



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“INSTALACIÓN Y PUESTA EN SERVICIO DEL SISTEMA
DE ANÁLISIS DE DESCARGAS PARCIALES DEL
PROYECTO HIDROELÉCTRICO EL CAJÓN”**

T E S I N A

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO

PRESENTA:

PATRICIA TONANTZIN HERNÁNDEZ BERBER

AVAL:

ING. ARTURO ZAMORA SÁNCHEZ



MÉXICO D.F.

2008

DEDICATORIA

A mis padres, Federico y Patricia, que les debo cuanto soy. Cada una de las letras de este trabajo es para ustedes. Gracias por ser, por estar, por existir...

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por la aportación incalculable que ha encabezado mi formación.

A la Facultad de Ingeniería, cuyos docentes se entregan a la tarea universitaria con constancia y dedicación.

De manera especial, al Ing. Álvaro Arturo Zamora Sánchez, por el apoyo brindado, la confianza que ha depositado en mí y por alentarme a lograr esta realidad.

A toda la plantilla de la empresa Duero Ingeniería S.A de C.V., encabezada por su director, Ing. Salvador Del Pozzo Mastachi, cuyo verdadero trabajo en equipo ha permitido culminar exitosamente grandes proyectos. Mi más sincero respeto y admiración.

A César López García, la estrella que he tenido la suerte de conocer, a quién admiro profundamente por su resolución ante las dificultades y con cuyo apoyo atravesé una etapa crucial en mi camino profesional. Por su continuo interés, asesoramiento, contribución fundamental y disponibilidad.

A Citlali, mi hermana, por estar a mi lado en cada paso, en los buenos y malos tiempos. A ella, gracias.

Agradezco particularmente a los miembros del jurado Ing. José Raul Martín, Ing. Roberto Espinosa y Lara, M.I. Rodolfo Lorenzo Bautista, Ing. David Vázquez Ortiz y especialmente al Ing. Eduardo Carranza Torres, por sus comentarios y sugerencias.

A todas aquellas personas e instituciones, que con su apoyo han sido imprescindibles para la elaboración de éste trabajo.

A todos ellos muchas gracias.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	7
2.	OBJETIVO	8
3.	ANTECEDENTES DEL TEMA	9
4.	CONTEXTO DE LA PARTICIPACIÓN PROFESIONAL.....	12
5.	ANÁLISIS Y METODOLOGÍA EMPLEADA.....	13
6.	PARTICIPACIÓN PROFESIONAL	14
6.1.	DESCARGAS PARCIALES	14
6.1.1.	ANTECEDENTES GENERALES DE LAS DESCARGAS PARCIALES	14
6.1.2.	NATURALEZA DEL FENÓMENO.....	15
6.1.3.	CLASIFICACIÓN DE LAS DP's.	16
6.1.4.	MODELO DEL FENÓMENO.	17
6.1.5.	ANÁLISIS DE LA FORMA DE ONDA DE LAS DP's PARA EVALUACIÓN DE LA DEGRADACIÓN	19
6.1.6.	NOCIVIDAD DE LAS DESCARGAS PARCIALES.	20
6.1.7.	PERTURBACION ELÉCTRICA PRODUCIDA POR LAS DP's.	20
6.1.8.	OTROS EFECTOS.	21
6.2.	DESCARGAS PARCIALES EN MÁQUINAS ROTATORIAS.	21
6.2.1.	INFLUENCIA DEL AISLAMIENTO EN LA EFICIENCIA DE LAS MÁQUINAS ROTATORIAS.....	21
6.2.2.	MECANISMOS DE FALLA EN GENERADORES.....	22
6.2.2.1.	ESFUERZOS TÉRMICOS.....	22
6.2.2.2.	ESFUERZOS MECÁNICOS.	22
6.2.2.3.	ESFUERZOS ELÉCTRICOS.	23
6.2.2.4.	ESFUERZOS RELATIVOS AL ENTORNO.	23
6.2.3.	DETECCIÓN DE DESCARGAS PARCIALES	23
6.2.3.1	ENSAYOS PARA DETECTAR DP's.	24
6.2.3.2	DETECCIÓN OFF-LINE DE DP's.	24
6.2.3.3	DETECCIÓN ON-LINE DE DP's.....	26
6.2.4.	ESTADO DEL ESTUDIO DE LAS DP's EN MÁQUINAS ROTATORIAS.....	27
6.3.	INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE ANÁLISIS DE DESCARGAS PARCIALES	28
6.3.1.	DIRECCIÓN DE LOS PUNTOS DE CONEXIÓN	32
6.3.2.	MATERIALES Y ACCESORIOS.....	32
6.3.3.	CONEXIÓN DE LOS CABLES A LOS ACOPLADORES CAPACITIVOS	33
6.3.4.	CONEXIÓN DEL CABLE DE ALTO VOLTAJE A LA BARRA DEL ESTATOR	40
6.3.5.	AISLAMIENTO Y LA SOLDADURA DE LOS CABLES A LAS BARRAS.....	42
6.3.6.	CAJA DE TERMINALES PDA	44
6.4.	PUESTA EN SERVICIO DEL SISTEMA DE DESCARGAS PARCIALES.....	46
6.4.1.	SOFTWARES.....	46
6.4.2.	COMPUTADORA.....	47
6.4.3.	COMISIÓN DE PRUEBAS Y REPRESENTANTES.....	47
6.4.4.	PLANOS AQC (Así Quedó Construido).....	47

6.4.5.	VERIFICACIÓN DE LOS EQUIPOS PARA PRUEBAS.....	47
6.4.6.	INSTRUCCIONES DE SEGURIDAD.....	48
6.4.7.	DATOS DE LAS PRUEBAS Y REGISTROS DE LA INSPECCIÓN.....	48
7.	RESULTADOS Y APORTACIONES.....	51
8.	CONCLUSIONES.....	55
9.	ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO.....	57
10.	SOLUCIONES PRÁCTICAS.....	58
11.	BIBLIOGRAFÍA.....	60

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.	AVALANCHA INICIAL PARA LA FORMACIÓN DE UNA DESCARGA PARCIAL.....	15
FIGURA 2.	MODELO DE UN AISLANTE SÓLIDO CON FALLA.....	17
FIGURA 3.	CIRCUITO ELÉCTRICO EQUIVALENTE.....	17
FIGURA 4.	CIRCUITO ELÉCTRICO SIMPLIFICADO. MODELO ABC.....	18
FIGURA 5.	FORMAS DE ONDA DE VOLTAJE Y CORRIENTES GENERADAS POR DP'S.....	19
FIGURA 6.	FORMACIÓN DE ÁRBOLES A PARTIR DE UNA CAVIDAD.....	20
FIGURA 7.	ESQUEMA BÁSICO ASOCIADO A LA MEDICIÓN OFF-LINE DE DP'S.....	24
FIGURA 8.	CONFIGURACIÓN INSTRUMENTAL DEL ENSAYO DE DETECCIÓN OFF-LINE DE DP'S.....	25
FIGURA 9.	DISPOSICIÓN INSTRUMENTAL PARA LA MEDICIÓN ON-LINE.....	26
FIGURA 10.	MEDICIÓN DE DP'S ON-LINE.....	27
FIGURA 11.	PULSO DE RUIDO Y DP'S.....	28
FIGURA 12.	SISTEMA DE ANÁLISIS DE DESCARGAS PARCIALES.....	31
FIGURA 13.	MATERIALES A UTILIZAR CON UN ACOPLADOR CAPACITIVO.....	33

FIGURA 14. BASE DE MONTAJE DEL ACOPLADOR CAPACITIVO.....	33
FIGURA 15. CONEXIÓN DEL CABLE DE ALTA TENSIÓN.....	34
FIGURA 16. USO DE LA CINTA 2571	34
FIGURA 17. USO DE LA CINTA DE PIB.....	35
FIGURA 18. USO DE LA CINTA DE SILICÓN.....	35
FIGURA 19. USO DE CINTA DE FIBRA DE VIDRIO.....	36
FIGURA 20. PREPARACIÓN DEL CABLE COAXIAL.....	36
FIGURA 21. AJUSTE DE CABLE COAXIAL	37
FIGURA 22. CONEXIÓN DE CABLE COAXIAL.....	37
FIGURA 23. MONTAJE DEL ACOPLADOR CAPACITIVO	38
FIGURA 24. MONTAJE ACOPLADOR CAPACITIVO	38
FIGURA 25. CONEXIÓN A TIERRA SGA	39
FIGURA 26. CONEXIÓN AL BUS	39
FIGURA 27. INSTALACIÓN DE LOS CABLES DE ALTA TENSIÓN	40
FIGURA 28. SOLERA PLANA.....	41
FIGURA 29. SOLERA DOBLADA	41
FIGURA 30. AISLAMIENTO EN EL CABLE	42
FIGURA 31. POSICIÓN DE PUNTOS DE SOLDADURA EN ESTATOR.....	43
FIGURA 32. ESQUEMA DE CONEXIÓN DE CABLE COAXIAL	44
FIGURA 33. CAJA DE TERMINALES PDA	44
FIGURA 34. CONECTOR BNC.....	45
FIGURA 35. TARJETA DE CIRCUITOS IMPRESOS	45

INDICE DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1. CALIBRACIÓN DE CABLEADO EN OSCILOSCOPIO.....	51
GRÁFICO 2. PANTALLA PRINCIPAL DEL MONITOREO DEL PROGRAMA DP'S WATCH.....	52
GRÁFICO 3. ANÁLISIS DE TENDENCIA DE DP'S DE LARGO PLAZO.....	53
GRÁFICO 4. GRÁFICA DE LA ALTURA DEL PULSO	53
GRÁFICO 5. GRÁFICA POR FASE	54

INDICE DE TABLAS

TABLA 1. MATERIALES Y ACCESORIOS.....	32
TABLA 2. CONDICIONES DE AISLAMIENTO	42
TABLA 3. ACOPLADORES CAPACITIVOS-PDA	49

TESINA

“INSTALACIÓN Y PUESTA EN SERVICIO DEL SISTEMA DE ANÁLISIS DE DESCARGAS PARCIALES EN EL PROYECTO HIDROELÉCTRICO EL CAJÓN”.

1. INTRODUCCIÓN

El generador eléctrico es de gran importancia para los sistemas eléctricos de potencia de una central; su salida por falla origina severas repercusiones y grandes pérdidas para las compañías suministradoras de electricidad, ya que deja de generar niveles importantes de energía.

Por el alto nivel de potencia que manejan los generadores, están sujetos a esfuerzos eléctricos, mecánicos, térmicos y ambientales que deterioran gradualmente sus componentes y que en caso extremo pueden llevarlos a fallar.

Los problemas técnicos y económicos que ocasiona su salida de servicio, como resultado de una falla, ha inducido a los usuarios a cambiar de un sistema de mantenimiento correctivo y preventivo, a un mantenimiento predictivo basado en inspección continua de las condiciones en que se encuentran los principales componentes de la máquina.

En este sentido, las técnicas de diagnóstico en línea se han convertido en herramientas poderosas que permiten determinar, oportunamente, la salida de operación de un equipo. El conocimiento de los métodos de detección de fallas en dichos equipos y su implementación son de gran ayuda para el análisis y diseño de sistemas mejorados de mantenimiento.

La experiencia en la operación de equipos eléctricos ha mostrado que las descargas parciales acortan el tiempo de vida de los sistemas de aislamiento y causan una serie de interferencias con las medidas, control y comunicaciones eléctricas. Por lo tanto las descargas parciales pueden llegar a ser la causa de serias pérdidas económicas al producir reparaciones y cambios prematuros en los equipos eléctricos, pérdidas de eficiencia y seguridad en la operación de los sistemas de comunicación y por último la interrupción del servicio de suministro de energía.

Las pérdidas económicas de esta naturaleza pueden ser prevenidas mediante pruebas a los sistemas eléctricos y sus equipos en el momento apropiado, y así asegurarse que las descargas parciales no producirán efectos adversos al operar los equipos y sistemas, bajo las condiciones de servicio para las cuales fueron especificadas.

La prueba de Análisis de Descargas Parciales durante la operación de una máquina rotatoria de alta tensión puede detectar serios mecanismos de deterioro del estator tales como descargas en las ranuras, en los intersticios, en las cuñas y en los devanados flojos. Si estos problemas no son monitoreados, detectados y corregidos, pueden ocasionar una falla catastrófica en la máquina.

3. ANTECEDENTES DEL TEMA

Las descargas parciales son actualmente una de las principales causas de la degradación del aislamiento del estator del generador. Es el fenómeno de degradación física más estudiado en la historia del mantenimiento eléctrico y a ello se debe que los primeros esfuerzos de medición en línea se refieran a este fenómeno.

En la industria eléctrica, el mantenimiento de los equipos juega un papel determinante en el cumplimiento del periodo considerado para su vida útil. La importancia de elegir un programa de mantenimiento adecuado repercute directamente sobre el rendimiento de la máquina y su óptimo funcionamiento. Es por ello que es de gran importancia buscar las mejores alternativas en la planeación y realización del mantenimiento.

Debido a los altos costos de la reparación de las unidades generadoras, se ha hecho necesario implementar un sistema de mantenimiento diferente a los tradicionales (correctivo y preventivo), que se basan en la medición directa del estado de los equipos. Este nuevo esquema de mantenimiento se le ha denominado como de tipo predictivo.

El tipo de mantenimiento que busca la optimización de recursos es el mantenimiento predictivo, emplea varias metodologías para determinar la condición del equipo, mediante la medición y el análisis de la tendencia de los parámetros característicos de su funcionamiento. Se busca detectar los problemas potenciales en la máquina antes de que se produzca la falla, con el fin de poder ejercer acciones oportunas que la eviten. Es un sistema de advertencia temprana que indica si una característica determinada está alcanzando valores que ponen en riesgo el funcionamiento del generador, antes que el operador pueda notarlo.

