



UNIVERSIDAD CATÓLICA “NUESTRA SEÑORA DE LA ASUNCIÓN”
CAMPUS ALTO PARANÁ
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA CON ORIENTACIÓN ELECTRÓNICA

DESCARGAS PARCIALES EN CENTRALES GENERADORAS
ELÉCTRICAS

CAMILA ISABEL GONZÁLEZ LÓPEZ

Hernandarias - Paraguay

Diciembre del 2019



UNIVERSIDAD CATÓLICA “NUESTRA SEÑORA DE LA ASUNCIÓN”
CAMPUS ALTO PARANÁ
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA CON ORIENTACIÓN ELECTRÓNICA

DESCARGAS PARCIALES EN CENTRALES GENERADORAS
ELÉCTRICAS

CAMILA ISABEL GONZÁLEZ LÓPEZ

TUTOR: MSC. ING. RODRIGO RAMOS.

COTUTOR: LIC. ARIEL GUERRERO.

Hernandarias - Paraguay

Diciembre del 2019

CAMILA ISABEL GONZÁLEZ LÓPEZ

DESCARGAS PARCIALES EN CENTRALES GENERADORAS
ELÉCTRICAS

Proyecto de Fin de Carrera presentado como requisito para obtener
el título de Ingeniera Electromecánica con Orientación Electrónica.
Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Católica “Nuestra
Señora de la Asunción”

Tutor: Msc. Ing. Rodrigo Ramos.

Cotutor: Lic. Ariel Guerrero.

Hernandarias

2019

González López, Camila Isabel (2019). Descargas parciales en centrales generadoras eléctricas. Hernandarias, Universidad Católica, 102p.

Tutor: Msc. Ing. Rodrigo Ramos

Cotutor: Lic. Ariel Guerrero

Defensa de Proyecto de Fin de Carrera

Palabras claves: Descargas parciales, especificación técnica, gestión de activos eléctricos, mantenimiento preventivo, medición en línea, monitoreo basado en condiciones, sistema de aislamiento.

CAMILA ISABEL GONZÁLEZ LÓPEZ

DESCARGAS PARCIALES EN CENTRALES GENERADORAS
ELÉCTRICAS

Proyecto de fin de carrera presentado a la carrera de Ingeniería Electromecánica con
Orientación Electrónica como requisito para la obtención del título de Ingeniera
Electromecánica con Orientación Electrónica

Mesa Examinadora

Hernandarias, diciembre de 2019

DEDICATORIAS

A mis padres María Teresa, Jorge Alberto y hermanos María Verónica y Hugo Ignacio, especialmente a mi mamá, que me dio fuerzas y siempre creyó en mi capacidad de enfrentar este desafío.

A mi esposo Rafael.

Camila Isabel González López

AGRADECIMIENTOS

Al concluir esta etapa quiero agradecer en primer lugar a Dios y a la Virgen María, por concederme los dones necesarios para crecer en sabiduría, espero en la vida profesional honrar y retribuir esta gracia recibida compartiendo lo aprendido con los demás y siendo útil a la sociedad.

A mi papá Jorge Alberto, por sus consejos y especialmente a mi mamá, María Teresa, por brindarme la posibilidad de estudiar y por apoyarme en todo momento, fue ejemplo de paciencia y perseverancia y a pesar de mis quejas o momentos de dificultad no midió esfuerzos para ayudarme a llegar a la meta.

A mis hermanos María Verónica y Hugo Ignacio quienes me han orientado en los momentos difíciles y además me regalaron sobrinos que llenan mi vida de alegría.

A mi esposo Rafael, quien siempre creyó en mi potencial y me ayudó a desarrollarlo y que también ha colaborado activamente con la realización de este trabajo. Extiendo también este agradecimiento a todos los miembros de su familia.

A mi tutor, Ing. Rodrigo Ramos y a mi co-tutor Lic. Ariel Guerrero, quienes me orientaron durante el desarrollo de esta investigación, a mis compañeros que hicieron que los largos años de estudio sean alegres y más llevaderos, a mis amigos en especial a aquellos que contribuyeron con ánimos y sugerencias para este trabajo y también a aquellos con los que he compartido largas horas de estudio, a los profesores que además de formarnos técnicamente nos trasmisieron valores y a todos los miembros de la comunidad educativa.

Camila Isabel González López

“Pon en manos del Señor todas tus obras, y tus proyectos se cumplirán”

Proverbios 16:3

RESUMEN

Los sistemas de aislamiento de equipos eléctricos pueden estar sometidos al fenómeno de descargas parciales debido a las imperfecciones intrínsecas al proceso de fabricación y a otros factores como desgaste y envejecimiento. Físicamente, lo que ocurre es que, en un punto localizado se produce un aumento significativo de la intensidad de campo, entonces, una vez que el equipo es sometido a altos niveles de tensión de servicio, puede iniciarse el proceso degenerativo de ruptura dieléctrica del sistema de aislamiento en ese punto.

El presente Trabajo Final de Grado denominado Descargas Parciales en Centrales Generadoras Eléctricas presenta el estado del arte de las mediciones de descargas parciales, fruto de una compleja investigación bibliográfica en el área. Abarca también un apartado que aporta información acerca de las centrales generadoras eléctricas en Paraguay. Se indica que la medición en línea es el método más recomendado para una evaluación oportuna de los sistemas de aislamiento de máquinas eléctricas, este método brinda a los usuarios la posibilidad de obtener información que puede ser procesada, analizada y posteriormente reproducida gracias a los modernos métodos de almacenamiento que son los pilares del monitoreo basado en condiciones. Estos datos permiten la realización de mantenimiento preventivo, promoviendo la optimización del manejo de recursos y una gestión de activos eléctricos más eficiente.

El proyecto contiene además la descripción de una cadena de medición típica del fenómeno estudiado. Finalmente, se presenta la especificación técnica de una bancada para el estudio y medición de descargas parciales. La Especificación Técnica se compone de un esquema de circuito y un listado detallado de los equipos necesarios para efectuar mediciones de descargas parciales con base en un modelo capacitivo.

Palabras Claves: Descargas parciales, especificación técnica, gestión de activos eléctricos, mantenimiento preventivo, medición en línea, monitoreo basado en condiciones, sistema de aislamiento.

ABSTRACT

Insulation systems of electrical equipment may be subject to partial discharge phenomena due to imperfections intrinsic to the manufacturing process and other factors such as use and aging. Physically, what happens is that, at a localized point there is a significant increase in field strength, then, once the equipment is subjected to high levels of operating voltage, the degenerative process of dielectric breakdown of the insulation system at that point can initiate.

This Final Degree Project called Partial Discharges in Power Plants presents the state of the art of partial discharge measurements as the result of complex bibliographic research in the area. It also includes a section that provides information about power plants in Paraguay. It is indicated that online measurement is the most recommended method for a timely evaluation of electrical machine insulation systems. This method offers users the possibility of obtaining information that can be processed, analyzed and subsequently reproduced thanks to modern storage methods that are the pillars of condition-based monitoring. These data allow the realization of preventive maintenance, promoting the optimization of resources management and a more efficient management of electrical assets.

This project also contains the description of a typical digital measurement chain of the studied phenomena and finally the technical specification of a bench for the study and measurement of partial discharges is presented. The design consists of a circuit scheme and a detailed list of the necessary equipment to carry out partial discharge measurements based on a capacitive model.

Keywords: Condition-based monitoring, electrical asset management, insulation system, online measurement, partial discharges, preventive maintenance, technical specification.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	1
Planteamiento del Problema.....	2
Objetivos.....	3
Objetivo General	3
Objetivos Específicos.....	3
Justificación.....	4
MARCO TEÓRICO	5
Sistemas de Potencia.....	5
Centrales generadoras eléctricas	7
Generación de energía eléctrica en el Paraguay.....	10
Antecedentes	14
Ocurrencia de descargas parciales.....	20
Descargas parciales. Visión general.....	24
¿Cuándo ocurre una descarga parcial?	25
¿Por qué las descargas parciales son tan peligrosas?	30
Gestión de activos eléctricos	31
Medición de descargas parciales	34
Sistemas utilizados para la medición de DP	34
Sistema analógico de medición de DP.	34
Sistema digital de medición de DP.....	35
Sistema digital de medición de DP con filtrado digital.....	35
Tipos de medición de descargas parciales	37
Principales inconvenientes en la medición de DP	39
Tipos de fallas de descargas parciales	40
Técnicas de medición de DP	45
Modelo capacitivo	46
Radiofrecuencia.....	48
Método químico	51
Normas técnicas para la medición de DP	52
MARCO METODOLÓGICO	53
Diseño Metodológico	53
Alcance.....	53
Diseño de la investigación	54

Enfoque.....	54
Área de estudio	54
Contexto de la investigación	55
Informaciones Necesarias	55
ANÁLISIS DE DATOS DE MEDICIONES DE DESCARGAS PARCIALES	57
ELABORACIÓN DE LA ESPECIFICACIÓN TÉCNICA DE UNA BANCADA PARA EL ESTUDIO Y MEDICIÓN DE DESCARGAS PARCIALES.....	60
Descripción de la cadena típica de medición, transmisión de señales medidas y procesamiento de las mismas, para un generador síncrono de grandes dimensiones.	60
Esquema referencial de modelo capacitivo utilizado.	62
Lista de componentes necesarios.....	63
Esquema del circuito a emplear para realizar la medición de DP.....	64
Características técnicas de los equipos del laboratorio.....	64
Estimación del costo de la bancada propuesta.....	67
RESULTADOS	68
CONCLUSIÓN	70
TRABAJOS FUTUROS	71
BIBLIOGRAFÍA	72
ANEXO I	76
Cálculo aproximado de la generación en USD por hora de una unidad generadora.....	76
ANEXO II	78
Datos utilizados para realizar el cálculo del Anexo I	78
ANEXO III	80
Datos técnicos del equipo de la NI que puede ser utilizado para procesar señales de DP.....	80
ANEXO IV.....	84
Circuitos de prueba básicos para DP extraídos de la copia de la norma IEC60270	84
Circuito eléctrico equivalente de medición off line para un canal en la fase U	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Componentes principales de los Sistemas de Potencia	5
Figura 2 Recursos Energéticos.....	8
Figura 3 Generación mundial de electricidad neta por fuente de energía.....	8
Figura 4 Central Hidroeléctrica Itaipu	10
Figura 5 Central Hidroeléctrica Yacyreta	11
Figura 6 Central Hidroeléctrica Acaray	11
Figura 7 Grupo electrógeno Caterpillar	12
Figura 8 Grupo electrógeno Olympia	12
Figura 9 Instalaciones de la Planta Solar situada en Mayor Pablo Lagerenza.....	13
Figura 10. Daños en el aislamiento, térmicos, mecánicos y de rodamiento	15
Figura 11. Causas raíz de falla.....	16
Figura 12 Distribución de los incidentes por causa raíz de la falla y extensión del daño	17
Figura 13 Distribución de los incidentes por causa raíz de falla e interrupción	18
Figura 14 Influencia de los métodos de monitoreo de condiciones en las causas raíz de aislamiento	19
Figura 15 Fotografía de canales de descarga. A. Descarga serpentina en aire (Lemke 1967). B. Descarga líder en aceite (Hauschild 1970). C. Árboles en PMMA (Pilling 1976).....	22
Figura 16 Parámetros de tiempo de pulsos de corriente DP. A. Forma teórica del pulso calculada por Bailey para pequeños huecos en dieléctricos sólidos. B. Formas de pulso medidas por Boggs y Stone para un punto afilado (izquierda) y una partícula flotante en SF6 (derecha)	22
Figura 17 Patrón de descargas parciales según Kreuger, (1989).	23
Figura 18 Tamaños típicos de inclusiones gaseosas en dieléctricos sólidos según Kreuger (1989).....	23
Figura 19 Líneas de campo eléctrico homogéneo.....	25
Figura 20 Hueco en el sistema de aislación	25
Figura 21 Concentración de campo eléctrico en el hueco	26
Figura 22 Líneas de equipotencialidad	26

Figura 23. Ejemplo ilustrativo de ocurrencia de DP en un conductor.....	28
Figura 24 Daños en una barra de estator y en una máquina rotativa	30
Figura 25 Curva de tasa de riesgo (curva bañera) para sistemas eléctricos.....	31
Figura 26 Ejemplos de marcadores de diagnóstico (propiedad de diagnóstico vs tiempo)	33
Figura 27 Esquema de un sistema analógico de medición de DP.....	34
Figura 28 Esquema de un sistema digital de medición de DP.....	35
Figura 29 Esquema de un sistema digital de medición de DP con filtrado digital	35
Figura 30 Perspectiva general de fallas de DP.....	41
Figura 31 Perspectiva general de fallas de DP.....	41
Figura 32 Descargas parciales internas, superficiales y corona según (Phung, 1997)	43
Figura 33 Patrones de DP resueltos en fase con sus defectos asociados	44
Figura 34 Configuración experimental utilizada por Gemant y Philippoff (1932) para explicar la recurrencia característica de los pulsos DP a la tensión de prueba de CA de frecuencia de potencia.....	47
Figura 35. (a). Registros de osciloscopios realizados por Gemant y Philippoff. (b). Enfoque para el cálculo del conteo de impulsos versus el nivel de voltaje de prueba.....	47
Figura 36. Modelo capacitivo de DP basado en red. (a). Electrodos de plano paralelo con elementos de circuito. (b). Circuito capacitivo equivalente modelo abc.....	48
Figura 37. Modelo para detección de DP.....	49
Figura 38 Espectro de frecuencia de una señal de DP	57
Figura 39 Ensayo de laboratorio en barras de estator	58
Figura 40 Gráfico PRPD correspondiente a la medición de DP en línea de un generador.....	58
Figura 41 Patrones PRPD de DP a) internas b) superficiales y c) corona	59
Figura 42 Capacitores de acoplamiento	60
Figura 43 Capacitor de acoplamiento con cuadripolo	61
Figura 44 Tarjeta de adquisición de datos	61
Figura 45 Esquema referencial de modelo capacitivo utilizado	62
Figura 46 Circuito de medición	64
Figura 47 Circuito simplificado de un cuadripolo	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Fuentes de información.....	14
Tabla 2 Constantes y resistencias dieléctricas aproximadas de diversos materiales a temperatura ambiente	27
Tabla 3 Presupuesto de una bancada para estudio y medición de DP modelo capacitivo.....	67

LISTA DE ACRÓNIMOS

DP	Descargas parciales
RF	Radiofrecuencia
PMMA:	Polimetilmetacrilato
GPIB	General Purpose Interface Bus. Bus de interfaz de propósito general
μ :	micro
pC	pico Coulomb
mV	milli Volt
EIA	U.S. Energy Information Administration. Administración de información de energía de Estados Unidos
CIGRE:	Consejo internacional de grandes redes eléctricas
CA:	Corriente alterna
CBM:	Condition Based Monitoring. Monitoreo basado en condiciones
ANDE:	Administración Nacional de Energía
Rpm:	Revoluciones por minuto
S.A.:	Sociedad Anónima
IEEE:	Institute of Electrical and Electronics Engineers. Instituto de Ingenieros eléctricos y electrónicos
IEC	International Electrotechnical Commission. IEC significa la Comisión Electrotécnica Internacional
CWIEME	Coil Winding Insulation and Electrical Manufacturing Exhibition. Son las siglas correspondientes al mayor evento mundial de exhibición de fabricantes dedicados a bobinados, aislantes, motores eléctricos, transformadores y generadores
OCDE	Organización para la cooperación y el desarrollo económico
PC	Personal Computer. Ordenador o computador personal
PRPD	Phase Resolved Partial Discharge, en español, descarga parcial resuelta en fase
GWh	GigaWatt Hora
MWh	MegaWatt Hora
NI	National Instruments

INTRODUCCIÓN

Se denomina Descarga Parcial a una descarga eléctrica que puentea parcialmente el aislamiento de un conductor. Este fenómeno ocurre por virtud de una ionización gaseosa transitoria debida a que la tensión en una irregularidad de la aislación excede un valor crítico. (IEE Std 1434-2014, p.5).

El fenómeno de las descargas parciales afecta a varios equipos que operan en alta tensión, entre los principales se pueden citar: transformadores, generadores y conductores. En las unidades generadoras de una central eléctrica, las ocurrencias de este fenómeno son más difíciles de predecir comparándolo con otras magnitudes ya estandarizadas tales como la vibración y la temperatura, por lo que su estudio se convierte en una necesidad para las industrias; esto implica indefectiblemente la convergencia de distintas áreas de la ingeniería, tales como mediciones eléctricas, estadística, tecnología de materiales, modelado matemático e ingeniería de software.

(Montanari, 2006) menciona que la vida útil de un sistema de aislamiento, que a menudo coincide con la vida útil del aparato eléctrico que aloja el sistema, siempre estará relacionada con el proceso de degradación más rápido. Por esta razón, la medición de descargas parciales, que a menudo es el fenómeno de degradación de mayor velocidad, se está convirtiendo en la herramienta principal para el diagnóstico de sistemas de aislamiento. En los artículos científicos consultados para esta investigación varios autores coinciden en que las mediciones de descargas parciales son las herramientas más útiles para evaluar la condición de los sistemas de aislamiento ya que a pesar de ser un fenómeno auto acelerado, es decir, una vez que inicia tiende a empeorar, el monitoreo de ocurrencias a través de mediciones permite la realización de mantenimiento preventivo oportuno, viabilizando así una gestión de activos eléctricos más eficiente.

En la presente investigación se hizo énfasis en un estudio bibliográfico cualitativo respecto al tema con la finalidad de ampliar los conocimientos necesarios para la comprensión y medición del fenómeno y así concretizar los objetivos propuestos.

Planteamiento del Problema

Debido a su naturaleza, las descargas parciales son difíciles de predecir y además producen una serie de manifestaciones físicas no deseadas en las máquinas eléctricas, tales como interferencias, calor, reacciones químicas, corto circuitos y otros que hacen que su estudio, medición y fundamentalmente su interpretación sean puntos importantes a considerar.

Según diversos autores consultados, la observación, medición e interpretación de las descargas parciales se traducen directamente en la mejora de las condiciones de operación, seguridad y mantenimiento preventivo de los equipos ayudando a extender la vida útil de los mismos. En consecuencia a lo expuesto arriba se plantean los siguientes cuestionamientos:

Pregunta General

¿Es posible estudiar el fenómeno de descargas parciales en un equipo de alta tensión de manera a entender el origen del mismo, sus fundamentos físicos y sus implicaciones en el desempeño del sistema eléctrico donde está ubicado?

Preguntas Específicas

¿Cuál es el estado del arte de las técnicas de medición de descargas parciales?

¿Cómo son las características de las señales de descargas parciales en un caso real?

¿Se puede elaborar especificaciones técnicas de una bancada capaz de efectuar mediciones de descargas parciales?

En caso afirmativo ¿Se puede realizar la validación virtual de la bancada propuesta?

Objetivos

Objetivo General

Estudiar el fenómeno de las DP en un equipo de alta tensión de manera a entender cabalmente el origen del mismo, sus fundamentos físicos y sus implicaciones en el desempeño del sistema eléctrico donde está ubicado.

Objetivos Específicos

- Investigar acerca del estado del arte de las técnicas de medición de descargas parciales.
- Analizar las características de las señales de descargas parciales de un caso correspondiente a un equipo real.
- Elaborar la especificación técnica de una bancada capaz de efectuar mediciones de descargas parciales.

Justificación

Las mediciones de descargas parciales se han realizado en equipos de CA, generadores, transformadores, líneas de transmisión, barras de subestaciones, etc. durante más de 40 años. El aislamiento eléctrico de estos equipos puede ser propenso a la actividad de descargas parciales como resultado de delaminaciones internas, de descargas de superficie, ranura y otros. Este tipo de actividad de descargas parciales, cuando el equipo está en funcionamiento normal, puede ocasionar un deterioro significativo a lo largo de un período de tiempo. La experiencia ha indicado que las mediciones de descargas parciales pueden ser útiles para evaluar el estado de, por ejemplo, devanados completos, bobinas y barras individuales. (IEEE Guide for the measurement of Partial Discharges in AC electric machinery, p. viii, 2014/2019).

Debido a las investigaciones preexistentes en el área se puede inferir que el estudio de las descargas parciales sirve fundamentalmente para realizar controles de calidad, evaluación y detección de envejecimiento y deterioro de los sistemas de aislamiento en equipos eléctricos, lo que es de vital importancia para la realización oportuna del mantenimiento preventivo de los mismos en tiempo y forma conveniente.

Por este motivo, será de utilidad para la comunidad educativa la investigación acerca del estado del arte de las descargas parciales y la elaboración de la especificación técnica de una bancada que sirva para su estudio y medición. Con esto, los estudiantes de la carrera de Ingeniería electromecánica con orientación electrónica de la Universidad Católica “Nuestra Señora de la Asunción” campus Alto Paraná podrán familiarizarse con este fenómeno y realizar futuramente estudios más profundos acerca del tema, tomando como base el contenido de este material.

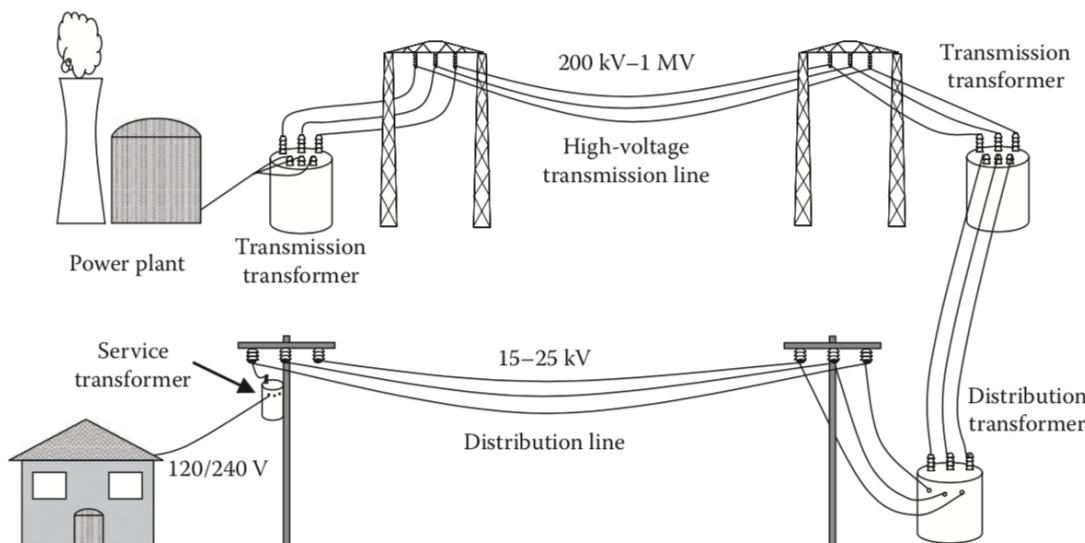
MARCO TEÓRICO

Sistemas de Potencia

(El Sharkawi, 2013/2019) menciona que a pesar de que la electricidad fue descubierta alrededor el año 600 a.C. no fue hasta finales del siglo XIX que se pudo tener energía eléctrica útil a disposición en los hogares, escuelas, oficinas o fábricas. Hoy en día la dependencia de la energía eléctrica está tan arraigada en nuestra sociedad que no podemos imaginarnos nuestra vida sin ella. De hecho la damos por garantizada, por eso cuando experimentamos un corte en el suministro nos damos cuenta de cómo nuestra vida es dependiente de la electricidad. Esta dependencia crea un desafío formidable para los ingenieros que consiste en hacer del sistema de potencia el sistema complejo más confiable y eficiente jamás creado por el hombre.

Los sistemas modernos de potencia están constituidos por tres sistemas distintos: generación, transmisión y distribución. La Figura 1 muestra un esquema básico de un sistema de potencia.

