases del generador. Tenga en cuenta la dirección del flujo de corriente y el indicador de campo magnético en la unidad de sincronización (si aplica)
3. Conecte el sensor de descargas parciales en la fase R del barraje de salida del generador eléctrico o el punto más cercano a este.

El numeral tres (3) da cumplimiento al primer objetivo específico: Establecer la ubicación del sensor que permita detectar con mayor precisión el origen de las descargas parciales en generadores eléctricos, transformadores de potencia y cables de potencia
4. En el software de lectura de descargas parciales seleccione el modo de operación "PREMIUM"
5. Tome la lectura de descargas parciales seleccionando la opción "START"
6. Ingrese la descripción del activo al que se le tomó la medida y tome una fotografía que permita observar la ubicación del sensor y el sincronizador externo
7. Para finalizar la medición de descargas parciales, seleccione la opción "LOAD MEASUREMENT" y luego de esto prepare la nueva medición con la opción "CLEAR"
8. Conecte el sensor de descargas parciales en la fase S del barraje de salida del generador eléctrico o el punto más cercano a este y repita los pasos 4 al 7 de este procedimiento

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

9. Conecte el sensor de descargas parciales en la fase T del barraje de salida del generador eléctrico o el punto más cercano a este y repita los pasos 4 al 7 de este procedimiento

Transformadores de Potencia

1. Sincronice el sensor con la unidad de sincronización externa en cualquiera de los tres modos:
 - Voltaje - Campo Eléctrico
 - Corriente - Campo Magnético (configuración recomendada)
 - Luz: Fuente de Luz Artificial
2. Ubique la unidad de sincronización externa paralela a cualquiera de los cables de salida del transformador. Tenga en cuenta la dirección del flujo de corriente y el indicador de campo magnético en la unidad de sincronización (si aplica)
3. Conecte el sensor de descargas parciales en la fase R/H1/X1 de los cables de salida del transformador de potencia o el punto más cercano a este (en caso de ser necesario, use la pértiga).

El numeral tres (3) da cumplimiento al primer objetivo específico: Establecer la ubicación del sensor que permita detectar con mayor precisión el origen de las descargas parciales en generadores eléctricos, transformadores de potencia y cables de potencia

4. En el software de lectura de descargas parciales seleccione el modo de operación "PREMIUM"
5. Tome la lectura de descargas parciales seleccionando la opción "START"
6. Ingrese la descripción del activo al que se le tomó la medida y tome una fotografía que permita observar la ubicación del sensor y el sincronizador externo
7. Para finalizar la medición de descargas parciales, seleccione la opción "LOAD MEASUREMENT" y luego de esto prepare la nueva medición con la opción "CLEAR"
8. Conecte el sensor de descargas parciales en la fase S/H2/X2 de los cables de salida del transformador de potencia o el punto más cercano a este y repita los pasos 4 al 7 de este procedimiento (en caso de ser necesario, use la pértiga).
9. Conecte el sensor de descargas parciales en la fase T/H3/X3 de los cables de salida del transformador de potencia o el punto más cercano a este y repita los pasos 4 al 7 de este procedimiento (en caso de ser necesario, use la pértiga).

Cables de Potencia

1. Sincronice el sensor con la unidad de sincronización externa en cualquiera de los tres modos:
 - Voltaje - Campo Eléctrico
 - Corriente - Campo Magnético (configuración recomendada)
 - Luz: Fuente de Luz Artificial

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

2. Ubique la unidad de sincronización externa paralela a cualquiera de puntos de inicio del cable de potencia. Tenga en cuenta la dirección del flujo de corriente y el indicador de campo magnético en la unidad de sincronización (si aplica)
3. Conecte el sensor de descargas parciales en la fase R del inicio del cable de potencia o el punto más cercano a este
El numeral tres (3) da cumplimiento al primer objetivo específico: Establecer la ubicación del sensor que permita detectar con mayor precisión el origen de las descargas parciales en generadores eléctricos, transformadores de potencia y cables de potencia
4. En el software de lectura de descargas parciales seleccione el modo de operación "PREMIUM"
5. Tome la lectura de descargas parciales seleccionando la opción "START"
6. Ingrese la descripción del activo al que se le tomó la medida y tome una fotografía que permita observar la ubicación del sensor y el sincronizador externo
7. Para finalizar la medición de descargas parciales, seleccione la opción "LOAD MEASUREMENT" y luego de esto prepare la nueva medición con la opción "CLEAR"
8. Conecte el sensor de descargas parciales en la fase S del inicio del cable de potencia o el punto más cercano a este y repita los pasos 4 al 7 de este procedimiento
9. Conecte el sensor de descargas parciales en la fase T del inicio del cable de potencia o el punto más cercano a este y repita los pasos 4 al 7 de este procedimiento
10. Repetir los puntos tres (3) al nueve (9) del paso a paso para los empalmes y final del cable de potencia analizado

I-2.2.2. Contenido del reporte:

Para la realización del reporte de la condición de descargas parciales en generadores eléctricos, transformadores de potencia y cables de potencia, tenga en cuenta:

- Fecha
- Activo que se va a inspeccionar
- Ubicación del activo
- Número de activo
- Responsable de la medición de descargas parciales
- Responsable de la actividad
- Resultado actual de la medición de descargas parciales
- Tendencias del comportamiento de las descargas parciales medidas

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

I-2.2.3. Paso a paso y diagrama de flujo de Detección de descargas parciales por método electromagnético

<i>DETECCIÓN DE DESCARGAS PARCIALES POR MÉTODO ELECTROMAGNÉTICO</i>		
<i>PROCEDIMIENTO DE LA MEDICIÓN</i>		
N° Paso	Descripción	Registro
1	Planear la lectura de descargas parciales con el personal encargado del activo	N.A.
2	Realizar inspección visual al activo en búsqueda de anomalías que puedan afectar la operación del activo	Registro de Mantenimiento
3	Ubique la unidad de sincronización externa paralela a cualquiera de las fases del generador eléctrico, puntos de inicio del cable de potencia, cables de salida del transformador de potencia del activo a inspeccionar	N.A.
4	Ubique el sensor en la fase R del generador eléctrico, fase R/H1/X1 del transformador de potencia o R del inicio/empalme/final del cable de potencia y realice la medición de descargas parciales	N.A.
5	En el software de lectura de descargas parciales seleccione el modo de operación "PREMIUM"	N.A.
	Tome la lectura de descargas parciales seleccionando la opción "START"	
	Ingrese la descripción del activo al que se le tomó la medida y tome una fotografía que permita observar la ubicación del sensor y el sincronizador externo	
	Seleccione la opción "LOAD MEASUREMENT" para guardar la información y luego de esto prepare la nueva medición con la opción "CLEAR"	
6	Repita los pasos cuatro (4) y (5) para las fases S y T del generador eléctrico, fase S/H2/X2 y fase T/H3/X3 del transformador de potencia o S y T del inicio/empalme/final del cable de potencia y realice la medición de descargas parciales	N.A.
7	Realice el reporte preliminar del mantenimiento realizado	Registro de Mantenimiento
8	Haga entrega del activo con el informe previo de la condición	Registro de Mantenimiento
9	Realizar informe de condición de los activos	Informe de Mantenimiento

Tabla 34 paso a paso actividades de detección de descargas parciales por método electromagnético

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

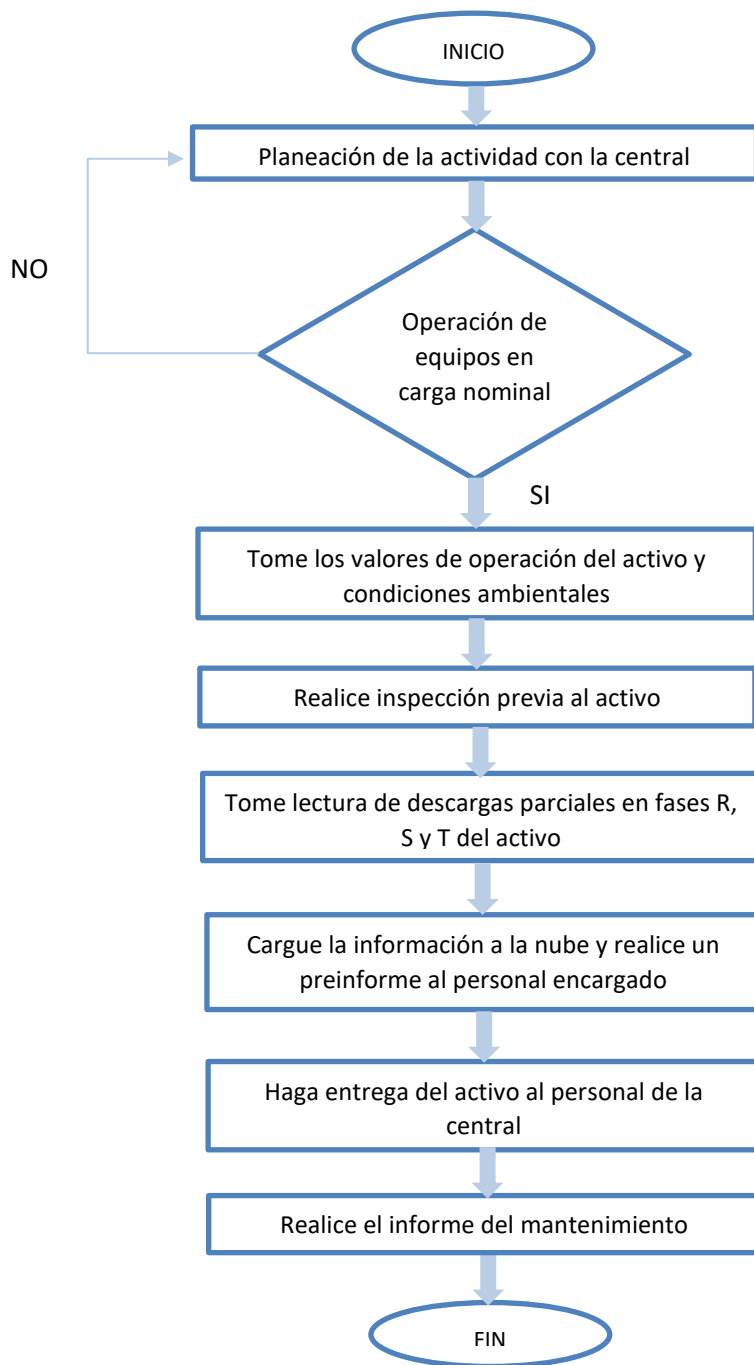


Ilustración 2 Diagrama de flujo procedimiento de medición de descargas parciales por método electromagnético

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

I-2.2.4. Criterios de evaluación para la toma de decisiones

Todos los equipos que operan a partir de 4kV en corriente alterna tienen presencia de descargas parciales, por lo tanto, para su monitoreo es necesario tener en cuenta el comportamiento de las descargas parciales a través del tiempo. Se recomienda tomar las medidas de descargas parciales desde la puesta en servicio de la máquina, sin embargo, cualquier momento es bueno para comenzar a establecer la tendencia del comportamiento de las descargas parciales.