Con este tipo de mantenimiento se pretende tener un monitoreo constante de las condiciones físicas del equipo, minimización de los tiempos fuera de operación de la máquina, reducción de los costos de mantenimiento y la optimización del funcionamiento de la máquina para el cumplimiento de su vida útil.

La importancia, tanto técnica como económica, del mantenimiento predictivo, ha llevado al desarrollo de varias técnicas de monitoreo, que pueden ser clasificadas en primera instancia, como técnicas de monitoreo en línea y técnicas de monitoreo fuera de línea. La diferencia entre éstas radica, como su nombre lo indica, en la condición de operación de la máquina en que se llevan a cabo; es decir, las primeras se realizan con la máquina en operación y bajo las condiciones reales a las que está sujeta, mientras que las técnicas de monitoreo fuera de línea se llevan a cabo cuando la máquina se encuentra fuera de operación.

Actualmente la industria en general ha descubierto que gracias al nivel tecnológico alcanzado hoy en día, la evaluación en línea representa una alternativa atractiva y confiable para la implementación de políticas de mantenimiento predictivo.

El primer intento exitoso por medir DP's en línea fue un sistema desarrollado por J. S. Johnson, utilizado para detectar descargas en las ranuras de motores y generadores en 1951. Las descargas parciales eran detectadas como pulsos de voltaje en el neutro del generador, tratadas con un filtro paso-banda y desplegadas en un osciloscopio. Esta técnica tenía el serio

inconveniente de que el reconocimiento y discriminación de las DP's, enmascaradas por el ruido electromagnético, dependía de la habilidad de un observador experimentado.

Otra versión de medición en línea de Descargas Parciales, la implementó Ontario Hydro con sensores capacitivos conectados en las terminales del generador y a un filtro paso-banda (30KHz a 3MHz), para registrar las descargas en un osciloscopio. Éste método presentaba el mismo inconveniente de la interferencia electromagnética (ruido).

En los años 70's, empezaron a utilizarse las técnicas de radio frecuencia (RF) para detectar DP's en hidrogeneradores y turbogeneradores por medio de un transformador de corriente (TC) de alta frecuencia instalado en el neutro del generador. La salida era analizada directamente por un analizador de espectros, utilizando como filtro de banda angosta con el fin de ofrecer una mejor discriminación de las señales provenientes de las Descargas Parciales.

A finales de los 70's, Ontario Hydro, bajo contrato de la CEA (Canadian Electrical Association) desarrolló el PDA (Partial Discharge Analyzer), como un sistema de medición en línea de las DP's en generadores de plantas hidroeléctricas. Ésta técnica tiene la característica de rechazar las señales de ruido usando las características de propagación de los pulsos de DP'S en hidrogeneradores. En la medición por PDA, se instalan dos sensores capacitivos por fase, cada uno de ellos se coloca en una de las ramas paralelas de los embobinados de cada fase. En esta configuración se utiliza un amplificador diferencial en modo común para la eliminación del ruido. Los capacitores utilizados en este sistema están hechos de cables de alta potencia de 1 a 2.5 m de longitud, de 80pF a 60 Hz, que no presentan el efecto inductivo en altas frecuencias como los capacitores convencionales. El sistema de adquisición de datos de PDA despliega el comportamiento de los pulsos de las DP'S en una gráfica, en la que un eje vertical indica el número de pulsos por segundo y un eje horizontal proporciona la magnitud de éstos.

El TGA (Turbine Generator Analyzer) constituye una nueva forma de monitoreo en línea, desarrollado a principios de los 90's por Ontario Hydro e Iris Power Engineering, basado en el uso de sensores en las ranuras del estator (SSCs). El SSC es una antena que consiste de un conductor desnudo con 50 cm de longitud y una impedancia de 50Ω , que se conecta a un cable coaxial en cada uno de sus extremos; está diseñado para ser un detector de banda ultra ancha (superior a los 150 MHz), capaz de responder a los pulsos de DP'S con un tiempo de duración típico entre 2 y 6 ns.

El SSC, como su nombre lo indica, es colocado directamente debajo de las cuñas del estator, posición ventajosa para el sensor ya que por una parte, se encuentra lo más cerca posible de la fuente de DP'S de interés (el devanado de estator); y por otro lado, ésta ubicación le permite estar alejado físicamente de las fuentes de ruido. Esta característica permite que las señales de ruido sufran una atenuación en frecuencia y magnitud, al viajar a través del embobinado de la máquina hacia el detector.

El SSC es capaz de producir una señal en la cual el ruido electromagnético puede ser distinguido de las DP'S, ya que solo las descargas locales podrán conservar su contenido en frecuencia. Para medir el ancho del pulso en los dos extremos del SSC, se desarrolló un sistema llamado TGA (Turbine Generator Analyzer). Si el ancho de pulso es mayor de 8 ns entonces es clasificado como ruido; de lo contrario se le considera como un pulso de DP'S.

La señal proveniente de cada extremo del SSC es muestreada inicialmente a 2.5 ns por un comparador, cuya salida es almacenada. Si la señal fue detectada a los 2.5 ns (la longitud eléctrica del SSC) cerca de la parte final del sensor, se asume que el pulso fue originado en la zona de cabezales de la máquina. Si la diferencia de tiempo de llegada es menor a 2.5 ns se asume que el pulso se originó debajo del SSC.

Sin embargo para un monitoreo con mayor exactitud, se requieren sensores instalados en todas las ranuras del estator, ya que los pulsos de DP'S que ocurren en devanados de las ranuras más alejados de los sensores, pueden ser detectados como ruido.

La información desplegada en el monitor de un sistema TGA es muy similar al que se observa en el uso de PDA en el caso de hidrogenadores. En ambos sistemas se observan gráficas del número cuántico normalizado (NQN) de descargas.

En nuestro país las técnicas de monitoreo más utilizadas son el PDA y el ICM; para el caso de éste informe, nos interesa el PDA, ya que es el que se instaló para los generadores del P. H. El Cajón.

3. ANTECEDENTES DEL TEMA

Las descargas parciales son actualmente una de las principales causas de la degradación del aislamiento del estator del generador. Es el fenómeno de degradación física más estudiado en la historia del mantenimiento eléctrico y a ello se debe que los primeros esfuerzos de medición en línea se refieran a este fenómeno.

En la industria eléctrica, el mantenimiento de los equipos juega un papel determinante en el cumplimiento del periodo considerado para su vida útil. La importancia de elegir un programa de mantenimiento adecuado repercute directamente sobre el rendimiento de la máquina y su óptimo funcionamiento. Es por ello que es de gran importancia buscar las mejores alternativas en la planeación y realización del mantenimiento.

Debido a los altos costos de la reparación de las unidades generadoras, se ha hecho necesario implementar un sistema de mantenimiento diferente a los tradicionales (correctivo y preventivo), que se basan en la medición directa del estado de los equipos. Este nuevo esquema de mantenimiento se le ha denominado como de tipo predictivo.

El tipo de mantenimiento que busca la optimización de recursos es el mantenimiento predictivo, emplea varias metodologías para determinar la condición del equipo, mediante la medición y el análisis de la tendencia de los parámetros característicos de su funcionamiento. Se busca detectar los problemas potenciales en la máquina antes de que se produzca la falla, con el fin de poder ejercer acciones oportunas que la eviten. Es un sistema de advertencia temprana que indica si una característica determinada está alcanzando valores que ponen en riesgo el funcionamiento del generador, antes que el operador pueda notarlo.

Con este tipo de mantenimiento se pretende tener un monitoreo constante de las condiciones físicas del equipo, minimización de los tiempos fuera de operación de la máquina, reducción de los costos de mantenimiento y la optimización del funcionamiento de la máquina para el cumplimiento de su vida útil.

La importancia, tanto técnica como económica, del mantenimiento predictivo, ha llevado al desarrollo de varias técnicas de monitoreo, que pueden ser clasificadas en primera instancia, como técnicas de monitoreo en línea y técnicas de monitoreo fuera de línea. La diferencia entre éstas radica, como su nombre lo indica, en la condición de operación de la máquina en que se llevan a cabo; es decir, las primeras se realizan con la máquina en operación y bajo las condiciones reales a las que está sujeta, mientras que las técnicas de monitoreo fuera de línea se llevan a cabo cuando la máquina se encuentra fuera de operación.

Actualmente la industria en general ha descubierto que gracias al nivel tecnológico alcanzado hoy en día, la evaluación en línea representa una alternativa atractiva y confiable para la implementación de políticas de mantenimiento predictivo.

El primer intento exitoso por medir DP's en línea fue un sistema desarrollado por J. S. Johnson, utilizado para detectar descargas en las ranuras de motores y generadores en 1951. Las descargas parciales eran detectadas como pulsos de voltaje en el neutro del generador, tratadas con un filtro paso-banda y desplegadas en un osciloscopio. Esta técnica tenía el serio

inconveniente de que el reconocimiento y discriminación de las DP's, enmascaradas por el ruido electromagnético, dependía de la habilidad de un observador experimentado.

Otra versión de medición en línea de Descargas Parciales, la implementó Ontario Hydro con sensores capacitivos conectados en las terminales del generador y a un filtro paso-banda (30KHz a 3MHz), para registrar las descargas en un osciloscopio. Éste método presentaba el mismo inconveniente de la interferencia electromagnética (ruido).

En los años 70's, empezaron a utilizarse las técnicas de radio frecuencia (RF) para detectar DP's en hidrogeneradores y turbogeneradores por medio de un transformador de corriente (TC) de alta frecuencia instalado en el neutro del generador. La salida era analizada directamente por un analizador de espectros, utilizando como filtro de banda angosta con el fin de ofrecer una mejor discriminación de las señales provenientes de las Descargas Parciales.

A finales de los 70's, Ontario Hydro, bajo contrato de la CEA (Canadian Electrical Association) desarrolló el PDA (Partial Discharge Analyzer), como un sistema de medición en línea de las DP's en generadores de plantas hidroeléctricas. Ésta técnica tiene la característica de rechazar las señales de ruido usando las características de propagación de los pulsos de DP'S en hidrogeneradores. En la medición por PDA, se instalan dos sensores capacitivos por fase, cada uno de ellos se coloca en una de las ramas paralelas de los embobinados de cada fase. En esta configuración se utiliza un amplificador diferencial en modo común para la eliminación del ruido. Los capacitores utilizados en este sistema están hechos de cables de alta potencia de 1 a 2.5 m de longitud, de 80pF a 60 Hz, que no presentan el efecto inductivo en altas frecuencias como los capacitores convencionales. El sistema de adquisición de datos de PDA despliega el comportamiento de los pulsos de las DP'S en una gráfica, en la que un eje vertical indica el número de pulsos por segundo y un eje horizontal proporciona la magnitud de éstos.

El TGA (Turbine Generator Analyzer) constituye una nueva forma de monitoreo en línea, desarrollado a principios de los 90's por Ontario Hydro e Iris Power Engineering, basado en el uso de sensores en las ranuras del estator (SSCs). El SSC es una antena que consiste de un conductor desnudo con 50 cm de longitud y una impedancia de 50Ω , que se conecta a un cable coaxial en cada uno de sus extremos; está diseñado para ser un detector de banda ultra ancha (superior a los 150 MHz), capaz de responder a los pulsos de DP'S con un tiempo de duración típico entre 2 y 6 ns.

El SSC, como su nombre lo indica, es colocado directamente debajo de las cuñas del estator, posición ventajosa para el sensor ya que por una parte, se encuentra lo más cerca posible de la fuente de DP'S de interés (el devanado de estator); y por otro lado, ésta ubicación le permite estar alejado físicamente de las fuentes de ruido. Esta característica permite que las señales de ruido sufran una atenuación en frecuencia y magnitud, al viajar a través del embobinado de la máquina hacia el detector.

El SSC es capaz de producir una señal en la cual el ruido electromagnético puede ser distinguido de las DP'S, ya que solo las descargas locales podrán conservar su contenido en frecuencia. Para medir el ancho del pulso en los dos extremos del SSC, se desarrolló un sistema llamado TGA (Turbine Generator Analyzer). Si el ancho de pulso es mayor de 8 ns entonces es clasificado como ruido; de lo contrario se le considera como un pulso de DP'S.

La señal proveniente de cada extremo del SSC es muestreada inicialmente a 2.5 ns por un comparador, cuya salida es almacenada. Si la señal fue detectada a los 2.5 ns (la longitud eléctrica del SSC) cerca de la parte final del sensor, se asume que el pulso fue originado en la zona de cabezales de la máquina. Si la diferencia de tiempo de llegada es menor a 2.5 ns se asume que el pulso se originó debajo del SSC.

Sin embargo para un monitoreo con mayor exactitud, se requieren sensores instalados en todas las ranuras del estator, ya que los pulsos de DP'S que ocurren en devanados de las ranuras más alejados de los sensores, pueden ser detectados como ruido.

La información desplegada en el monitor de un sistema TGA es muy similar al que se observa en el uso de PDA en el caso de hidrogenadores. En ambos sistemas se observan gráficas del número cuántico normalizado (NQN) de descargas.

En nuestro país las técnicas de monitoreo más utilizadas son el PDA y el ICM; para el caso de éste informe, nos interesa el PDA, ya que es el que se instaló para los generadores del P. H. El Cajón.

4. CONTEXTO DE LA PARTICIPACIÓN PROFESIONAL

De acuerdo a las condiciones elementales de construcción del P. H. El Cajón, mi participación consistió en el estudio del Sistema de Análisis de Descargas Parciales, estudio de la documentación proporcionada por las diferentes fábricas diseñadoras, para participar en la supervisión de la instalación y Puesta en Servicio del Sistema de Análisis de Descargas Parciales para dos generadores eléctricos de 350 MW cada uno, del Proyecto Hidroeléctrico El Cajón, de acuerdo a las especificaciones y normas correspondientes.

5. ANÁLISIS Y METODOLOGÍA EMPLEADA

El presente informe está integrado por una investigación documental y trabajo de campo.