Figura 1 Componentes principales de los Sistemas de Potencia



Fuente: (El Sharkawi, 2013)

La electricidad generada en las centrales eléctricas es transmitida a todos los usuarios a través de un complejo sistema de transmisión que está compuesto principalmente por líneas de transmisión, transformadores y equipos de protección. Las líneas de transmisión son los enlaces entre las centrales generadoras y los centros de carga. Los transformadores son utilizados para elevar o reducir el voltaje. En la central generadora, la subestación es la encargada de aumentar las tensiones de las líneas de transmisión con transformadores elevadores a valores muy elevados (220-1200kV). Esto se realiza para reducir la corriente a través de las líneas de transmisión, que a su vez reduce la sección transversal de los cables o conductores para transmisión y consecuentemente se reduce el costo total del sistema de transmisión. En los centros de carga el voltaje de las líneas de transmisión se reduce a valores más bajos (15-25kV) mediante transformadores reductores para la distribución de potencia dentro de los límites de las ciudades. En los sitios de consumo la tensión es nuevamente reducida a valores entre 100 y 240V para la utilización en el hogar dependiendo de las normas del país (El Sharkawi, 2013/2019).

En Paraguay el valor de la tensión domiciliaria utilizada es 220V (fase-tierra) a una frecuencia de 50Hz. (Enchufes del mundo, s.f.)

Centrales generadoras eléctricas

Según (El Sharkawi, 2013/2019), el sistema de generación incluye las partes principales de las centrales generadoras como turbinas y generadores. En las centrales generadoras, los recursos energéticos tales como: calor, combustible, gas, energía hidráulica y energía nuclear son convertidos en electricidad. Éstos recursos energéticos a menudo se dividen en tres categorías libremente definidas:

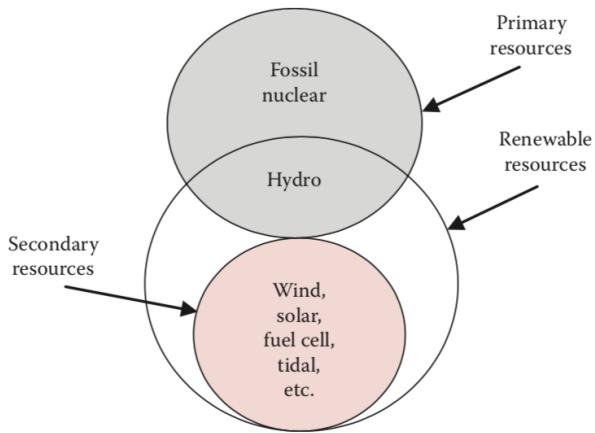
1. Combustibles fósiles
2. Combustibles nucleares
3. Recursos renovables

Los combustibles fósiles incluyen: petróleo, carbón y gas natural. Los recursos renovables incluyen energía hidroeléctrica, eólica, solar, hidrógeno, biomasa, marea y geotérmica. Todos estos recursos también se pueden clasificar en recursos primarios y secundarios. Los recursos primarios son:

1. Combustibles fósiles
2. Combustibles nucleares
3. Energía hidroeléctrica

Los recursos secundarios incluyen todas las energías renovables menos la hidroeléctrica, tal como se puede apreciar en la siguiente figura.

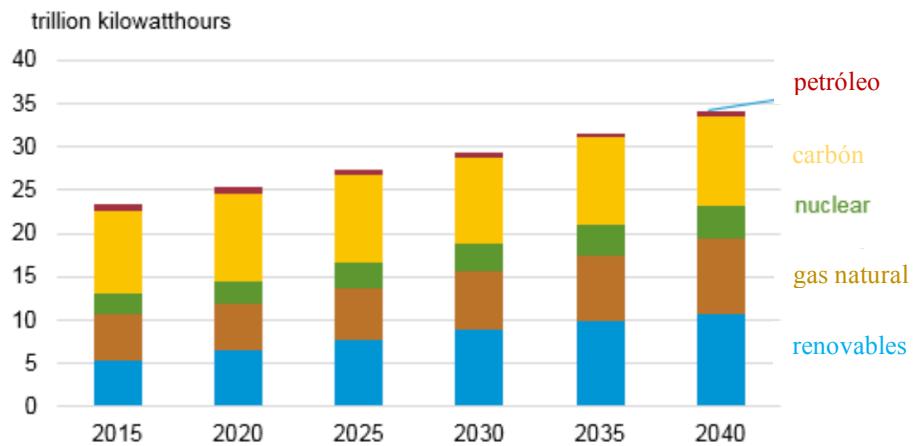
Figura 2 Recursos Energéticos



Fuente: (El Sharkawi, 2013)

De acuerdo a los datos publicados por la Administración de Energía de Estados Unidos (EIA) en el reporte denominado “Perspectivas internacionales de energía 2017”, la electricidad es la forma de consumo de energía de uso final de más rápido crecimiento en el mundo, tal como lo ha sido por muchas décadas. Los sistemas de energía continúan evolucionando de redes aisladas y no competitivas a mercados integrados nacionales e internacionales.

Figura 3 Generación mundial de electricidad neta por fuente de energía



Fuente: Administración de la Información de Energía de Estados Unidos, 2017/2019

Las perspectivas mundiales a largo plazo continúan mejorando para la generación a partir de fuentes de energía renovables y gas natural (ver Fig. 3). Las energías renovables son la fuente de energía de más rápido crecimiento para la generación de electricidad, con aumentos promedio estimado de 2.8% al año de 2015 a 2040. Los recursos renovables no hidroeléctricos son las fuentes de energía de más rápido crecimiento para la capacidad de nueva generación tanto en las regiones de la OCDE (Organización para la cooperación y el desarrollo económico), como en las que no lo son. Las energías renovables no hidroeléctricas representaron el 7% de la generación mundial total en 2015; su participación en 2040 es del 15% en un caso de referencia denominado IEO2017, con más de la mitad del crecimiento proveniente de la energía eólica. Después de las fuentes de energía renovables, el gas natural y la energía nuclear son las siguientes fuentes de energía de más rápido crecimiento utilizadas para generar electricidad. Muchos países, particularmente aquellos en la OCDE han promulgado políticas y regulaciones ambientales destinadas a aumentar la presión sobre los generadores de energía eléctrica para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de las plantas de energía eléctrica al disminuir el uso de combustibles fósiles. Como resultado, cambiará el papel constante del carbón como el combustible menos costoso para las centrales eléctricas. La generación neta a carbón aumenta en un 0,4% / año, en comparación con el aumento del 2,8%/año en la generación renovable proyectada. Para 2040, la generación a partir de fuentes de energía renovables superará la generación a partir de carbón a nivel mundial. (IEA, 2017/2019)

Generación de energía eléctrica en el Paraguay

En cuanto a generación de energía eléctrica, Paraguay participa con 50% del capital social en dos empresas hidroeléctricas de naturaleza jurídica binacional, Itaipú con una capacidad instalada de 14.000MW (Paraguay/Brasil) y Yacyretá con una capacidad instalada de 3.200MW (Paraguay/Argentina). La Administración Nacional de Energía, más conocida como ANDE opera la central hidroeléctrica Acaray con capacidad instalada de 210MW. Dos empresas del sector privado también operan en el mercado: CLYFSA (Compañía de Luz y Fuerza S.A.) que es una distribuidora que opera en Villarrica, en igual condición se encuentra la Cooperativa Menonita del Chaco, ambas con participación poco significativa en el mercado nacional de electricidad. (Vice Ministerio de Minas y Energía, 2019).

Figura 4 Central Hidroeléctrica Itaipú



Fuente: (Agencia de información paraguaya, 2018)

Figura 5 Central Hidroeléctrica Yacyreta



Fuente: (El Cronista, 2019)

Figura 6 Central Hidroeléctrica Acaray



Fuente: (Última Hora, 2018)

Además de la generación hidráulica mencionada, la ANDE cuenta con las siguientes centrales de generación térmica: Bahía Negra 0,565 MW, Fuerte Olimpo 0,50 MW, Pedro J. Caballero 3,0 MW, Salto del Guairá 20,875 MW. (ANDE, s.f.)

La central térmica localizada en la ciudad de Bahía Negra cuenta con un grupo electrógeno Caterpillar de 365kVA, 292 Kw. y otro grupo electrógeno Olympian de 200kVA, 160kW. (Ferreira Beling & Ríos González, 2014). Los grupos electrógenos son una combinación de un generador eléctrico y un motor que están montados juntos y conforman una sola pieza capaz de producir energía eléctrica, éstos equipos se utilizan en sitios que no están conectados a la red eléctrica ó para suministrar energía en caso de falla de la red (Minnesota State University Mankato, s.f./2019).

Figura 7 Grupo electrógeno Caterpillar



Fuente (Ferreira Beling & Ríos González, 2014)

Figura 8 Grupo electrógeno Olympia



Fuente (Ferreira Beling & Ríos González, 2014)

En la localidad del chaco paraguayo, específicamente en la quinta división de infantería situada en Mayor Pablo Lagerenza, Alto Paraguay fue inaugurada en Enero de 2019 una central solar compuesta por 160 paneles solares con potencia de 40kW solar. La obra fue financiada por la Itaipú Binacional y la instalación estuvo a cargo de funcionarios del Parque Tecnológico Itaipú. (Itaipú Binacional, 2019).

Figura 9 Instalaciones de la Planta Solar situada en Mayor Pablo Lagerenza



Fuente: (Itaipú Binacional , 2019)

En el sitio web del Vice Ministerio de Minas y Energía dependiente del Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones de la República del Paraguay se menciona que: dadas las altas capacidades en generación hidroeléctrica, la energía eléctrica generada en el Paraguay es casi exclusivamente del tipo hidráulico.

Por lo tanto, en la presente investigación acerca de la ocurrencia de descargas parciales en centrales generadoras eléctricas se consideraron para el estudio aquellos equipos que pueden ser afectados por descargas parciales y se encuentran en centrales hidroeléctricas, tales como: conductores e hidrogeneradores.

Antecedentes

Uno de los grupos de trabajo del CIGRÉ denominado WG A1.10 conformado por (García Araco, & otros, 2009) realizó un estudio que buscaba determinar las causas y el lugar de las fallas en hidrogeneradores con la finalidad de obtener información estadística para evaluar los principales riesgos de fallas en los mismos. La intención de esta investigación fue la de proveer información útil para usuarios y fabricantes y así mejorar la confiabilidad futura de las unidades.

El estudio fue realizado en varios países y se limitó a fallas que produjeron paradas de máquina forzadas de más de 10 días en hidrogeneradores con clasificación superior a 10MVA funcionando por más de 10 años. Se trató de un cuestionario que fue enviado tanto a fabricantes como a usuarios; el cuestionario fue dividido en dos partes: La primera parte del cuestionario fue para evaluar el tamaño de la muestra para cada compañía e incluía preguntas relacionadas al periodo de tiempo cubierto por la encuesta (no menor a 10 años) el número de generadores superiores a 10MVA y una suma global de la potencia de los mismos. La segunda parte se enfocó en la gravedad de la falla (interrupción de servicio y extensión del daño), naturaleza de la falla, causas principales, el tipo de daño y la influencia de los métodos de monitoreo y reducción de riesgo en la disminución de costos por falla. En la tabla que se presenta a continuación se resumen las fuentes de información utilizadas para el estudio. 16 empresas públicas y 1 fabricante en 5 países conforman la muestra.

Tabla 1. Fuentes de información

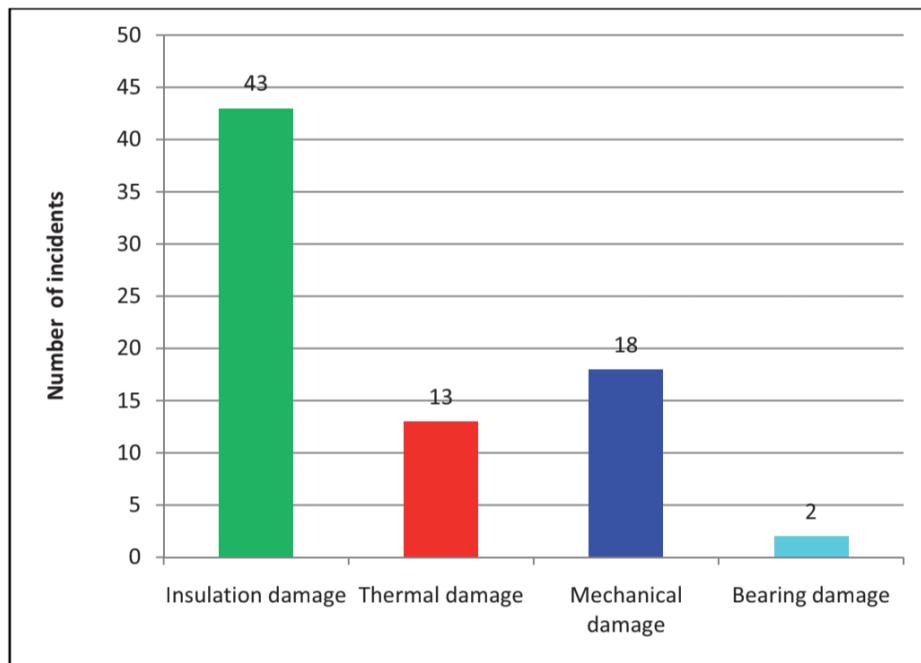
Country	No. of companies	No. of hydrogenerators	Total power of hydrogenerators (MVA)	Incidents Reported	
				Number	Total Power (MVA)
Australia	1 (Utility)	31	3.756	1	145
Germany	5 (Utilities)	111	3.785	5	597
Norway	2 (1 Utility+1 Manufacturer)	410	20.000	11	1.343
Spain	4 (Utilities)	409	16.384	37	2.700
Sweden	5 (Utilities)	238	13.317	15	804
		1.199	48.692	69	5.589

Fuente: (García Araco, y otros, 2009)

Las fallas han sido evaluadas desde dos puntos de vista distintos, definiendo para ello los siguientes conceptos de daño y causa raíz de falla.

Daño: puede ser considerado como perjuicio o lesión a la propiedad, en este caso, de un hidrogenerador, que resulta en la pérdida de valor o el deterioro de la utilidad. Se han establecido cuatro categorías de daños: daños en el aislamiento, daños térmicos, daños mecánicos y de rodamiento. La Fig. 10 muestra que la ocurrencia de daños en el aislamiento representa a más de la mitad de la muestra.

Figura 10. Daños en el aislamiento, térmicos, mecánicos y de rodamiento



Fuente: (García Araco, y otros, 2009)

El grupo de investigadores destacó que el 40% de los daños están relacionados con fallas de estator a tierra o de fase a fase y alrededor del 12% producen quemaduras de aislamiento.

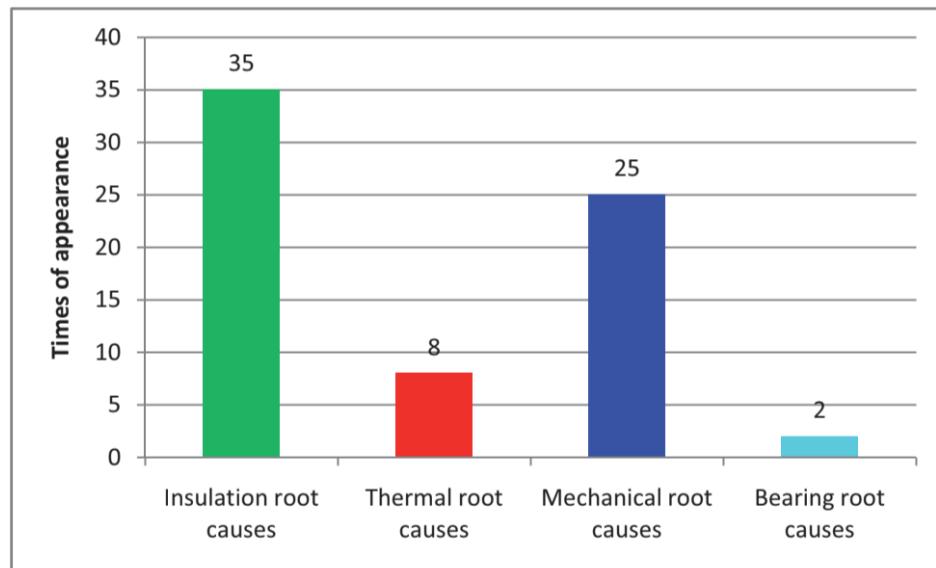
Causa Raíz de falla:

En el ítem 3.1 del estudio realizado se discutieron las causas directas o inmediatas que llevaron a la falla. Sin embargo, estas causas a menudo son el resultado de otro conjunto de causas, que podrían denominarse causas intermedias, y éstas a su vez pueden ser el resultado de otras causas.

Cuando se sigue una cadena de causa y efecto desde un estado final conocido, de regreso a un origen o punto de inicio, se encuentran las causas raíz. El propósito principal de intentar encontrar las causas raíz es resolver un problema que realmente haya ocurrido o evitar que un problema menos serio se extienda a un nivel inaceptable. El concepto básico es que resolver un problema abordando las causas de raíz es, en última instancia, más efectivo que simplemente abordar los síntomas o las causas directas.

Se identificaron las siguientes causas fundamentales relacionándolas con el daño resultante: causas de aislamiento, térmicas, mecánicas y de raíz de rodamientos. La Fig. 11 muestra la ocurrencia de las causas raíz de falla.

Figura 11. Causas raíz de falla



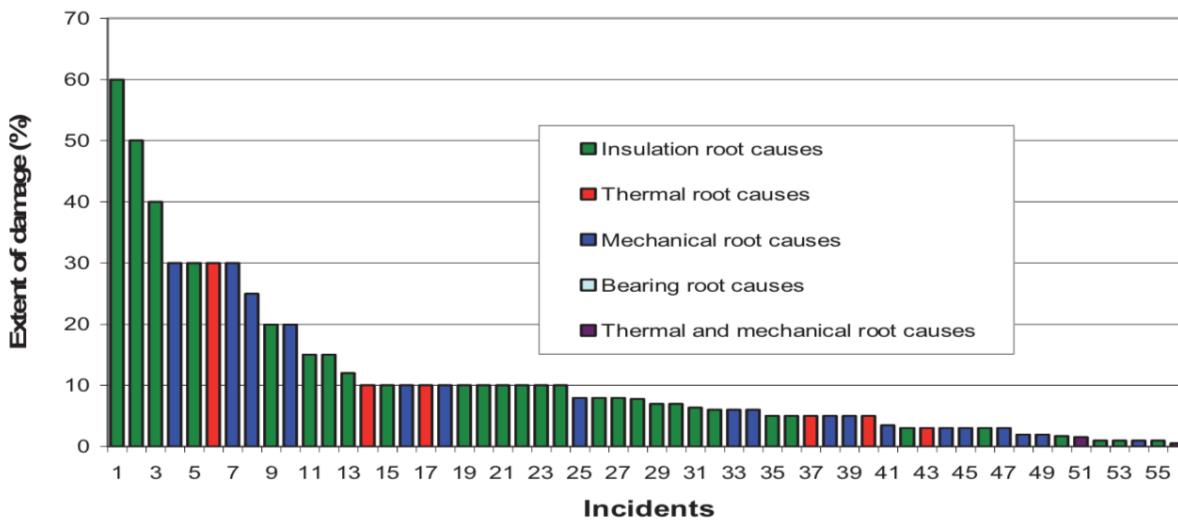
Fuente: (García Araco, y otros, 2009)

Las conclusiones a las que arribó el estudio fueron las siguientes:

Para observar la gravedad de una falla se deben tener en cuenta dos aspectos principales: la extensión del daño y la interrupción producida, también conocida como parada de máquina. Una falla infrecuente que produce una interrupción muy larga es tan grave como otra falla más común que produce interrupciones más cortas.

La Fig. 12 muestra la relación entre la causa raíz del fallo y la extensión del daño. Como se puede ver, las fallas más destructivas son aquellas originadas por causas raíz de aislamiento (tres incidentes con un grado de daño superior al 30%).

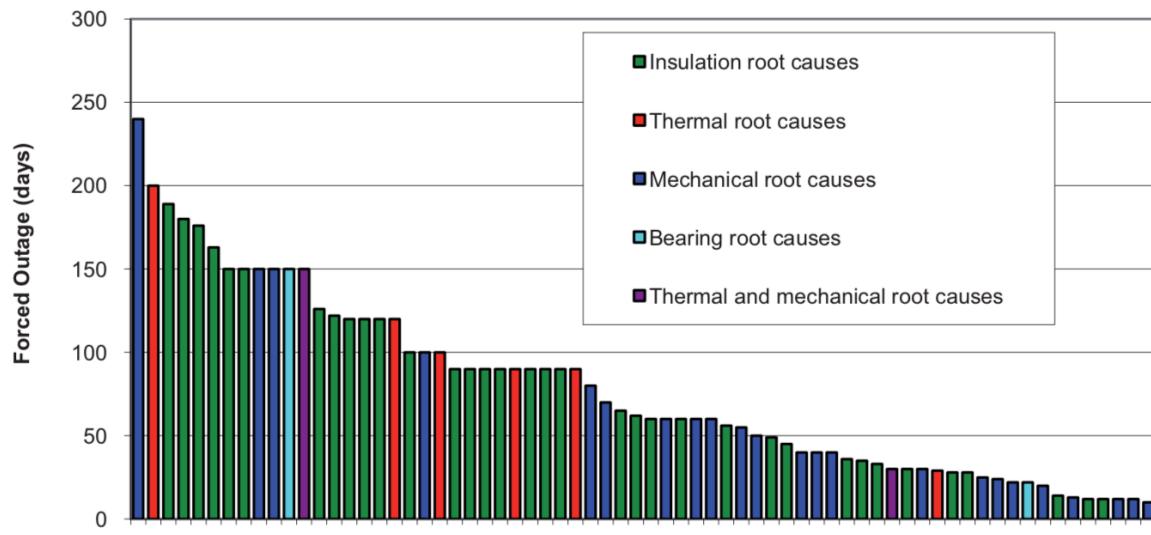
Figura 12 Distribución de los incidentes por causa raíz de la falla y extensión del daño



Fuente: (García Araco, y otros, 2009)

La Fig. 13 muestra la relación entre la causa raíz del fallo y la interrupción del servicio. En solo un incidente, la interrupción fue de más de 200 días (debido a causas mecánicas), para dieciocho incidentes (25%) la interrupción fue de más de 100 días y para cuarenta y un incidentes (60%) la interrupción fue de más de 50 días.

Figura 13 Distribución de los incidentes por causa raíz de falla e interrupción



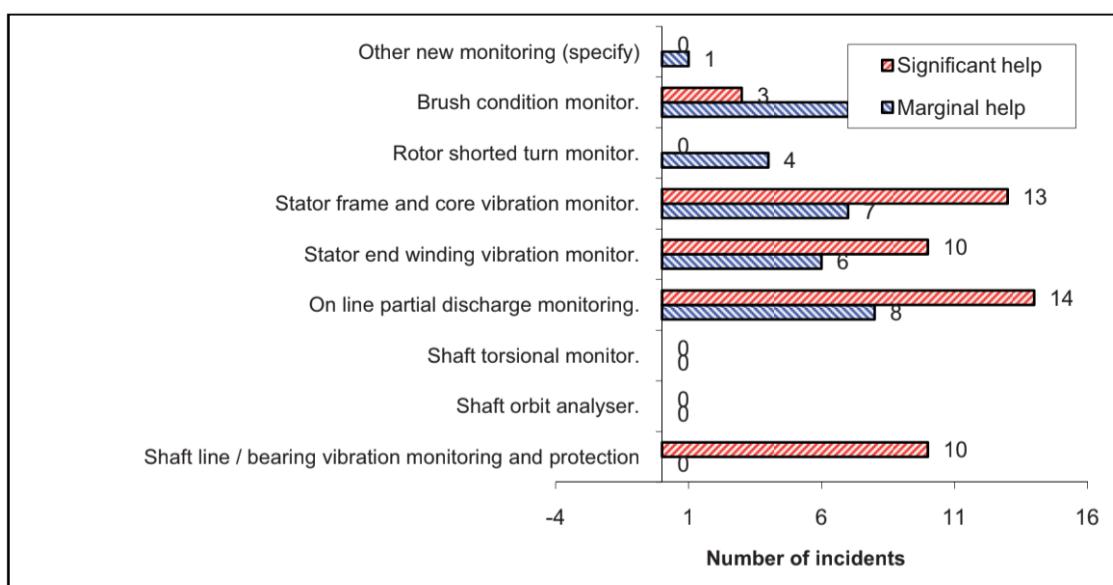
Fuente: (García Araco, y otros, 2009)

Los resultados de esta encuesta muestran que los daños en el aislamiento son las causas más frecuentes de falla (57%) y las que producen mayor daño (en algunos casos más del 30%). La distribución de las causas raíz de falla es similar a la del daño, pero una falla de aislamiento no siempre se debe a una causa de raíz de aislamiento.