Los siguientes valores mínimos de descargas parciales, son los propuestos para intensificar el seguimiento y/o realizar pruebas con equipos específicos para cada uno de los activos analizados:

Generadores Eléctricos:

Los valores superiores a 90mV se toman como valores de descargas con variaciones significativas por fuera de la norma, es decir, a partir de los 90mV se recomienda:

- Aumentar la frecuencia de la toma de descargas parciales para determinar si es el comportamiento normal del activo o si hay una falla en progreso
- Programar actividades de seguimiento de descargas parciales con equipos desarrollados para la medición de descargas parciales en generadores eléctricos, y/o
- Programar barrido térmico que permita establecer los valores de inyección de descargas parciales

Transformadores de Potencia

El monitoreo de las descargas parciales acompañado de actividades de toma de muestra de aceites para la determinación de los gases combustibles en el transformador, pueden indicar la necesidad de:

- Aumentar la frecuencia de la toma de descargas parciales para determinar si es el comportamiento normal del activo o si hay una falla en progreso
- Programar actividades de seguimiento de descargas parciales con equipos desarrollados para la medición de descargas parciales en generadores eléctricos

Cables de Potencia

Los valores superiores a 500mV se toman como valores de descargas con variaciones significativas por fuera de la norma, es decir, a partir de los 500mV se recomienda:

- Aumentar la frecuencia de la toma de descargas parciales para determinar si es el comportamiento normal del activo o si hay una falla en progreso
- Ubicar el punto de mayor densidad de descargas parciales en el cable de potencia e inspeccionarlo en búsqueda de posibles fallas visibles e implementar estrategias de mantenimiento correctivo

I-3. NORMATIVIDAD ASOCIADA

IEEE Standards. (2014). *IEEE Std 1434-2014 (Revision of IEEE Std 1434-2000) Guide for the Measurement of Partial Discharges in AC Electric Machinery*

IEEE Standards. (2014). *IEEE Guide for the Measurement of Partial Discharges in AC Electric Machinery.*

IEC. (2016). *High voltage test techniques -Measurement of partial discharges by electromagnetic and acoustic methods. IEC TS 62478.*

IEC. (2000). *Partial Discharge Measurement. IEC Standard 60270.*

I-4. DOCUMENTOS DE REFERENCIA

PRY-CAM Portable User Manual

PRY-CAM Training 2020

I-5. ANEXO

Registro de Mantenimiento

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

MEDICIÓN DE DESCARGAS PARCIALES EN GENERADORES, TRANSFORMADORES DE POTENCIA Y CABLES DE POTENCIA EN CENTRALES DE GENERACIÓN HIDRÁULICAS Y TÉRMICAS	
Fecha:	_____
Responsable de la medición:	_____
Ubicación:	_____
Activo Inspeccionado:	_____ ID Activo: _____
INSPECCIÓN PREVIA	
Potencia activa	_____ MVA
Potencia reactiva	_____ MVAR
Voltaje	_____ KV
Temperatura del activo	_____ °C
Temperatura ambiente	_____ °C
Humedad Relativa	_____
Detalle de la inspección visual (señales de deterioro, actividad corona, ruidos, olores y/o vibraciones inusuales, condiciones ambientales/ de infraestructura que afecte o pueda afectar el activo)	

MEDICIÓN DE DESCARGAS PARCIALES	
Observaciones de la medición de descargas parciales:	

Funcionario al que se le hace entrega del activo: _____	
NOTA	
* Tenga en cuenta que todas las actividades se realizarán con el equipo enegizado en carga nominal	
* Procure que las inspecciones se realicen bajo las mismas condiciones de carga y temperatura del activo	
* Para cualquier información adicional, consulte el manual de usuario del sensor de descargas parciales	

Ilustración 3 Procedimiento medición de descargas parciales por método electromagnético

7. Conclusiones, recomendaciones y trabajo a futuro

7.1. Conclusiones

La ejecución de las actividades de detección de descargas parciales por el método electromagnético en la que se dio cumplimiento a los objetivos específicos “Establecer la ubicación del sensor que permita detectar con mayor precisión el origen de las descargas parciales en generadores eléctricos, transformadores de potencia y cables de potencia”, “Relacionar las técnicas actuales de detección de descargas parciales en generadores eléctricos, transformadores de potencia y cables de potencia, con la técnica de detección electromagnética” y “Definir un protocolo para la medición de descargas parciales replicable a los activos críticos de generación a partir de la respuesta electromagnética” deja las siguientes conclusiones:

- El estudio del comportamiento de las descargas parciales permite evidenciar el estado del aislamiento durante la operación de los activos, la comparación de estos resultados con las pruebas en estado estático que se tienen implementadas en algunas rutinas de mantenimiento generales hace que las pruebas en estado dinámico y estático sean complementarias.
- El sensor electromagnético PRY-CAM que fue desarrollado para el análisis de la actividad de descargas parciales en cables de potencia, puede ser implementado para el

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

análisis de las descargas en otro tipo de activos como lo son los generadores eléctricos y los transformadores de potencia.

- En los generadores eléctricos, al tomar una lectura no invasiva y que respeta las normas de seguridad de distancia eléctrica a equipos de alta tensión durante su operación, las descargas parciales mostradas por el sensor electromagnético pueden mostrar variaciones de hasta más de cinco veces en la magnitud real de las descargas parciales de los activos analizados.
- Si bien, las empresas generadoras de energía vienen tomando decisiones de implementar en los generadores eléctricos de sus centrales de generación acopladores capacitivos que permitan la lectura en línea y de tiempo completo de las descargas parciales, el sensor electromagnético puede emplearse en generadores donde aún no se cuente con esta tecnología o no se considere viable económicamente la instalación de estos equipos.
- La evaluación de la presencia de descargas parciales en transformadores de potencia generalmente es realizada por el resultado del análisis de la cromatografía de gases, que como se vio en la evaluación del transformador de potencia de la Central Térmica N.1., en algunos casos no permite evidenciar la presencia de las descargas parciales, en estos casos, y como se demuestra en este documento, la lectura de descargas parciales por un sensor electromagnético permite complementar la información del estado del devanado de un transformador de potencia.
- El sensor electromagnético no reemplaza algún otro método de lectura de descargas parciales en generadores y transformadores de potencia, esta actividad brinda información

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

adicional que permite la toma oportuna de decisiones de mantenimientos e intervenciones de máquinas eléctricas y en caso de que su los resultados de la medición entregue valores por fuera de los rangos de aceptación, se recomienda realizar estudios adicionales con equipos de medición de descargas parciales específicos para el activo analizado

- La implementación del sensor electromagnético en los cables de potencia permite detectar descargas hasta a 400 metros de longitud del punto de generación de ellas, sin embargo, se recomienda que, en caso de encontrar actividad de descargas parciales, se reduzca la distancia de inspección hasta encontrar el punto donde se generan las mencionadas descargas parciales.
- Debido a que el sensor electromagnético fue desarrollado para la detección de descargas parciales en cables de potencia, se tuvieron que realizar ejercicios que permitieron establecer que la ubicación óptima del sensor se da en los cables de salida de los transformadores de potencia, barrajes de salida de los generadores eléctricos y en los terminales iniciales y finales del cable de potencia, siempre y cuando su longitud no supere los 400 metros.
- La practicidad para el manejo del sensor electromagnético brinda beneficios como accesibilidad a los activos a inspeccionar, omisión de conexión de cables e indisponibilidad de activos, entre otros.

7.2. Recomendaciones

- Teniendo en cuenta que los empalmes de los cables de potencia pueden generar propensión a fallas en los mencionados cables, se sugiere la importancia de la realización del seguimiento del estado de las descargas parciales en el empalme de estos activos.
- Para realizar la medición de descargas parciales en activos como generadores eléctricos, cables de potencia y transformadores de potencia se recomienda planear la actividad procurando que la operación de los activos se encuentre idealmente bajos las mismas condiciones en carga nominal y temperatura del activo.
- Se recomienda en todo momento tener presente las distancias de seguridad antes de realizar trabajos en equipos energizados.
- Se recomienda que, en las mediciones de descargas parciales en los generadores eléctricos, la magnitud se contemple como cinco veces la medida con el sensor electromagnético.

7.3. Trabajo a Futuro

La investigación del diagnóstico del estado del aislamiento de los activos a partir de las señales de descargas parciales adquiridas con el sensor electromagnético y su correlación con las tecnologías actuales de diagnóstico diseñadas para activos como generadores eléctricos y transformadores de potencia se recomienda como el paso a seguir de este estudio.