La investigación documental consistió en el estudio de las descargas parciales como un fenómeno que se presenta en máquinas rotatorias, la importancia de su detección, y el análisis de los acontecimientos presentados en todo el proceso de instalación y puesta en servicio del sistema.

El método empleado es el propuesto por el fabricante del equipo, presentado en los manuales del fabricante de los equipos que integran al sistema PDA, planos BPE (buenos para ejecución), Memoria descriptiva del Sistema Analizador de Descargas Parciales, Catálogos de equipos y sensores, Plan de Instalación del Sistema de Análisis de Descargas Parciales, Esquema Dimensional de Acopladores Capacitivos, Esquema Dimensional de UADP's y Manual de Instrucción y Operación del Sistema.

6. PARTICIPACIÓN PROFESIONAL

INTRODUCCIÓN

La detección y monitoreo de las descargas parciales (DP'S) es de vital importancia, ya que los fenómenos de DP'S frecuentemente preceden a un fallo del aislamiento en equipos de alta tensión que producen pérdida del servicio eléctrico y reparaciones costosas.

Cuando el sistema de aislamiento eléctrico tiene pequeñas fallas, se producen descargas parciales y, cuando éstas son muy frecuentes, terminan afectando al aislamiento sólido. Con el tiempo, lo que en un principio había sido un deterioro muy leve se puede agravar, llegando a destruir el aislamiento.

Por esta razón, los equipos para detectar descargas parciales en los sistemas de aislamiento son ahora muy utilizados para analizar cables, terminales, empalmes, generadores, motores, interruptores, distribuidores, transformadores (CT y PT), condensadores y pararrayos.

Los equipos de medición de descargas parciales ayudan a mantener en buen estado de conservación los equipos

6.1. DESCARGAS PARCIALES

6.1.1. ANTECEDENTES GENERALES DE LAS DESCARGAS PARCIALES

Durante el proceso de fabricación de un aislante, pudiera ocurrir que quedaran pequeñas cantidades de gas aprisionadas en el seno del material, formando cavidades de formas y dimensiones muy diferentes.

Por otra parte, al montar un aislante alrededor de piezas conductoras de equipos eléctricos, por descuido, imperfecciones o dificultades constructivas, pudieran quedar cavidades entre el dieléctrico sólido y los conductores, o bien, entre diferentes capas de aislamiento sólido.

También al usar aislantes plásticos, que se moldean directamente en equipos eléctricos, en el proceso de fraguado, pueden quedar burbujas gaseosas en su interior.

Se puede presentar el envejecimiento del material aislante, ya sea porque frente a sollicitaciones externas de los conductores, éstos ejercen fuerzas mecánicas o incluso bajo la acción de contracciones térmicas, tales que dan origen a cavidades de tamaño y formas diversas.

Los fenómenos de origen eléctrico que se producen en estas cavidades (burbujas o espacios con gas) son fundamentalmente, los mismos.

6.1.2. NATURALEZA DEL FENÓMENO.

Cuando el material aislante es sometido a una diferencia de potencial y debido a la presencia de un campo eléctrico el cual tiende a concentrarse en la cavidad, se produce la ionización del gas presente en éstas, dando origen a una descarga eléctrica.

La ionización es un proceso físico, el cual se inicia cuando un electrón libre o un ion negativo llega a un espacio lleno de algún material ionizable, por ejemplo gas donde exista un campo eléctrico. Si un electrón tiene la suficiente libertad para moverse en el gas, éste adquirirá una gran energía dinámica tal que en la colisión del electrón y una molécula neutra se liberará un electrón de ésta por el impacto. Así cada vez que esto suceda se liberará un nuevo electrón capaz de producir el mismo efecto, logrando de esta forma que el número de electrones libres aumente, produciendo así el efecto avalancha.

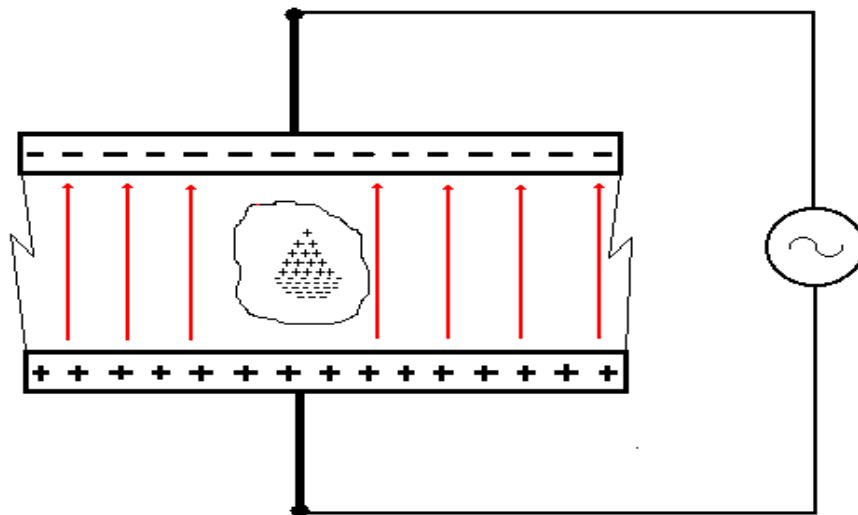


Figura 1. Avalancha inicial para la formación de una descarga parcial.

Estos electrones, cargados negativamente, se moverán rápidamente en la dirección del electrodo cargado positivamente, el cual junto con el electrodo negativo producen el campo eléctrico en el gas ionizable. Las moléculas que pierdan un electrón permanecerán cargadas positivamente y se moverán más lentamente que los electrones, en la dirección opuesta, es decir, hacia el electrodo negativo.

El movimiento de los iones está gobernado por la fuerza que ejerce el campo eléctrico entre las cargas libres y la masa de cada ion. La nube de iones positivos representa una carga de espacio la cual reduce la rigidez del campo eléctrico en la región donde los electrones son liberados por las colisiones, éste y otros efectos desaceleran el proceso de ionización.

Cuando la intensidad del campo alcanza un valor menor al cual se inicio la ionización, no se generan más electrones por avalancha. La carga de espacio formada por iones positivos en la vecindad del electrodo negativo y la de los iones negativos y electrones, en la vecindad del electrodo positivo disminuye por la influencia de varios efectos. El material de los límites de la región donde la ionización ocurre, además de la distribución del campo eléctrico y la polaridad de los electrodos, influyen en la velocidad a la cual la carga se recombina.

A medida que la carga de espacio desaparece, la intensidad del campo eléctrico en la región en cuestión aumenta, cuando éste alcanza el valor al cual la ionización fue iniciada la primera vez o ligeramente mayor, la avalancha de electrones comienza y el proceso de ionización se vuelve a repetir.

Las tensiones de inicio de estas descargas eléctricas son relativamente bajas debido principalmente a que el campo eléctrico tiende a concentrarse en las cavidades, y que la rigidez dieléctrica del gas es menor que la rigidez dieléctrica del sólido.

Este fenómeno puede ocurrir en cualquier gas y en consecuencia, en cualquier material aislante sólido con fisuras o cavidades, líquido con burbujas y también en aislamientos sólidos desgastados.

Si se coloca un metal en una zona cercana a la avalancha, las cargas eléctricas se inducirán capacitivamente en este metal o electrodo. Cuando este electrodo se conecta a una línea de transmisión, la forma de onda que puede registrarse en esta línea, corresponderá a la del movimiento de los iones y electrones de la avalancha.

Estas descargas eléctricas afectan sólo a la zona en que se producen, es decir no comprometen todo el aislamiento, de allí su nombre genérico de descargas parciales (DP's). Se podría definir entonces DP's como pequeñas descargas eléctricas que se producen en el seno de cavidades con gas presente en un medio aislante sólido o líquido.

6.1.3. CLASIFICACIÓN DE LAS DP's.

En general se distinguen tres tipos de DP's.

- Internas.
- Superficiales.
- Corona.

Descargas internas ocurren en cavidades, en general gaseosas, al interior de un dieléctrico sólido. Estas pueden presentarse de varias formas. En el exterior, es decir la cavidad se produce entre los revestimientos de dos conductores paralelos. En el interior del dieléctrico, se presentan como una pequeña cavidad de aire. Entre dieléctrico y aislante, generalmente se produce porque el aislamiento se despegó.

Descargas superficiales ocurren en gas, ocasionalmente en líquido, en la superficie de un dieléctrico o interfase entre dos dieléctricos.

Descargas corona, son bastante diferentes de las ya mencionadas. Las descargas corona ocurren en las superficies metálicas aguzadas o que tienen un pequeño radio de curvatura, en las cuales el campo eléctrico supera la rigidez dieléctrica del gas (en general aire). La descarga limitada a la zona de alto campo se extingue en el medio circundante lo que no origina una falla franca.

6.1.4. MODELO DEL FENÓMENO.

Una falla en un determinado punto de un sistema de aislamiento eléctrico puede significar la presencia de una cavidad, la cual presenta una determinada capacidad frente a tensiones alternas.

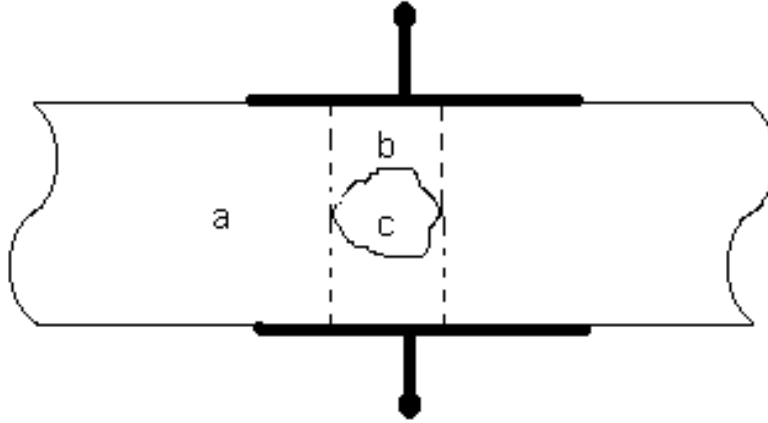


Figura 2. Modelo de un aislante sólido con falla.

Donde

- a : Representa la capacidad de aislamiento sin falla.
- b : Capacidad serie a la cavidad, es decir, de la zona sin falla.
- c : Es la capacidad equivalente de la cavidad.

En general la perturbación eléctrica provocada por una descarga parcial con voltaje alterno puede ser modelada mediante un circuito análogo con condensadores y resistencias.

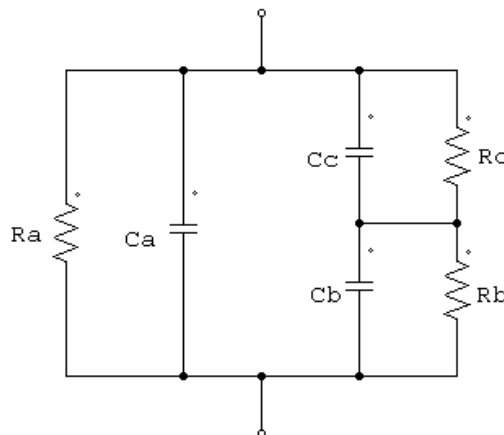


Figura 3. Circuito eléctrico equivalente.

Donde R_c y C_c representan la resistencia y la capacidad de la imperfección o cavidad, R_b y C_b la resistencia y capacidad del aislante en serie con la cavidad, R_a y C_a la resistencia y capacidad del aislante restante.

Pero como las resistencias son tan grandes en relación a las reactancias capacitivas se adopta simplemente el modelo simplificado.

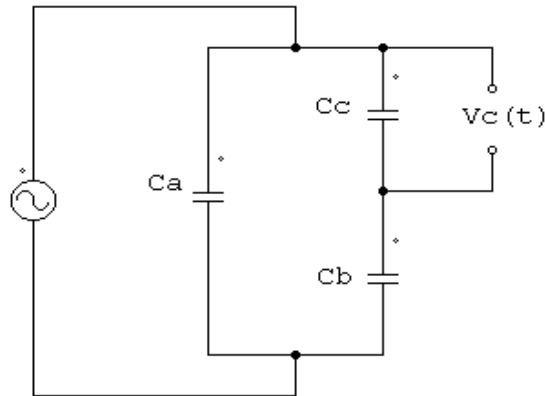


Figura 4. Circuito eléctrico simplificado. Modelo ABC

Si se aplica una tensión alterna el aislante designado por:

$$Vt(t) = Vm \cdot \text{Sen}\omega t$$

La diferencia de potencial de los bornes de la cavidad es:

$$Vc(t) = \frac{Cb}{Cb + Cc} Vm \cdot \text{Sen}\omega t$$

hasta el momento donde toma el valor U_i (tensión disruptiva del gas en el interior de la cavidad).

La descarga se produce cuando el valor máximo de la tensión total aplicada es igual a:

$$V_{\max} \geq V_i = \frac{Cb + Cc}{Cb} U_i$$

Donde;

V_i : Tensión umbral.

La descarga en la cavidad se traduce en una brusca caída de tensión $V_c(t)$ hasta un valor U_e llamado extinción de la descarga. Después de esto, la tensión en la cavidad C empieza a subir nuevamente, ya que la capacidad de la cavidad representada por C_c , empieza a cargarse debido a la tensión externa aplicada.

Una vez que la tensión en la cavidad C , alcanza nuevamente el valor de inicio U_i se produce una nueva descarga, y así sucesivamente hasta que, pasado el máximo de la onda V_c , se llega a valores negativos produciéndose una descarga en sentido opuesto cuando se alcanza el valor $-U_i$.

Posteriormente y análogamente al caso ya descrito, se producirá una secuencia de descargas negativas. (La curva de color rojo muestra el voltaje que debería aparecer en la cavidad de no haber descarga).