Debe tenerse en cuenta que la gravedad (costo, grado de daño y parada de máquina) de un fallo mecánico, térmico o de rodamientos puede ser tan importante como el de una falla de aislamiento.

Otro apartado del mismo estudio trata acerca de la influencia de los métodos de monitoreo de condiciones en causas raíz; los investigadores afirman que el monitoreo de vibraciones (estator / núcleo, devanados finales y rodamientos) poseen mucha influencia en las causas raíz de aislamiento y también mencionan que el monitoreo de descargas parciales es otro método bien conocido, muy apreciado y cada vez más presente en las centrales eléctricas. Por el contrario, el monitoreo de vibración (estator / núcleo, devanados finales y rodamientos) tiene una influencia marginal en las causas mecánicas de raíz. Esto refuerza la idea de que los fabricantes deben abordar las causas mecánicas de raíz.

Figura 14 Influencia de los métodos de monitoreo de condiciones en las causas raíz de aislamiento



Fuente: (García Araco, y otros, 2009)

Las causas de fallas en el aislamiento parecen ser más evolutivas y sensibles al tiempo que otras (mecánica, térmica y de rodamiento). Por lo tanto, la responsabilidad de reducir estas últimas causas de origen recae principalmente en los fabricantes (diseño preciso, estándares de alta calidad, etc.) por un lado, y por otro lado, la responsabilidad de la evaluación de la condición del hidrogenerador recae en los usuarios. El monitoreo de descargas parciales y el monitoreo de vibraciones son los métodos más valiosos, ya que son vitales para prever la ocurrencia de fallas futuras y para planificar las medidas correctivas adecuadas. (García Araco, y otros, 2009)

Ocurrencia de descargas parciales.

Las descargas parciales en el aislamiento técnico son consecuencia de imperfecciones dieléctricas, como bordes afilados en el aire ambiente e inclusiones gaseosas en dieléctricos líquidos y sólidos. Esto causa un incremento del campo local, que podría exceder la intensidad de campo intrínseca, de modo que se puedan iniciar las avalanchas de electrones autosostenibles. El movimiento de los portadores de carga dentro de las inclusiones gaseosas se asocia con rápidos pulsos de corriente transitoria detectables en los electrodos del objeto de prueba, lo que puede ser utilizado ventajosamente para el reconocimiento de descargas parciales (Hauschild y Lemke, 2014).

El primer método experimental aplicado para el reconocimiento de descargas eléctricas se remonta al año 1777 cuando Lichtenberg descubrió figuras de polvo como estrellas y círculos en la superficie de una torta de ámbar después de haber sido ocultada por chispas de unos 40 cm de longitud (Lichtenberg 1777, 1978). A mediados del siglo XIX, la técnica de la figura de Lichtenberg se convirtió en una herramienta valiosa para estudiar los fenómenos de descarga eléctrica utilizando no solo polvo sino también fotografías para registrar patrones de descarga típicos (Blake 1870; Toepler 1898; Müller 1927).

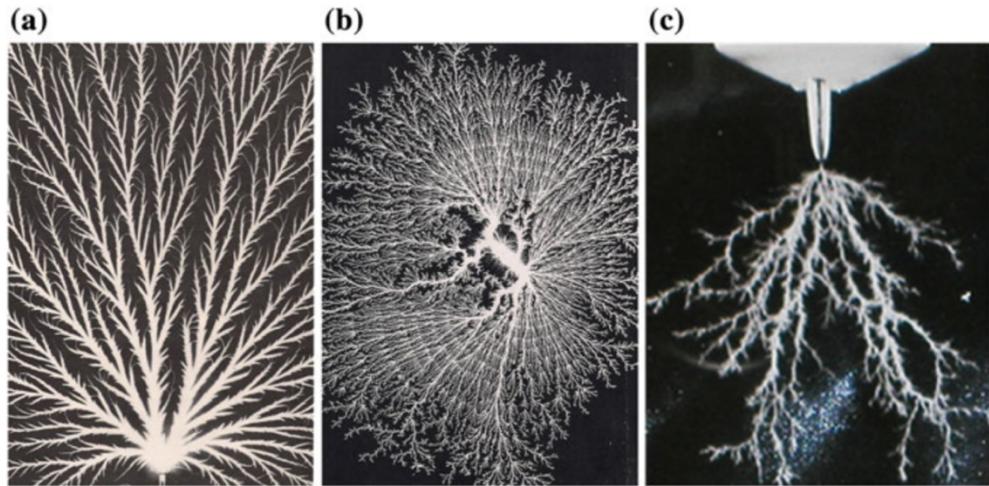
Desde principios del siglo pasado, cuando los altos voltajes se utilizaron cada vez más para la transmisión de energía eléctrica a larga distancia, se supo que las descargas en inclusiones llenas de gas de dieléctricos sólidos pueden considerarse un precursor de una ruptura definitiva. Por lo tanto, la detección de descargas parciales se volvió cada vez más interesante cuando se adoptaron varias herramientas para medirla, como métodos ópticos, químicos, acústicos y eléctricos. Desde la década de 1960, la medición eléctrica de DP es una herramienta ampliamente aceptada para las pruebas de garantía de calidad de los aparatos de alta tensión después de la fabricación (Hauschild & Lemke, 2014).

Como las descargas parciales están asociadas con la ionización de las moléculas de gas, tales eventos ocurren no solo en el aire ambiente sino también en cavidades llenas de gas de dieléctricos sólidos o en burbujas y vapor de agua de líquidos dieléctricos. Por lo tanto, el mecanismo de descarga fundamental conocido por el aire ambiente, como Townsend, descargas de cable y líder, se investigó ampliamente desde principios del siglo pasado (Townsend 1915, 1925; Schuman 1923; Meek and Craggs 1953; Loeb 1956; Raether 1964; Park and Cones 1963) también puede ocurrir en inclusiones gaseosas. Las fotografías típicas de canales de descarga que se desarrollan en aire ambiente y aceite aislante, así como en PMMA, se muestran a modo de ejemplo en la Fig. 15 (Lemke 1967; Hauschild 1970; Pilling 1976).

Debido a la formación de avalanchas de electrones dentro del rango de nanosegundos, cada evento de descarga parcial individual está asociado con un pulso de corriente muy rápido causado por los portadores de carga en movimiento. En 1966, Bailey estimó teóricamente que el tiempo de subida más corto de los impulsos DP originales podría estar en el rango de nanosegundos. Esto se ha manifestado experimentalmente por Fujimoto y Boggs (1981), así como por Boggs y Stone (1982) utilizando el primer osciloscopio de alta velocidad disponible con un ancho de banda de 1 GHz, como se muestra en la Fig. 16.

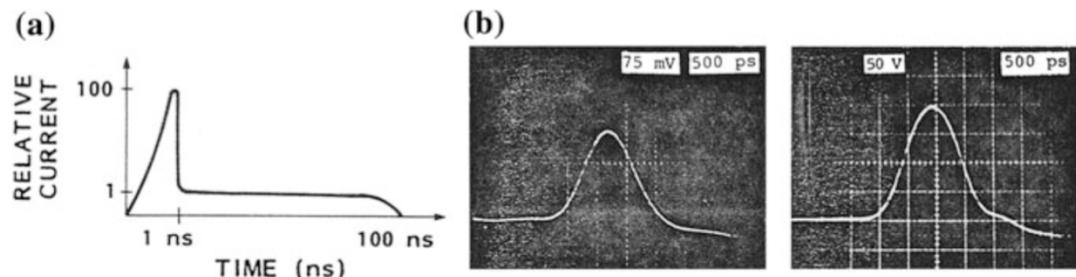
En cuanto al aislamiento técnico, el defecto de DP no es accesible, la forma real de los impulsos de corriente de DP no se puede medir. La única forma es desacoplar los transitorios DP de los terminales del objeto de prueba. Sin embargo, bajo esta condición, el contenido de frecuencia de la señal DP se reduce drásticamente debido a la inevitable atenuación y dispersión de los impulsos DP cuando se propagan desde la fuente DP a los terminales del objeto de prueba (Hauschild & Lemke, 2014).

Figura 15 Fotografía de canales de descarga. A. Descarga serpentina en aire (Lemke 1967). B. Descarga líder en aceite (Hauschild 1970). C. Árboles en PMMA (Pilling 1976)



Fuente: (Hauschild & Lemke, 2014)

Figura 16 Parámetros de tiempo de pulsos de corriente DP. A. Forma teórica del pulso calculada por Bailey para pequeños huecos en dieléctricos sólidos. B. Formas de pulso medidas por Boggs y Stone para un punto afilado (izquierda) y una partícula flotante en SF6 (derecha)

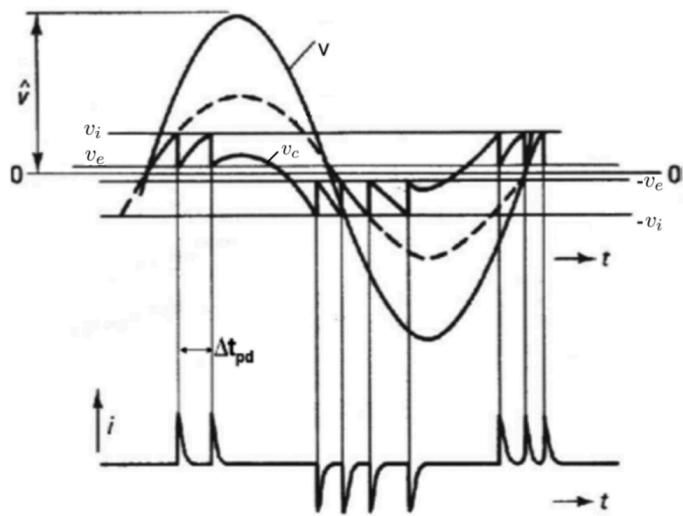


Fuente: (Hauschild & Lemke, 2014)

Cuando los aislantes de los equipos eléctricos son sometidos a una tensión V sinusoidal pueden aparecer DP en las imperfecciones. Esto sucede a partir de un nivel de tensión llamado tensión de ignición v_i . El campo eléctrico debido a esta tensión provoca una avalancha de electrones en las zonas no homogéneas que inicia la descarga. Las condiciones para que sigan apareciendo las descargas parciales solo desaparecen cuando la tensión cae por debajo de un valor llamado tensión de extinción v_e . En el ciclo positivo, una vez extinguida, la tensión en la imperfección v_c , empieza nuevamente a crecer mientras la tensión de alimentación aplicada al sistema continúa aumentando. Este proceso se repite siempre que en la onda de tensión haya

suficiente pendiente como para superar los niveles de ignición. En los ciclos negativos el mecanismo es análogo y origina pulsos de polaridad diferente. (Albarracín Sánchez, 2014).

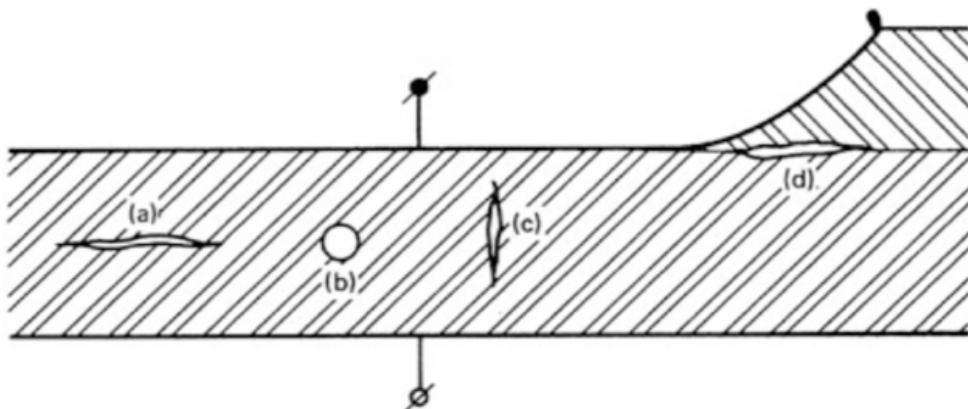
Figura 17 Patrón de descargas parciales según Kreuger, (1989).



Fuente: (Albarracín Sánchez, 2014)

La tensión de ignición que da lugar a este tipo de descargas, varía de acuerdo a factores como el tamaño y la forma del hueco en el dieléctrico. Por ejemplo, es menor en cavidades esféricas o elípticas que en cilíndricas. (Albarracín Sánchez, 2014).

Figura 18 Tamaños típicos de inclusiones gaseosas en dieléctricos sólidos según Kreuger (1989).



Fuente: (Hauschild & Lemke, 2014)

Descargas parciales. Visión general

A continuación, se presentan algunas definiciones de descargas parciales

Se denomina descarga parcial a una descarga eléctrica que puentea parcialmente el aislamiento de un conductor. Este fenómeno ocurre por virtud de una ionización gaseosa transitoria debida a que la tensión en una irregularidad de la aislación excede un valor crítico. (IEE Std 1434-2014, p.5).

De acuerdo con IEC 60270,

Una descarga parcial se define como la ruptura dieléctrica del aislamiento de equipos de alto voltaje como resultado de un aumento localizado en la intensidad de campo causada por la contaminación o sitios de descarga en el medio aislante. El pulso electromagnético liberado como resultado puede usarse para proporcionar una indicación de la condición del aislamiento.

Según la definición de la especificación IEC 60270

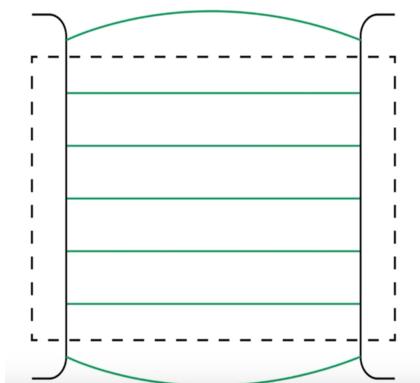
La descarga parcial es una descarga eléctrica localizada que solo parcialmente, puentea el aislamiento entre los conductores y que puede o no puede ocurrir adyacente a un conductor. Las descargas parciales son, en general, una consecuencia de las concentraciones de tensión eléctrica local en el aislamiento o en la superficie del aislamiento. Generalmente tales descargas aparecen como pulsos que tienen duraciones de mucho menos de 1 μ s. Las descargas parciales a menudo van acompañadas de emisiones de sonido, luz, calor y reacciones químicas.

A medida de facilitar la comprensión de estas definiciones se presentan a continuación gráficos y comentarios extraídos de una conferencia realizada en la CWIEME por René Hummel, un especialista en DP representante de la compañía OMICROM.

¿Cuándo ocurre una descarga parcial?

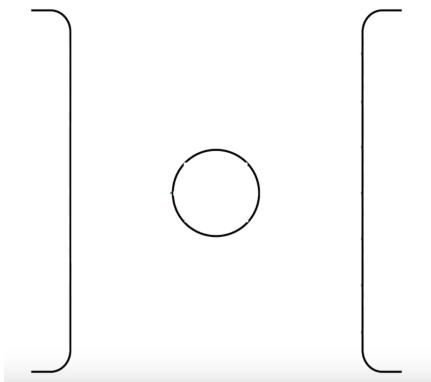
Se tienen dos electrodos que conforman un campo eléctrico cuyas líneas de campo tienen aproximadamente la distribución observada en la Fig. 19. Para este análisis se tienen en cuenta las líneas de campo rectas encerradas dentro del área punteada. Seguidamente aparece un hueco, como se observa en la Fig. 20. Lo que sucede es que se producirá un aumento del campo eléctrico en esa zona, entonces la concentración del campo eléctrico será mayor en ese punto que en el exterior a él como se observa en la Fig. 21 (Hummel & Omicrom, 2015/2019).

Figura 19 Líneas de campo eléctrico homogéneo



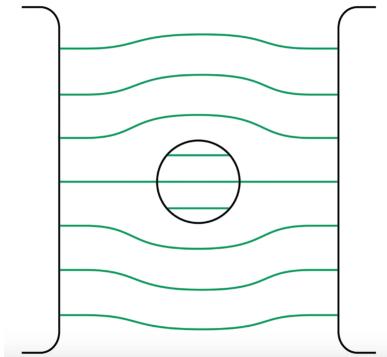
Fuente: (Hummel, 2015)

Figura 20 Hueco en el sistema de aislación



Fuente: (Hummel, 2015)

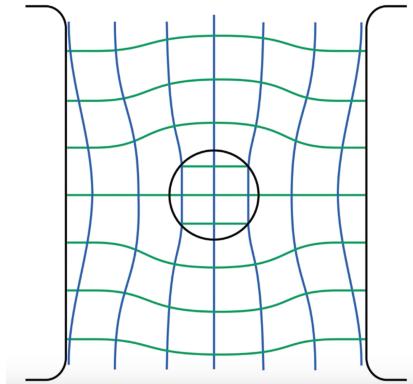
Figura 21 Concentración de campo eléctrico en el hueco



Fuente: (Hummel, 2015)

Si se supone que la permitividad relativa del material es $\epsilon_r = 3$, dentro del hueco la permitividad es $\epsilon_r = 1$, lo que sucede es que se tendrá un campo eléctrico mayor en ese punto que en el exterior. En este caso particular, 3 veces mayor. Si se dibujan las líneas de equipotencialidad se tiene el resultado observado en la Fig. 22. Si el sistema de aislación fue diseñado para 6kV y cada cuadrícula posee el valor de 1kV, en la burbuja se presenta una concentración de aproximadamente 3kV (Hummel, 2015/2019).

Figura 22 Líneas de equipotencialidad



Fuente: (Hummel, 2015)

De esta situación se presentan los siguientes tres problemas: En primer lugar, se tiene una concentración de campo eléctrico mayor en un punto, en segundo lugar, se presenta una amplia caída del voltaje y en tercer lugar ocurre lo más grave, en ese punto ya no existirá aislación sólida como mica u otros polímeros, lo que solía ser parte de un sistema de aislamiento sólido es ahora aire. Y es justamente en ese punto en el que se tendrá una DP en el caso de que el campo eléctrico sea suficientemente grande (Hummel & Omicrom, 2015/2019).

El valor de la permitividad relativa de un sistema de aislación es mayor a 1 en la mayor parte del tiempo (1 es el valor para el aire), usualmente el valor de la permitividad relativa en un sistema de aislación es 2, 3 o inclusive mayor y es justamente ahí en donde radica el problema. La permitividad relativa o la constante dieléctrica (ϵ_r ó k) de un medio es la relación entre la permitividad absoluta ϵ del medio y la permitividad ϵ_0 del espacio libre (Kumar, s.f.).

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

El factor adimensional k se llama constante dieléctrica del material. La constante dieléctrica varía de un material a otro (Serway & Jewett, 2008/2019).

Tabla 2 Constantes y resistencias dieléctricas aproximadas de diversos materiales a temperatura ambiente

Material	Constante dieléctrica κ	Intensidad dieléctrica ^a (10^6 V/m)
Aceite de silicona	2.5	15
Agua	80	—
Aire (seco)	1.000 59	3
Baquelita	4.9	24
Cloruro de polivinilo	3.4	40
Cuarzo fundido	3.78	8
Hule de neopreno	6.7	12
Mylar	3.2	7
Nylon	3.4	14
Papel	3.7	16
Papel impregnado en parafina	3.5	11
Poliestireno	2.56	24
Porcelana	6	12
Teflón	2.1	60
Titanato de estroncio	233	8
Vacio	1.000 00	—
Vidrio pirex	5.6	14

^aLa resistencia dieléctrica es igual al campo eléctrico máximo que puede existir en un dieléctrico sin que se rompa el aislamiento. Observe que estos valores dependen en gran medida de si existen o no impurezas o defectos en los materiales.

Fuente: (Serway & Jewett, 2008/2009)

Los aislantes sometidos a tensión constante poseen un campo eléctrico, E_a , que se distribuye uniformemente en caso de que el material sea homogéneo y perfecto. Cuando el material aislante posee imperfecciones, el campo eléctrico dentro de los defectos o huecos se ve incrementado E_c . E_c será mayor que E_a cuanto mayor sea la permitividad relativa del aislante. (Albarracín Sánchez, 2014).

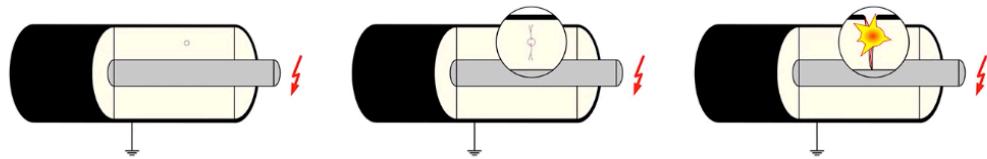
Es importante mencionar que, los sistemas de aislamiento pueden ser sólidos, como mica, vidrio, polietileno, resina, etc., líquidos como el aceite en el caso de los transformadores

y gaseosos como el gas hexafloruro de Azufre SF6 utilizado en subestaciones aisladas a gas. Todos estos materiales poseen una alta rigidez dieléctrica que les permite soportar niveles altos de tensión mientras mantienen, sostienen y separan los conductores y zonas activas de las máquinas del exterior. Sin embargo, estas propiedades dieléctricas pueden disminuir con el tiempo debido a los esfuerzos térmicos, mecánicos y otros a los que se ha sometido el material, teniendo así una incidencia directa en la disminución de la vida útil de los equipos. (Albarracín Sánchez, 2014)

Según lo expresado por (Albarracín Sánchez, 2014) en su tesis doctoral, las descargas parciales son un fenómeno estocástico que varía en el tiempo, (Morshuis, 2005). Un fenómeno estocástico se refiere a sistemas que evolucionan a lo largo del tiempo, o del espacio, de acuerdo a unas leyes no determinísticas, es decir, de carácter aleatorio.

Este fenómeno, se desarrolla en tres estados. En el primero, estado Streamer, las DP son pulsos rápidos del orden de nanosegundos y tienen la mayor amplitud de los tres estados, creando corrientes de 10 a 100 mA. y apareciendo entre los 10-60 minutos primeros de actividad. Tras estos 10-60 minutos, aparece un proceso más lento, estado Townsend, durante el cual, la amplitud de la corriente disminuye y se pueden apreciar ciertos indicios de deterioro y oxidación. Finalmente, y después de varios días de actividad permanente, la magnitud de las DP sigue decreciendo, hasta el orden de μ A, y la repetición aumenta a decenas de descargas por microsegundo, estado Pitting, en el que el dieléctrico está muy cerca del fallo, (Morshuis, 1993).

Figura 23. Ejemplo ilustrativo de ocurrencia de DP en un conductor.