8. Bibliografía

- IEEE. (2009). *IEEE Std C57.104-2008. Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers.* .
- MW Megavatios. (2018). Obtenido de Clasificación de las Descargas Parciales: 14 Conceptos Fundamentales: <https://megavatios.com.ar/clasificacion-de-las-descargas-parciales-14-conceptos-fundamentales/>
- A. BURGOS MELGUIZO, A. B. (6 de 2020). *ELECTRA*. Obtenido de Guidelines for safe work on cable systems under induced voltages or currents: <https://electra.cigre.org/310-june-2020/technical-brochures/guidelines-for-safe-work-on-cable-systems-under-induced-voltages-or-currents.html>
- AAI, A. e. (2016). *AAI, Asesores en Alta Tecnología*. Obtenido de Diferencias entre el transformador seco y el de aceite: <https://www.altatecnologia.com.mx/diferencias-entre-el-transformador-seco-y-el-de-aceite/>
- ABB Group. (06 de 12 de 2013). Stator Winding Insulation Diagnosis for Maintenance Planning. *Tutorial-*.
- ALTANOVA GROUP. (2 de 10 de Recuperado en 2021). *Acopladores Capacitivos De DP De InF*. Obtenido de ALTANOVA GROUP: <https://www.altanova-group.com/es/products/partial-discharge-tests/sensors-and-accessories/pd-coupler>
- Álvarez, D. O. (15 de 7 de 2021). *Qué es la Conductividad Eléctrica*. Obtenido de Concepto: <https://concepto.de/conductividad-electrica/>
- Anderson J. C. Sena, R. M. (2021). Frequency Resolved Partial Discharges Based on Spectral Pulse Counting. *Energies*, 1-36.
- Antonio Di Stefano, R. C. (2 de 12 de Recuperado en 2021). *Portable partial discharge detection device*. Obtenido de Google Patents: <https://patents.google.com/patent/US20110156720A1/en>
- Aparicio, D. G. (2015). *Detección y Lcalización de Descargas Parciales en Devanados de Transformadores de Potencia usando Modelos de Alta Frecuencia*. Mexico: Universidad Autónoma de Nuevo León.
- AREATECNOLOGIA. (2 de 10 de Recuperado en 2021). *Transformador Trifásico*. Obtenido de AREATECNOLOGIA: <https://www.areatecnologia.com/electricidad/transformador-trifasico.html>
- Arturo García. Oscar Reyes, E. R. (1998). *Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias*. Obtenido de Mecanismos de deterioro de generadores eléctricos: <https://www.ineel.mx/publica/bolnd98/art2nd98.htm>

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

- Bibo Geng, C. L. (2011). The comparison of sensitivity between the UHF and Ultrasonic methods for partial discharge detecting in GIS. . *IEEE*.
- Cardoso, Y. G. (2017). *Diagnóstico con descargas parciales a transformadores de potencia en Cuba*. Villa Clara: Técnica Industrial 318.
- CENELEC. (2000). *BRITISH STANDARD 60270: High-Voltage test techniques-partial discharge measurement*. Bruselas: CENELEC.
- CH Transformadores. (2 de 10 de Recuperado en 2021). *Transformador seco Vs. Transformador en aceite*. Obtenido de CH Transformadores: <https://www.transformadores.cl/blog/transformadores-de-energia-seco-y-en-aceite/#:~:text=Los%20transformadores%20en%20aceite%20se,y%20del%20tipo%20de%20instalaci%C3%B3n>.
- Chalaki, M. R. (2020). *Non-conventional sensors for measuring partial discharge under DC electrical stress*. Mississippi: Mississippi State University.
- Chapman, S. J. (2012). *Máquinas Eléctricas*. México: McGraw-Hill Latinoamericana S.A.
- Davide Fabiani, A. C. (2008). a UHF Technique for Advanced PD Measurements on Inverter-Fed Motor. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*.
- Díaz, H. (19 de 10 de 2017). *15 Ventajas del uso de Transformadores Secos*. Obtenido de Energética Hoy: <https://www.energeticahoy.com/post/2017/10/19/15-ventajas-del-uso-de-transformadores-secos>
- Díaz, R. O. (2017). *Diseño de investigación del análisis de la gestión de mantenimiento proactivo en base al diagnóstico de fallas recurrentes y normas de mantenimiento del fabricante Brush de generadores eléctricos para un generador trifásico modelo BDAX 84.445 ERH de 160M*. Guatemala: Universidad San Carlos de Guatemala.
- doble. (5 de 10 de Recuperado en 2021). *M4100 Probador de aparatos de alto voltaje*. Obtenido de doble: <https://www.doble.com/product/m4100/?lang=es>
- Eberhead Lemke, T. S. (2008). Ultra-Wide-band PD Diagnostics of Power Terminations in Service. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*.
- Endesa. (2 de 10 de Recuperado en 2021). *Transformador Eléctrico*. Obtenido de Endesa: <https://www.fundacionendesa.org/es/recursos/a201908-corrientes-alternas-con-un-transformador-electrico>
- F.H, K. (1989). Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment. . *Butterworth & Co*.
- Fernando, S. C. (2012). *Electromagnetic Radiation due to Partial Discharge and Fault Detection Method for Overhead Distribution Lines*. Melbourne: RMIT University.
- FLIR. (2 de 10 de Recuperado en 2021). *Termografías para diagnósticos eléctricos y mecánicos*. Obtenido de FLIR: https://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/T820483/T820483_ES.pdf
- Foro Nuclear. (08 de 15 de Recuperado en 2021). *¿Qué es un generador eléctrico?* Obtenido de Foro Nuclear: <https://www.rinconeducativo.org/es/recursos-educativos/que-es-un-generador-electrico#top>

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

- G. Crespo-Sánchez, J. C.-S.-P.-S. (2020). Estimación del tiempo de vida útil restante en transformadores de fuerza a partir de la despolimerización de la celulosa del aislamiento. *Tecnología Química. Vol. 40.*
- García Peñaloza, A. &. (2015). DIAGNÓSTICO Y LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN CABLES. *Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.*
- Godoy, F. F. (2012). *Estudio de Atributos Estadísticos para Evaluación de Aislamientos Eléctricos.* Ingeniería Industrial y de Manufactura.
- Gómez-Ramírez, G. A. (2018). Medición de Descargas Parciales en Transformadores de Potencia bajo los estándares internacionales IEC e IEEE. *IEEE Tecnología en Marcha.*
- González, P. C. (2014). Las Emisiones Acústicas y su aplicación al mantenimiento predictivo. . *Navals Facultat Nàutica de Barcelona.*
- Gouli Wang, Y. H. (2001). Study on the Ultra-High-Frequency Sensors for PD Detection in Power Transformers. *Asian Conference on Electrical Insulating Diagnosis .*
- Group, P. (2020). *PRY-CAM PORTABLE User Manual.*
- Gustavo Jiménez-Araya, G. A.-R. (2016). Comportamiento de los aislamientos sólidos de transformadores de potencia en condiciones ambientales no controladas,. *Tecnología en Marcha. Vol. 29, 99-116.*
- H.R. Mirzaei, A. A. (2015). Advancing New Techniques for UHF PD Detection and Localization in the Power Transformers in the Factory Tests. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation.*
- Hamidreza Karami1, M. A. (2021). An experimental validation of partial discharge localization using electromagnetic time reversal. *Scientific Reports, 1-12.*
- Herculano Martínez, A., & Maza Sánchez, C. (Mexico). *Manual para la instalación de cables de energía de media tensión. Tesis de GRado.* 2012: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Herrera, L. C. (2015). *Diagnóstico del aislamiento principal de bobinas estáticas sometidas a esfuerzos termoeléctricos en el laboratorio.* Cali: Universidad del Valle.
- HIO NAM JOHNSON, O. (2009). PROPAGATION OF HIGH FREQUENCY PARTIAL DISCHARGE SIGNAL IN POWER CABLES. *School of Electrical Engineering and Telecommunications The University of New South Wales, Australia.*
- Huazheng. (2 de 10 de Recuperado en 2021). *Transformador de potencia trifásico de tipo sumergido en aceite.* Obtenido de Huazheng: <http://es.electric-test.com/new-products/electrical-three-phase-oil-immersed-type.html>
- IEC (International Electrotechnical Commission). (2016). High voltage test techniques - Measurement of partial discharges by electromagnetic and acoustic methods. *IEC TS 62478.*
- IEC (International Electrotechnical Commission). (2016). *High voltage test techniques - Measurement of partial discharges by electromagnetic and acoustic methods. IEC TS 62478.*
- IEC. (2000). *Partial Discharge Measurement. IEC Standard 60270.*
- IEEE. (1999). *Induced Voltage Test. IEEE Standard C57.12.90.*

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

- IEEE. (2006). *IEEE Std 1415-2006. IEEE Guide for Induction Machinery Maintenance Testing and Failure Analysis*. .
- IEEE. (2012). *IEEE Std 400-2012. IEEE Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems Rated 5 kV and Above*. .
- IEEE Guide for the Measurement of Partial Discharges in AC Electric Machinery. (2014). *IEEE Std 1434-2014 (Revision of IEEE Std 1434-2000)*, 1-89.
- IEEE Power and Energy Society. (2013). IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery. *IEEE Standards Association* .
- IEEE Power Engineering Society. (2000). IEEE Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation. *IEEE-SA Standards Board*.
- IEEE Standards. (2014). IEEE Guide for the Measurement of Partial Discharges in AC Electric Machinery. *IEEE Standards*.
- INDUCOR INGENIERÍA S.A. (2 de 10 de Recuperado en 2021). *PRUEBAS DE BAJA INDUCCION EN ESTADORES DE GRANDES GENERADORES Y MOTORES*. Obtenido de INDUCOR.COM.AR:
https://www.inducor.com.ar/articulos tecnicos/pruebas_de_baja_induccion_en_estadores_de_grandes%20generadores.pdf
- Inducor. Electrical Testing Group. (s.f.). *TECNICA DE LA ALTA TENSION*. Obtenido de CAPITULO 1 - INSTALACIONES DE CORRIENTE ALTERNA DE ALTA TENSION:
<https://www.inducor.com.ar/academicos/alta-tension/alta-tension-capitulo1.html>
- International Electrotechnical Commission. (2017). *Rotating electrical machines - Part 27-1: Off-line partial discharge measurements on the winding insulation*.
- IRIS Power. (2013). Interpretation of Partial Discharge Result Electrical Rotating Machine Stator Windings. *PD Report Appndiex Version 4*.
- IrunBG-Moodle. (2 de 10 de Recuperado en 2021). *Erdieroaleak*. Obtenido de IrunBG-Moodle:
<https://elearning3.hezkuntza.net/013157/mod/glossary/showentry.php?concept&courseid=0&eid=28&displayformat=-1&lang=es>
- J. Lopez-Roldan, T. T. (2008). Optimisation of a Sensor for Onsite Detection of Partial Discharges in Power Transformers by the UHF. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*.
- J. Singsathien, T. S. (2017). Partial Discharge Detection and Localization of Defected Power Cable Using HFCT and UHF Sensors. *14th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*.
- Jian Li, T. J. (2012). Optimization of UHF Hilbert Antenna for Partial Discharge Detection of Transformers. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*.
- Juan Carlos Toro Londoño, H. G. (2005). Evolución de las Descargas Parciales y su Incidencia en el Deterioro y fallo de los Aislamientos Sólidos de las Barras Estatóricas de los Hidrogeneradores de EEPP. *CIER*.
- L. Agudelo-Vélez, M. S.-M.-T. (2 de 10 de Recuperado en 2021). *Definición de Índices de Salud para Cables de Media Tensión Aislados en XLPE*. Obtenido de Educacion ACIEM:

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

- https://educacion.aciem.org/CIMGGA/2018/Trabajos/2018-069%20TRA_COL_L_A_M_S_D_G_CIMGGA2018.pdf
- M. Wang, A. J. (2002). Review of condition assessment of power transformers in service. *IEEE Electr. Insul.*
- M.Kalyan Chakravarthi, A. D. (2019). Localization of Incipient Discharge in Power Transformer using UHF Sensor. *IEEE*.
- MAGNETRON. (2 de 10 de Recuperado en 2021). *Transformadores de Potencia*. Obtenido de MAGNETRON: http://www.magnetron.com.co/images/2018/PDF-FICHAS-TECNICAS/ficha_tecnica_transformador_de_potencia.pdf
- Marin, D. S. (2 de 10 de Recuperado en 2021). Máquinas Eléctricas de Corriente Alterna. *Capítulo 3. Máquina Sincrónica*. Madrid, España: Universidad Carlos III de Madrid. Obtenido de [http://dfs.uib.es/GTE/education/industrial/con_maq_electricas/teoria/Transparencias%20\(Univ.%20Pontificia%20Comillas\)/Introduccion%20Maquinas/sld012.htm](http://dfs.uib.es/GTE/education/industrial/con_maq_electricas/teoria/Transparencias%20(Univ.%20Pontificia%20Comillas)/Introduccion%20Maquinas/sld012.htm)
- Michael Duval and Laurent Lamarre. (2014). The Duval Pentagon - A New Complementary Tool for the Interpretation of Dissolved Gas Analysis in Transformers. *DEIS*, 9-12.
- Michael Steven Castillo Monsalve, F. G. (2016). *Tipología de fallas en generadores sincrónicos hidráulicos de la empresa de energía del pacífico. Trabajo de grado*. Santiago de Cali: Universidad del Valle.
- MM Yaacob, M. A. (2014). Review on Partial Discharge Detection Techniques Related to High Voltage Power Equipment Using Different Sensors. *Photonic Sensors*.
- Mohammad Azadifar, H. K. (2020). Partial Discharge Localization Using Electromagnetic Time Reversal: A Performance Analysis. *IEEE ACCESS*.
- Mor, A. R. (2012). *Nueva metodología de la medida de descargas parciales en cables de alta tensión. Desarrollo de un sensor capacitivo de gran ancho de banda*.
- Neier, T. (2015). *Cable Diagnostic in MV Underground Cable Networks*. Sulz: BAUR .
- Omicron Energy. (3 de 2020). *Pruebas de diagnóstico y monitoreo de máquinas rotativas*. Obtenido de Direct Industry: <https://pdf.directindustry.es/pdf/omicron-electronics/pruebas-diagnostico-monitoreo-maquinas-rotativas/13971-840837.html>
- Omicron. (2 de 10 de Recuperado en 2021). *Análisis de descargas parciales en cables eléctricos*. Obtenido de Omicron: <https://www.omicronenergy.com/es/solucion/medicion-y-analisis-de-descargas-parciales-en-cables-electricos/>
- Omicron. (2 de 10 de Recuperado en 2021). *Medición del factor de potencia/disipación (Tan Delta) en cables eléctricos*. Obtenido de Omicron: <https://www.omicronenergy.com/es/solucion/medicion-del-factor-de-disipacion-potencia-en-cables-electricos/>
- OMICRON. (5 de 10 de Recuperado en 2021). *PDL 650 Localización acústica de descargas parciales en transformadores de potencia*. Obtenido de OMICRON: <https://www.omicronenergy.com/es/productos/pdl-650/>
- Oscar Núñez-Mata, G. R.-V.-O. (2018). Monitoreo de Descargas Parciales En-línea en Generadores Eléctricos de Alta Tensión. *Knowledge Enganing Minds*.

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

- Pacheco, C. R. (2007). *Radiometric Partial Discharge Characterisation*. Glasgow: Universidad de Strathclyde.
- Pietro Romano, A. I. (2019). Partial Discharge Detection Using a Spherical Electromagnetic Sensor. *sensors*.
- Pozueta, M. A. (2018). Problemas Resueltos de Devanados de Corriente Alterna. *PROBLEMAS RESUELTOS DE DEVANADOS DE C.A.* Santander, Cantabria, España: Universidad de Cantabria.
- Promelsa. (26 de 6 de 2011). *Transformadores y su tiempo de vida útil*. Obtenido de Promelsa: <http://promelsa.blogspot.com/2011/07/vida-util-en-los-transformadores.html>
- Qualitrol Defining Reliability. (2018). *Monitoreo de Descarga Parcial de Motores y Generadores*. Obtenido de <https://www.qualitrolcorp.mx/products/partial-discharge-monitors/motors-generators-and-turbine-partial-discharge-monitors/>
- QUALITROL. (5 de 10 de Recuperado en 2021). *Iris Power GuardII+*. Obtenido de QUALITROL: <https://www.qualitrolcorp.mx/products/partial-discharge-monitors/motors-generators-and-turbine-partial-discharge-monitors/guardii/>
- Real Academia de Ingeniería. (s.f.). *Real Academia de Ingeniería*. Obtenido de Descarga Corona: <http://diccionario.raing.es/es/lema/descarga-corona>
- Rey, J. A. (2014). *Separación de fuentes de descargas parciales y ruido eléctrico mediante análisis de potencia espectral en alta frecuencia*.
- Rivero, J. P. (2015). *Revisión de normativas sobre detección de descargas parciales en máquinas eléctricas rotativas: Comparativa y Alcance*. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid.
- Robles, H. F. (2012). *Diseño simulador de control óptimo para generadores de corriente alterna de baja potencia. Trabajo de Grado*. Callao: Universidad Nacional del Callao.
- Rodríguez, D. L. (2012). *Sistema de Monitorización Continua de Descargas Parciales para Transformadores de Alta Potencia. Trabajo de Grado*. Leganés: Universidad Carlos III de Madrid.
- Rodríguez, D. L. (2012). *Sistema de Monitorización Continua de Descargas Parciales para Transformadores de Alta Potencia. Trabajo de Grado*. Leganés: Universidad Carlos III de Madrid.
- Roslizan N. D., R. M. (2020). A review: Partial Discharge Detection using UHF sensor on High Voltage Equipment. *Journal of Physics: Conference Series*, 1-8.
- S. Tenbohlen, D. D. (2008). Partial Discharge Measurement in the Ultra High Frequency (UHF) Range. *IEEE*.
- Samper, M. A. (2008). *Diagnóstico del Aislamiento en Equipos Primarios*.
- Sander Meijer, P. D. (2006). Application of UHF Diagnostics to Detect PD during Power transformer Acceptance Test. *Conference Record of the 2006 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*.
- Serrano, J. R. (2017). *Monitorización de la Actividad de Descargas Parciales en Sistemas Aislantes Papel-Aceite mediante la Detección y Análisis de sus Emisiones Acústicas*.
- Shugg, W. T. (1995). *Handbook of electrical and electronic insulating materials*. IEEE Dielectrics Society, and Electrical Insulation.

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

- Shugg, W. T. (1995). Handbook of electrical and electronic insulating materials. IEEE Press. *IEEE Dielectrics Society, and Electrical Insulation*. .
- Sirabonian, A. R.-N. (2011). DIMENSIONAMIENTO DE CABLES. CALCULO DE CABLES DE LAS INSTALACIONES ELECTRICAS. *IE-04cab*.
- Standardization, I. 5.-I. (2014). *Gestión de Activos - Aspectos generales, principios y terminología*. Ginebra: ISO.
- TECSA. (2 de 7 de 2018). *Las fallas más comunes en un transformador*. Obtenido de TECSA: <https://www.tecsagro.com.mx/blog/las-fallas-mas-comunes-en-un-transformador/#:~:text=Las%20fallas%20mec%C3%A1nicas%20son%20distorsiones,y%20vibraciones%20dentro%20de%20este>.
- TF, C. (2003). Knowledge Rules for Partial Discharge Diagnosis in Service. *CIGRE*.
- Torres, J. (14 de 7 de 2021). *Conductores Eléctricos*. Obtenido de lifeder.com: <https://www.lifeder.com/conductores-electricos/>
- Transequipos S.A. (2 de 9 de 2020). *LA NOTA ENERGÉTICA*. Obtenido de Transequipos: <https://transequipos.com/que-indican-los-pentagonos-de-duval-y-cual-es-su-importancia/>
- TURCIOS, C. A. (2011). *ESTUDIO DEL ESTADO DE AISLAMIENTO DE LOS GENERADORES, A TRAVÉS DEL ANÁLISIS DE LAS DESCARGAS PARCIALES, EN LA CENTRAL GEOTÉRMICA DE BERLÍN USULUTÁN, EL SALVADOR*. SAN SALVADOR: UNIVERSIDAD FRANCISCO GAVIDIA FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA.
- Turcios, C. A. (2011). *Estudio del estado de aislamiento de los generadores, a través del análisis de las descargas parciales, en la central geotérmica de Berlín Usulután, El Salvador. Tesis para optar al grado académico de ingeniero electricista*. San Salvador: Universidad Francisco Gavidia.
- Turizo, R. E. (2017). *Aplicación de la prueba de descargas parciales al generador hidráulico de 85MW de la central hidroeléctrica Urrá I. Trabajo de Grado*. Duitama: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Ulises Manassero, A. Z. (2015). Envejecimiento de la aislación eléctrica en transformadores de potencia. Desarrollo de un algoritmo de cálculo según guías de carga IRAM 2473 e IEEE C57. 91-2002. . *4o Simposio Argentino de Informática Industrial*.
- Ulises Manassero, A. Z. (2015). Envejecimiento de la aislación eléctrica en transformadores de potencia. Desarrollo de un algoritmo de cálculo según guías de carga IRAM 2473 e IEEE C57.91-2002. *Simposio Argentino de Informática Industrial*.
- Unisalia. (2 de 10 de Recuperado en 2021). *Tipos De Transformadores De Potencia, Que Son Y Cómo Funcionan*. Obtenido de Unisalia: <https://unisalia.com/tipos-de-transformadores-de-potencia/>
- Unitronics electric. (2019). *Seminario: Técnicas de Mantenimiento Predictivo en Máquinas Rotativas. Descargas Parciales y Flujo Retórico*.
- Victor Sokolov, V. M. (Recuperado en 2021). ON-SITE PARTIAL DISCHARGE MEASUREMENTS ON POWER TRANSFORMERS. *Semantic Scholar*.