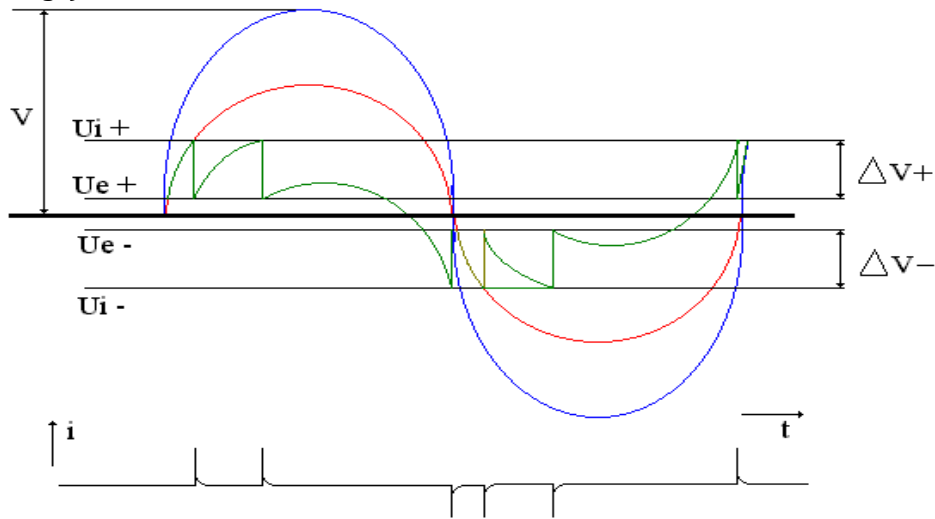


Figura 5. Formas de onda de voltaje y corrientes generadas por DP's.

Se debe destacar que los pulsos de DP's son de signo positivo en los intervalos 0° - 90° y 270° - 360° , y negativos en el intervalo 90° - 270° , concentrándose en la región de cruce por cero de la señal.

Con tensión continua el fenómeno es irrelevante pues solo ocurre una descarga al conectar el voltaje y otra al desconectarlo, comparado con lo que ocurre con tensión alterna, en que habrá al menos dos descargas por ciclo.

6.1.5. ANÁLISIS DE LA FORMA DE ONDA DE LAS DP's PARA EVALUACIÓN DE LA DEGRADACIÓN.

Los primeros intentos por resolver en tiempo la forma de onda de una descarga parcial se iniciaron al final de la década de los 60's. Sin embargo, estos intentos no se extendieron masivamente hasta los 80's, cuando aparecieron digitalizadores de 1GHz a bajo costo.

Los primeros estudios revelaron que la forma de onda de una DP's tiene un frente electrónico de muy altas frecuencias, por lo que los circuitos de detección se basaron en arreglos coaxiales con impedancias lineales de hasta 1GHz.

La siguiente discusión sobre la mecánica de evaluación de la degradación producida por las descargas parciales, utilizó un arreglo de este tipo y se circunscribe al análisis de la corriente inducida por una DP's ocurriendo en una cavidad única ocluida al momento de secado de la resina epóxica. Las condiciones controladas de manufactura y medición permiten resultados repetitivos para diferentes muestras.

Las formas de onda de la corriente inducida por una descarga parcial pueden clasificarse en dos tipos, descargas rápidas y lentas.

6.1.6. NOCIDIDAD DE LAS DESCARGAS PARCIALES.

La degradación de un aislante sólido por las descargas parciales es el resultado de un conjunto complejo de fenómenos.

Elevación de la temperatura del gas encerrado proveniente de los choques elásticos entre electrones y moléculas gaseosas. Bombardeo iónico y electrónico de las paredes de la cavidad provocando su erosión. Acción de rayos ultravioleta producidas por átomos excitados y por la recombinación de portadores. Descarga química progresiva del material con producción de gases, particularmente hidrogeno.

La importancia de estos diversos fenómenos, varía ciertamente con el material dieléctrico considerado y las condiciones en las cuales él es utilizado, pero las experiencias han demostrado que en un ambiente gaseoso químicamente inerte la degradación de un aislante obedece a un mismo tipo de evolución que comprende tres fases sucesivas:

Inicialmente el proceso de ataque se limita a una erosión lenta, las cavidades se agrandan y pueden entrar en contacto con otra, debilitando localmente el muro del aislante.

La segunda etapa puede aparecer en los puntos débiles de la cavidad a partir de las cuales las descargas se propagan al interior del dieléctrico sano formando caminos conductores (treeing).

Por fin, cuando el campo eléctrico en la extremidad de una de las ramificaciones alcanza al gradiente disruptivo intrínseco del aislante se observa un desgaste rápido del material en esa dirección, y cuando esta progresión de daño se produce también hacia al electrodo opuesto, la perforación completa del aislante produce una descarga total de una pieza conductora a otra.

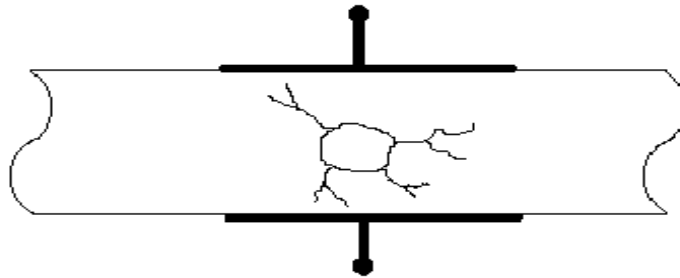


Figura 6. Formación de árboles a partir de una cavidad.

6.1.7. PERTURBACION ELÉCTRICA PRODUCIDA POR LAS DP's.

La transferencia de carga en la región donde se produce la ionización es acompañada por la correspondiente transferencia de carga en el circuito externo y la fuente de poder asociada. Por lo tanto, como resultado de esta transferencia de carga, momentánea, de corta duración, regular o aleatoria, se producen pulsos de corriente, los cuales se propagan a través del circuito externo, estos pulsos de corriente son de corta duración ya que son el resultado del movimiento extremadamente rápido de portadores de carga.

6.1.8. OTROS EFECTOS.

La descripción del proceso de ionización muestra que hay transferencia de carga en la región donde se produce la ionización. Esto significa que hay circulación de corriente en esta región y cierta potencia disipada. Como la corriente circula en un espacio restringido, la densidad de corriente local es extremadamente alta, lo que produce en la región un intenso calor. Esto provoca un fuerte incremento de presión en la cavidad, este efecto puede ser comparado con el de una explosión en miniatura. Así el material que rodea esta zona es comprimido, generándose una onda de pulsos sónica y ultrasónica que se propaga a través del medio.

6.2. DESCARGAS PARCIALES EN MÁQUINAS ROTATORIAS.

En los procesos industriales, los generadores cumplen un rol muy importante y están diseñados para una larga vida útil, la que a su vez depende en gran medida de la condición del aislante de éstos. Surge así la necesidad de ejercer un control de la calidad de los aislantes de los generadores usados en procesos industriales.

Los materiales empleados como aislantes o dieléctricos quedan sometidos a diversos tipos de sollicitaciones, aún en condiciones normales de operación, estas sollicitaciones dan origen a un lento deterioro de los materiales, lo que se conoce como “envejecimiento”. La velocidad de envejecimiento de los materiales aislantes varía según las exigencias de trabajo (temperatura, humedad, sobrevoltaje, descargas parciales, etc.).

6.2.1. INFLUENCIA DEL AISLAMIENTO EN LA EFICIENCIA DE LAS MÁQUINAS ROTATORIAS.

En general, la eficiencia del generador en lo que respecta a la conversión de energía mecánica a eléctrica se incrementa en la medida que el espesor del aislamiento disminuye.

En las bobinas de estator, el acoplamiento entre la corriente en las bobinas y el campo magnético resulta mayor si el espesor del aislamiento alrededor de los conductores se reduce a niveles cercanos a cero. Si se da esta última situación todo el flujo magnético creado a partir de la corriente en las bobinas del estator se enlazaría a través del núcleo con el rotor.

Si se tiene un aislamiento de espesor mayor, algún porcentaje del flujo derivado de los conductores de las bobinas de estator no se acopla hacia el núcleo por lo que será necesaria una mayor corriente en el estator para obtener una misma proporción de flujo magnético hacia el rotor.

Entonces si se incrementa el espesor del aislamiento se tendrá como resultado mayores flujos de fuga, la utilización necesaria de más hierro y finalmente una menor eficiencia. El incremento del espesor del aislamiento tiene otro tipo de influencia sobre la eficiencia, con aislamiento de mayor espesor la impedancia térmica entre conductores y el núcleo de hierro se incrementa, entonces los conductores que forman parte del bobinado de la máquina operan a mayor temperatura, trayendo como consecuencia mayores pérdidas y por ende menor eficiencia.

En estudios realizados sobre influencia del aislamiento en la vida útil del generador se ha concluido que el 37% de las fallas en máquinas rotatorias están determinadas por la ruptura del aislamiento del estator, las cuales terminan en cortocircuitos. De acuerdo a esto, los problemas en los bobinados constituye el factor más determinante en la vida del generador.

Otras investigaciones muestran que el origen de las fallas en los bobinados de las maquinas rotatorias es el deterioro gradual del aislamiento debido a esfuerzos térmicos, eléctricos, mecánicos y ambientales.

6.2.2. MECANISMOS DE FALLA EN GENERADORES.

El aislamiento de máquinas eléctricas, deben soportar simultáneamente esfuerzos: térmicos, mecánicos, eléctricos y ambientales.

6.2.2.1. ESFUERZOS TÉRMICOS.

La temperatura de operación de las bobinas de estator puede eventualmente ser superior a las normales por una o más de las siguientes razones:

- Flujo de aire de ventilación a alta temperatura por mal mantenimiento.
- Sobrecarga de la máquina. La temperatura del cobre aumenta con el cuadrado de la corriente de sobrecarga.
- Partidas consecutivas del generador sin que se haya disipado las sobretemperaturas ocasionadas por partidas anteriores.
- Corriente de secuencia negativa en bobinados del estator debido a sistemas de tensiones desbalanceadas entre las tres fases.

6.2.2.2. ESFUERZOS MECÁNICOS.

Los esfuerzos mecánicos se generan en los bobinados del estator de las máquinas rotatorias como consecuencia de fenómenos térmicos o como resultado de flujos de corriente en el campo magnético. En algún momento un polo de rotor pasa sobre la ranura de estator generando fuerza magnética sobre las bobinas del estator que tiende a mover a éstas. La fuerza producida por este fenómeno electromagnético es proporcional al cuadrado de la corriente que fluye hacia los conductores. Lo anterior puede llevar a distintos mecanismos de falla del aislamiento tales como:

- Grietas en el aislamiento a tierra causando eventualmente fallas a tierra.
- Desgaste del aislamiento del conductor causando fallas conductor-conductor a vuelta-vuelta.

- Desgaste del aislamiento a tierra resultando en pérdidas de cubiertas semiconductoras, trayendo como consecuencia aparición de descargas parciales.

Al momento de la partida de los generadores se inducen grandes esfuerzos radiales, axiales y circunferenciales en las terminaciones de las bobinas a raíz de la corriente de inrush que aparece cada vez que la máquina parte. Aquí resulta crítica la presencia de elementos sujetadores de bobinas para prevenir el excesivo movimiento.

6.2.2.3. ESFUERZOS ELÉCTRICOS.

En general los esfuerzos eléctricos a los que se puede ver sometido el aislamiento de generadores pueden desarrollarse a frecuencias nominales o a alta frecuencia. Los mecanismos de falla a frecuencia nominal son las descargas parciales ocasionadas por cavidades en el aislamiento estática que van deteriorando continuamente al aislamiento, y la combinación de esfuerzos eléctricos alternos y contaminación que pueden ocasionar tracking eléctrico o trayectos conductores sobre la superficie del aislamiento en las terminaciones de las bobinas. Estos esfuerzos eléctricos pueden perforar al aislamiento entre vueltas provocando alta circulación de corriente que eventualmente puede quemar el aislamiento a tierra. La rigidez dieléctrica del aislamiento entre vueltas puede empeorar o sufrir degradación debido a otros factores tales como:

- Uso de aislamiento en los conductores magnéticos con baja resistencia a esfuerzos eléctricos y descargas parciales.
- Debilitamiento del aislamiento entre vueltas derivado de procesos de fabricación como el inherente a la fabricación de bobinas.
- Agentes, eléctricos o mecánicos que pueden reducir la rigidez dieléctrica del aislamiento entre vueltas.

6.2.2.4. ESFUERZOS RELATIVOS AL ENTORNO.

El ambiente en que el generador opera puede tener la mayor influencia en la vida útil del bobinado del estator. Si la terminación de las bobinas está sometida a alta contaminación como humedad, polvo, aceite, es muy probable la aparición de tracking eléctrico y picaduras en el aislamiento.

De igual manera algunas máquinas rotatorias que operan en ciertos ambientes industriales cuyo entorno contiene ácidos, álcalis o aceite, que pueden atacar químicamente los componentes del aislamiento reduciendo la rigidez dieléctrica de éste.

6.2.3. DETECCIÓN DE DESCARGAS PARCIALES.

Las descargas parciales (DP's) constituyen descargas que aparecen con la aplicación de alta tensión en cavidades del aislamiento, sobre la superficie de las bobinas cercanas al estator o en las regiones próximas a las terminaciones de los bobinados.

6.2.3.1 ENSAYOS PARA DETECTAR DP's.

Los ensayos de DP's para verificar el estado del aislamiento de una máquina rotatoria deben satisfacer las siguientes condiciones:

- No debe aumentar la probabilidad de falla.
- La prueba no debe dar falsas indicaciones de deterioro.
- No riesgosos. Tanto para el equipo, al imponer eventualmente una sollicitación excesiva, como para el personal que está realizando la operación.
- El costo debe ser apreciablemente menor que el costo de una falla o salida de servicio forzada.
- La prueba debe ser parte de una estrategia de mantenimiento.

6.2.3.2 DETECCIÓN OFF-LINE DE DP's.

En esta prueba los bobinados son energizados con el voltaje de operación normal de línea a tierra con una fuente de alimentación externa y empleando un detector de descargas parciales para medir actividad de DP's en los bobinados.