Fuente: (Hummel, 2015)

Para facilitar la comprensión de la ocurrencia del fenómeno se presenta la Fig. 23 y su correspondiente explicación. Se tiene un conductor, un sistema de puesta a tierra donde hay un micro hueco que representa un tipo de falla o impureza en el sistema de aislamiento. Debido a esta falla se origina en el lugar un aumento de campo eléctrico, posteriormente, el micro hueco es sometido a alta tensión y si alcanza un valor conocido como tensión de ignición v_i , entonces, se obtiene en ese punto una descarga parcial. Recién cuando la tensión disminuya por debajo de un valor denominado tensión de extinción v_e , desaparecerán las condiciones para que continúen apareciendo descargas.

Lo que ocurrirá luego de que la primera descarga parcial suceda es que este pequeño punto se agrandará, esto hace que la discontinuidad en el sistema de aislamiento aumente y tarde o temprano podría presentarse una rotura total del sistema de aislamiento, lo cual no es deseable debido a que, en caso de llegar a ese punto crítico, el dispositivo de alta tensión, sea éste un transformador o una máquina rotativa, ya no estaría funcionando, pudiendo ocasionar graves daños e inconvenientes como explosiones y otros (Hummel, 2015/2019).

Con estas aseveraciones vuelve a destacarse la importancia de realizar mediciones periódicas y monitoreo en los sistemas de aislamiento, éstas dos prácticas son de vital importancia para poder evaluar la condición de los sistemas de aislamiento, generar un registro y evitar a tiempo la ocurrencia o incremento de los daños que pueden derivarse de una descarga parcial, promoviendo la protección de los equipos y principalmente de las personas.

¿Por qué las descargas parciales son tan peligrosas?

Las descargas parciales crean un canal de plasma de un par de miles de Kelvin, algunas fuentes mencionan que el valor es de 5.000ºK y otras mencionan que es de hasta 10.000ºK. Lo que sucede si el canal es pequeño es que se tendrá una pequeña descarga, pero debido al calor se destruirá todo a su alrededor. Los elementos metálicos también podrían sufrir daños, pero los sistemas de aislamiento de plástico son los que se ven mayormente afectados. Lo que sucede es que el calor destruye el sistema de aislación, carbonizándolo, tal como se puede apreciar en las siguientes imágenes. A medida que esto suceda, ocurrirán más descargas parciales, a mayores DP se tengan más calor se generará. Por lo que el peligro radica en que la ocurrencia de DP es un proceso auto acelerado o degenerativo, es decir, una vez que empieza tiende a empeorar (Hummel, 2015/2019).

Figura 24 Daños en una barra de estator y en una máquina rotativa



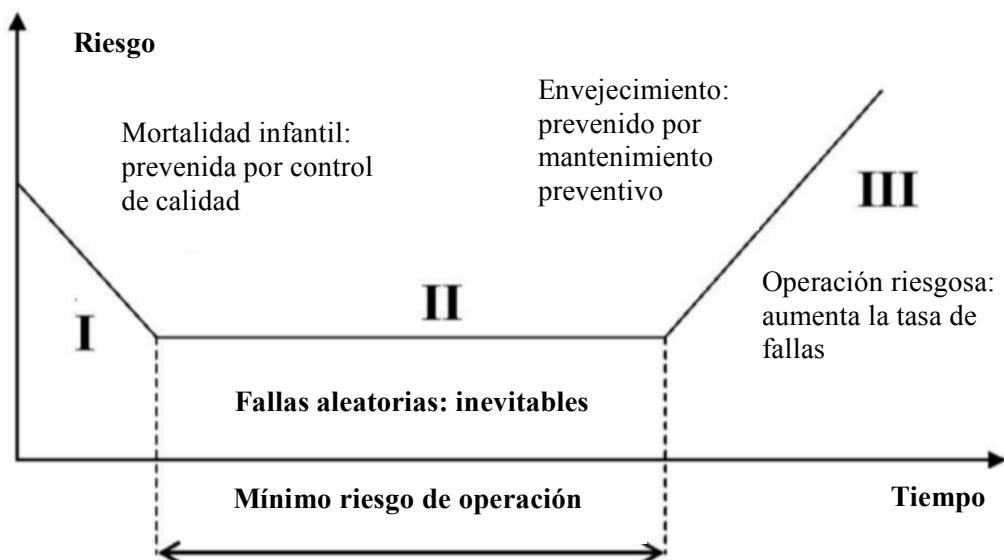
Fuente: VATech Hydro Austria, s.f.

Al inicio de esta investigación se hizo mención de la importancia y el desafío que implica el hecho de brindar energía segura a los consumidores y tal como se puede apreciar luego de estas explicaciones, las implicaciones de las ocurrencias de DP en el desempeño del sistema eléctrico son directas y pueden llegar a ser graves si no se toman las acciones preventivas y correctivas correspondientes. Un monitoreo de condiciones realizado oportunamente permitirá evitar daños mayores que puedan llevar a eventuales paradas de máquina u otros efectos perjudiciales que pueden acarrear pérdidas en el orden de los miles de dólares.

Gestión de activos eléctricos

La mayoría de los aparatos eléctricos falla debido a ruptura o pérdida de rendimiento del aislamiento. Los sistemas de aislamiento generalmente no están libres de imperfecciones e inhomogeneidades que son intrínsecas al proceso de fabricación, de modo que, dependiendo de las tensiones de servicio, ocurren varios procesos competitivos de envejecimiento en paralelo. La gestión de los activos eléctricos pone cada vez más énfasis en la calidad de la energía, incluidas las interrupciones de voltaje, asociadas con la reducción de los costos de mantenimiento. Las técnicas de diagnóstico que revelan la condición del equipo proporcionan un medio para una gestión efectiva, permitiendo planes de mantenimiento basados en la condición del aislamiento (CBM), la operación del sistema y el riesgo asociado. (Montanari, 2006/2019). Una propiedad de diagnóstico (marcador) debe tener una tendencia temporal que esté correlacionada con el estado de envejecimiento del sistema bajo evaluación. El marcador debe estar asociado con un valor umbral que establezca el nivel límite para la operación correcta del sistema. La elección tanto de la propiedad diagnóstica como del umbral tiene implicaciones fundamentales en la efectividad diagnóstica del sistema.

Figura 25 Curva de tasa de riesgo (curva bañera) para sistemas eléctricos



Fuente (Montanari, 2006/2019)

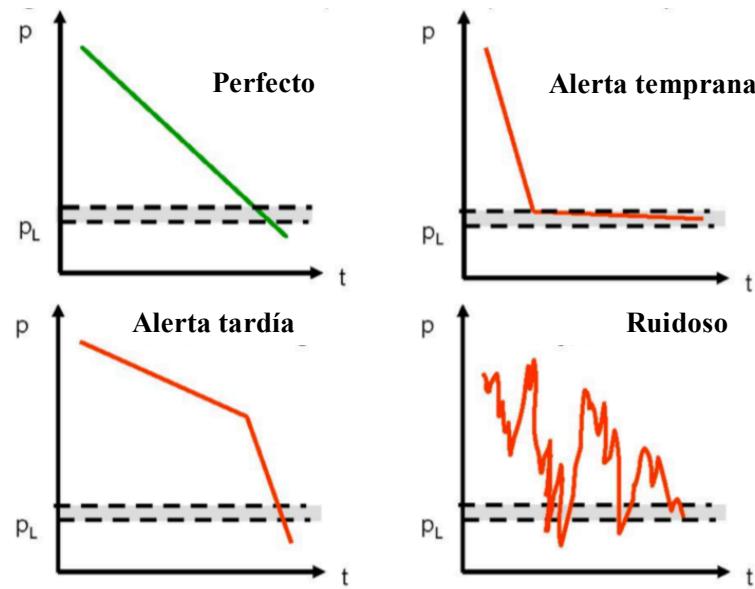
Según (Montanari, 2006/2019), el umbral está relacionado con el nivel de riesgo que el administrador de activos considera aceptable. Refiriéndose a la llamada curva bañera, que representa el comportamiento temporal del riesgo de falla, peligro o tasa de falla ver Fig. 25, las mejores condiciones de operación para un sistema eléctrico son las correspondientes al riesgo mínimo (parte II de la curva), que proporciona la máxima confiabilidad permitida para el sistema. La falla en esta sección se describe mediante una función exponencial de probabilidad, o una función Weibull, que tiene un coeficiente de forma cercano a 1.

$$F(t|\alpha, \beta) = 1 - \exp[-(t / \alpha)^\beta]$$

Siendo α y β , parámetros de escala y forma, respectivamente, y tiempo t . Cabe destacar que los datos de la tasa de falla de los aparatos y componentes eléctricos y electrónicos disponibles en la literatura (por ejemplo, el IEEE Gold Book) son relevantes para la parte II de la curva bañera. Sin embargo, la necesidad de optimizar los costos de mantenimiento en relación con el nivel de riesgo que se considera razonable para el activo empuja hacia la elección de aceptar una cantidad de riesgo y, por lo tanto, permitir que el activo funcione en la tercera parte de la curva bañera. El riesgo de falla aumenta con el tiempo de operación debido al envejecimiento del aparato.

El mantenimiento se hace efectivo solo si se conoce el estado del sistema, lo que significa que el nivel de envejecimiento debe diagnosticarse de manera eficiente para establecer el tiempo de mantenimiento adecuado. Dicho enfoque puede promover un procedimiento llamado mantenimiento basado en condiciones (CBM), que permite la optimización de las condiciones operativas de un activo eléctrico, la minimización de los costos de mantenimiento y el logro de un nivel de riesgo de falla que el administrador de activos considere aceptable (Montanari, 2006/2019).

Figura 26 Ejemplos de marcadores de diagnóstico (propiedad de diagnóstico vs tiempo)



Fuente (Montanari, 2006/2019)

La Figura 26 muestra ejemplos de marcadores de diagnóstico buenos y malos, los últimos proporcionan una advertencia demasiado temprana o demasiado tardía, o se ven afectados por demasiado ruido. El nivel de umbral se proporciona como un intervalo de confianza, debido a la incertidumbre en la estimación de la propiedad y en la evaluación del riesgo del sistema eléctrico. Debe subrayarse que el nivel de propiedad límite, P_L , corresponde al riesgo aceptable en la Figura 25 (Montanari, 2006/2019).

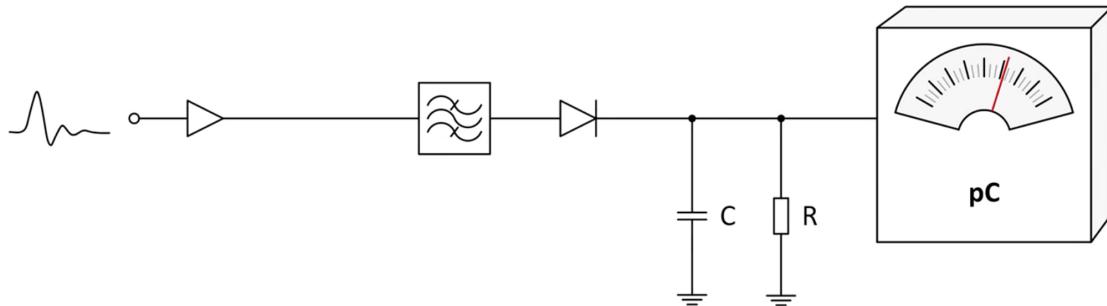
Medición de descargas parciales

Sistemas utilizados para la medición de DP

(Hummel, 2015/2019) presenta tres esquemas que han sido utilizados para realizar mediciones de DP a lo largo del tiempo. Los mismos han evolucionado a la par del aumento las investigaciones acerca de las DP y al surgimiento de innovaciones tecnológicas que permiten la modernización de éstos sistemas.

Sistema analógico de medición de DP.

Figura 27 Esquema de un sistema analógico de medición de DP

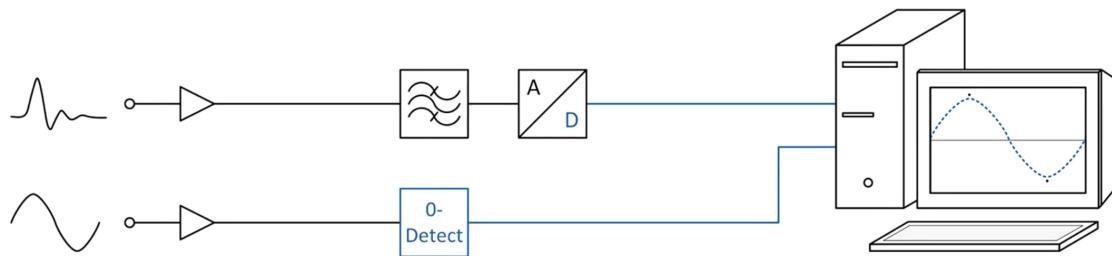


Fuente: (Hummel, 2015)

Si bien el primer método que se presenta es algo desfasado, es interesante para facilitar la comprensión del tema. A la entrada del sistema se tiene una señal de descarga parcial, que es un tipo de señal de alta frecuencia, esta señal va a un amplificador, luego pasa por un filtro, posteriormente se tiene un diodo a través del cual se cargará la capacitancia, el sistema posee también un resistor conectado en paralelo para realizar la descarga del capacitor. La caída de voltaje en la capacitancia puede ser observada a través de un medidor analógico. Así es como se realizaban las mediciones de DP en principio, pero como es de suponer el problema con este método se debe a las varias fuentes de perturbación al que era sometido el sistema.

Sistema digital de medición de DP

Figura 28 Esquema de un sistema digital de medición de DP

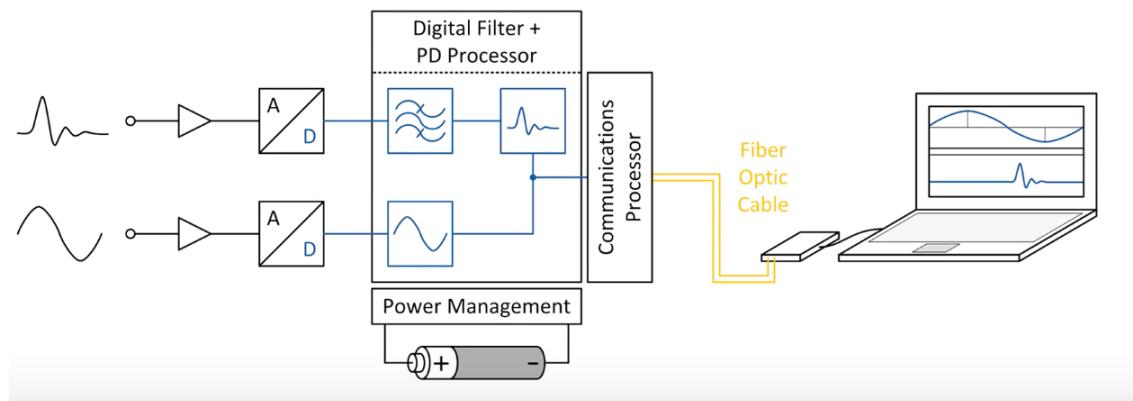


Fuente: (Hummel, 2015)

A la entrada de este sistema digital se tiene la señal de DP que pasa por un filtro, posteriormente pasa por un convertidor analógico digital para ser procesada. Al mismo tiempo se puede observar la señal de voltaje, como normalmente se trabaja a una frecuencia conocida (50-60Hz u otros valores en laboratorio) se puede obtener más información que permite saber cuando ocurre una DP a través del periodo.

Sistema digital de medición de DP con filtrado digital

Figura 29 Esquema de un sistema digital de medición de DP con filtrado digital



Fuente: (Hummel, 2015)

En la Fig. 29 (Hummel, 2015/2019) presenta un sistema considerado realmente digital, moderno y ampliamente utilizado en la actualidad. Las señales tanto de DP como de voltaje se conectan directamente a un convertidor analógico digital que envía los datos a un procesador digital de DP que a través del empleo de software a medida es capaz de analizar el fenómeno y almacenar los datos para permitir posteriores análisis. Inclusive permite a los fabricantes realizar pruebas y mantener registros históricos de las condiciones del sistema de aislamiento de sus equipos, sería como un registro médico de las condiciones de aislación, que posteriormente, ante cualquier inconveniente, pueden utilizar como prueba de que todo estaba en orden durante el proceso de fabricación y dar indicios de que ocurrió algún problema durante el transporte o instalación.

Este sistema también puede ser considerado más seguro que realizar las mediciones en un laboratorio de alta tensión, puesto que, existe un cable de fibra óptica entre el sistema de medición ubicado en la instalación real y el equipo que posee los datos (ordenador) que es manipulado por un experto. Es decir, si algo falla no se presentan altos riesgos de fatalidad y además el cable de fibra óptica puede llegar a ser realmente muy extenso sin que esto implique que se presenten mayores perturbaciones. Otra ventaja que presenta este método es que las mediciones pueden ser fácilmente adaptables a los requerimientos y estándares de distintas normas técnicas, CIGRÉ, IEEE e IEC por mencionar algunas, por lo que a pesar de sus altos costos iniciales es el método más utilizado. (Hummel, 2015/2019).

Tipos de medición de descargas parciales

Según (Oettl, Krueger, Koltunowicz, Badicu, & Gorgan, 2017/2019) los tipos de medición de DP según la condición de operación de las máquinas pueden ser:

Medición de DP Fuera de línea (Offline)

Esto requiere tomar mediciones de DP a intervalos regulares. Es un procedimiento generalmente más caro porque implica parada de máquina y una fuente externa de alto voltaje.

Medición de DP en línea (Online)

Se trata de mediciones continuas en la máquina, sin fuente externa, mientras está en funcionamiento. Este método resulta caro para la primera medición porque se deben instalar los sensores y software para interpretar los datos. Pero, a partir de allí el costo es cero y además se pueden almacenar los datos de manera más confiable.

A menudo se realizan esfuerzos para definir valores límite para descargas parciales y para evaluar la condición del aislamiento simplemente observando la amplitud de la DP. Esto representa un intento equivocado de resolver procesos complejos mediante el uso de un criterio SÍ / NO. Solo en muy raras ocasiones una sola medición puede desencadenar una necesidad inmediata de acción (Oettl, Krueger, Koltunowicz, Badicu, & Gorgan, 2017/2019).

La medición de DP es una herramienta de mantenimiento adecuada que identifica la condición del aislamiento de las máquinas eléctricas giratorias y, sobre esta base, ayuda al equipo de ingeniería a determinar qué medidas de mantenimiento adoptar en todo el parque de máquinas. Como los dos tipos de medición tienen sus ventajas y desventajas y ofrecen diferentes posibilidades de diagnóstico, las mediciones fuera de línea y en línea se pueden ver como formas complementarias de determinar la condición del aislamiento.

Como se explica en el apartado anterior existen dos formas posibles de medir descargas parciales: mediciones fuera de línea, donde la máquina está desconectada y el voltaje de prueba proviene de una fuente externa, y mediciones en línea, donde la máquina se mantiene en funcionamiento y las mediciones se realizan utilizando condensadores de acoplamiento preinstalados.

En el caso de una medición en línea, los datos se pueden generar en varios puntos de operación y bajo condiciones variables de carga o temperatura sin tener que apagar la máquina. Por lo tanto, las mediciones se realizan en condiciones reales de funcionamiento. Sin embargo, esta ventaja se ve afectada por una probabilidad mucho mayor de que exista interferencia externa. Esto no proviene del sistema de aislamiento de la máquina, por lo que no debe incluirse en el diagnóstico. Para sortear este problema y garantizar una distancia adecuada entre la señal útil y la señal no deseada, normalmente se necesitarán frecuencias de filtro más altas (Oettl, Krueger, Koltunowicz, Badicu, & Gorgan, 2017/2019).

Los componentes de alta frecuencia medidos se atenuarán muy rápidamente entre su fuente y la ubicación de medición, lo que significa que solo se pueden diagnosticar correctamente partes del devanado. A modo de compensación, la distribución de voltaje del devanado hacia el punto de estrella disminuye cuando la máquina está en funcionamiento.

Las mediciones fuera de línea difieren en que todo el devanado se eleva al mismo potencial de alto voltaje para que cualquier sitio de descarga que no aparezca durante la operación se vea en el patrón de resolución de fase, lo que aumenta en gran medida las posibilidades de detección temprana. Otra ventaja es que el nivel de ruido generalmente es muy bajo, lo que significa que se pueden usar frecuencias de filtro mucho más bajas. Esto permite medir pulsos lentos, lo que resulta en la detección de descargas parciales a lo largo de la mayor parte del devanado. Las mediciones fuera de línea también permiten calibrar la configuración de prueba. Estas ventajas se ven compensadas por el hecho de que la medición es más costosa y requiere más tiempo, ya que la máquina debe desconectarse y debe instalarse una fuente externa. Por otro lado, este tipo de medición se lleva a cabo normalmente mientras se realiza el

mantenimiento. Como otra desventaja de las mediciones fuera de línea, debe tenerse en cuenta la influencia de la humedad. Esto puede tener una influencia significativa en las descargas externas, tales como descargas de ranura y / o descargas de superficie.

(Hummel, 2015/2019) menciona que en la práctica la interpretación de las mediciones de DP es bastante compleja, existen pocas personas que con sólo observar los registros pueden interpretarlos, sin embargo, el monitoreo es fácil de entender de manera general. Cuando se tiene, por ejemplo, una máquina rotativa, la instalación no es simple. Se fabrican las piezas, se empaquetan, se envían y se espera que al llegar estén en las mismas condiciones en las que salieron de la fábrica, las mediciones tanto offline como online pueden permitir al usuario saber si existen fallas a ser corregidas.

Respecto a la expectativa de vida útil de una gran máquina rotativa existen varias afirmaciones, algunos sostienen que puede durar entre 20-30 años hasta necesitar rebobinado, otros determinan la vida útil de acuerdo a la operación a determinada temperatura con x horas límite de uso, y otros se guían por el valor económico y la depreciación, por ej.: 15 años. Es difícil o imposible realizar una predicción exacta, por lo tanto, métodos diagnósticos o monitoreos son necesarios para dar lugar a lo que se conoce como monitoreo basado en condiciones (CBM), ya que generalmente no se posee una sola máquina sino varias, todas deben ser monitoreadas y si una empieza a fallar se deben buscar los motivos para evaluar el posible comportamiento de las demás (Hummel, 2015/2019).

Principales inconvenientes en la medición de DP

Según (Montanari, 2006/2019), los problemas históricamente relacionados con las mediciones de DP son: la cancelación de ruido, la separación e identificación de fenómenos de DP, la ubicación de la fuente de PD y la evaluación de riesgos. Los nuevos desarrollos en las técnicas de adquisición digital, procesamiento de señales e inteligencia artificial han mejorado la eficiencia de las mediciones de DP, proporcionando nuevos enfoques para abordar la gestión de los sistemas eléctricos.