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

Webstarsnet.com. (2 de 10 de Recuperado en 2021). *Rotor de Polos Salientes Vs. Rotor de Polos no Salientes*. Obtenido de Webstarsnet.com: <https://webstarsnet.com/es/4-salient-pole-rotor-vs-non-salient-pole-rotor.html>

WEG. (8 de 11 de Recuperado en 2021). *Sensores Magnéticos*. Obtenido de WEG: https://www.weg.net/catalog/weg/BR/es/Seguridad-de-M%C3%A1quinas%2C-Sensores-Industriales-y-Fontes-de-Alimentaci%C3%B3n/Sensores-Industriales/Sensores-Magn%C3%A9ticos/Sensores-Magn%C3%A9ticos/p/MKT_WDC_BRAZIL_SENSORS_MAGNETIC_SENSORS

Yuanlin Luo, Z. L. (2017). A Review on Online Partial Discharge Measurement of Large Generators. *Energies*.

9. Anexos

9.1. Pruebas de descargas parciales realizadas en la Central Térmica N.1.

9.1.1. Cromatografía de gases del transformador de potencia

En el transformador de potencia de la central térmica N.1. se realizó toma de muestra de aceites para la medición de la cromatografía de gases, estos gases fueron analizados con el método del Pentágono de Duval, los resultados obtenidos son presentados en la tabla 33 y en la figura 27:

RESULTADOS DE CROMATOGRAFÍA DE GASES

Transformador	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	COLOR
N.1.	2,07	1,60	0	82,37	2,85	●

Tabla 35 Cromatografía de gases en transformador de potencia central térmica N.1.

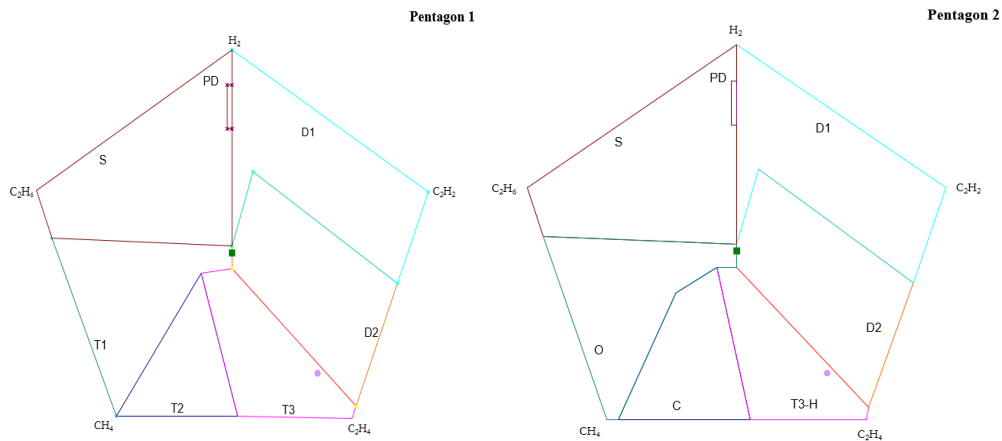


Figura 27 Pentágonos 1 y 2 - Cromatografía de gases en transformador de potencia

El análisis de los gases generados en el transformador de potencia según los pentágonos de Duval muestra en el primer pentágono la ubicación de la posible falla en el área T3 que indica posible falla térmica mayor a 300°C, mientras que en el pentágono dos, se ve la ubicación en el área T3-H lo que indica posibilidad de la misma falla térmica en el aceite. A partir de estos resultados se puede determinar que la muestra de aceite tomada no determina posibles descargas parciales en el transformador.

9.1.2. Descargas parciales acústicas en el transformador de potencia

La prueba de detección acústica de descargas parciales en el transformador se realizó ubicando los sensores de descargas en puntos diferentes alrededor de la cuba y encontrando un posible origen de descargas parciales de bajo nivel cerca del cambiador de tomas. En la figura 28 se muestran las visualizaciones de la ubicación de los sensores de detección acústica cerca del cambiador de tomas que fue donde se encontraron las señales más altas de posibles descargas parciales:

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

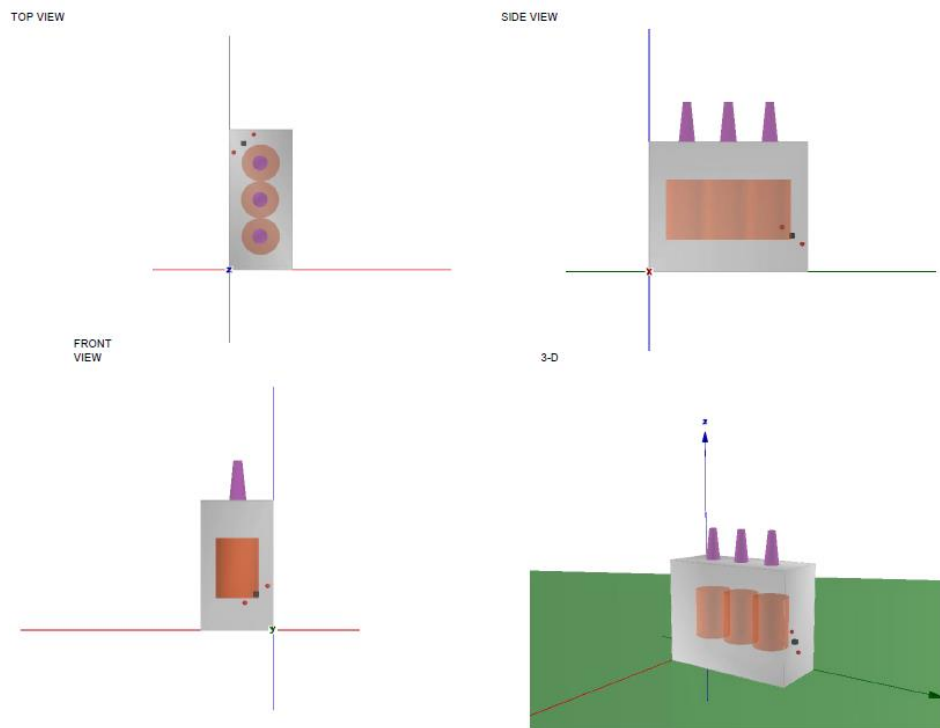


Figura 28 Ubicación de los sensores para detección de descargas parciales

9.2. Pruebas de descargas parciales realizadas en la Central Hidroeléctrica N.1.

9.2.1. Cromatografía de gases de los transformadores de potencia

La evaluación de los gases generados en el aceite aislante de los transformadores de potencia durante su operación, son examinados por medio de la cromatografía de gases con el método del Pentágono de Duval.

A continuación, en la tabla 36 se muestran los resultados de las muestras de aceite tomados a los transformadores de potencia de la central N.1.:

RESULTADO DE CROMATOGRAFÍA DE GASES

<i>Transformador</i>	<i>H2</i>	<i>CH4</i>	<i>C2H2</i>	<i>C2H4</i>	<i>C2H6</i>	<i>COLOR</i>
<i>U2</i>	54	88	0	57	22	●
<i>U3</i>	0	48	0	8	6	●

Tabla 36 Resultados de cromatografía de gases en los transformadores de potencia de la C.H. N.1.

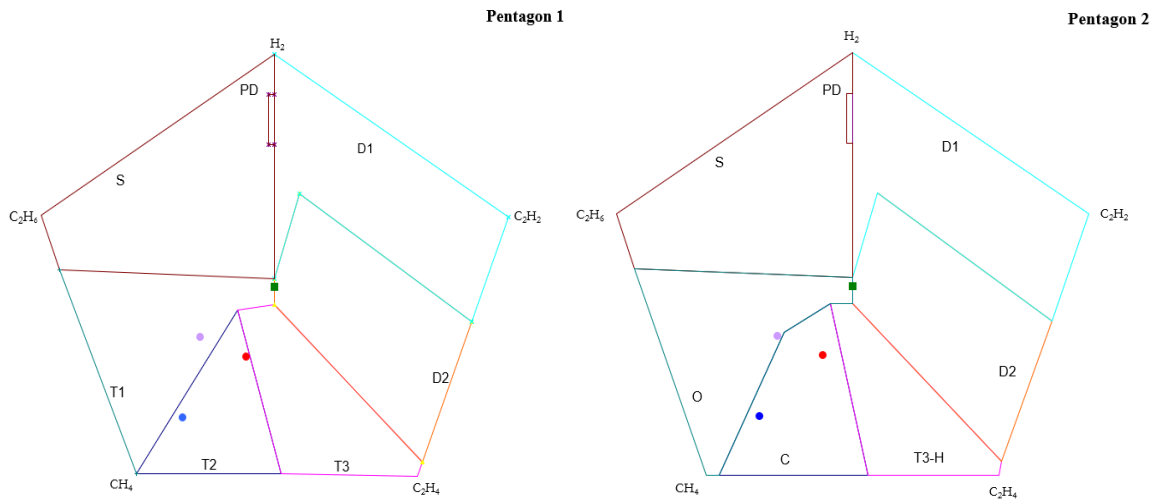


Figura 29 Análisis de cromatografía de gases en transformadores de potencia de la C.H. N.1. por Pentágono de Duval

La figura 29 muestra que para los transformadores de potencia de las unidades uno y dos, se evidencia que los gases están ubicados en el área T2 del pentágono 1 y en el área C del pentágono, que indica posible falla térmica entre 300°C – 700°C y posible carbonización del papel. Como se nota, a pesar de que el análisis cromatográfico muestra posibles fallas, estas no se asocian a posible presencia de descargas parciales en el devanado del transformador.