Cada chispa asociada a la descarga es un pulso rápido de corriente que avanza a través de los bobinados del estator. La descarga de mayor amplitud está relacionada con el mayor pulso de corriente (acompañado por pulsos de tensión) que alcanza los terminales de las bobinas del estator.

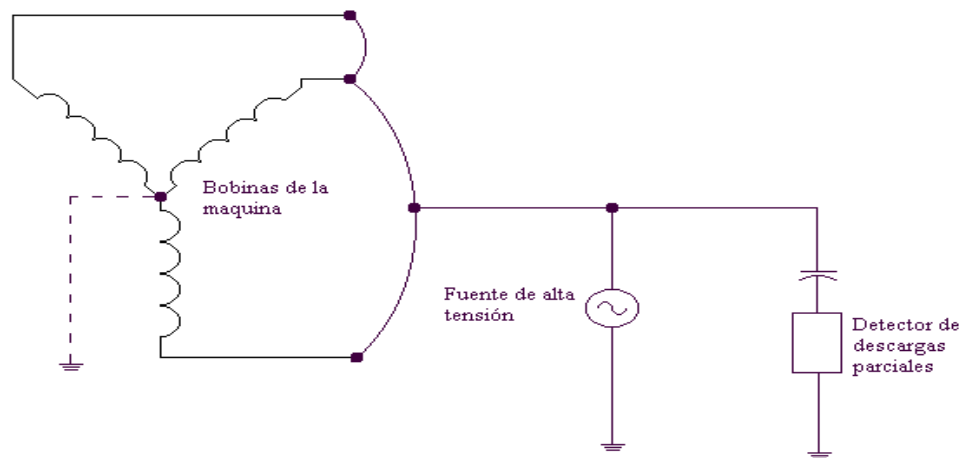


Figura 7. Esquema básico asociado a la medición OFF-LINE de DP's.

Un capacitor de alto voltaje bloquea la tensión de frecuencia industrial mientras permite que las señales o pulsos de alta frecuencia lleguen al detector de descargas parciales. Estos pulsos, luego de ser filtrados, pueden ser visualizados en un osciloscopio, aunque las magnitudes de las señales que se pueden observar a través de la pantalla del osciloscopio vienen en milivolts.

El procedimiento de ensayo más común consiste en incrementar gradualmente la tensión alterna de prueba hasta que los pulsos asociados a descargas parciales sean visibles en el osciloscopio o puedan ser registrados en un instrumento electrónico. El voltaje para el cual comienzan las descargas parciales se conoce como tensión de inicio de descarga (DIV).

Cuando se reduce el voltaje de prueba debe determinarse la tensión de extinción de descarga (DEV). El DIV es por lo general mayor que el DEV.

No existe consenso sobre los niveles aceptables para las magnitudes de DP's. Los bobinados de las máquinas rotatorias son virtualmente los únicos equipos de alta tensión para los cuales los límites de descargas parciales no están claramente establecidos.

Entre los inconvenientes de detección OFF-LINE de descargas parciales se tiene:

En este ensayo, el bobinado completo incluyendo el punto neutro, están completamente energizados, por lo que muchos sitios de DP's normales no activos en servicio pueden contribuir a la magnitud de los pulsos observados en el display. Lo anterior puede inducir a errores de interpretación por parte del operador, que eventualmente puede asumir aislamiento en deterioro cuando en realidad no es así.

Un problema adicional radica en el hecho que algunos sitios de DP's se distribuyen de manera errática cuando la máquina no está operando, situación que puede hacer de este ensayo una prueba inconsistente. Por ejemplo; las DP's en ranuras, debido a bobinas sueltas dentro de éstas, pueden no manifestarse si no hay vibración mecánica.

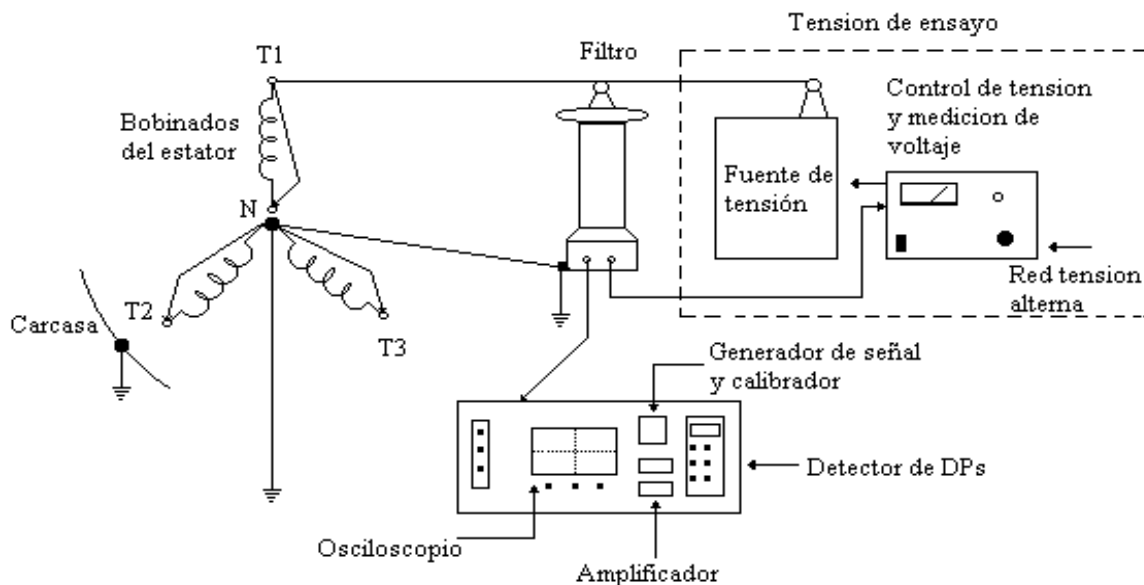


Figura 8. Configuración instrumental del ensayo de detección OFF-LINE de DP's.

6.2.3.3 DETECCIÓN ON-LINE DE DP's.

Este ensayo es similar al OFF-LINE, con la diferencia que no requiere fuente de voltaje externa para energizar los bobinados, pues el estator del generador se conecta a la red y se le hace funcionar normalmente. La actividad de descargas parciales puede ser medida por diferentes tipos de detectores.

Una vez que las señales de ruido son separadas, instrumentos especiales son empleados para registrar las descargas parciales en bobinas del estator. Estos instrumentos sólo se justifican en máquinas grandes de 6kV o más, donde las fallas en bobinados traen consigo grandes costos.

La interpretación de las mediciones es prácticamente la misma para el ensayo OFF-LINE. En particular se examinan las tendencias de las magnitudes de las descargas parciales en un período de tiempo. Si estas magnitudes aumentan al doble o más cada seis meses, sé esta en presencia de bobinados en rápido deterioro. Adicionalmente resulta conveniente comparar las bases de datos de un estator en particular con la información de varios estatores similares para determinar si el primero posee mediana o alta actividad de descargas parciales.

Un problema asociado a la detección ON-LINE que no está presente en las pruebas OFF-LINE es la alta interferencia eléctrica del sistema de potencia, particularmente debido a la operación de instrumentos de potencia, malas conexiones y efectos corona en líneas aledañas. Estas fuentes de ruido pueden ser confundidas con descargas parciales de los bobinados de estator y pueden traer como consecuencia diagnósticos incorrectos. A partir de los últimos 20 años se han desarrollado varios métodos para eliminar el problema del ruido. Algunas de estas técnicas emplean dos sensores por fase en una configuración tipo puente para balancear los niveles de ruido. Como es el caso de los generadores instalados en el P.H. El Cajón.

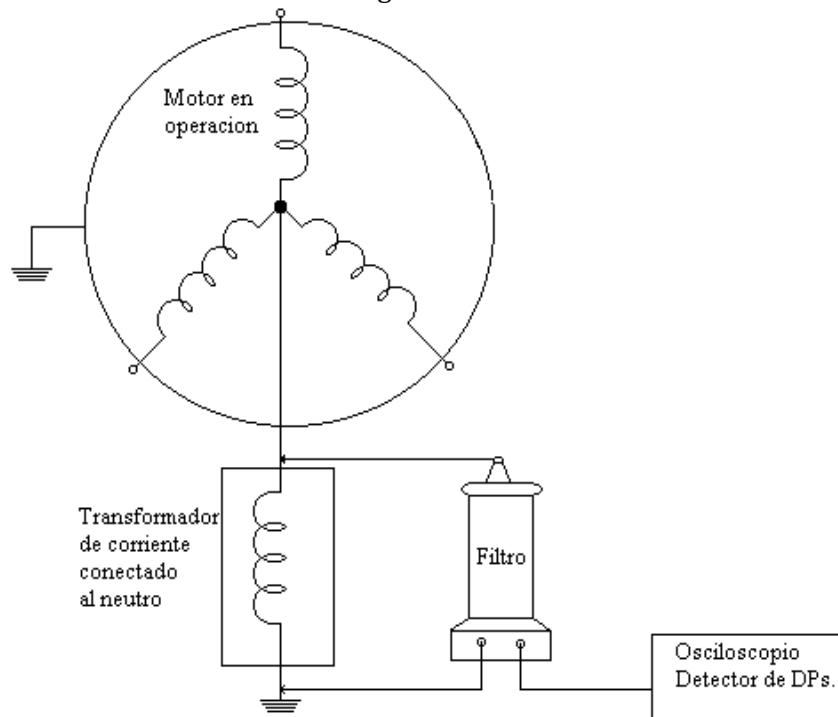


Figura 9. Disposición instrumental para la medición ON-LINE.

6.2.4. ESTADO DEL ESTUDIO DE LAS DP's EN MÁQUINAS ROTATORIAS.

La más común aproximación automatizada se basa en el reconocimiento de patrones. La mayoría de las aproximaciones se basa en experimentos de laboratorio o en señales adquiridas durante pruebas OFF-LINE de aparatos industriales.

La prueba ON-LINE es ampliamente preferible, ya que en la actualidad existen sistemas de monitoreo de DP's. La tendencia de las variadas características y parámetros de distribución deben ser adquiridas automáticamente y evaluados tomando en cuenta el estado de la máquina (temperatura, carga, etc.) al momento de las mediciones.

Hoy se puede constatar la aplicabilidad de modernas técnicas digitales para procesamiento de señales utilizadas para reconocer pulsos de DP's entre ruido. La tradicional técnica de supresión de ruido incluye salas aisladas, filtros en las entradas de líneas de poder, entradas de transformadores aisladas y filtros de atenuación para el ruido de alto voltaje.

El ruido puede definirse como una señal no deseada que no está relacionada con la señal de entrada. Las fuentes de ruido a menudo ensucian las señales de DP's de interés. Cuando tal señal ruidosa es procesada, el nivel de ruido sobrepuesto sobre la señal de DP's supera la capacidad de procesamiento electrónico, lo que causa una serie de peaks en ubicaciones incorrectas.

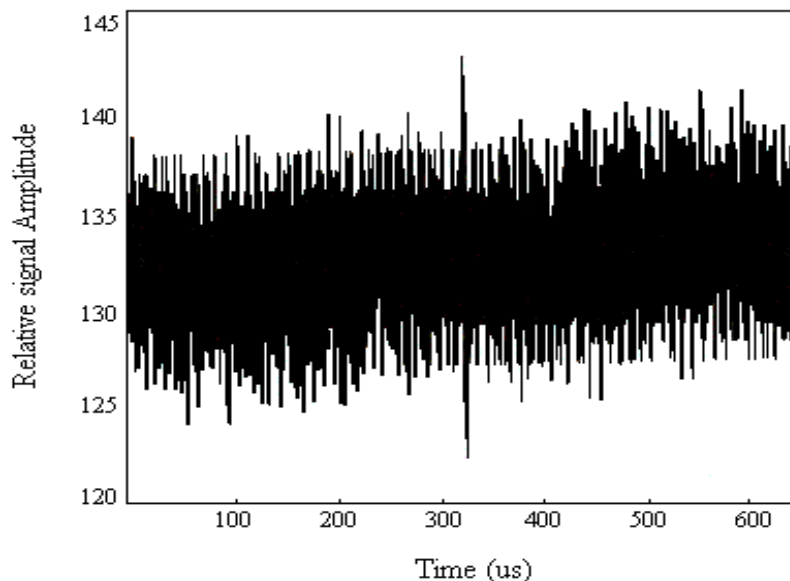


Figura 10. Medición de DP's ON-LINE.

La figura 10 muestra una señal real de DP's grabada desde una fase de una máquina rotatoria de 33 kV ON-LINE.

Como se puede ver el ruido oscurece alguna señal de DP's que pudiera estar presente en la lectura. La habilidad para separar la señal del ruido depende de que cuán bien se conozca ésta, tal conocimiento podría incluir ancho de banda, forma de onda característica, etc.

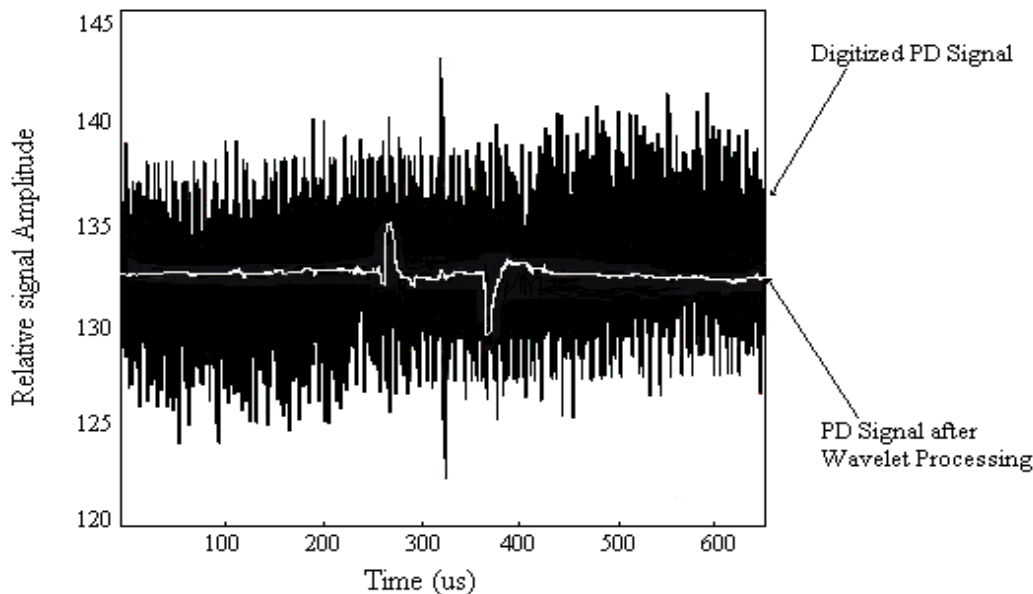


Figura 11. Pulso de ruido y DP's.