(Oettl, Krueger, Koltunowicz, Badicu, & Gorgan, 2017/2019) mencionan que el ingeniero que realiza mediciones normalmente se enfrenta a tres desafíos:

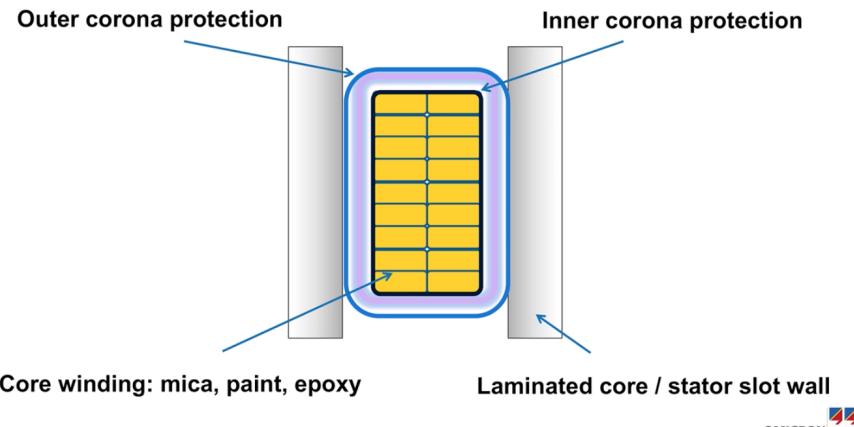
- 1) Interferencias externas
- 2) Superposición de varios fenómenos de DP
- 3) Acoplamiento cruzado de fases vecinas (en la medición en línea)

Tipos de fallas de descargas parciales

La medición DP en devanados en máquinas eléctricas rotativas proporciona un método no destructivo y no invasivo para identificar sitios de descarga individuales en su aislamiento. A diferencia de otros métodos como mediciones de resistencia de aislamiento o factor de pérdida, las mediciones de DP brindan una imagen completa del estado del aislamiento de todo el devanado. Al igual que los otros dos métodos mencionados, los resultados de una medición de descargas parciales deben interpretarse una vez que se ha realizado la medición. Los instrumentos de medición modernos ofrecen métodos de almacenamiento muy sofisticados, que permiten que la medición pueda reproducirse como una película en una PC con la frecuencia que sea necesaria. La medición de descargas parciales permite identificar fallas de fabricación y envejecimiento en el aislamiento de máquinas eléctricas, lo que permite reconocer las causas potenciales de fallas de las máquinas a tiempo. Las actividades de mantenimiento posteriores se pueden programar para facilitar el despliegue específico de recursos, frecuentemente escasos. La medición de DP en línea consta de dos pasos clave: la detección de la señal de DP y la interpretación de la señal de DP (Oettl, Krueger, Koltunowicz, Badicu, & Gorgan, 2017/2019).

(Hummel, 2015/2019) menciona cuatro lugares críticos en los que pueden ocurrir descargas parciales en una máquina rotativa.

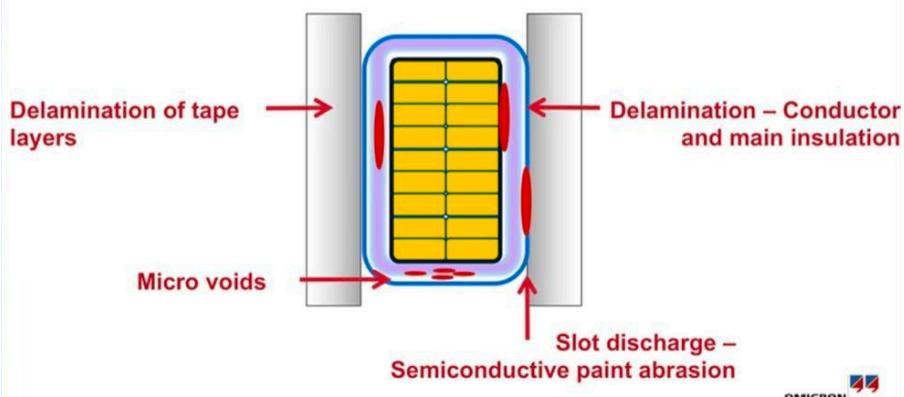
Figura 30 Perspectiva general de fallas de DP



Fuente: (Hummel, 2015)

Además, el mismo autor menciona y caracteriza cuatro tipos de fallas de DP que pueden presentarse

Figura 31 Perspectiva general de fallas de DP



Fuente: (Hummel, 2015)

Micro huecos internos: Se trata de imperfecciones en el material aislante que producen pequeñas burbujas de gas o micro huecos.

Delaminación de capas de cintas aislantes: La delaminación es un modo de falla en materiales compuestos que consiste en la separación de capas que lo componen, y que supone una significativa pérdida de resistencia mecánica del material (Real academia de ingeniería , s.f.).

Delaminación entre el conductor y el aislamiento principal: En este tipo de falla la delaminación ocurre en el punto de contacto entre el conductor y la aislación principal.

Descargas en la ranura debido a abrasión de pintura semiconductiva: La abrasión es un desgaste de la película de pintura causada por fricción (Quiminet, 2004), en este caso, la falla ocurre en las ranuras.

Otros autores estudiados como (Kreuger, 1989) mencionan que existen 3 tipos de descargas parciales según su origen, estas son: internas, de superficie y corona. Las mismas se describen a continuación.

Descargas internas

Las descargas internas ocurren en huecos de los sistemas de aislamiento que tienen baja rigidez dieléctrica. Pueden localizarse como huecos en los sólidos o como burbujas en los aislantes líquidos, así como dentro del aislante o en la frontera cercana a alguno de los electrodos. Debido a la actividad en estos puntos débiles, pueden provocar una rotura y una posterior descarga total, llevando al fallo de los equipos eléctricos, debido a esto, son las descargas más dañinas. (Albarracín Sánchez, 2014).

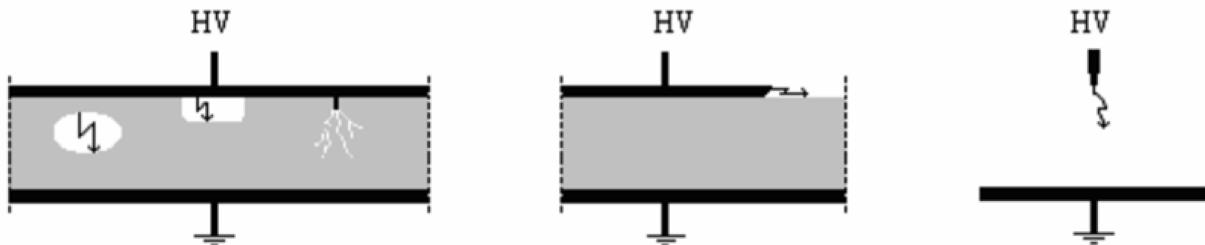
Descargas de superficie o superficiales

Según (Albarracín Sánchez, 2014), son descargas que aparecen entre dos dieléctricos, habitualmente entre aislante y aire y son debidas a las componentes tangenciales de campo eléctrico de gran intensidad. La contaminación o humedad, por ejemplo, en cadenas de aisladores, puede acelerar el proceso que provoca este tipo de descargas. Es muy común encontrar este tipo de DP superficiales en los aislamientos eléctricos entre espiras de máquinas eléctricas, (Stone y Kapler, 1998), como motores, (Shibuya et al., 2011). Este tipo de descarga, también puede aparecer en las uniones de tornillos, entre los pasos de tuercas, y otros elementos metálicos sometidos a tensión, (Cavallini, 2012).

Descargas corona

Estas descargas se producen en zonas metálicas aisladas sometidas a tensión, principalmente, en los conductores de las líneas de alta tensión y se manifiesta en forma de halo luminoso a su alrededor (Albarracín Sánchez, 2014). La "corona" es una forma de descarga parcial que ocurre en medios gaseosos alrededor de conductores que están alejados del aislamiento sólido o líquido. "Corona" no debe usarse como un término general para todas las formas de DP (IEC60270, 2001/2019).

Figura 32 Descargas parciales internas, superficiales y corona según (Phung, 1997)

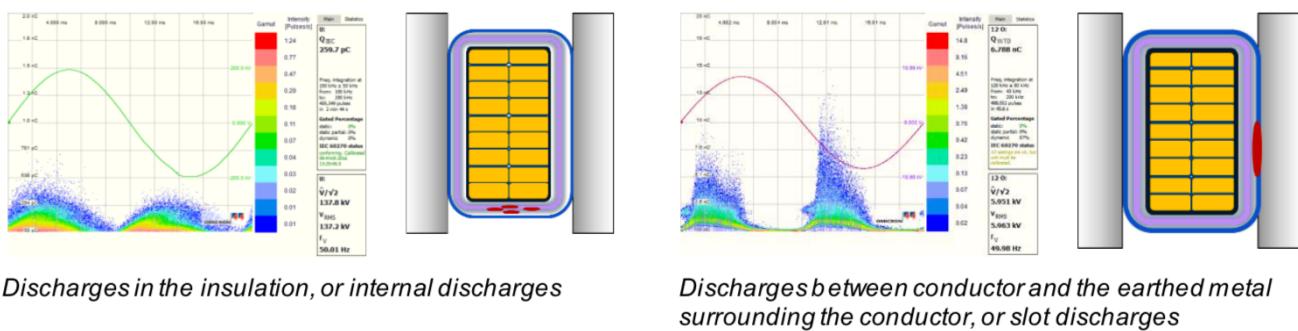


Fuente: (Albarracín Sánchez, 2014)

Algunas técnicas utilizadas en algoritmos de clasificación en sistemas de adquisición de DPs son los diagramas PRPD, mapas T-F y mapas PRL-PRH. Los diagramas PRPD son una técnica fiable para identificar los diferentes tipos de fuentes y de DPs. Los mapas de tiempo frecuencia T-F y PRL-PRH dan información adicional de las DPs y ruido. En estos mapas, se representan las señales mediante nubes de puntos para poder separar las diferentes fuentes y, posteriormente, se llevan a un diagrama PRPD para identificarlas (Albarracín Sánchez, 2014).

Lo que se conoce como el patrón PRPD se ha establecido como la forma más fiable de interpretar la medición de descargas parciales de acuerdo a (Oettl, Krueger, Koltunowicz, Badicu, & Gorgan, 2017/2019). PRPD son las siglas de descarga parcial resuelta en fase. Este enfoque correlaciona los pulsos de DP individuales en términos de frecuencia, amplitud, polaridad y fase con respecto a la alta tensión. Su ventaja radica en el mapeo de patrones típicos al tipo de defecto en el devanado. Esto permite no sólo la identificación del tipo de fallo, sino que también proporciona una clasificación del riesgo de acuerdo con las normas internacionales. Un ejemplo se ilustra en la Figura 33, donde el patrón resuelto de fase se correlaciona con los defectos conocidos correspondientes.

Figura 33 Patrones de DP resueltos en fase con sus defectos asociados



Fuente: (Oettl, Krueger, Koltunowicz, Badicu, & Gorgan, 2017)

La información recopilada acerca de los tipos de fallas de DP permite inferir que existen cuatro tipos principales de fallas que pueden ocurrir en determinadas zonas del sistema de aislamiento, representantes del fabricante Omicrom afirman que, dependiendo de la zona de ocurrencia de la falla, los patrones de DP observados en su sistema, son diferentes, lo que podría permitir la obtención de mayores indicios de la localización posible de la falla.

Técnicas de medición de DP

El concepto de carga aparente es empleado para efectuar mediciones del fenómeno estudiado. A continuación se presenta su definición.

La carga aparente de un pulso de DP es esa carga que, si se inyecta dentro de un tiempo muy corto entre los terminales del objeto de prueba en un circuito de prueba específico, daría la misma lectura en el instrumento de medición que el pulso actual de DP. La carga aparente generalmente se expresa en picocoulombs (pC).

NOTA La carga aparente no es igual a la cantidad de carga involucrada localmente en el sitio de la descarga, que no se puede medir directamente. (IEC60270, p8, 2000/2019)

Método eléctrico o de detección de pulso eléctrico

Debido a que una DP involucra un flujo de electrones e iones a través de una pequeña distancia en un período finito de tiempo, una pequeña corriente fluye cada vez que ocurre una DP. La corriente total se regirá por el transporte de un cierto número de picocoulombs de carga. El flujo de corriente crea un pulso de voltaje a través de la impedancia del sistema de aislamiento. Una de las principales formas de detectar DP es medir el pequeño pulso de voltaje que acompaña a cada DP, o el pulso de corriente resultante. Estas cantidades se miden en circuitos alejados de la fuente de DP. Nótese que en una bobina, barra o devanado típico, pueden haber cientos de DP por segundo; por lo tanto, se pueden detectar cientos de pulsos eléctricos cada segundo. El pulso de voltaje se puede detectar por medio de condensadores de alto voltaje, que normalmente están conectados al terminal de fase o en otra parte del devanado. El condensador tiene una alta impedancia al voltaje de frecuencia de alimentación, pero aparece como una baja impedancia a los pulsos de voltaje PD de alta frecuencia (IEC60270, 2001/2019).

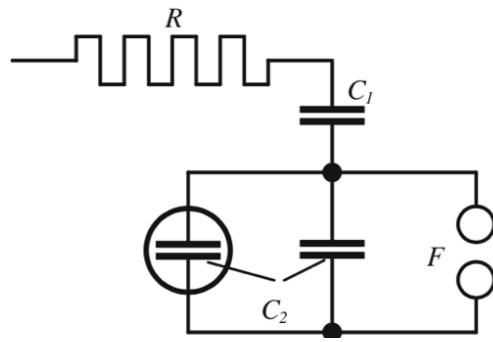
La salida de los condensadores son pulsos de voltaje o corriente, respectivamente, que se pueden medir con un osciloscopio, un analizador de espectro o un analizador de altura de pulso. Se pueden utilizar variaciones de estos métodos para pruebas en línea y fuera de línea (IEC60270, 2001/2019).

Modelo capacitivo

Para evaluar las pérdidas debidas a descargas en dieléctricos sólidos laminados sometidos a voltajes de CA, Byrstlyn investigó en 1928 las secuencias de ruptura de una chispa conectada en serie con una capacitancia. Este sencillo enfoque ha sido investigado sistemáticamente por Gemant y Philippoff (1932) para estimar las pérdidas de potencia en los cables de alimentación impregnados en masa causados por las descargas de grandes cavidades. Para este propósito, las descargas por semiciclo de la tensión de prueba de frecuencia de potencia aplicada se han registrado mediante un osciloscopio utilizando el circuito equivalente que se muestra en la Fig. 33. La chispa F estaba conectada directamente con las placas de desviación horizontal de un osciloscopio de alto voltaje. Además, la capacitancia efectiva C2 de la chispa se varió mediante capacitores paralelos adicionales. La capacitancia en serie C1 y la resistencia R sirvieron para la limitación de la corriente transitoria a través de la chispa F. Los registros osciloscópicos típicos obtenidos para dos niveles diferentes de tensión de prueba se muestran en la Fig. 34., donde el número de colapsos de tensión depende del nivel de tensión de prueba, mostrando una concordancia sorprendentemente buena con los cálculos teóricos.

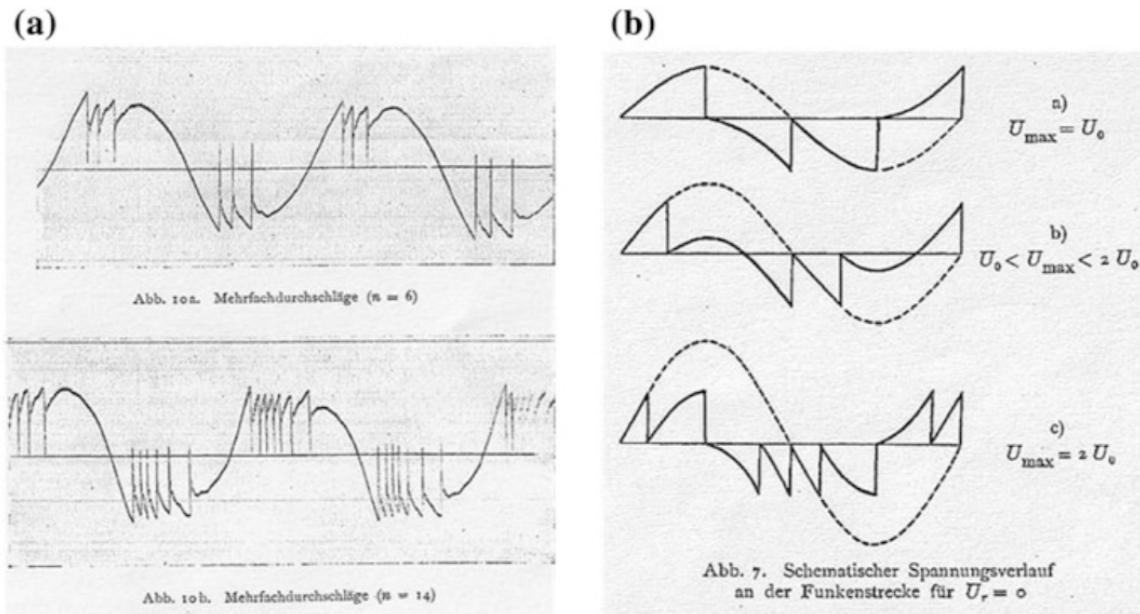
Para calcular no solo el conteo de impulsos en función del nivel de voltaje de prueba, sino también la relación entre la carga de DP externa detectable y la carga de DP interna que fluye a través de la cavidad, el circuito equivalente que se muestra en la Fig. 33. ha sido modificado por Whitehead y por Kreuger en la década de 1950 (ver Fig. 35).

Figura 34 Configuración experimental utilizada por Gemant y Philippoff (1932) para explicar la recurrencia característica de los pulsos DP a la tensión de prueba de CA de frecuencia de potencia.



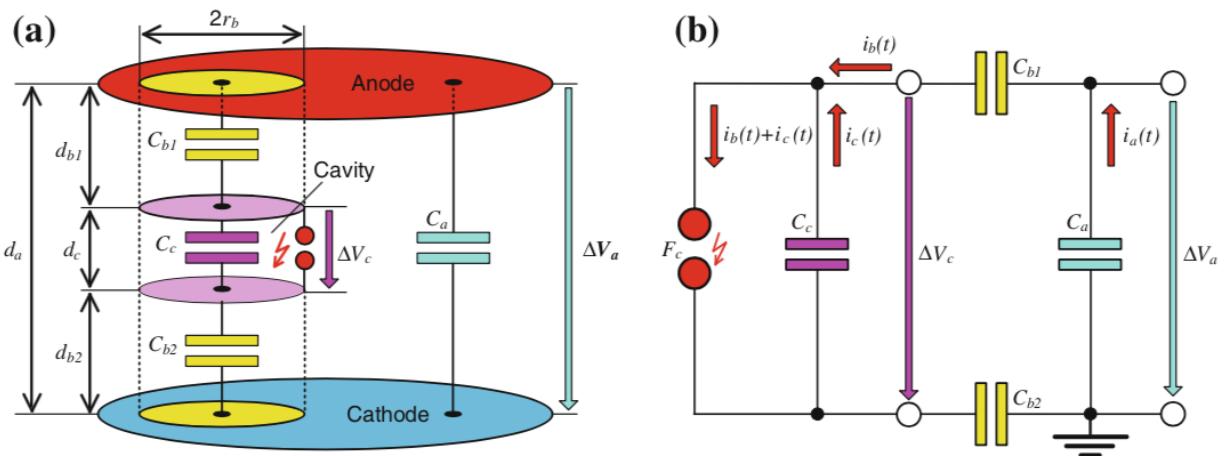
Fuente: (Hauschild & Lemke, 2014)

Figura 35. (a). Registros de osciloscopios realizados por Gemant y Philippoff. **(b).** Enfoque para el cálculo del conteo de impulsos versus el nivel de voltaje de prueba.



Fuente: (Hauschild & Lemke, 2014)

Figura 36. Modelo capacitivo de DP basado en red. (a). Electrodo de plano paralelo con elementos de circuito. (b). Circuito capacitivo equivalente modelo abc.



Fuente: (Hauschild & Lemke, 2014)

En este circuito, C_a es la capacitancia del dieléctrico volumétrico entre los electrodos del objeto de prueba, C_b es la capacitancia parásita de la columna dieléctrica sana entre la cavidad y los electrodos, y C_c es la capacitancia de la cavidad que está puenteada por la brecha F_c . Originalmente introducido por Gemant y Philippoff. Debido a estas tres capacidades características, el circuito equivalente de acuerdo con la Fig. 6. se denomina tradicionalmente modelo abc.

Radiofrecuencia

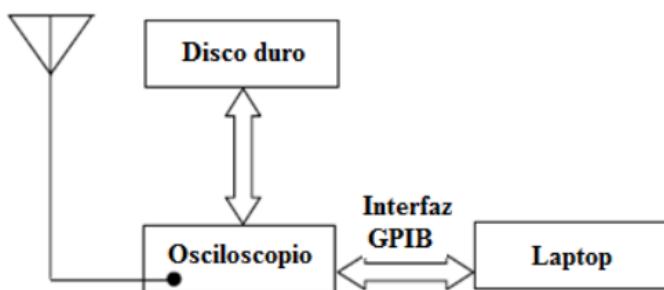
Además de crear pulsos de voltaje y corriente dentro del devanado del estator, la chispa de descarga parcial también crea algunas ondas electromagnéticas de RF que se propagan lejos del sitio de descarga. La perturbación electromagnética creada por una DP tiene frecuencias de RF de 100 kHz a varios cientos de megahercios. Por lo tanto, las radios de AM con una antena adecuada pueden usarse para detectar que se está produciendo actividad de DP. (IEC60270, 2001/2019).

(Albarracín Sánchez, 2014) menciona que, cuando se realiza la medida de los pulsos de Dps en Radiofrecuencia (RF) en el rango de muy alta frecuencia, Very-High Frequency, VHF (3MHz y 300MHz), y UHF (30-3000 MHz), es de vital importancia separar las posibles fuentes de interferencia electromagnética de la radiación emitida por la fuente de DPs. Estas fuentes son: radio en frecuencia modulada, Frequency Modulated (FM), radio difusión sonora digital, Televisión (TV), sistema global para las comunicaciones móviles, Global System for Mobile Communications (GSM), fidelidad inalámbrica, Wireless-Fidelity (Wi-Fi), etc.

La norma IEC 62478 abarca técnicas de medición y sensores de los métodos acústicos y electromagnéticos y la medida con transformadores de corriente en alta frecuencia. Se basa en que el análisis de la emisión de la DP tanto en el dominio del tiempo, como en frecuencia. Esta norma no fue analizada en la presente investigación debido a que no pudo conseguirse en fuentes públicas y el costo ronda los 400 francos suizos.

Las DP ocurren debido al desplazamiento de carga. Esto produce una tasa de corriente de cambio rápida que ocurre cuando el dieléctrico empieza su ruptura. Esta tasa de cambio, es principalmente determinada por la naturaleza del dieléctrico y por el campo eléctrico aplicado, y es sometida a valores límites establecidos por el dieléctrico. La evidencia empírica indica que el espectro de frecuencia está delimitado por un dieléctrico específico. Existe un sistema desarrollado por Moore, Portugués y Glover en el cual emplean una antena bicónica, un osciloscopio y una laptop para la detección de DP. A continuación se muestra el diagrama a bloques empleado.

Figura 37. Modelo para detección de DP



Fuente: Moore, Portugués y Gloover, s.f.

Un GPIB o un IEEE 488 Bus, es un bus de interfaz de propósito general. Consiste de una o más tarjetas de interfaz y uno o más instrumentos. Las tarjetas de interfaz son controladores GPIB que gobiernan el flujo de información en el bus. Esto se logra mandando comandos a los instrumentos para que hablen, escuchen o respondan a pedidos de servicio de los dispositivos. Puede haber mas de un controlador GPIB en un bus, pero solo uno puede tener el control a la vez. (Electronics notes, 2019)

Métodos no eléctricos de detección de DP

Los métodos no eléctricos utilizados para la de detección de DP incluyen métodos acústicos, ópticos y químicos y también, de ser posible, la observación posterior de los efectos de cualquier descarga en el objeto de prueba (IEC60270, 2001).

La norma IEC60270, aclara que, en general, estos métodos no son adecuados para la medición cuantitativa de cantidades de descargas parciales, pero si son utilizados para detectar y/o localizar las descargas. A continuación, se presentan breves descripciones acerca de dichos métodos.

Método acústico

Observaciones auditivas realizadas en una habitación con bajo nivel de ruido pueden utilizarse como un medio para detectar descargas parciales. Las mediciones acústicas no subjetivas, generalmente realizadas con micrófonos u otros transductores acústicos en combinación con amplificadores y unidades de visualización adecuadas, también pueden ser útiles, particularmente para localizar las descargas. Los micrófonos selectivamente direccionales con alta sensibilidad por encima del rango de frecuencia audible son útiles para localizar descargas de corona en el aire. Los insonorizadores acústicos también se pueden usar para localizar DP en aislamientos a gas o equipos sumergidos como transformadores; Pueden estar dentro o fuera del recinto (IEC60270, 2001/2019).