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

9.2.2. Detección de descargas parciales por acopladores capacitivos en el generador eléctrico

La evaluación de descargas parciales en los generadores eléctricos de la central hidroeléctrica N.1. se realizó de manera simultánea con la medición con el sensor electromagnéticos. Los resultados de la primera evaluación mencionada se muestran a continuación:

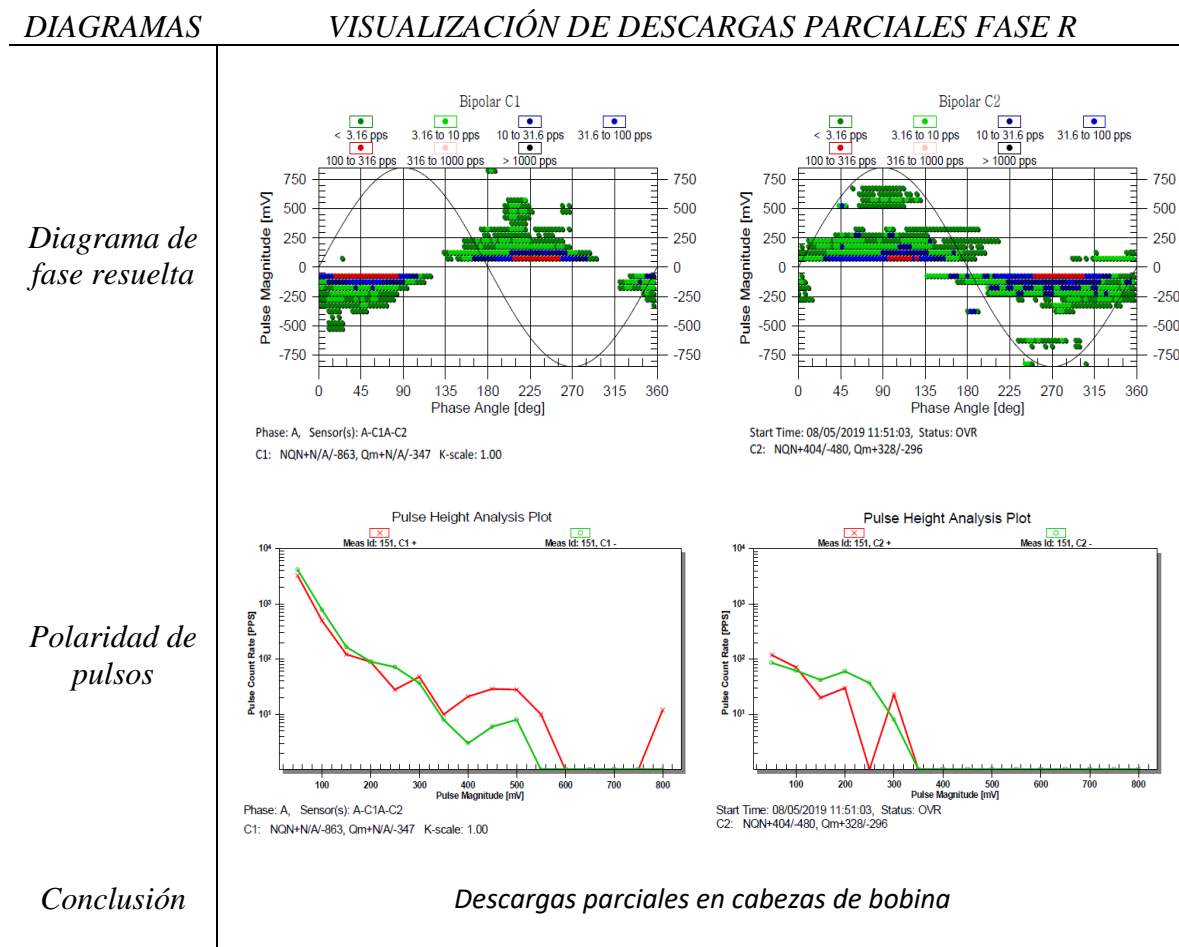


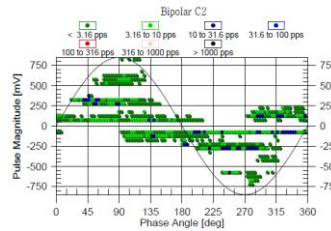
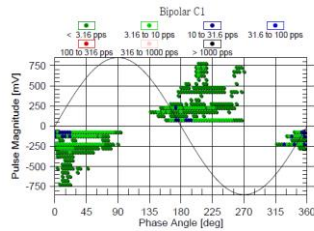
Tabla 37 Lectura de Descargas Parciales en la fase R del generador de la unidad 1 de la C.H. N.1.

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

DIAGRAMAS

VISUALIZACIÓN DE DESCARGAS PARCIALES FASE S

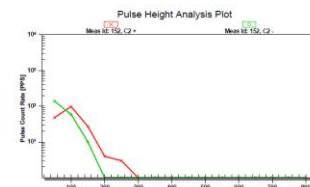
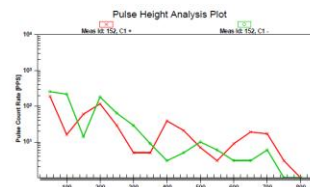
Diagrama de fase resuelta



Phase: B, Sensor(s): B-C1B-C2
C1: NON+931/876, Qm+726/509 K-scale: 1.00

Start Time: 08/05/2019 11:53:01, Status: OVR
C2: NON+307/242, Qm+186/149

Polaridad de pulsos



Phase: B, Sensor(s): B-C1B-C2
C1: NON+931/876, Qm+726/509 K-scale: 1.00

Start Time: 08/05/2019 11:53:01, Status: OVR
C2: NON+307/242, Qm+186/149

Descargas parciales en cabezas de bobina

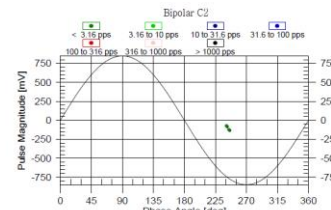
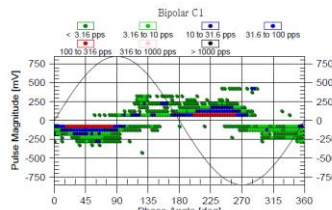
Conclusión

Tabla 38 Lectura de Descargas Parciales en la fase S del generador de la unidad 1 de la C.H. N.1.

DIAGRAMAS

VISUALIZACIÓN DE DESCARGAS PARCIALES FASE T

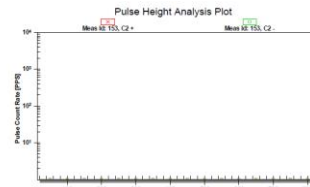
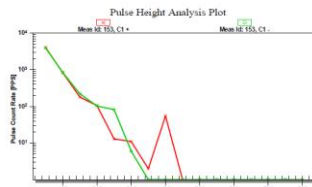
Diagrama de fase resuelta



Phase: C, Sensor(s): C-C1C-C2
C1: NON+753/686, Qm+441/297 K-scale: 1.00

Start Time: 08/05/2019 11:54:55, Status: OVR
C2: NON+N/A/N/A, Qm+N/A/N/A

Polaridad de pulsos



Phase: C, Sensor(s): C-C1C-C2
C1: NON+753/686, Qm+441/297 K-scale: 1.00

Start Time: 08/05/2019 11:54:55, Status: OVR
C2: NON+N/A/N/A, Qm+N/A/N/A

Contaminación

Conclusión

Tabla 39 Lectura de Descargas Parciales en la fase T del generador de la unidad 1 de la C.H. N.1.

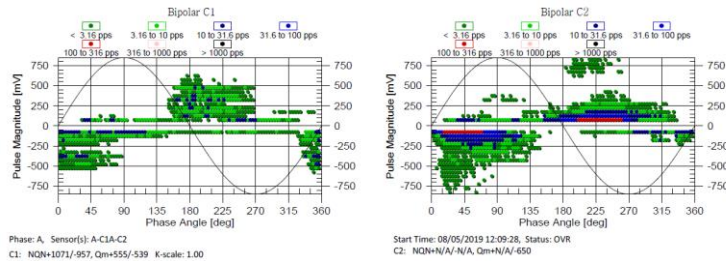
Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

El software de lectura de descargas parciales usado en este método permite observar en cada una de las fases del generador el diagrama de fase resuelta y la polaridad de sus pulsos. De acuerdo con el análisis de los resultados de DP, teniendo en cuenta que no se evidencia una predominancia del tipo de descarga (- o +), aparentemente se tienen descargas en la zona de cabezas de bobinas (corona) y contaminación. Es preciso aumentar la periodicidad de la medición de las descargas parciales con el fin de obtener más información sobre el comportamiento de estas en la máquina, que permitan corroborar, o desvirtuar la hipótesis anteriormente planteada. Para el caso específico de estos generadores, con una edad de servicio superior a los 25 años, se recomienda realizar un estudio completo de barrido térmico, con el fin de determinar con mayor precisión la respuesta de los aislamientos a las diferentes condiciones operativas de la máquina.

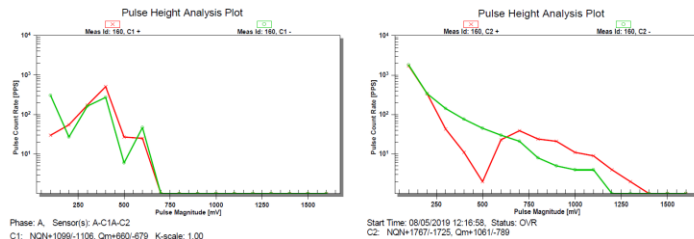
DIAGRAMAS

VISUALIZACIÓN DE DESCARGAS PARCIALES FASE R

Diagrama de fase resuelta



Polaridad de pulsos



Conclusión

Descargas parciales en cabezas de bobina

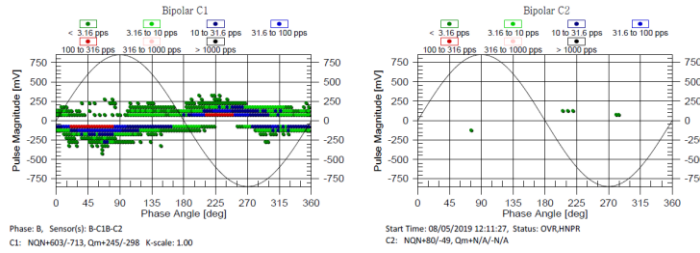
Tabla 40 Lectura de Descargas Parciales en la fase R del generador de la unidad 2 de la C.H. N.1.

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

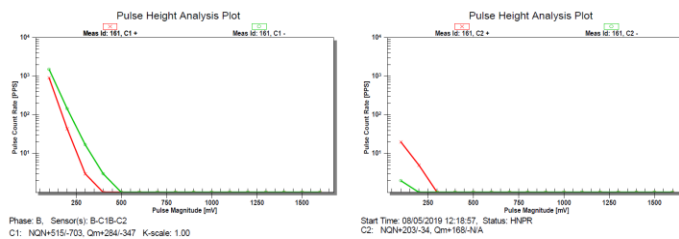
DIAGRAMAS

VISUALIZACIÓN DE DESCARGAS PARCIALES FASE S

Diagrama de fase resuelta



Polaridad de pulsos



Conclusión

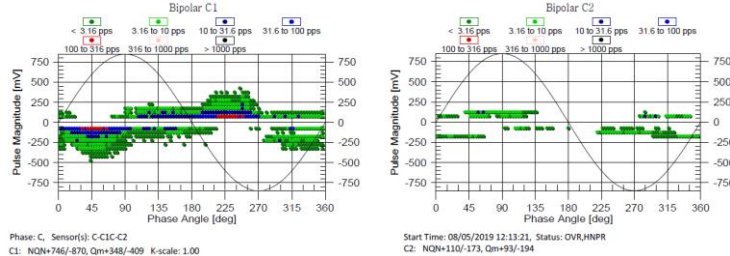
Contaminación

Tabla 41 Lectura de Descargas Parciales en la fase S del generador de la unidad 2 de la C.H. N.1.