Señal de ruido original y señal producida por descargas parciales obtenida después del proceso de limpieza de la señal.

Cabe señalar que no hay nada normalizado en cuanto a mediciones de descargas en máquinas rotatorias, aún se están haciendo estudios, donde se consideran cada vez mas parámetros que influyen en el comportamiento del sistema de aislamiento de la máquina.

6.3. INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE ANÁLISIS DE DESCARGAS PARCIALES

En la última década se han desarrollado aplicaciones para observar las DP's en línea en generadores. En este caso el ruido ambiente se debe en general a corona, descargas o malos contactos eléctricos externos a la máquina. Para discriminar entre DP's internas del estator y el ruido proveniente del exterior se sugiere utilizar 6 sensores (2 por cada fase).

Estos sensores son condensadores de 80 pF, 15 kV, llamado "acopladores de línea". Conectados a tierra bloquean la frecuencia industrial, pero detectan como un breve pulso las DP's. Estos pulsos son detectados por transformadores de corriente de radio frecuencia instalados en el cable que conecta el acoplador a tierra.

Se instalan dos acopladores por fase, separados al menos por 2 m de barra o de cable. El ruido proveniente del exterior se discrimina de las DP's del estator por la dirección en que viaja el pulso. Si el pulso se detecta primero en N y luego en F, es una descarga del estator y contabiliza. Si el pulso se detecta primero en F y luego en N, es ruido de exterior y se descarta.

La lectura, discriminación y registro de las descargas parciales se puede hacer con un equipo apoyado por un computador dedicado llamado PDA. Los acopladores N se instalan en la caja de terminales y los acopladores F, por ejemplo en los terminales del interruptor.

La experiencia ha mostrado que si los cables de alimentación de un generador son suficientemente largos (100 m o más) y libres de descargas, el ruido proveniente del exterior se atenuaría, haciendo innecesario usar en cada fase uno de los sensores, el más alejado, el F.

El análisis de Descargas Parciales (DP's) puede utilizarse eficazmente para evaluar en línea el estado del aislamiento del devanado estatórico. El Sistema PDA COPA incorpora los 20 años de experiencia de ADWEL en el diseño y utilización de instrumentación para el análisis de descargas parciales.

El sistema PDA COPA monitorea y registra los datos de DP's de forma continua, junto con los parámetros de funcionamiento, para analizar la tendencia y comparar las DP's medidas con otras mediciones en las mismas condiciones. Los datos de DP's resultantes del análisis muestran claramente los síntomas iniciales del deterioro del aislamiento.

La completa gama de herramientas para análisis de DP's, ayuda a descubrir la causa original de los problemas que están en proceso de desarrollo en el sistema de aislamiento. Una vez que se conozca el problema, debe ser solucionado, se podrá implementar el mejor método de mantenimiento para evitar fallas catastróficas, prolongar la vida útil del equipo y gestionar de forma eficiente los recursos disponibles.

El sistema PDA COPA monitorea y registra automáticamente los parámetros de DP's vinculados a las condiciones de funcionamiento de la unidad generadora. La información recogida es eficientemente gestionada por el sistema y elimina la necesidad de buscar y relacionar manualmente los datos referidos a una condición específica de la máquina. Esta poderosa característica ahorra tiempo y aumenta la eficacia de los resultados de sus análisis y permite obtener conclusiones más fácilmente.

El sistema COPA brinda:

- La funcionalidad del analizador de DP's, ampliamente aceptado por la industria, caracterizado por su circuitería digital para rechazo del ruido
- Un software flexible, poderoso y fácil de usar, que presenta los datos en un formato muy comprensible y con la máxima resolución disponible en la actualidad
- Tres etapas de funcionamiento: el sistema gestiona simultáneamente niveles de monitoreo continuo digitales y analógicos con alarmas digitales y analógicas. El sistema PDA COPA permite que el SCAAD (Sistema de Control Automático y Adquisición de Datos) registre la actividad de DP's de cada máquina, para cada fase y de forma continua, lo cual da por resultado la implementación de una confiable y totalmente integrada solución para el monitoreo de la condición de toda la central hidroeléctrica.

El monitoreo continuo del aislamiento del estator no es un lujo. Es un método para superar la complejidad técnica y el factor humano que se encuentran al tratar de implementar un programa de medición periódico y consistente de las descargas parciales. El monitoreo continuo agiliza la adquisición de datos y el proceso de análisis. Además, ahorra tiempo y proporciona un amplio y organizado conjunto de informaciones que permite sacar conclusiones inequívocas y tomar decisiones con confianza.

La descarga parcial está representada por pulsos de alta frecuencia del orden de algunos mV; por lo tanto, la mejor forma de detectarlos es por medio de acopladores capacitivos instalados directamente en los devanados del generador o en los terminales de alta tensión. Los cables de los acopladores están conectados a la caja de terminales. La descarga parcial es un micro evento que ocurre en una máquina que funciona con alta tensión. Sólo puede ser capturada mediante un dispositivo de medición sofisticado que rechace de forma eficaz el ruido del entorno. Como vínculo de red se utilizó un cable de fibra óptica.

La PC, proporciona un sistema de monitoreo de funcionamiento simultáneo multicapa. La PC del control central registra los datos, ejecuta el software de análisis de DP's y exporta los datos para que puedan ser utilizados en otras aplicaciones.

Para lograr una evaluación precisa, los niveles de DP's deben estar relacionados con los parámetros de funcionamiento del generador:

- Carga (activa y reactiva)
- Temperatura del estator
- Humedad o presión

Estos parámetros son provistos por el SCAAD o por el sistema de control distribuido (DCS) de la planta a la ADAU (Unidad de Adquisición de Datos Analógicos). La conexión al SCAAD. La ADAU admite señales de 4 a 20 mA, por lo cual no es necesario utilizar sensores dedicados ni software especial. La ADAU se instala en la sala de control, por lo cual el costo del cableado es mínimo.

El sistema COPA brinda los siguientes beneficios:

- Monitorea las descargas parciales de generadores cuyas condiciones de funcionamiento son cambiantes (de gran importancia en centrales que funcionan únicamente cuando existe una demanda alta de energía).
- Elimina los gastos de viaje a plantas distantes para realizar mediciones de DP's
- Proporciona los medios para integrar los datos de DP's con otros parámetros vitales
- Reduce los errores humanos
- Ahorra tiempo y elimina las tareas rutinarias

La ADAU puede indicar los resultados del monitoreo de DP's en varios formatos prácticos:

- Qmax para cada fase como señal de 4 a 20 mA
- Advertencia de DP's para cada fase como contacto seco (NA y NC)
- Indicadores LEDs de alerta de DP's para cada fase

A continuación se muestra un esquema del Sistema de Análisis de Descargas Parciales, así como su ubicación, conexiones y componentes generales.

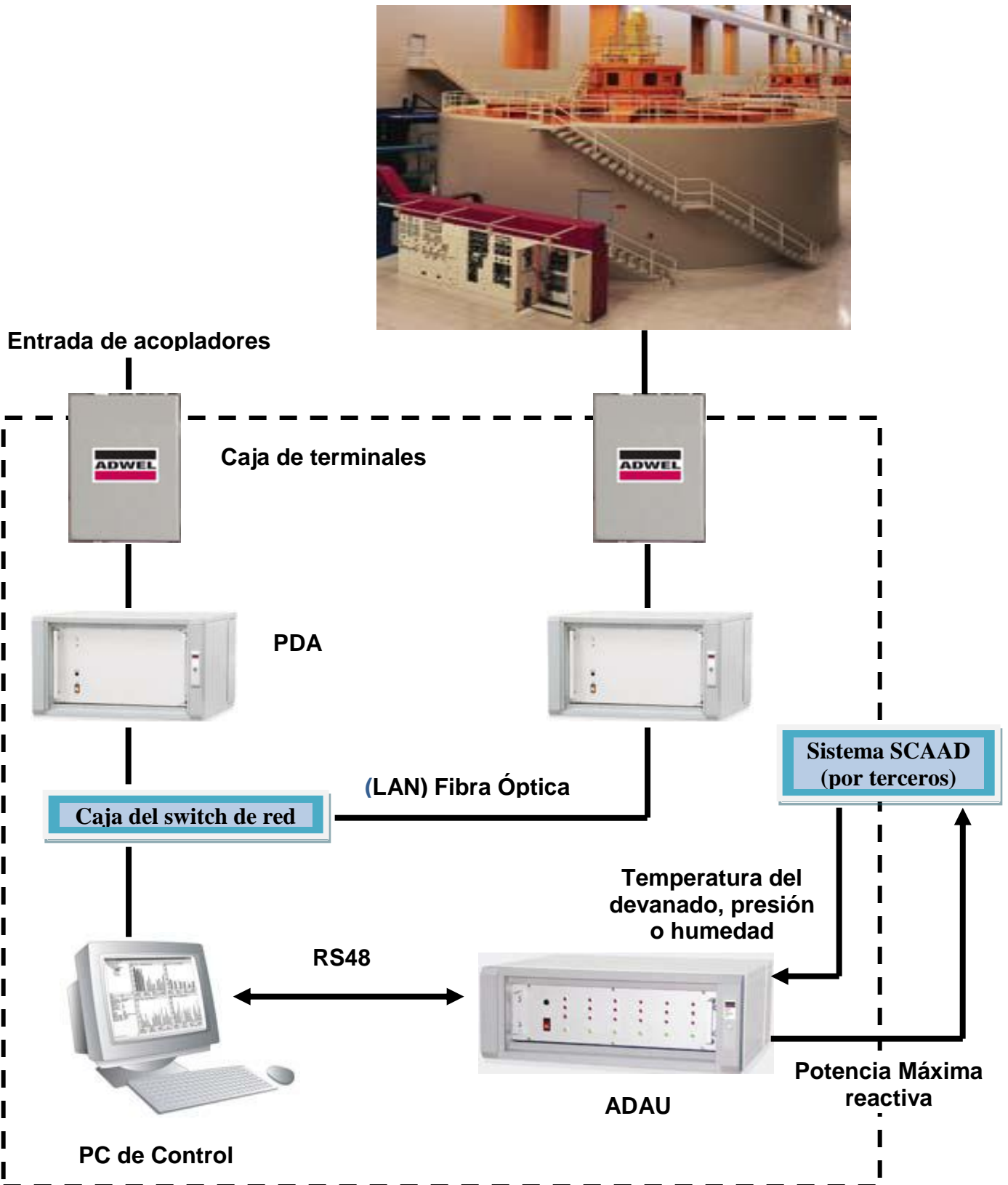


Figura 12. Sistema de Análisis de Descargas Parciales

La robusta filosofía constructiva de su comunicación de nivel analógico, asegura una transmisión confiable de información vital sobre el estado del estator al personal a cargo del funcionamiento de la planta o al ingeniero de mantenimiento.

En los 2 generadores del P. H. “El Cajón”, al disponerse de espacio en el interior, se instalaron 4 acopladores capacitivos por fase, es decir en total fueron 12 acopladores capacitivos por unidad. La medida se efectúa por pares de acopladores para discriminar las DP’s del ruido por el tiempo de llegada de la señal al instrumento.

La instalación de los acopladores capacitivos se realizó durante el montaje del generador de forma permanente.

Los acopladores capacitivos son de tipo epoxi-mica, 80 pF; los cables de señal son coaxiales 50 ohms del tipo RG58/U (MIL-C-17F). Las terminaciones de los cables de señal de los acopladores capacitivos fueron instaladas en la caja terminal instalada externamente al generador PDA.

Para cada unidad generadora fue suministrada una unidad de adquisición de datos de descargas parciales (PDA). La empresa diseñadora, se encargó de suministrar la información de los puntos de conexión en las barras del estator, suministró los materiales y accesorios, así como los planos e información necesarios.

6.3.1. DIRECCIÓN DE LOS PUNTOS DE CONEXIÓN

Las distancias requeridas fueron evaluadas en sitio por un ingeniero de alto voltaje, ya que los detalles de instalación y diseño varían según las máquinas y fueron personalizados en cierta medida para cada máquina. Los parámetros a considerar son principalmente tensión nominal, tipo de máquina (hidrogenerador, turbogenerador, tamaño), sistema de salida (barras, cable) y dimensiones o distancias entre componentes.

6.3.2. MATERIALES Y ACCESORIOS

Para cada unidad se necesitaron los siguientes materiales y accesorios. Ver Tabla 1.

Material	Cantidad	Descripción
1	12 pzs	Solera de cobre de 6x2x1/4 pulgadas
2	12 pzs	Terminales de Cobre para cabo 1/0 AWG
3	12 pzs	Tornillos de Bronce
4	25m	HV Cable de Alta Tensión
5	1 pq	Cinta de la masilla 2571
6	1 pq	Cinta de PIB 2501
7	1 pq	Cinta de silicón
8	1 pq	Cinta de fibra de vidrio
9	1 l	Esmalte 3Л-9111

Tabla 1. Materiales y Accesorios

6.3.3. CONEXIÓN DE LOS CABLES A LOS ACOPLADORES CAPACITIVOS

El contenido de materiales a utilizar se muestra en la Figura 13, incluyendo un acoplador capacitivo.