Técnica de Detección Óptica

Las observaciones visuales pueden llevarse a cabo en una habitación oscura, después de que los ojos se hayan adaptado a la oscuridad y, si es necesario, con la ayuda de binoculares de gran apertura. Alternativamente, se puede hacer un registro fotográfico, pero generalmente son necesarios tiempos de exposición bastante largos. Para fines especiales, a veces se usan multiplicadores de fotos o intensificadores de imágenes. (IEC60270, 2001/2019).

Método químico

La presencia de descargas parciales en aparatos aislados con petróleo o gas puede detectarse en algunos casos mediante el análisis de los productos de descomposición o subproductos disueltos en el aceite o en el gas. Estos productos se acumulan durante la operación prolongada, por lo que el análisis químico también puede usarse para estimar la degradación causada por descargas parciales. (IEC60270, 2001/2019).

Normas técnicas para la medición de DP

Con el objetivo de estandarizar los parámetros utilizados para la realización de mediciones de descargas parciales y la evaluación de los resultados, dos instituciones de referencia en Ingeniería se han abocado a la creación de especificaciones y normas; éstas son la IEC y la IEEE. (Gómez Ramírez, 2017). La selección de cuál norma utilizar responde a criterios individuales de la persona física o jurídica o del comité técnico que desee llevar a cabo una medición de este tipo.

El contenido de éstas normas define las reglas que guían los procesos de medición y son bastante específicas en cuanto a requerimientos, aparatos y niveles de tensión. Se detallan circuitos equivalentes de prueba para pruebas de rutina y pruebas de rendimiento, unidades de medida a utilizar, procesos de calibración, tiempo de duración de las pruebas, forma correcta de almacenar los datos obtenidos, temperatura a la que debe estar el objeto de prueba, entre otros.

Éstas normas aparte de guiar el proceso de medición también se encargan de definir conceptos relacionados al fenómeno de descargas parciales y a los principales inconvenientes que pueden ocurrir durante la medición, además de aportar sugerencias acerca de cómo reducir los efectos negativos de los últimos.

Para la redacción de este apartado se ha realizado la lectura de dos normas técnicas: la IEEE Std 1434 -2014 obtenida a través de la Conacyt y la norma IEC60270 que ha sido recuperada de internet, el archivo consultado es una copia perteneciente al British Standards Institution. Debido al alcance propuesto, en la presente investigación no se han efectuado mediciones, pero si se han extraído importantes conceptos y gráficos de dichos documentos.

MARCO METODOLÓGICO

Diseño Metodológico

Alcance

De acuerdo a lo manifestado por (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2010) el alcance de esta investigación es descriptivo ya que se busca especificar propiedades, características y rasgos importantes de un fenómeno. Es importante mencionar que se ha buscado detallar el estado del arte de las mediciones de descargas parciales, pero no se han realizado mediciones del fenómeno debido a falta de equipamiento e infraestructura, por lo cual no hay manejo estadístico, sino que se analizaron datos de estudios previos para obtener conclusiones acerca del fenómeno.

Se realizó un estudio profundo acerca del estado del arte de las descargas parciales y posteriormente se procedió a elaborar la especificación técnica de una bancada para estudio y medición de DP. El proyecto fue dividido en tres etapas principales:

- La primera etapa consistió en la investigación bibliográfica acerca del estado del arte del tema propuesto, enfocada principalmente en la comprensión del fenómeno y el estudio de las técnicas y normativas vigentes para la medición de las descargas parciales.
- La segunda parte consistió en el análisis de datos de ocurrencias de descargas parciales en casos reales obtenidos de fuentes públicas y estudios previos acerca del tema, que permitieron la visualización de las formas teóricas estudiadas.
- La tercera etapa consistió en la elaboración de la especificación técnica de una bancada para estudio y medición de descargas parciales.

Diseño de la investigación

La investigación propuesta es del tipo no experimental ya que se ha realizado sin la manipulación deliberada de variables, en concordancia con lo expresado por Hernández Sampieri. Según dicho autor en un estudio no experimental no se genera ninguna situación, sino que se observan situaciones ya existentes, no provocadas intencionalmente en la investigación por quien la realiza.

Enfoque

Esta investigación es de enfoque mixto, debido a algunas particularidades. De acuerdo a lo expresado por (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2010) posee características de dos enfoques. Es cualitativa, ya que se utiliza la recolección de datos sin medición numérica, en este caso se utilizaron datos de investigaciones previas y además la revisión de la literatura se complementó en distintas etapas del estudio. Y a su vez, es cuantitativa no experimental, ya que se buscó que la investigación sea objetiva, que describa y explique el fenómeno estudiado, se aplica la lógica deductiva, que va de lo general a lo particular, la literatura representa un papel crucial, los datos son confiables y duros tal como expresado en una tabla comparativa 1.1 del libro de los autores previamente mencionados.

Área de estudio

Descargas parciales

Unidad de estudio

Descargas parciales en centrales generadoras eléctricas

Contexto de la investigación

Universidad Católica Campus Alto Paraná y centros especializados de la región.

Informaciones Necesarias

Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Las técnicas utilizadas para la recolección de datos fueron: lectura de trabajos relacionados al área extraídos de la biblioteca virtual de la IEEE, estudios hechos por CIGRÉ, CEPEL y otras instituciones de referencia en ingeniería, visualización de videos de conferencias dictadas sobre el tema en la plataforma youtube, investigación en libros y revistas científicas en formato impreso y virtual, charlas con profesionales especializados del área y realización de visitas técnicas a la hidroeléctrica de Itaipú para observar in situ algunos equipos de medición y el proceso de toma de datos.

En lo que respecta al análisis de las características de las señales del fenómeno de DP se procedió a analizar datos disponibles en fuentes públicas y en artículos científicos. Inicialmente la propuesta del proyecto consistió en obtener datos generados por medio de equipos de última generación proveídos por especialistas en el estudio de descargas parciales y analizarlos, pero tal intención no pudo lograrse debido a excesivas burocracias y al sigilo profesional al que se encuentran sometidos los profesionales consultados.

Investigación Bibliográfica

La investigación bibliográfica consistió en la búsqueda de libros actualizados y artículos científicos acerca del fenómeno de las descargas parciales de manera general para comprender el origen del mismo y sus fundamentos físicos, lo cual se pudo lograr mediante la lectura de los materiales recopilados de diversas fuentes y la visualización de conferencias acerca del tema

que se encuentran disponibles al público a través de la plataforma YouTube. Posteriormente, se analizaron datos obtenidos de otros estudios previos realizados en el área de estudio.

Es importante destacar que, en todas las etapas, la posibilidad de acceder a los recursos de la IEEE fue facilitada mediante registro en el Centro de Información Científica del Conacyt, por sus siglas CICCO, un recurso disponibilizado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología más conocido como CONACYT. El registro gratuito en la biblioteca virtual de CIGRÉ también facilitó la obtención de recursos relacionados al tema, la restricción de este tipo de registro es que solo permite la descarga de documentos con más de 5 años de antigüedad de publicación.

Como la mayoría de los recursos académicos utilizados para el desarrollo de esta investigación se encontraban redactados en idioma inglés, se ha realizado una traducción libre buscando los términos más acertados para reproducir la interpretación de los textos de la manera más fidedigna posible.

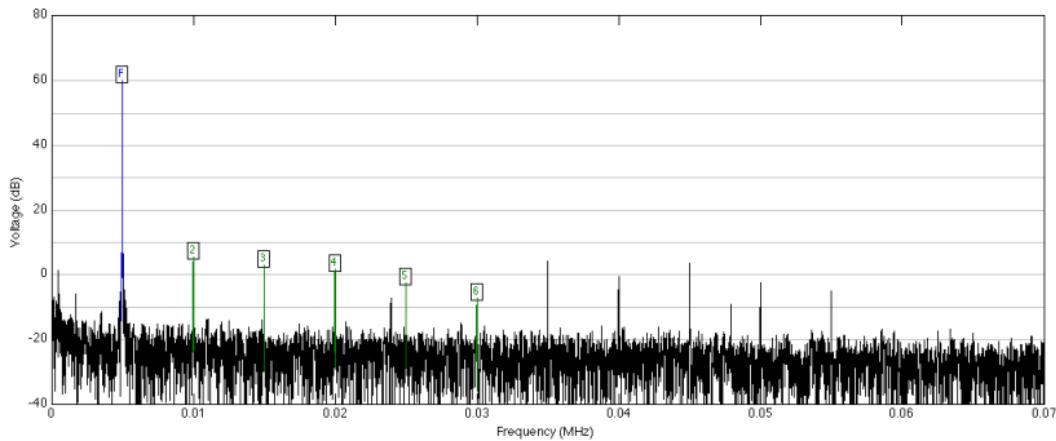
Entrevistas y Visitas técnicas con Profesionales Especializados en el Área

Con la intención de conocer la instrumentación necesaria para la medición de descargas parciales desde la toma de datos, transporte y almacenamiento de los mismos se realizaron visitas técnicas a la hidroeléctrica Itaipú durante el periodo transversal 2018/2019, en donde el Ing. Rodrigo Ramos, tutor de este proyecto encabezó recorridos por las instalaciones de la usina, permitiendo la familiarización con los equipos que conforman el sistema MATRIX, proyecto que se encuentra actualmente en etapa de implementación en dos unidades generadoras.

ANÁLISIS DE DATOS DE MEDICIONES DE DESCARGAS PARCIALES

Con el objetivo de obtener familiarización con la interpretación de datos de mediciones previamente realizadas del fenómeno estudiado, se seleccionaron datos disponibles en fuentes públicas y en artículos científicos. En las figuras abajo se presentan ejemplos de dichos datos, obtenidos tanto en equipos en operación como en laboratorio.

Figura 38 Espectro de frecuencia de una señal de DP

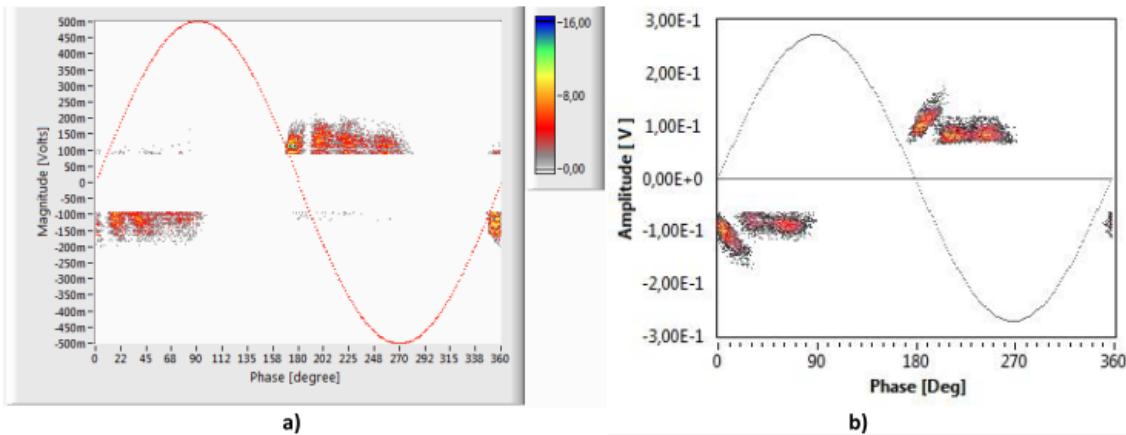


Fuente: (Roen Velo, 2015)

Este gráfico, que corresponde al espectro de frecuencia de la señal, ilustra la gran cantidad de componentes senoidales de una señal de DP, identificando la componente principal en color azul.

Los gráficos de la Fig. 39, corresponden a un ensayo de laboratorio donde se ha simulado el comportamiento del aislamiento de las barras de estator, pueden observarse tanto la magnitud como el momento de ocurrencia de las DPs, a lo largo de un ciclo.

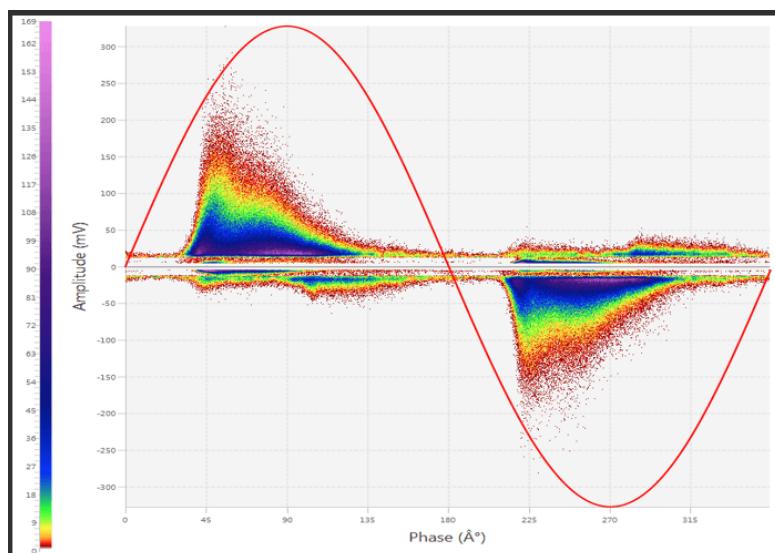
Figura 39 Ensayo de laboratorio en barras de estator



Fuente: (Vanegas Iriarte, J., 2016)

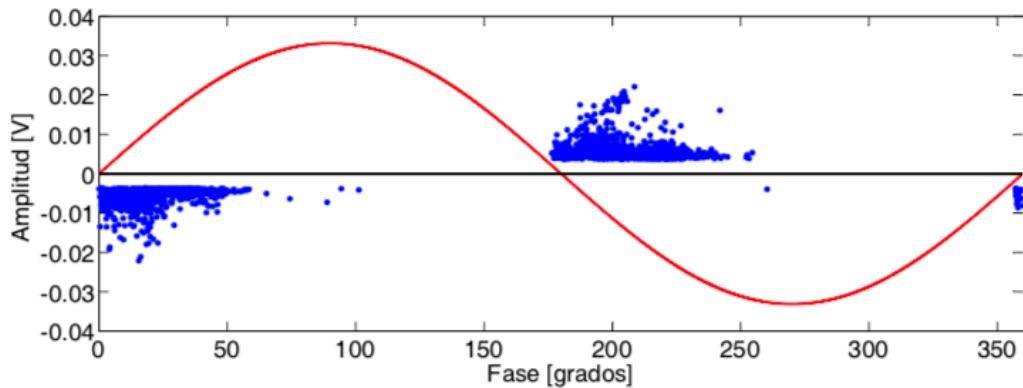
La Fig. 40 corresponde a la medición en línea de descargas parciales en un generador de gran porte en Nueva Zelanda. Mientras que la Fig. 41 presenta los patrones PRPD de los tres tipos de DP según su origen que pueden distinguirse claramente.

Figura 40 Gráfico PRPD correspondiente a la medición de DP en línea de un generador

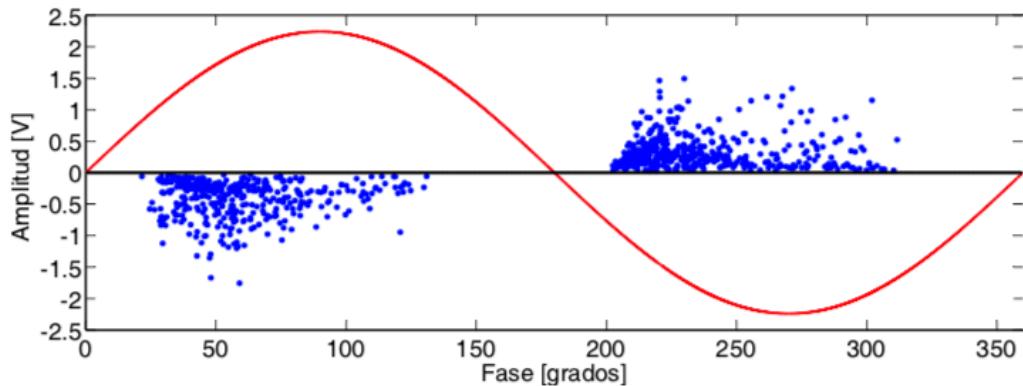


Fuente: Sitio web de la empresa LIVE-HV, 2019

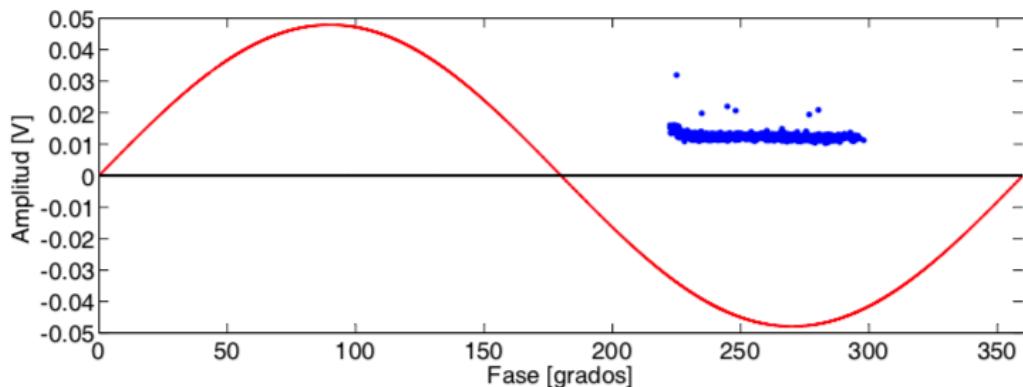
Figura 41 Patrones PRPD de DP a) internas b) superficiales y c) corona



(a) DPs internas.



(b) DPs superficiales.



(c) DPs corona.

Fuente: (Albarracín Sánchez, 2014)

ELABORACIÓN DE LA ESPECIFICACIÓN TÉCNICA DE UNA BANCADA PARA EL ESTUDIO Y MEDICIÓN DE DESCARGAS PARCIALES

Para poder elaborar la especificación técnica de una bancada capaz de efectuar mediciones de descargas parciales, primeramente se debe conocer la secuencia de procesos necesarios para realizar la medición, por lo que a continuación se realiza una descripción de la misma. La cadena típica de medición descripta a continuación fue redactada tomando como base la experiencia del Ing. Rodrigo Ramos en la instalación de un sistema de monitoreo de DP.

Descripción de la cadena típica de medición, transmisión de señales medidas y procesamiento de las mismas, para un generador síncrono de grandes dimensiones.

Sensores capacitivos: Estos sensores están compuestos por dos partes: el capacitor propiamente dicho y el cuadripolo que se encarga de convertir las señales de descargas parciales detectadas en señales analógicas que puede ser transmitidas a los equipos de análisis. A continuación, se presenta la imagen de un equipo del tipo mencionado:

Figura 42 Capacitores de acoplamiento



Fuente: Imagen extraída de internet, s.f.

En la Fig. 42 se observan los capacitores, uno por cada fase, instalados próximos al generador. Nótese los conductores de color naranja, que están conectados directamente a los devanados del estator del generador. Estos conductores poseen niveles de tensión de varios miles de voltios. Nótese también la ausencia de los cuadripolos.

En la Fig. 43 se muestra un sensor capacitivo de otro fabricante, en donde ya está integrado el cuadripolo en la parte inferior derecha del mismo. De este modo, este último sensor ya proporciona la señal analógica, típicamente enviada a los equipos de análisis por medio de un cable coaxial.

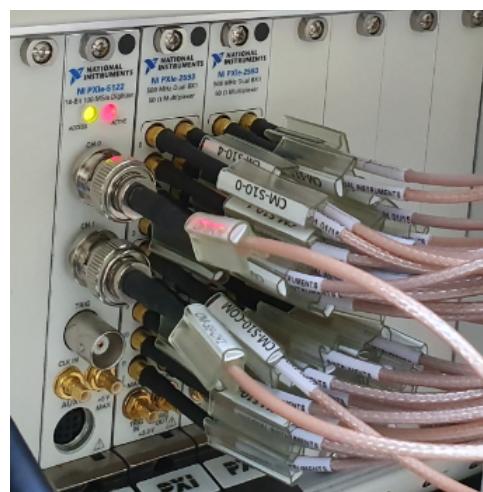
Figura 43 Capacitor de acoplamiento con cuadripolo



Fuente: Imagen ilustrativa extraída de internet, s.f.

Los cables coaxiales que salen de los cuadripolos, deben llegar a los equipos de análisis de estas señales analógicas. Estos equipos realizan el filtrado y las demás funciones de procesamiento de señales crudas. En la figura siguiente, se muestra un equipo típico de esta naturaleza.

Figura 44 Tarjeta de adquisición de datos



Fuente: Visita técnica realizada, 2019

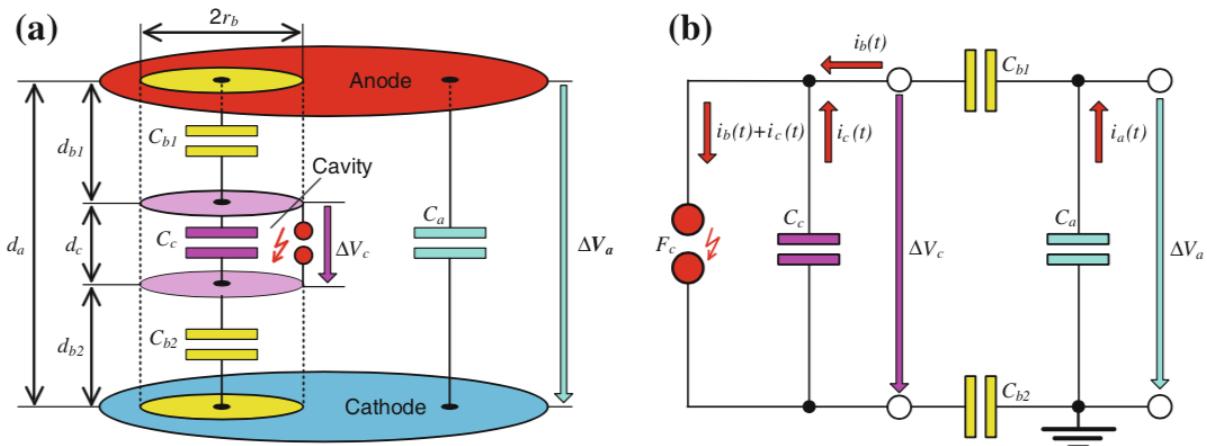
En el caso correspondiente a la Fig.44. se observan 3 tarjetas. Las dos de la derecha son las que reciben los cables coaxiales procedentes de los cuadripolos, mientras que la tarjeta de la izquierda realiza la función de osciloscopio. En este caso, las lecturas de los cables coaxiales no se realizan simultáneamente, el sistema posee una metodología de “barrido”, captando las señales consecutivamente. El módulo presentado se encarga de procesar y analizar las señales y enviarlas al computador al que está conectado para que el operador pueda visualizar los datos, estos registros se almacenan en discos de gran capacidad.

En este caso particular, los sensores capacitivos se han colocado en distintos ángulos a lo largo del estator, de manera a poder utilizar estas distancias diferentes para poder determinar la zona de ocurrencia de las descargas parciales. Se hace notar que, en el caso de un generador de gran porte, identificar el lugar exacto de la descarga parcial es extremadamente difícil, sino imposible. Por eso se hace énfasis en el término “zona” de ocurrencia.

Esquema referencial de modelo capacutivo utilizado.

Para la elaboración de esta especificación técnica, se representa la ocurrencia de una DP de acuerdo al diagrama previamente presentado. Este diagrama ilustra en la parte (a) la disposición física-espacial del fenómeno, mientras que en su parte (b) se presenta el circuito eléctrico equivalente.