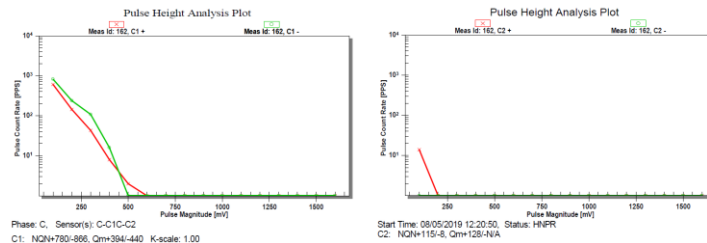
DIAGRAMAS

VISUALIZACIÓN DE DESCARGAS PARCIALES FASE T

Diagrama de fase resuelta



Polaridad de pulsos



Conclusión

Descargas parciales en cabezas de bobina

Tabla 42 Lectura de Descargas Parciales en la fase T del generador de la unidad 3 de la C.H. N.1.

Las tablas 40, 41 y 42 representan los diagramas de fase resuelta y diagramas de polaridad de pulsos para las fases R, S y T respectivamente para la unidad 2. Según el análisis de los resultados de descargas parciales, aparentemente se están presentando descargas en la zona de cabezas de bobinas, posiblemente causado por contaminación. Es preciso aumentar la periodicidad de la medición de las descargas parciales con el fin de obtener más información sobre el comportamiento de estas en la máquina, que permitan corroborar, o desvirtuar la hipótesis anteriormente planteada. Para el caso específico de estos generadores, con una edad de servicio superior a los 25 años, se recomienda realizar un estudio completo de barrido térmico, con el fin de determinar con mayor precisión la respuesta de los aislamientos a las diferentes condiciones operativas de la máquina.

9.2.3. TIP-UP en generadores eléctricos

9.3.1.1. Prueba de TIP-UP (Tangente delta): Generadores eléctricos

La evaluación de la tendencia del comportamiento del TIP-UP en los generadores de la Central Hidroeléctrica N.1. muestran una visión general sobre el estado del aislamiento del estator e incluso el comportamiento de las descargas parciales. A continuación, se presentan los resultados de la evaluación de la prueba tangente delta y el comportamiento del TIP-UP durante los últimos 19 años de evaluación de estos factores en los generadores de las unidades 1 y 2 de la central hidroeléctrica N.1.:

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

Generador unidad 1:

FECHA	R			S			T		
	(S-T GRD)			(T-R GRD)			(R-S GRD)		
	2 KV	8 KV	Tip - Up	2 KV	8 KV	Tip - Up	2 KV	8 KV	Tip - Up
2003	1,44	3,22	1,78	1,44	2,96	1,52	1,45	2,94	1,50
2004	1,42	2,85	1,43	1,42	2,84	1,42	1,42	2,84	1,42
2005	1,45	2,90	1,45	1,43	2,88	1,45	1,46	2,89	1,43
2006	1,45	2,92	1,47	1,42	2,90	1,48	1,44	2,90	1,46
2007	1,61	3,11	1,51	1,61	3,10	1,49	1,62	3,10	1,49
2008	1,27	2,73	1,46	1,26	2,71	1,45	1,27	2,71	1,44
2010	1,53	3,05	1,52	1,53	3,02	1,49	1,54	3,04	1,50
2011	1,32	2,9	1,58	1,31	2,87	1,56	1,33	2,88	1,55
2013	1,62	3,21	1,59	1,61	3,17	1,56	1,65	3,18	1,54
2014	1,44	3,01	1,57	1,43	3,00	1,57	1,43	2,99	1,56
2015	1,29	2,76	1,47	1,23	2,73	1,50	1,24	2,73	1,49
2016	1,53	3,06	1,53	1,49	3,04	1,55	1,49	3,08	1,59
2017	1,27	2,84	1,57	1,26	2,83	1,57	1,27	2,83	1,56
2018	1,41	3,07	1,66	1,41	3,05	1,64	1,43	3,05	1,62
2019	1,30	2,90	1,60	1,28	2,90	1,61	1,29	2,89	1,60
2020	1,37	3,01	1,64	1,35	2,99	1,64	1,38	2,99	1,62
2021	1,48	3,16	1,68	1,47	3,15	1,68	1,49	3,14	1,65

Tabla 43 Tendencia de prueba tangente delta y TIP-UP generador U1

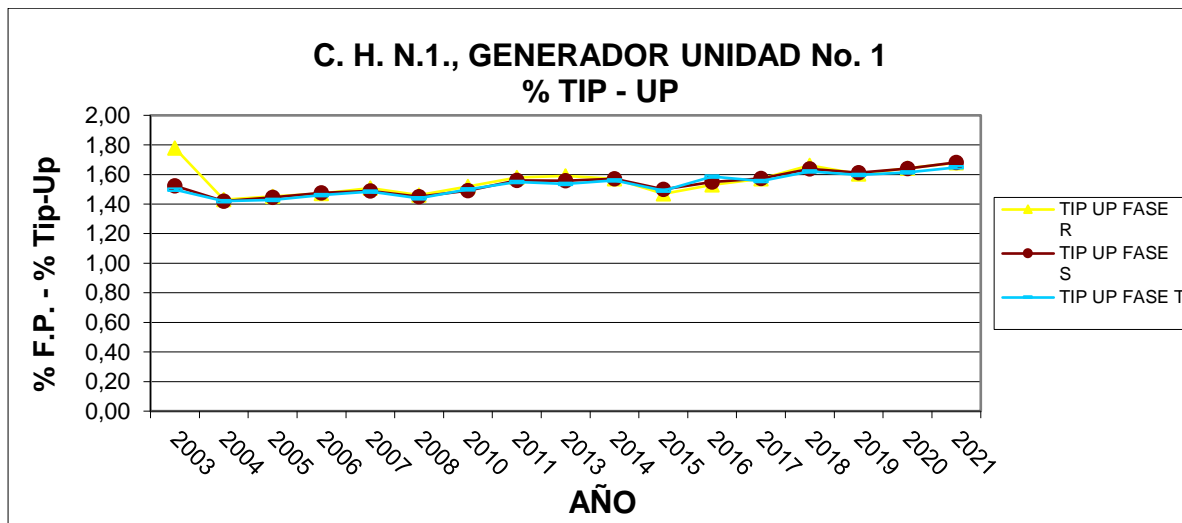


Figura 30 Tendencia de prueba tangente delta y TIP-UP generador U1

Los resultados de las mediciones Tip-Up del generador de la unidad 1 de la central N.1. tomados durante los últimos 18 años son mostrados en la tabla 43 y en la figura 38, que indican que el TIP-UP presenta un leve aumento del 2% en promedio con respecto a la medición anterior, y muestra una tendencia relativamente estable con respecto al valor promedio tomando los históricos, lo cual indica buen estado del aislamiento y no permite determinar actividad crítica de descargas parciales en el estator.

Generador unidad 2:

FECHA	R			S			T		
	(S-T GRD)			(T-R GRD)			(R-S GRD)		
	2 KV	8 KV	Tip - Up	2 KV	8 KV	Tip - Up	2 KV	8 KV	Tip - Up
2002	1,70	3,03	1,33	1,76	3,00	1,24	1,71	3,01	1,30
2005	1,47	2,69	1,22	1,49	2,69	1,20	1,49	2,70	1,21
2006	1,57	2,80	1,23	1,60	2,80	1,20	1,60	2,81	1,21
2007	1,38	2,64	1,26	1,42	2,64	1,22	1,43	2,65	1,22
2009	1,47	2,72	1,25	1,50	2,71	1,21	1,49	2,72	1,23
2010	1,23	2,43	1,20	1,25	2,42	1,17	1,24	2,44	1,20
2011	1,29	2,55	1,26	1,32	2,52	1,20	1,32	2,53	1,21
2012	1,34	2,59	1,25	1,35	2,57	1,21	1,35	2,60	1,26
2014	1,46	2,78	1,32	1,47	2,71	1,24	1,47	2,74	1,27
2016	1,46	2,73	1,27	1,46	2,72	1,25	1,46	2,74	1,28
2016	1,25	2,46	1,22	1,27	2,46	1,19	1,27	2,47	1,20
2017	1,54	2,83	1,29	1,57	2,83	1,26	1,55	2,84	1,29
2018	1,38	2,70	1,32	1,41	2,68	1,27	1,39	2,70	1,31
2019	1,53	2,84	1,31	1,57	2,83	1,26	1,55	2,83	1,29
2020	1,63	2,91	1,28	1,66	2,90	1,24	1,65	2,91	1,26
2020	1,25	2,52	1,27	1,27	2,49	1,22	1,25	2,50	1,25
2020	1,42	2,70	1,28	1,45	2,68	1,23	1,44	2,70	1,26
2021	1,33	2,64	1,31	1,36	2,62	1,26	1,34	2,64	1,29