Figura 13. Materiales a utilizar con un acoplador capacitivo

A continuación se explica el proceso a seguir de la conexión de un acoplador capacitivo al cable de alto voltaje.

A partir de la exposición de terminales en las barras del estator, se determinó la longitud requerida del cable de alto voltaje, previendo una coca considerable. La base de montaje del acoplador capacitivo, se colocó en una posición conveniente dentro de la caja del generador, fijando cada base con dos tornillos M8. Ver Figura 14.

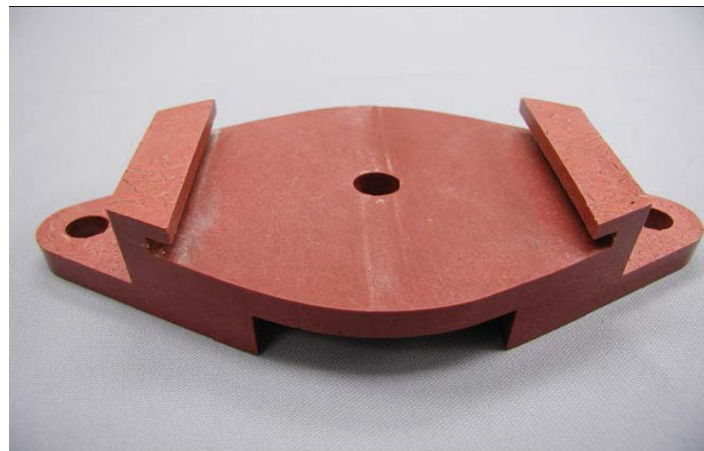


Figura 14. Base de montaje del acoplador capacitivo

En un extremo del cable de alta tensión, se conectó una zapata, misma que se soldó a un tornillo de 3/8". El tornillo se conectó con el extremo superior del acoplador capacitivo y se ajustó con arandela plana y arandela de presión. Se aseguró que cualquier extensión prevista de cable de alta tensión fuese permitida para las longitudes de la conexión. Ver figura 15.



Figura 15. Conexión del cable de alta tensión

Para aislar el punto de la conexión se utilizó cinta de la masilla 2571. Se estiró la cinta hasta la elongación de un 50% y se apretó firmemente alrededor del perno del tornillo. Como muestra la Figura 16.



Figura 16. Uso de la Cinta 2571

Se aisló la conexión usando 4 capas mitad-traslapadas de la cinta de PIB 2501, se estiró la cinta por lo menos a 2/3 de su anchura original. Las cintas cubrieron la tapa y los primeros 19 milímetros (3/4") de la tapa del acoplador capacitivo. Ver Figura 17.



Figura 17. Uso de la cinta de PIB

Se cubrieron las cintas de PIB con dos capas de la cinta de silicón, como se muestra en la Figura 18.



Figura 18. Uso de la cinta de silicón

Al final, dos capas de la cinta de fibra de vidrio se aplicaron en la parte aislada y se barnizaron con esmalte 3Л-9111. Ver Figura 19.



Figura 19. Uso de cinta de fibra de vidrio

La preparación apropiada de la conexión del acoplador capacitivo y el cable coaxial asegurará confiabilidad y facilidad máxima de ensamble. A continuación se describe:

Se retiró el aislamiento externo del cable coaxial y se seleccionaron 25mm del mismo, se ajustaron los filamentos de la trenza seleccionados detrás de una zapata de seguridad para que no resaltaran. Se peló el conductor una longitud de 8mm del centro, como se muestra en la Figura 20.



Figura 20. Preparación del cable coaxial

Se deslizó la parte más grande de la zapata de seguridad detrás del cuerpo del cable coaxial, se desliza unos 40mm de longitud de 6mm. Después se soldó el conductor del centro a la zapata del cable.

Finalmente se ajustó el cable más largo alrededor de la base de la zapata, 80mm del extremo, para asegurar el cable.



Figura 21. Ajuste de Cable coaxial

Se conectó el cable coaxial terminado con la base del acoplador capacitivo usando tonillo de 1", arandela de presión y arandela plana que se fija entre la zapata y la base del acoplador capacitivo.

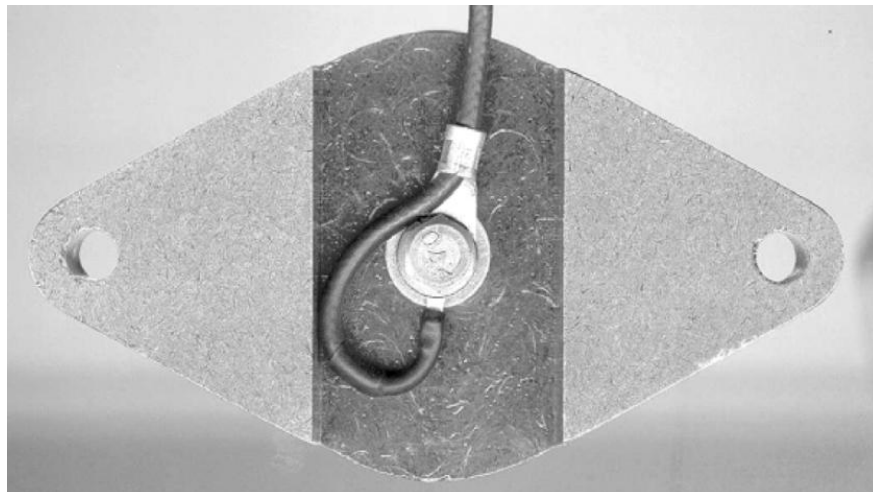


Figura 22. Conexión de cable coaxial

Se ensambló el acoplador capacitivo en la base, se ajustó y se aseguró. Se fija con un tornillo de 1", arandela de presión y se le da un torque de máximo 7Nm. Véase figura 23.



Figura 23. Montaje del acoplador capacitivo

Se instaló el ensamble del acoplador capacitivo con la base (Figura 24) y se fijó en la posición correspondiente dentro del generador, se verificó que existieran las separaciones necesarias de alto voltaje.



Figura 24. Montaje acoplador capacitivo

El cable de tierra (SGA) se conectó a la base del acoplador capacitivo, la longitud del cable coaxial entre la terminal de baja tensión del acoplador capacitivo y la conexión a tierra fue de menos de 40" (1m).



Figura 25. Conexión a tierra SGA

El otro extremo del cable de alto voltaje se conectó a la barra del bus correspondiente en cada fase del estator, del tal forma que la integridad del sistema de alto voltaje fuese flexible.

El cable de alto voltaje fue soldado a la barra del estator, se aplicó cinta de fibra de vidrio para aislarla y se barnizó. Véase Figura 26.



Figura 26. Conexión al bus

6.3.4. CONEXIÓN DEL CABLE DE ALTO VOLTAJE A LA BARRA DEL ESTATOR

Los cables de alta tensión se instalaron de acuerdo la Figura 27.

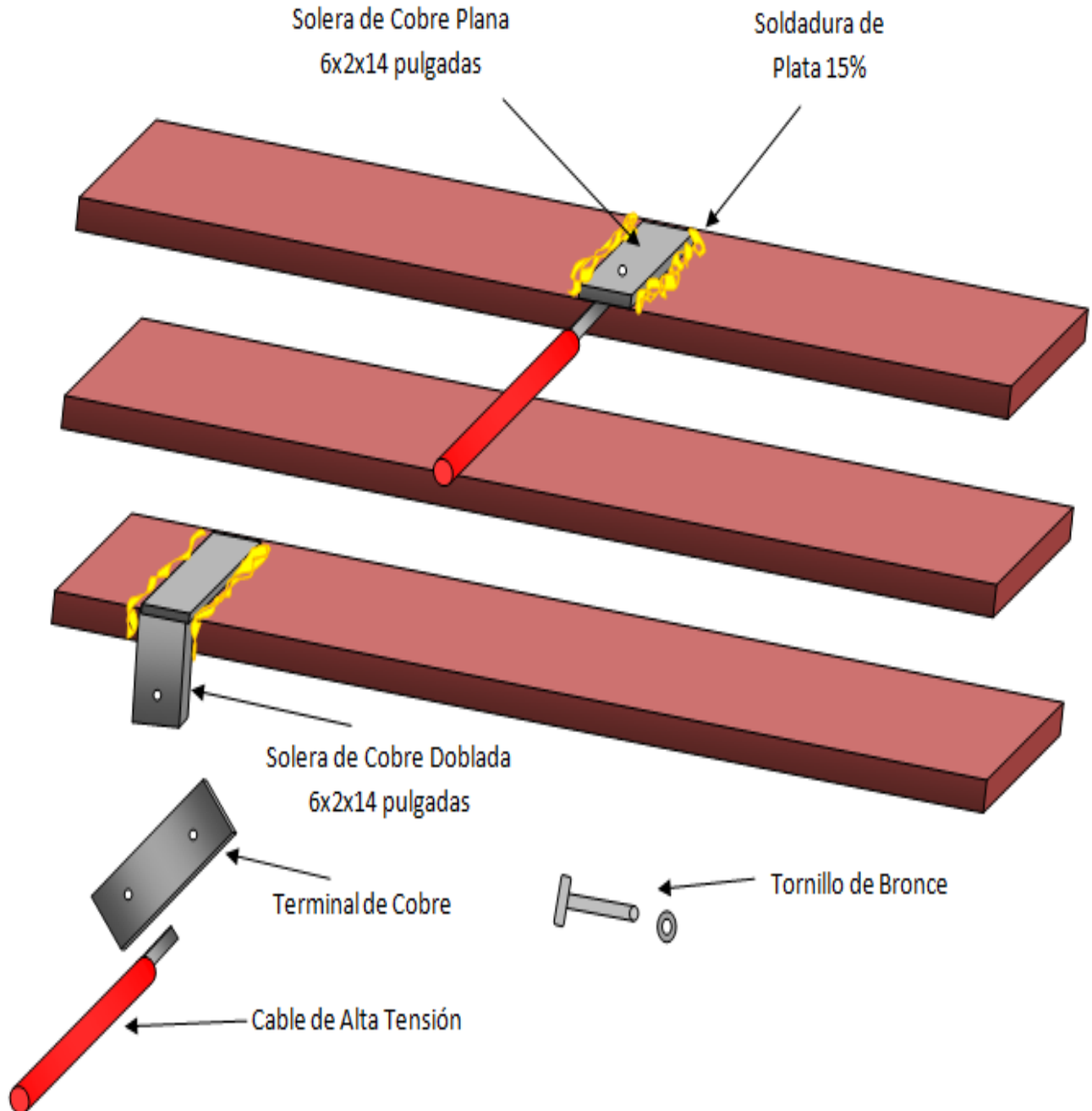


Figura 27. Instalación de los cables de alta tensión

Las soleras de cobre se instalaron como las Figuras 28 y 29.

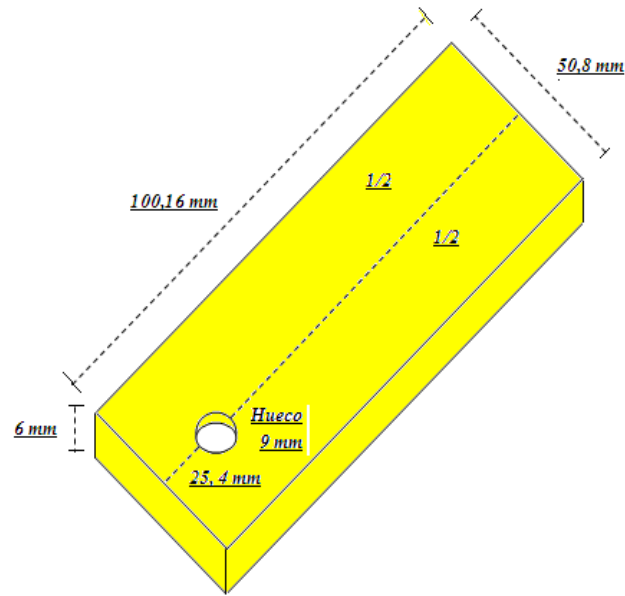


Figura 28. Solera Plana

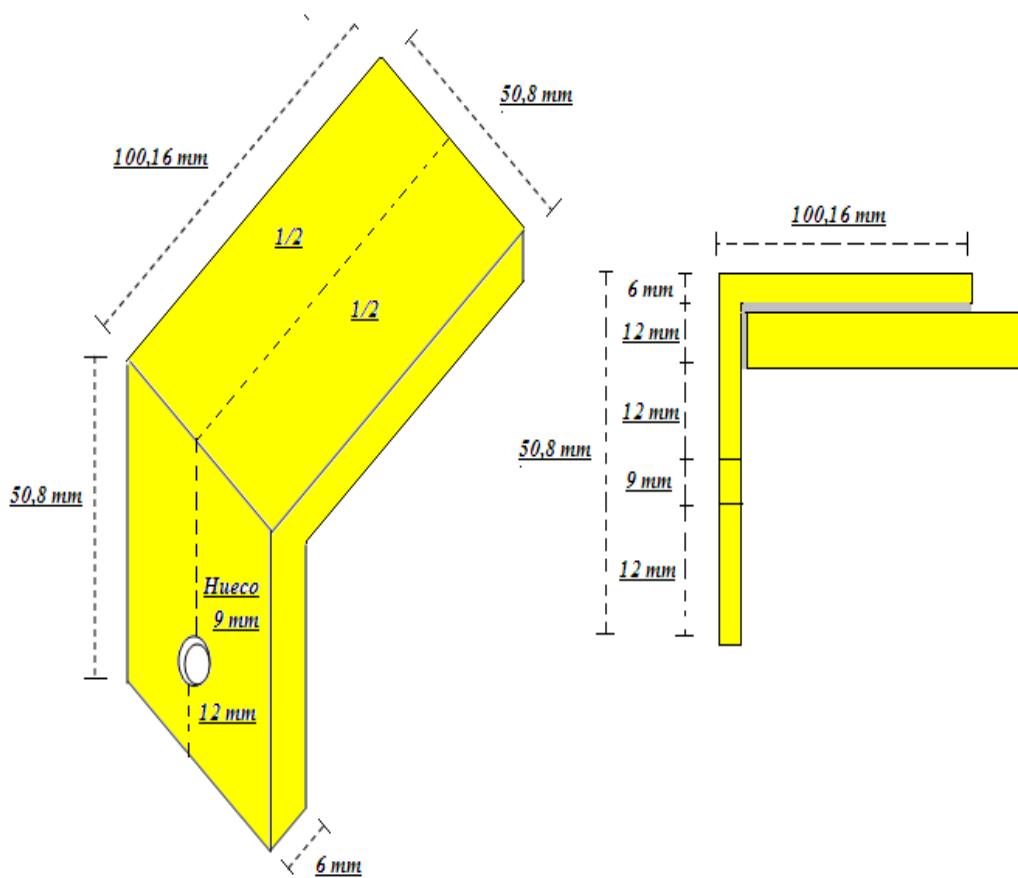


Figura 29. Solera Doblada

6.3.5. AISLAMIENTO Y LA SOLDADURA DE LOS CABLES A LAS BARRAS

La soldadura de las soleras a las barras del estator fue hecha de acuerdo con la tabla abajo. Tabla 2.