Figura 45 Esquema referencial de modelo capacutivo utilizado



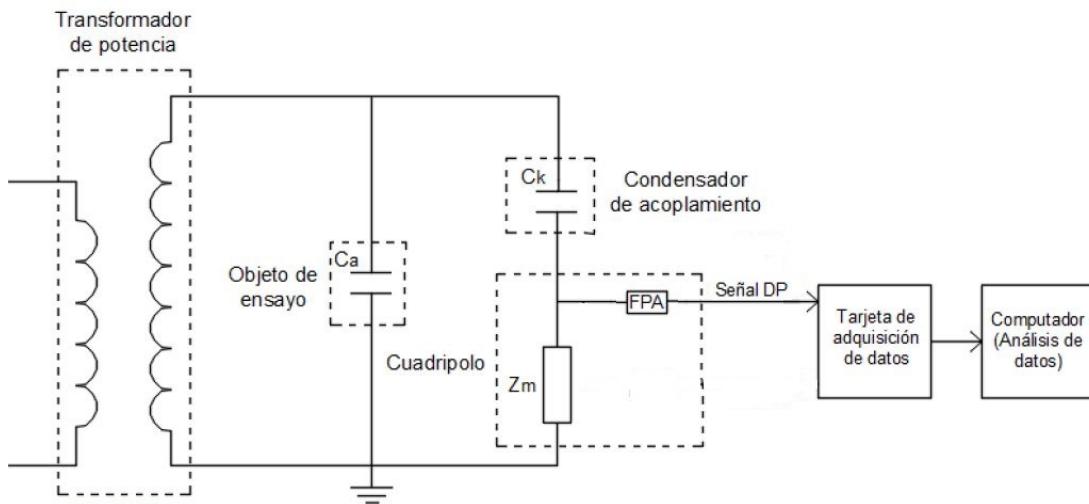
Fuente: (Hauschild & Lemke, 2014)

Lista de componentes necesarios

- **Transformador elevador de potencia:** su función es elevar la tensión disponible en la red eléctrica del laboratorio (en este caso, 220 V Fase-Tierra o 380 V Fase – Fase), a la tensión que será aplicada al objeto de ensayo. Esta tensión secundaria se encuentra en el orden de varios miles de Voltios.
- **Regulador de tensión:** este equipo (opcional, de acuerdo al transformador seleccionado) permite variar la tensión del secundario.
- **Condensador de acoplamiento:** es el encargado de detectar la ocurrencia de la DP en el objeto de ensayo, al cual está conectado en paralelo.
- **Cuadripolo:** este dispositivo convierte las señales detectadas por el condensador de acoplamiento, de manera a poder enviar las mismas a los equipos de adquisición y análisis de datos. Este cuadripolo puede o no estar integrado en el propio sensor capacitivo, como se muestra en las Figuras 41 y 42. (opcional, de acuerdo al condensador de acoplamiento seleccionado).
- **Tarjeta de adquisición de datos:** encargada de realizar el procesamiento de la señal analógica que procede del cuadripolo. Sus funciones principales son el filtrado de las señales y la digitalización de las mismas. Posee un osciloscopio integrado.
- **Computador:** utilizando un software adecuado, realiza el análisis de las señales digitalizadas oriundas de la tarjeta de adquisición.
- **Cables y conectores diversos:** cables coaxiales y otros según necesidad, descriptos en el apartado siguiente.

Esquema del circuito a emplear para realizar la medición de DP.

Figura 46 Circuito de medición



Fuente: Elaboración propia. Adaptado de (Vanegas Iriarte, J., 2016)

Características técnicas de los equipos del laboratorio

En esta sección, se presenta la especificación de cada uno de los componentes citados en el apartado anterior.

- **Transformador elevador de potencia:** en este caso, se tienen varias posibilidades: utilizar un transformador cuya tensión primaria sea de 220 V (fase-tierra) o 380 V (fase-fase). La tensión secundaria puede ser en tensión alterna o tensión continua. Se presentan las opciones disponibles:

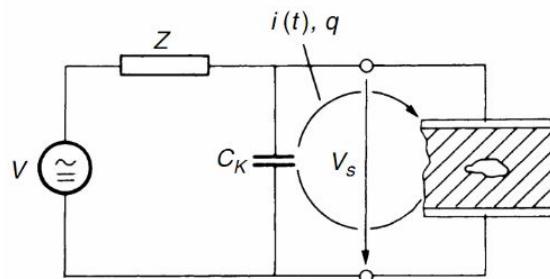
Fabricante	Tensión primaria	Tensión secundaria	Secundario variable
Rayon Energy Private Limited	230 V, 50 Hz, monofásica	400 kV, continua	SI
Petter Nodeland	350 V, 20 kHz	10 kV, 20 kHz	NO
General Electric	480 V, 50 Hz	65.3 kV	SI (con regulador externo)

- **Condensador de acoplamiento:** en la tabla siguiente se presentan los equipos disponibles en el mercado:

Fabricante	Capacitancia	Maxima tensión	Cuadripolo incluido
IRIS POWERS	1nF	30 kV	SI
QUARTZ TEQ	1000pF	20 kV	SI
SPARKS INSTRUMENTS	1000pF	24 kV	SI

- **Cuadripolo:** típicamente, los cuadripolos se construyen en el laboratorio, considerando las características de los ensayos a ser realizados. La figura abajo ilustra de una manera simplificada el circuito. La impedancia Z está compuesta por resistencias, capacitores y un descargador de sobretensión (centelleador)

Figura 47 Circuito simplificado de un cuadripolo



Fuente: Imagen extraída de internet, s.f.

- **Tarjeta de adquisición de datos:** se han seleccionado dos fabricantes, que son referencia mundial, en procesos de adquisición de datos de muy alta frecuencia, presentados en la tabla abajo:

Fabricante	Origen	Modelo	Tipo de Hardware
OMICROM	AUSTRIA	MPD 600	Equipo portátil
NATIONAL INSTRUMENTS	EEUU	NI PXIe-5162	Tarjeta para gabinete (rack)

- **Computador:** se puede, para ambos fabricantes citados arriba, utilizar tanto una Desktop o una Notebook disponibles comercialmente.
- **Cables y conectores diversos:** será necesario contar con los siguientes tipos de conductores:

Tipo	Sección	Nivel de Tensión	Aislamiento
Cable común multifilar	6 mm ²	220 – 480 V, 50 Hz	PVC
Cable para alta tensión	185 mm ²	32 kV	XLPE (Cross linked polyethylene)
Cable coaxial tipo RG-6/U	2 mm ²	+10 V	Sólido PE

Estimación del costo de la bancada propuesta

A continuación, se presenta un presupuesto estimativo del costo estimado que tendría una bancada para estudio y medición de DP en base a un modelo capacitivo, similar a la propuesta.

Tabla 3 Presupuesto de una bancada para estudio y medición de DP modelo capacitivo

Equipo	Costo en USD
Transformador elevador de potencia	15.000
Regulador de tensión	1.000
Condensador de acoplamiento con cuadripolo integrado	20.000
Tarjeta de adquisición de datos	35.000
Computador	1.000
Cables coaxiales y conectores diversos	400
Objeto de prueba	A conseguir o ser proporcionado por el cliente
INVERSIÓN TOTAL APROX.	72.400\$

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Los costos aquí planteados son estimativos. Existen dos alternativas posibles al presupuesto presentado. La primera consiste en adquirir el condensador de acoplamiento sin el cuadripolo, es decir, adquirir los componentes por separado y posteriormente adaptarlos. La segunda alternativa consiste en adquirir un transformador de potencia cuyo modelo posea taps para regular la tensión al nivel deseado en vez de adquirir el regulador de tensión por separado. La selección de componentes debe obedecer a los fines perseguidos y a los recursos disponibles.

RESULTADOS

Como respuesta al primer objetivo específico que consiste en investigar acerca del estado del arte de las técnicas de medición de descargas parciales, se indica que éste apunta al método de medición en línea como el más empleado debido a una serie de factores, tales como: el aprovechamiento de los datos medidos para analizar el desempeño de la máquina durante su tiempo en servicio, la reducción de los costos una vez instalado, la escalabilidad y la flexibilidad. Este método corresponde a una medición digital, ya que requiere de un moderno procesamiento de las señales de muestra, que contempla el tratamiento de dichas señales para contrarrestar efectos indeseados comunes a este tipo de medición, tales como acoplamiento de fases vecinas y ruido. La interpretación de las señales es otro factor clave para garantizar que las mediciones sean efectivas. En este punto son importantes tanto la confiabilidad de las mediciones como la experticia del profesional que analiza los datos. El aporte principal de las mediciones de DP consiste en la detección temprana de fallas, que da lugar a la realización del mantenimiento preventivo, estrategia recomendada para activos energéticos de gran porte y valor; su implementación también resulta en mayor seguridad para el personal operativo y un mejor aprovechamiento de la inversión realizada en los equipos, permitiendo una gestión de activos eléctricos más eficiente.

El segundo objetivo específico de esta investigación es el de analizar las características de las señales de descargas parciales de un caso correspondiente a un equipo real. Las características de señales de DP de casos reales correspondientes tanto a equipos en operación como a ensayos de laboratorio han sido obtenidas de fuentes públicas y estudios previos en el área. Las mismas han sido observadas y se pudo constatar que tienen forma de pulso de alta frecuencia y corta duración, coincidiendo con las señales estudiadas. Se destaca la observación de mediciones hechas bajo el método PRPD; de acuerdo con lo expresado por (Albarracín Sánchez, 2014) con este método clásico, se representa la amplitud de los pulsos de las DP, en pC o mV, en fase con la señal sinusoidal de la red. Estos patrones permiten la obtención de la fase y la amplitud de las DP adquiridas, superpuestas con un ciclo de la señal alterna. Con esta experiencia se han podido observar los distintos patrones que corresponden a los tres principales tipos de DP estudiadas.

El tercer objetivo consiste en la elaboración de la especificación técnica de una bancada capaz de efectuar mediciones de descargas parciales; luego de haber realizado la descripción de una cadena típica de medición del fenómeno de DP con acoplamiento capacitivo, se ha logrado elaborar la especificación técnica de una bancada que reúne los equipos necesarios para efectuar mediciones de DP. La especificación técnica propuesta contiene un esquema del circuito y una lista detallada de los equipos necesarios con sus respectivas características, así como también un presupuesto estimativo.

Cabe aclarar que es posible realizar la validación virtual de una bancada como la propuesta en este trabajo. Para ello se requiere una simulación en tiempo real que implica el manejo de muy altas frecuencias, en el orden de MHz o GHz inclusive. Analizar tales magnitudes requiere un hardware especial con procesadores capaces de simular en tiempo real, acompañados de su software correspondiente, por lo cual, se manifiesta que, la validación virtual puede hacerse si se cuenta con los equipos y la infraestructura necesaria.

Con la descripción detallada de los resultados correspondientes a los objetivos específicos planteados al inicio de la investigación, se da respuesta al objetivo general de: estudiar el fenómeno de las descargas parciales en un equipo de alta tensión, de manera a entender cabalmente el origen del mismo, sus fundamentos físicos y sus implicaciones en el desempeño del sistema eléctrico donde está ubicado. Se ha estudiado la ocurrencia de DP en hidrogeneradores de gran porte y en conductores, se entendió que el origen del fenómeno radica en la existencia de imperfecciones u otras condiciones de igual efecto en los sistemas de aislamiento que predisponen la ocurrencia de DP. Físicamente, lo que sucede es que, debido al aumento del campo eléctrico en la localización de las imperfecciones citadas, se supera un nivel de tensión denominado tensión de ignición, lo cual provoca el inicio de las descargas. Las implicaciones en el desempeño del sistema eléctrico son directas y la criticidad de los sucesos radica en el papel y la importancia del equipo dentro del sistema de potencia en el que se encuentra ubicado.

CONCLUSIÓN

La medición de descargas parciales en equipos eléctricos es una herramienta utilizada para evaluar la condición de los sistemas de aislamiento de los mismos; su correcta utilización permite la aplicación de lo que se conoce como mantenimiento preventivo, estrategia de mantenimiento bastante utilizada en las industrias, que normalmente operan equipos eléctricos de alto costo y complejidad. La interpretación de los datos ofrecidos por este tipo de tecnología permite a los profesionales técnicos la posibilidad de orientar la toma de decisiones respecto a estrategias de mantenimiento, gestión de activos eléctricos y manejo de riesgos.

Se ha logrado realizar la elaboración de un material que sintetiza el estado del arte de las mediciones de descargas parciales, abarcando los principales puntos mencionados en artículos científicos de actualidad, tomando como base estudios relevantes en el área y dos de las principales normas técnicas existentes. Durante la investigación se pudo comprender el fenómeno estudiado, sus fundamentos físicos y sus implicancias en el sistema eléctrico. Además, esta investigación aporta información actualizada respecto a las fuentes de generación de energía eléctrica en la República del Paraguay.

Los recursos bibliográficos consultados y las técnicas de investigación utilizadas han permitido la redacción detallada de una cadena típica de medición del fenómeno estudiado, precursora de la elaboración de la especificación técnica de una bancada para el estudio y medición de descargas parciales, con su presupuesto correspondiente, aporte destacado de este proyecto.

TRABAJOS FUTUROS

Como líneas de trabajo futuro, se sugieren las siguientes:

- Investigar acerca de la ocurrencia e incidencia de las descargas parciales en subestaciones aisladas a gas (GIS).
- Elaborar la validación virtual de la bancada propuesta para la medición de descargas parciales.
- Realizar mediciones de DP basadas en una de las normas técnicas mencionadas.
- Realizar el análisis de descargas parciales con datos reales obtenidos de especialistas.

BIBLIOGRAFÍA

Agencia de información paraguaya. (24 de Diciembre de 2018). Recuperado el 21 de Septiembre de 2019, de <https://www.ip.gov.py/ip/itaipu-logro-su-quinta-mejor-produccion-historica-anual/>

Albarracín Sánchez, R. (2014). *Medida de descargas parciales en radiofrecuencia*. Leganés, España.

Amperis. (s.f.). Obtenido de <https://www.amperis.com/content/tipos-de-descargas-parciales/>
ANDE. (s.f.). Recuperado el 12 de Septiembre de 2019, de <https://www.ande.gov.py/generacion.php>

Bhutia, P., & Nayak, A. (2015). Modeling And Simulation of Partial Discharge Pulse Generator. El Cronista. (23 de Julio de 2019). Recuperado el 21 de Septiembre de 2019, de <https://www.cronista.com/economiapolitica/Yacyreta-adjudicaron-obras-para-ampliar-en-un-10-la-central-hidroelectrica-20190723-0032.html>

El Sharkawi, M. A. (2013). *Electric Energy, An Introduction* (3^a edición ed.). (M. H. Rashid, Ed.) Estados Unidos : CRC Press.

Electronics notes. (20 de Febrero de 2019). *What is GPIB/IEEE 488 Bus*. Obtenido de <https://www.electronics-notes.com/articles/test-methods/gpib-ieee-488-bus/what-is-gpib-ieee488.php>

Enchufes del mundo. (s.f.). *Enchufes del mundo*. Recuperado el 14 de Junio de 2019, de <https://www.enchufesdelmundo.com/paraguay/>

Ferreira Beling, E. E., & Ríos González, R. G. (2014). *Análisis y Optimización de Recursos Energéticos de la Ciudad de Bahía Negra - Chaco Py. Trabajo Final de Grado*. Recuperado el 1 de Septiembre de 2019, de <https://prezi.com/1anzxj8fcnku/bahia-negra-sesep/>

- García Araco, J. L., Uriarte del Río, E., McLaren, D., Amundsen, J. L., Kampe, L.-E., Egli, R., . . . Whiteoak, N. (2009). Survey of hydrogenerator failures. *Cigré*, 22.
- Gómez Ramírez, G. A. (2017). *Medición de Descargas Parciales en Transformadores de Potencia bajo los estándares internacionales IEC e IEEE*. Costa Rica.
- Hauschild, W., & Lemke, E. (2014). *High-Voltage Test and Measuring Techniques*. (Springer, Ed.) Germany.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2010). *Metodología de la investigación* (5^a ed.).
- Hummel, R. (mayo de 2015). *Partial discharge measurement: An effective method for electrical insulation diagnosis*. Omicrom. Recuperado el 3 de mayo de 2019, de Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=FCymlMWIRvs&feature=youtu.be>
- IEA. (2017 de Septiembre de 2017). *International Outlook 2017*. Recuperado el 2019 de Septiembre de 2019, de [https://www.eia.gov/outlooks/archive/ieo17/pdf/0484\(2017\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/archive/ieo17/pdf/0484(2017).pdf)
- IEC60270. (2001). High-voltage test techniques - Partial discharge measurements. (B. Standard, Ed.)
- IEEE Standards Association. (2014). *IEEE 1434 Guide for the Measurement of Partial Discharges in AC Electric Machinery*. New York, USA.
- International Electrotechnical Commission. (2000). *IEC 60270 High-voltage test techniques - Partial discharge measurements* (Vol. 3). Geneva, Switzerland.
- Itaipú Binacional . (10 de Enero de 2019). Recuperado el 17 de Julio de 2019, de <https://www.itaipu.gov.py/es/sala-de-prensa/noticia/itaipu-inaugurara-moderna-planta-de-energia-solar-en-mayor-pablo-lagerenza>
- Itaipú Binacional. (16 de Enero de 2019). Recuperado el 18 de Julio de 2019, de <https://www.itaipu.gov.py/es/sala-de-prensa/noticia/planta-de-energia-solar-inaugurada-por-itaipu-en-lagerenza-beneficiara-unas-2>

Kumar, N. (s.f.). *Comprehensive Physics*. India: Laxmi Publications .

Minnesota State University Mankato. (s.f.). Recuperado el 1 de Setiembre de 2019, de
https://cset.mnsu.edu/engagethermo/systems_genset.html

Montanari, G. (2006). Insulation Diagnosis of High Voltage Apparatus by Partial Discharge Investigation. *IEEE*.

Oettl, F., Krueger, M., Koltunowicz, W., Badicu, L.-V., & Gorgan, B. (2017). *Partial discharge measurements on rotating machines - experience and innovation*. Alemania.

QR Ingenieria. (2017). *QR Ingenieria Quick Response With Quality Resources. Plataforma volcadora*. Recuperado el 22 de Enero de 2019, de <https://qringenieria.com/plataforma-volcadora/>

Quiminet. (1 de Septiembre de 2004). Recuperado el 27 de Octubre de 2019, de
<https://www.quiminet.com/articulos/glosario-de-terminos-relacionados-con-las-pinturas-y-los-recubrimientos-abrasion-alifatico-507.htm>

Real academia de ingeniería . (s.f.). Recuperado el 27 de Octubre de 2019, de
<http://diccionario.raing.es/es/lema/delaminaci%C3%B3n-0>

RESINEX. (s.f.). *PMMA Polimetilmetacrilato*. Recuperado el 20 de Febrero de 2019, de
<https://www.resinex.es/tipos-de-polimeros/pmma.html>

Roen Velo, I. (2015). Experimental Set-up for partial discharge detection. Norgen Tesnisk-Naturvitenskapelige Universitet.

Serway, R., & Jewett, J. J. (2008). *Física para ciencias e ingeniería* (7^a ed., Vol. 2). (S. C. Cervantes, Ed.) Estados Unidos: Thomson.

Última Hora. (13 de Diciembre de 2018). Recuperado el 20 de Septiembre de 2019, de
<https://www.ultimahora.com/celebran-50-anos-la-central-hidroelectrica-acaray-n2785280.html>

Última Hora. (16 de Enero de 2019). Planta de energía solar beneficiará a casi 3.000 pobladores del Chaco. *Última Hora*.

Vanegas Iriarte, J. A. (2016). Desarrollo de un sistema prototipo de medición y análisis de descargas parciales generadas en laboratorio. Santiago de Cali, Colombia: Universidad del Valle.

Vertiv. (s.f.). Recuperado el 19 de Noviembre de 2018, de <https://www.vertivco.com/en-us/about/news-and-insights/articles/educational-articles/what-is-partial-discharge-testing/>

Vice Ministerio de Minas y Energía. (15 de marzo de 2019). *Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones*. Recuperado el 6 de agosto de 2019, de https://www.ssme.gov.py/vmme/index.php?option=com_content&view=article&id=1216&Itemid=603

ANEXO I

Cálculo aproximado de la generación en USD por hora de una unidad generadora

Para realizar este cálculo, se han tomado como referencia datos de la Hidroeléctrica Itaipú, obtenidos de una charla denominada Itaipú 2023, realizada en la Universidad Católica en el mes de junio del año 2019. Los datos corresponden al año 2017. Este cálculo se realiza con la finalidad de estimar las pérdidas que una parada de máquina no programada puede llegar a occasionar.

Producción anual IB (2017):	96.387GWh
Suministrado a Paraguay:	13.455GWh
Días del año:	365
Costo de producción:	35,21\$/MWh
Precio de venta (supuesto):	42\$/MWh
Ganancia por MWh:	6.79\$/MWh, se redondea a 7\$/MWh. (supuesto)

Se divide el total de la producción anual en GWh del año 2017 entre los 365 días del año para obtener un valor estimado de producción diario.

$$96387\text{GWh}/365 = 264.07 \text{ GWh/día}$$

Se realiza la conversión a MWh multiplicando por 1000 ya que en esta unidad están cotizados los precios. 1GW=1000MW.

$$264.07 \times 1000 = 264.074\text{MWh/día}$$

Multiplicando el valor obtenido por la ganancia de 7\$/MWh, se obtiene la ganancia total por día:

$$264.074 \text{ MWh} \times 7\$/\text{MWh} = 1.848.518 \$ \text{ por día}$$

Se divide entre 24 para estimar el total por hora

$$1.848.518 \$ / 24 = 77.022 \$ \text{ por hora}$$

Considerando que las 20 unidades generadoras están en funcionamiento, se divide el total por hora entre 20 para estimar el total producido por hora por unidad

$$77.022 \$ / 20 \text{ unidades generadoras} = 3.851 \$ \text{ por hora por unidad generadora}$$

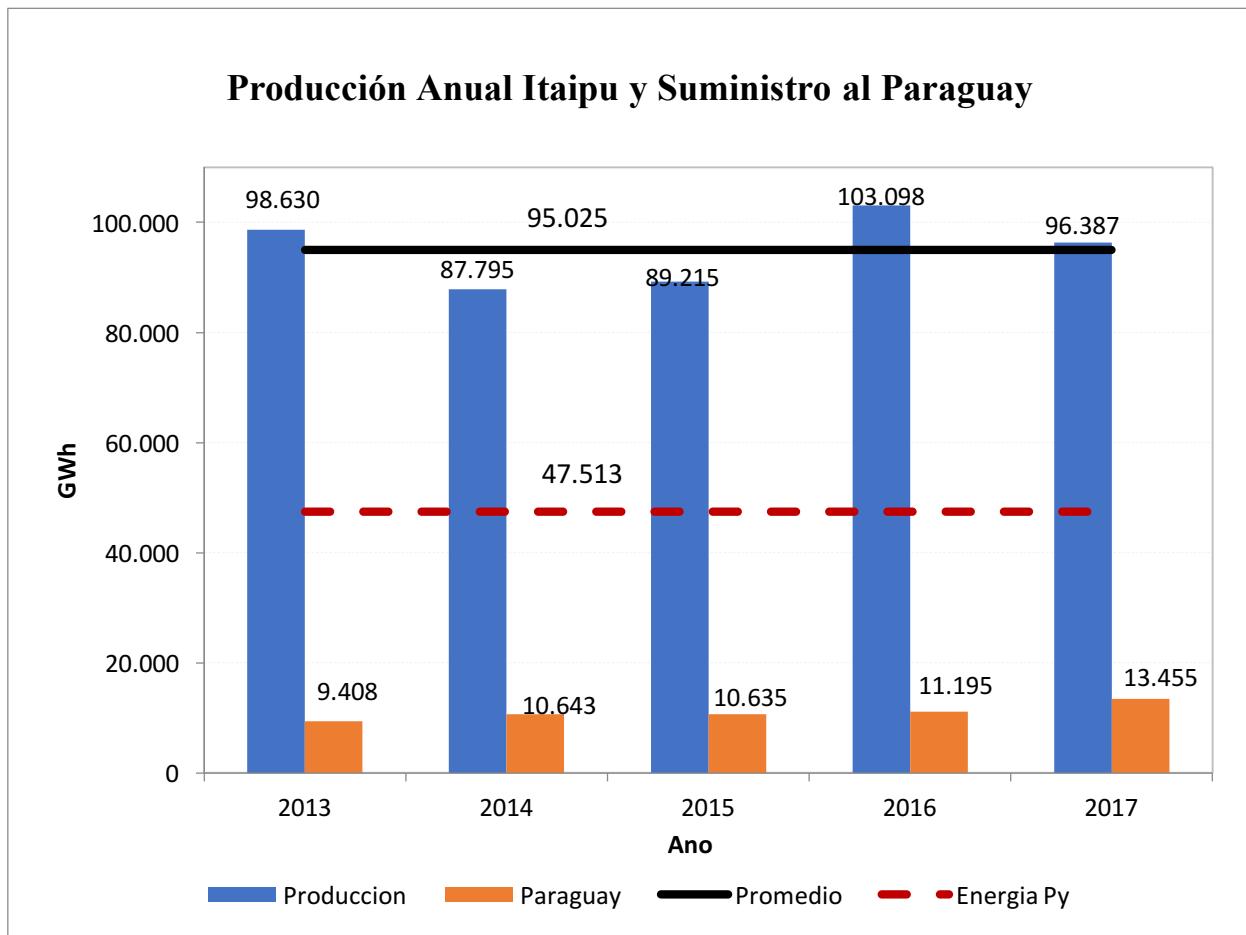
Para estimar el total producido por día por unidad se multiplica el valor obtenido por 24

$$3.851 \$ \times 24 = 92.424 \$ \text{ por día por unidad generadora}$$

Por lo tanto, se estima cada unidad produce un valor cercano a 3.851\$ por hora, totalizando 92.424\$ al día.