Tabla 44 Tendencia de prueba tangente delta y TIP-UP generador U2

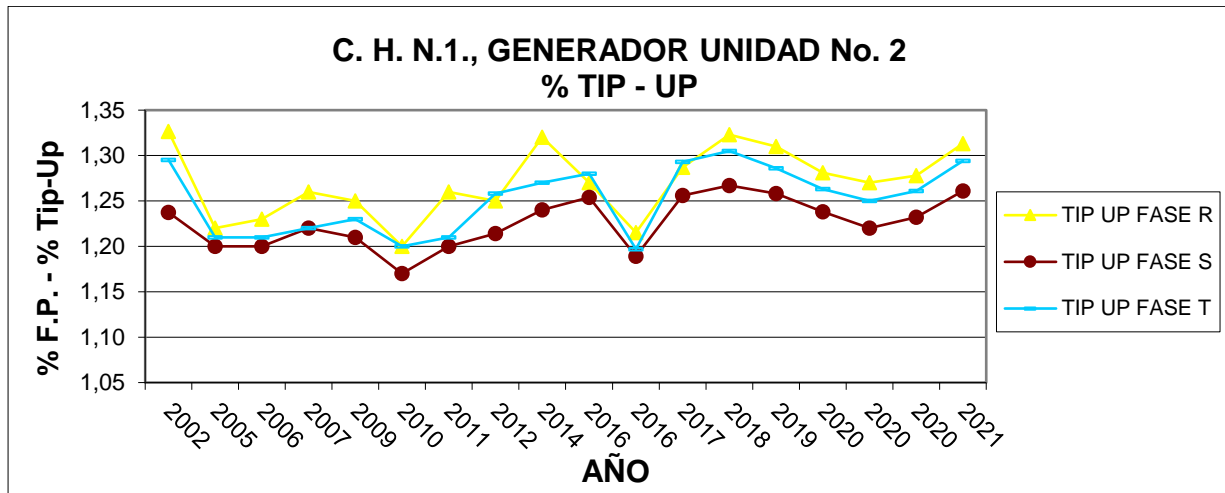


Figura 31 Tendencia de prueba tangente delta y TIP-UP generador U2

La tabla 44 y la figura 39 muestran el comportamiento de los resultados de las mediciones de tangente delta y Tip-Up en el generador de la unidad 2 de la central N.1., que permite identificar que se presenta un leve aumento del 2% en promedio con respecto a la medición anterior, y muestra una tendencia relativamente estable con respecto a los valores anteriormente tomados, lo cual indica en el momento de la ejecución de la prueba la buena condición en que se encuentra el aislamiento en esta sección del devanado y no permite identificar actividad crítica de descargas parciales en el estator.

Las Tendencias históricas del comportamiento del TIP-UP en las unidades 1 y 2 de la central de generación de energía N.1. que se presentaron anteriormente, muestran un comportamiento que, aunque es variable con el tiempo, es decir no permanece en los mismos valores, su valor actual es similar a los valores que ya se han determinado en la máquina y que hacen parte de su

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

comportamiento habitual. Por lo que se puede notar que estos valores de TIP-UP por sí solos no muestran el comportamiento de las descargas parciales en la máquina y que se hace necesario considerar información adicional para la evaluación de ellas.

9.2.4. Termografía de cables de potencia

Como apoyo a los resultados obtenidos en el análisis de descargas parciales en los cables de potencia de las unidades uno y dos de la central hidroeléctrica N.1., se tomó la termografía que permitió identificar la existencia o no de puntos calientes y con ello posibles fallas en la longitud del cable de potencia.

Durante la termografía se tuvieron las siguientes condiciones:

Emisividad: 0.95, T. Ambiente: 22°C

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

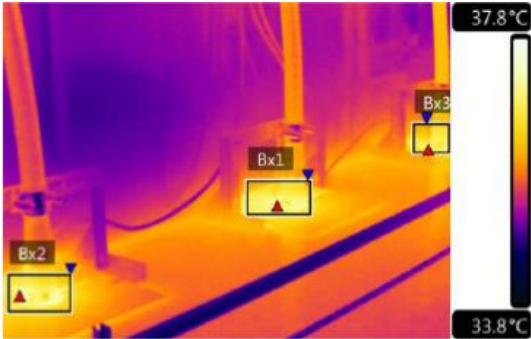
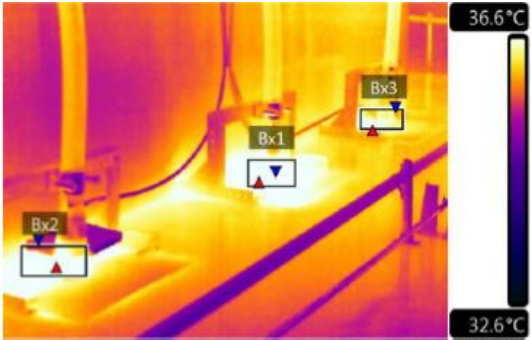
<i>IMAGEN TÉRMICA</i>	<i>DETALLE</i>
	<p>Generador 1</p> <p>Fase R: (Bx3) Temperatura Media: 36.5 °C Temperatura Máxima: 37.0 °C</p> <p>Fase S: (Bx1) Temperatura Media: 36.7 °C Temperatura Máxima: 37.5 °C</p> <p>Fase T: (Bx2) Temperatura Media: 36.7 °C Temperatura Máxima: 38.3 °C</p>
	<p>Generador 2</p> <p>Fase R: (Bx3) Temperatura Media: 37.1 °C Temperatura Máxima: 38.2 °C</p> <p>Fase S: (Bx1) Temperatura Media: 37.1 °C Temperatura Máxima: 38.2 °C</p> <p>Fase T: (Bx2) Temperatura Media: 36.9 °C Temperatura Máxima: 37.7 °C</p>

Tabla 45 Termografía Cables de Potencia

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

<i>IMAGEN TÉRMICA</i>	<i>DETALLE</i>
	<p>Unidades 1-2: Empalmes Fase R</p> <p>Unidad 1: (Li2) Temperatura Media: 26.0 °C Temperatura Máxima: 26.5 °C</p> <p>Unidad 2: (Li1) Temperatura Media: 26.2 °C Temperatura Máxima: 26.5 °C</p>
	<p>Unidades 1-2: Empalmes Fase S</p> <p>Unidad 2: (Li2) Temperatura Media: 26.0 °C Temperatura Máxima: 26.2 °C</p> <p>Unidad 3: (Li1) Temperatura Media: 26.1 °C Temperatura Máxima: 27.1 °C</p>
	<p>Unidades 1-2: Empalmes Fase T</p> <p>Unidad 2: (Li2) Temperatura Media: 25.9 °C Temperatura Máxima: 26.5 °C</p> <p>Unidad 3: (Li1) Temperatura Media: 25.9 °C Temperatura Máxima: 26.6 °C</p>

Tabla 46 Termografía en empalmes de cables de potencia

Las termografías realizadas a los cables de potencia que transportan la energía desde los transformadores de las unidades 1 y 2 hasta la subestación eléctrica de la central hidroeléctrica N.1.; mostraron en general un buen estado de los cables, sin muestras de calentamiento por carga o puntos calientes por posibles fallas presentadas. Se observó que los cables y terminales que componen el sistema de conducción de potencia desde la casa de máquinas hasta la subestación operan con temperaturas relativamente bajas, siendo la máxima temperatura encontrada de 38.3°C en la salida del cable de la unidad de generación 1, en la fase S.

9.3. Costo de la instalación de acopladores capacitivos para la realización de pruebas de descargas parciales

Si bien, la central de generación hidroeléctrica N.1. que fue analizada en esta tesis cuenta con un sistema de medición de descargas parciales en su estator como son los acopladores capacitivos, no son pocas las centrales que no cuentan con este sistema, por ejemplo, el generador de la Central Térmica N.1. no cuenta con sistema de acopladores capacitivos instalados en el generador de la máquina, por lo que para la medición de las descargas parciales es necesario interrumpir el servicio y realizar la instalación de un juego de acopladores. En este numeral se explicarán los costos por lucro cesante que implica la

Metodología de detección de Descargas Parciales en Generadores Eléctricos, Cables de Potencia y Transformadores de Potencia usando el Método Electromagnético

medición de descargas parciales en un generador que no cuenta con sistema de medición instalado:

En la Central Térmica N.1. se realizó por medio de un barrido térmico la medición de descargas parciales en el estator del generador de la unidad 1, este proceso consiste en realizar tres escalas ascendentes al 25%, 50% y 75% de la potencia nominal del generador donde se miden en cada una de ellas las variables de potencia activa, reactiva, aparente, temperatura ambiente, temperatura del devanado del estator y humedad relativa, además de medir en cada escalón las descargas parciales de la máquina. El barrido térmico se realiza con el fin de determinar el punto de inepción o el punto de inicio de las descargas parciales de una máquina y su comportamiento bajo variables como carga y temperatura.

El generador eléctrico de la central térmica N.1. cuenta con las siguientes características

Generador sincrónico con capacidad de 50MW

- ✓ Tensión nominal 13,8 kV
- ✓ Frecuencia: 60Hz



Figura 32 Instalación de acopladores capacitivos en generador de la central térmica N.1.

Los acopladores capacitivos instalados en la Central Térmica N.1. se muestran en la figura 32, para su instalación y la ejecución de las pruebas de descargas parciales se solicitó a la central contar con la máquina indisponible durante 15 horas. El dinero que deja de recibir la central por la indisponibilidad de la máquina está dado por:

$$\text{Lucro cesante} = P * t * \text{factor de planta} * \text{precio} \quad \text{Ec. 9.1}$$

Donde:

- P = Potencia de la unidad de generación: 50MW
- t = Tiempo de indisponibilidad: para el desarrollo de esta actividad se requirieron 15 horas
- Factor de planta = porcentaje del periodo de tiempo (mensual o anual) en que una central genera energía, en este caso, el factor de planta de la central térmica N.1. es de 16.6% o 0.166 para el 2020
- Precio = valor al que la electricidad es vendido en contratos y en la bolsa de energía.
Para la central térmica N.1. el precio está dado por: \$184.900

Aplicando la ecuación 9.1., en la central térmica N.1., se tiene:

$$\text{Lucro cesante} = \$23.020.050 \quad \text{Ec. 9.2}$$

La ecuación 9.2. indica que la central térmica N.1. por la actividad de medición de descargas parciales por barrido térmico deja de recibir más de 20 millones de pesos por cada uno de estos mantenimientos predictivos. Ahora, si este ejercicio se aplica en una central de generación hidráulica como la central de generación N.1., y ajustando las variables:

- $P = 109\text{MW}$
- Factor de planta = 58% o 0.58

$$\text{Lucro cesante} = \$175.340.670$$

Ec. 9.3

Se tiene que una parada de máquina para un generador de la central hidroeléctrica N.1. haría que la central deje de ganar más de 170 millones de pesos, o, teniendo en cuenta sus dos unidades de generación, la central hidroeléctrica N.1. en una actividad de medición de descargas parciales dejaría de ganar más de 350 millones de pesos y considerando que el valor aproximado de un sensor electromagnético como electromagnético implementado en esta tesis está alrededor de US 100.000, el lucro cesante por la ejecución de la actividad de medición de descargas parciales en los generadores de la central hidroeléctrica N.1., puede costear la compra de un sensor electromagnético el cual, como hemos visto en el desarrollo de esta tesis, no solo puede usarse con generadores, sino también con transformadores de potencia y cables de potencia de cualquier central de generación térmica o hidráulica.