ANEXO II

Datos utilizados para realizar el cálculo del Anexo I



Fuente: Charla Itaipu Binacional 2023, SISE. 2019

2 – Aspecto Técnico Comercial

2.2 – Costo de Producción de Itaipú

Composición del Costo de Servicio de Electricidad	Actual	Futuro
	US\$ Millones	US\$ Millones
1 - Utilidades de Capital	48.500.000	48.500.000
2 - Royalties	519.100.000	511.800.000
3 - Resarcimientos de Cargas de Adm. y Supervisión	39.900.000	39.900.000
4 - Amortización de Prestamos y Financiamientos	1.419.900.000	0(*)
5 - Cargas Financieras de Prestamos y Financiamientos	623.200.000	0(*)
6 - Gastos de Explotación	718.300.000	718.300.000
Total	3.368.900.000	1.317.950.000

(*) Se supone que estos componentes serán saldados hasta el 2023.

Producción Anual(GWh)	95.682 (2017)	95.025 (Promedio)
Costo (US\$/MWh)	35,21	13,86

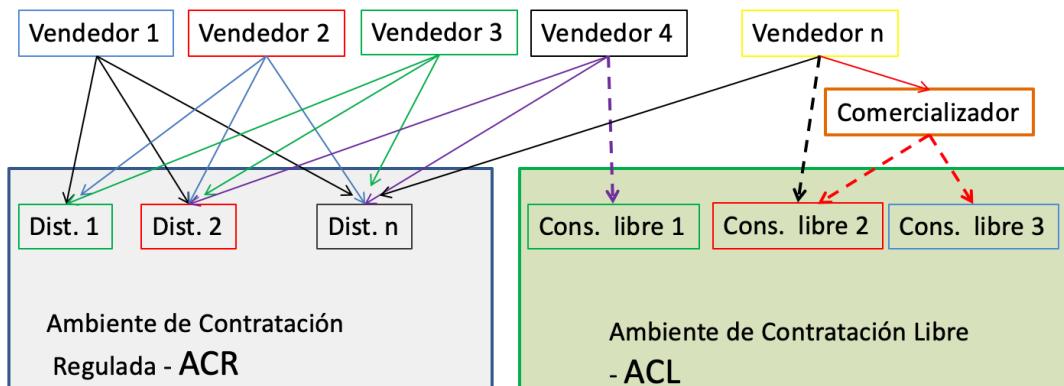
Fuente: Memoria Anual 2017

www.itaipu.gov.py

Fuente: Charla Itaipú Binacional 2023, SISE. 2019

2 – Aspecto Técnico Comercial

2.5 – Mercado de Energía Eléctrica Brasileño



Contratos que resultan de remates.

41,48 US\$/MWh (*)

CME 234 R\$/MWh = 58 U\$/MWh (**)

?

Contratos negociados libremente.

Precio Energía Py Cedida al Brasil= **9,89 US\$/MWh**

(*) Infoleilao _19-20_A-1_A-2
www.ccee.org.br

(**) Plano Decenal_de_Energia_2027
www.epe.gov.br

Fuente: Charla Itaipú Binacional 2023, SISE. 2019

ANEXO III

Datos técnicos del equipo de la NI que puede ser utilizado para procesar señales de DP.

Osciloscopio PXI, 14 Bits, 100 MS/s, 100 MHz, PXIE—El osciloscopio de alta resolución PXIE-5122 tiene dos canales con un rango dinámico libre de espurios (SFDR) mayor a 75 dBc y configuración flexible para el acoplamiento, la impedancia, el rango de voltaje y el filtrado. Los osciloscopios PXI también tienen varios modos de disparos, memoria interna profunda y un controlador de instrumentos que incluye funciones de registro de datos y análisis. Este dispositivo es ideal para aplicaciones de dominio de tiempo y de dominio de frecuencia que requieren medidas de alta resolución y bajo ruido, con hasta 100 MS/s y 100 MHz de ancho de banda analógico. El PXIE-5122 también cuenta con capacidades avanzadas de sincronización PXI y de registros de datos.

NOTA: Las informaciones y gráficos han sido extraídos de la página oficial de la NI, por lo tanto, están en idioma inglés. Ante cualquier duda adicional respecto al equipo, se puede consultar el siguiente link: <https://www.ni.com/es-cr/support/model.pcie-5122.html>.

Para consultar el flyer completo del producto se puede acceder al siguiente link:
<http://www.ni.com/pdf/product-flyers/oscilloscopes.pdf>

14-Bit PXI Oscilloscopes

PXIe-5122, PXIe-5163, PXIe-5164, PXIe-5170, PXIe-5171, and PXIe-5172



- **Software:** Includes InstrumentStudio support for interactive measurements, API support for LabVIEW and text-based languages, shipping examples, and detailed help files
- Two, four, and eight analog channel options
- 100 MHz – 400 MHz analog bandwidth
- Edge, window, hysteresis, digital, immediate, and software standard triggers
- Additional video trigger on PXIe-5122
- User-programmable Xilinx Kintex-7 FPGA on PXIe-5164, 5170, 5171, and 5172

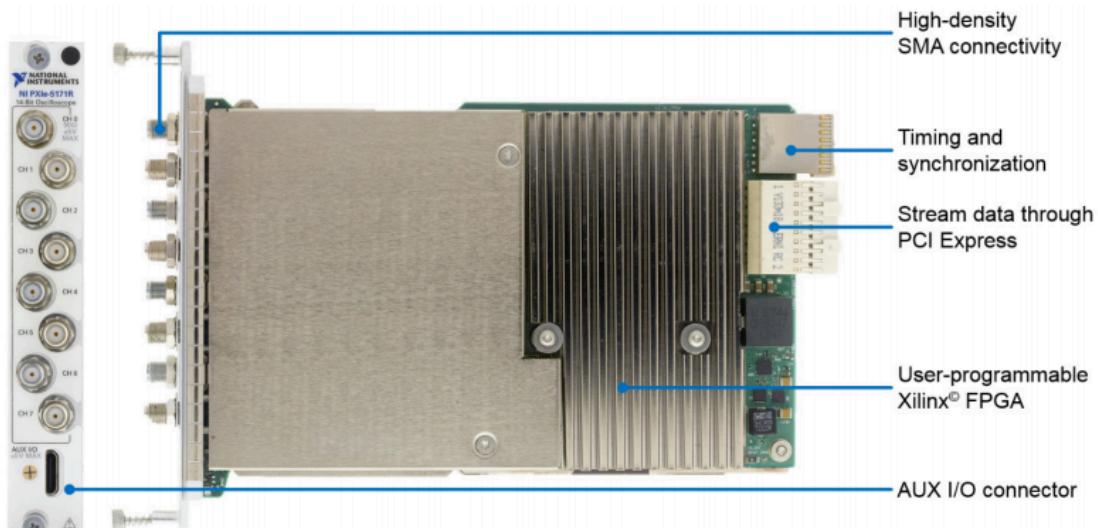
Optimized for Resolution and Density

NI's 14-bit PXI Oscilloscopes are optimized for high ADC resolution and often, high channel density as well. They provide the measurement performance of traditional box oscilloscopes in a form factor better suited for automated test and high-channel-count applications. Programmable settings for coupling, input impedance, voltage range, and filtering offer flexibility for automated and partially automated applications. Combined with the high throughput and low latency of the PCI Express bus, they are better equipped than LAN and GPIB alternatives to sequence measurements quickly and keep test time to a minimum. The PXI backplane also allows you to easily synchronize PXI Oscilloscopes either with each other or additional instrument types for mixed-signal tests. Several 14-bit PXI Oscilloscopes also have a user-programmable Xilinx Kintex-7 FPGA for implementing custom triggers or intensive in-line processing.

Table 7. NI's 14-bit oscilloscopes range from 100 MHz to 400 MHz options.

	PXIe-5122	PXIe-5163	PXIe-5164	PXIe-5170	PXIe-5171	PXIe-5172
50 Ω Bandwidth	100 MHz	200 MHz	400 MHz	100 MHz	250 MHz	100 MHz
1 MΩ Bandwidth	100 MHz	200 MHz	300 MHz	N/A	N/A	100 MHz
ADC Resolution	14-bit	14-bit	14-bit	14-bit	14-bit	14-bit
Channels	2	2	2	4 or 8	8	8
Maximum Sample Rate	100 MS/s Independent sampling channels	1 GS/s Independent sampling channels	1 GS/s Independent sampling channels	250 MS/s Independent sampling channels	250 MS/s Independent sampling channels	250 MS/s Independent sampling channels
50 Ω Full Scale Input Voltage Range	0.2 to 10 V _{pk-pk}	0.25 to 5 V _{pk-pk}	0.25 to 5 V _{pk-pk}	0.2 to 5 V _{pk-pk}	0.2 to 5 V _{pk-pk}	0.2 to 10 V _{pk-pk}
50 Ω Maximum Voltage Offset (Depends on Input Range)	± 2 V	N/A	N/A	N/A	N/A	± 2.5 V
1 MΩ Full Scale Input Voltage Range	0.2 to 20 V _{pk-pk}	0.25 to 100 V _{pk-pk}	0.25 to 100 V _{pk-pk}	N/A	N/A	0.2 to 80 V _{pk-pk}
1 MΩ Maximum Voltage Offset (Depends on Input Range)	± 5 V	± 248.75 V	± 248.75 V	N/A	N/A	± 20 V
Input Channel Connector	BNC	BNC	BNC	SMA	SMA	SMB
Input Capacitance (Characteristic)	29 pF	20.2 pF	20.2 pF	N/A	N/A	16 pF
User-Programmable FPGA	N/A	N/A	Xilinx Kintex-7 410T	Xilinx Kintex-7 325T	Xilinx Kintex-7 410T	Xilinx Kintex-7 325T or 410T
Maximum External Calibration Cycle	2 Years	2 Years	2 Years	2 Years	2 Years	2 Years

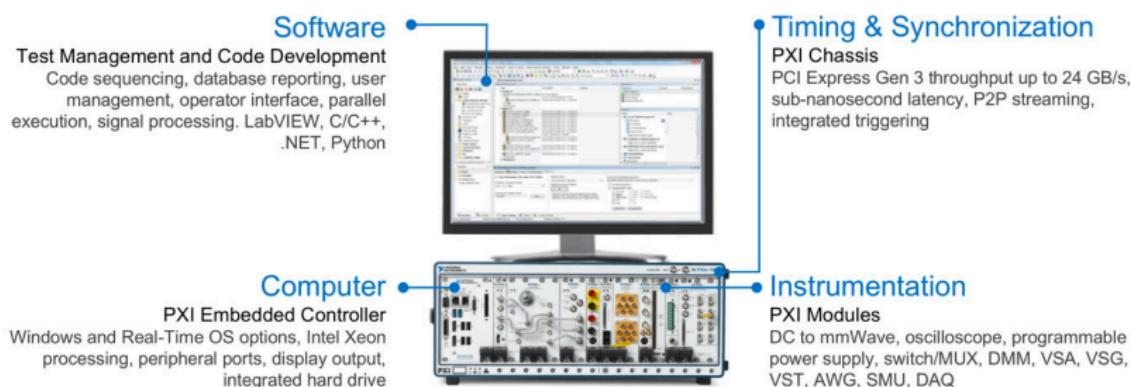
Detailed View of PXIe-5171 Oscilloscope



Platform-Based Approach to Test and Measurement

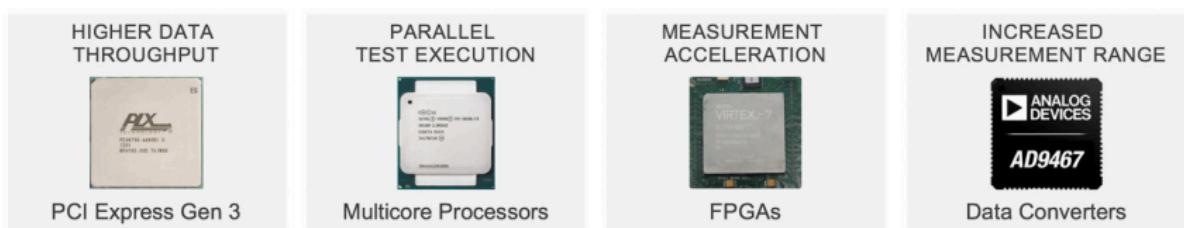
What Is PXI?

Powered by software, PXI is a rugged PC-based platform for measurement and automation systems. PXI combines PCI electrical-bus features with the modular, Eurocard packaging of CompactPCI and then adds specialized synchronization buses and key software features. PXI is both a high-performance and low-cost deployment platform for applications such as manufacturing test, military and aerospace, machine monitoring, automotive, and industrial test. Developed in 1997 and launched in 1998, PXI is an open industry standard governed by the PXI Systems Alliance (PXISA), a group of more than 70 companies chartered to promote the PXI standard, ensure interoperability, and maintain the PXI specification.



Integrating the Latest Commercial Technology

By leveraging the latest commercial technology for our products, we can continually deliver high-performance and high-quality products to our users at a competitive price. The latest PCI Express Gen 3 switches deliver higher data throughput, the latest Intel multicore processors facilitate faster and more efficient parallel (multisite) testing, the latest FPGAs from Xilinx help to push signal processing algorithms to the edge to accelerate measurements, and the latest data converters from TI and ADI continually increase the measurement range and performance of our instrumentation.



ANEXO IV

Circuitos de prueba básicos para DP extraídos de la copia de la norma IEC60270

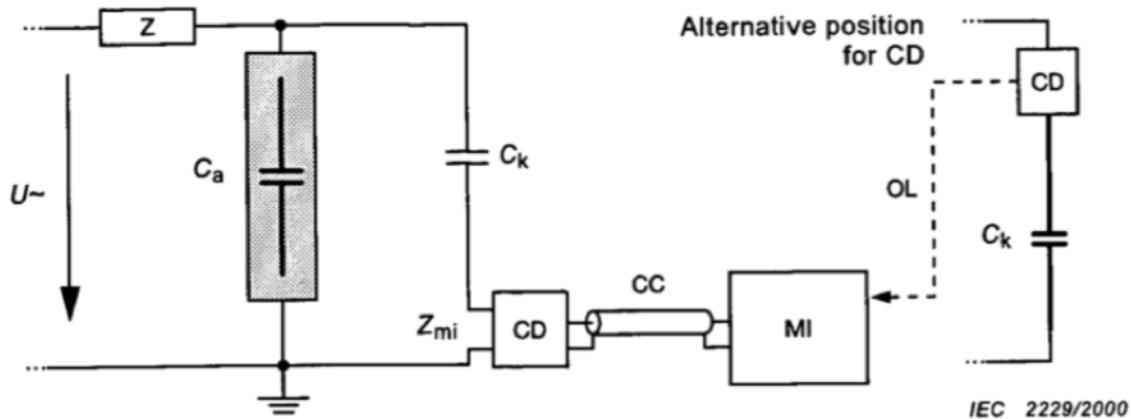


Figure 1a – Coupling device CD in series with the coupling capacitor

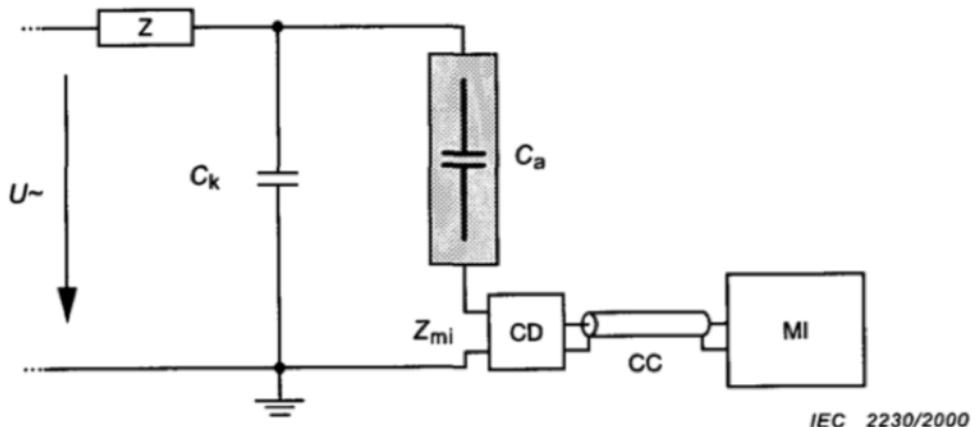
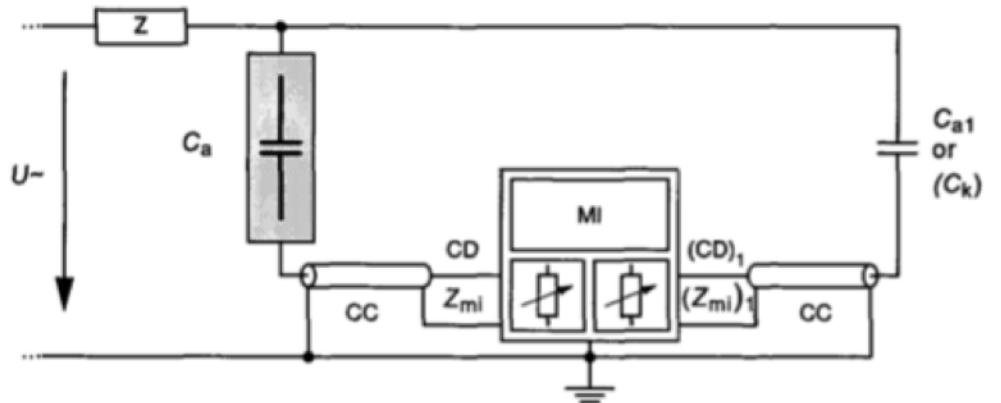


Figure 1b – Coupling device CD in series with the test object

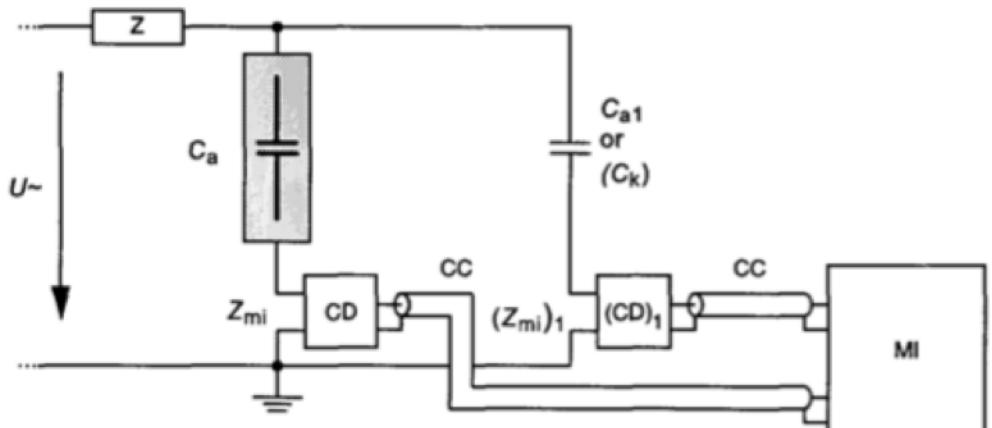
Components

- U_{\sim} high-voltage supply
- Z_{mi} input impedance of measuring system
- CC connecting cable
- OL optical link
- C_a test object
- C_k coupling capacitor
- CD coupling device
- MI measuring instrument
- Z filter



IEC 2231/2000

Figure 1c – Balanced circuit arrangement



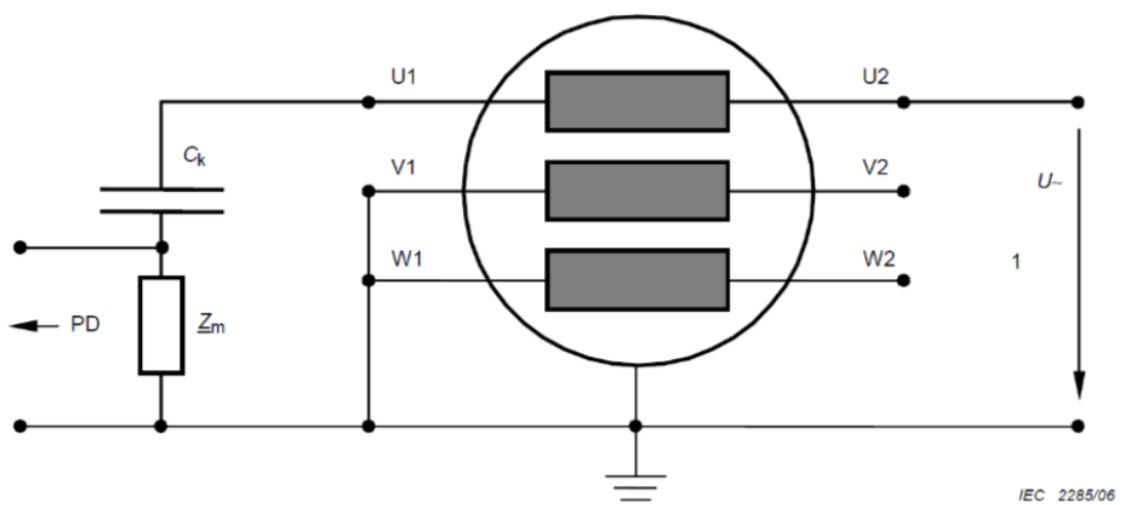
IEC 2232/2000

Figure 1d – Polarity discrimination circuit arrangement

Components

- U_- high-voltage supply
- Z_{mi} input impedance of measuring system
- CC connecting cable
- OL optical link
- C_a test object
- C_k coupling capacitor
- CD coupling device
- MI measuring instrument
- Z filter

Circuito eléctrico equivalente de medición off line para un canal en la fase U



IEC 2285/06

Fuente (Oettl, Krueger, Koltunowicz, Badicu, & Gorgan, 2017)