Aleación	Norma AWS DIN	Análisis Químico			Alargamiento %	Rango de Fusión °C
		Ag	Cu	P		
Soldadura SP-15	B Cu P-5	15	80	5	>10	643-802

Tabla 2. Condiciones de Aislamiento

El aislamiento del conjunto solera y cable fueron el mismo aislamiento que el aplicado a las barras del estator. El aislamiento avanza en el cable cerca de 30cm. Como se muestra en la Figura 30.



Figura 30. Aislamiento en el cable

Los puntos de soldadura en las barras se realizaron de acuerdo con la información del plano ED H001 PL 573 01 (Figura 31), y se verificó puntualmente que el aislamiento se colocara de acuerdo con este procedimiento.

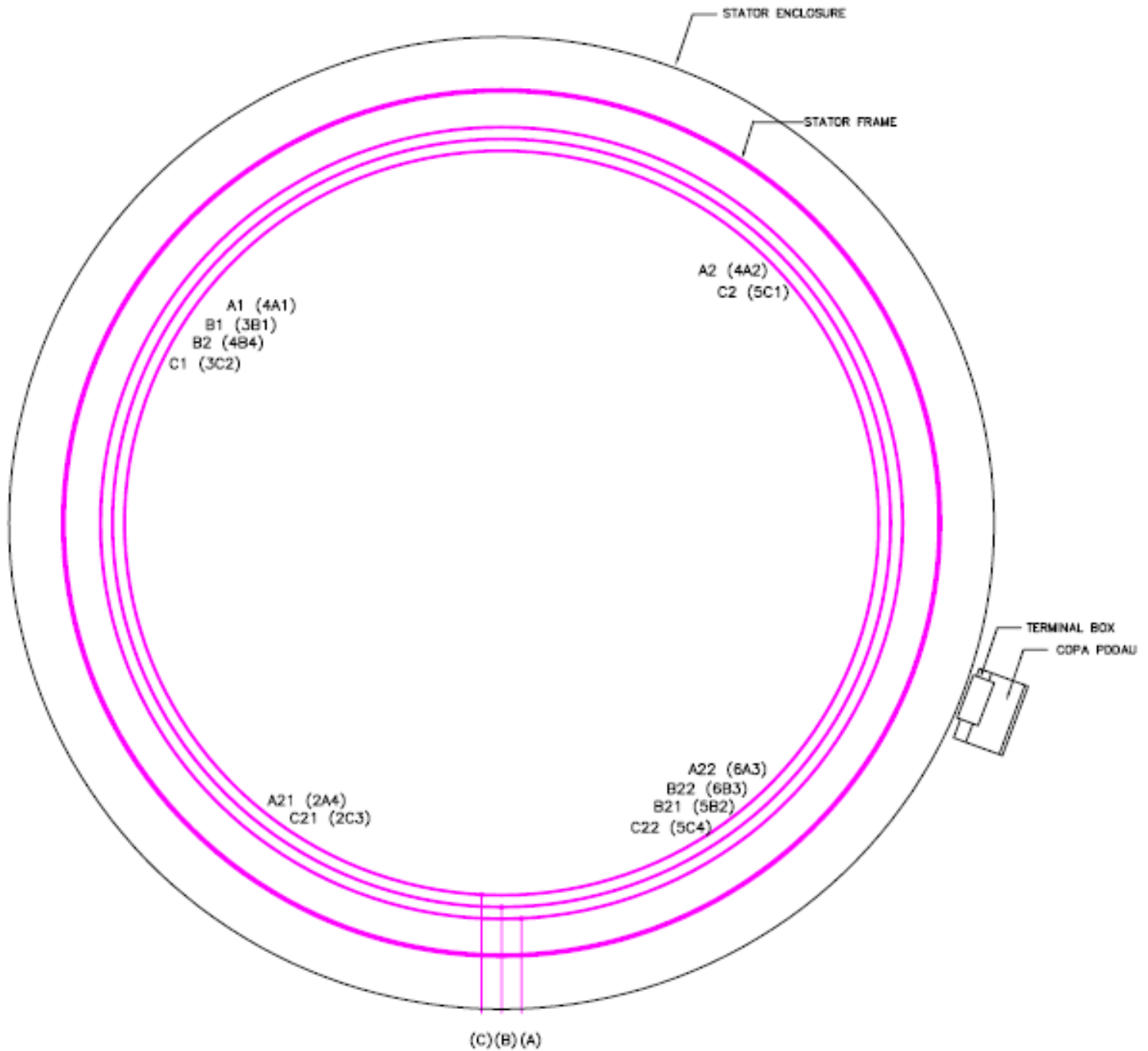


Figura 31. Posición de Puntos de Soldadura en Estator

6.3.6. CAJA DE TERMINALES PDA

Los cables coaxiales fueron colocados desde los acopladores capacitivos a la posición donde se montó la caja de terminales PDA mismos que son trasladados por tubería conduit. Ver Figura 32.

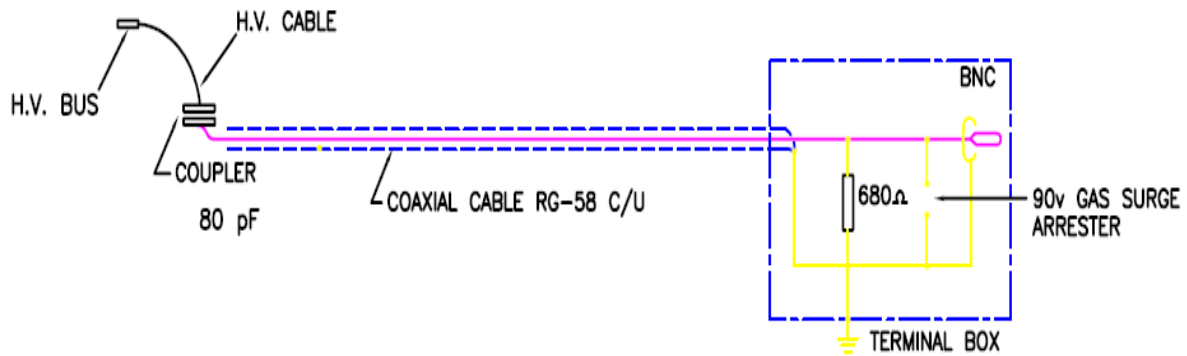


Figura 32. Esquema de Conexión de Cable Coaxial

Se debió tener extremo cuidado en que la pantalla coaxial de la trenza no entrara en contacto con la tierra de la máquina en cualquier parte de su ruta a la caja de terminales. Se aseguró que el cable coaxial estuviese protegido contra cualquier riesgo de corto circuito donde pudiese dañar su aislamiento externo. La única pieza que se debe conectar con la tierra es la cubierta del SGA que tiene aislamiento 50/60Hz. Ver Figura 33.



Figura 33. Caja de Terminales PDA

Antes de terminar se midió el aislamiento de cada cable, entre la pantalla principal y la tierra, para verificar que los cables no hayan sufrido ningún daño durante la instalación.

Después de verificar el funcionamiento correcto de los cables coaxiales, se soldó el otro extremo del cable coaxial al borne correspondiente de BNC en la caja de terminales PDA. Ver Figura 34.



Figura 34. Conector BNC

Se aseguró que el aislamiento del cable coaxial no estuviese en contacto con la resistencia conectada en la parte central de la tarjeta de circuitos impresos. Ver Figura 35.



Figura 35. Tarjeta de circuitos impresos

Se midieron los valores de la resistencia entre el protector y el perno central en los conectores de BNC en la caja de terminales. Los valores fueron aprobatorios.

La caja de terminales PDA se conectó a tierra.

Los cables fueron colocados en tubería en conduit, éstos fueron conectados desde los acopladores capacitivos hasta la caja de terminales fija PDA a la UADP (Unidad de adquisición de datos del Sistema de Análisis de Descargas Parciales) de cada unidad generadora, y de ésta se conectaron a la (Estación de análisis de datos del sistema de Análisis de Descargas Parciales) EADP que se encuentra en la Sala de Control del P. H. El Cajón.

La caja de conexiones PDA proporciona datos de descargas parciales determinados en fase y mide las tres fases a la vez, puede trazar la tendencia de los datos de prueba de descargas parciales en línea para mostrar el avance del deterioro del aislamiento del estator. Los resultados determinados en fase ayudan a identificar la naturaleza y la causa de las señales.

La prueba de Análisis de Descargas Parciales durante la operación de una máquina rotatoria de alta tensión puede detectar serios mecanismos de deterioro del estator tales como descargas en las ranuras, intersticios internos así como cuñas y devanados flojos. Si estos problemas no son detectados, monitoreados y corregidos, pueden ocasionar una falla catastrófica en la máquina.

6.4. PUESTA EN SERVICIO DEL SISTEMA DE DESCARGAS PARCIALES

El Sistema de Análisis de Descargas Parciales instalado, suministra mediciones de señales de pulsos de descargas parciales y permite mediciones para monitorizar frecuentemente en línea o bajo solicitud del operador la condición de las señales de descargas parciales en el estator de los generadores, sin necesidad de una interrupción en el funcionamiento de la máquina.

6.4.1. SOFTWARES

El software es capaz de monitorear las siguientes funciones:

- Monitoreo continuo de las actividades de descargas parciales;
- Registro de las mediciones y actualización de las bases de los datos de tendencia, automáticamente;
- Monitoreo y visualización continua del valor proporcional de DP'S para los valores positivos de Q_{max} de cada acoplador capacitivo;
- Transmisión automática de las mediciones DP'S para la computadora central;
- Registro automático de mediciones de DP'S en intervalos de tiempo definidos;
- Actualización automática de las salidas de corriente proporcionales;
- Visualizar funciones de análisis:
 - a) gráficos de pulsos
 - b) gráficos 3D de valores Q_{max}
 - c) gráficos 3D de valores NQN
 - d) gráficos 3D distribución de DP'S

6.4.2. COMPUTADORA

Computadora central para análisis de descargas parciales con:

- Procesador Intel Pentium
- Windows XP Profesional
- Pantalla LCD 17
- Teclado y Mouse
- Portal de comunicación

6.4.3. COMISIÓN DE PRUEBAS Y REPRESENTANTES

Las pruebas de Puesta en Servicio, debieron ser presenciadas por el personal necesario para su realización, así como los representantes de las partes interesadas.

- a) Coordinador de las Pruebas de Puesta en Servicio
- b) Representante de CFE
- c) Representante de CIISA
- d) Representante de Energ Power
- e) Representante de fabrica (ADWELL)

6.4.4. PLANOS AQC (Así Quedó Construido)

Antes del inicio de las pruebas, se analizó que todos los documentos y planos de trabajo correspondieran a la última emisión.

Se verificó en conjunto con el equipo de instalación, que las modificaciones que se realizaron durante la instalación se registraran en los planos y documentos. Todas las modificaciones debieron anotarse en las copias de trabajo de las pruebas.

Las modificaciones o actualizaciones de los planos AQC, observadas durante las pruebas de campo, se anotaron en el juego de copias de trabajo de la comisión de pruebas.

Después del cierre de las pruebas, una copia de todos los planos y lista de materiales con indicaciones de las alteraciones ejecutadas, fue enviada a CIISA para la elaboración de los planos AQC correspondientes.

6.4.5. VERIFICACIÓN DE LOS EQUIPOS PARA PRUEBAS

Antes de iniciar con las pruebas, se verificó para todos los equipos e instrumentos que se utilizaron, que contaran con certificados de calibración vigente.

6.4.6. INSTRUCCIONES DE SEGURIDAD

El coordinador de pruebas de puesta en servicio, verifica antes de la prueba, junto con el personal de seguridad del sitio, las siguientes instrucciones:

- Delimitación y señalización del área de trabajo.
- Proveer equipos de protección individual
- Verificar la identificación de los equipos utilizados en las pruebas.
- Proveer el acondicionamiento adecuado de los equipos e instrumentos de prueba y herramientas.
- Designación de la función de cada miembro del equipo.
- Verificación de la ubicación de extintores.
- Establecer la sistemática de comunicación entre los participantes del equipo de trabajo, tendiendo como objetivo la perfecta comprensión de mensaje.
- Verificar la inexistencia de la realización de otros trabajos no relacionados con las pruebas, dentro del área delimitada para la prueba.
- Proveer los equipos necesarios a forma de evitar improvisaciones para el acceso a cualquier equipo.
- Proveer las extensiones eléctricas, en caso de ser necesario, con dimensiones adecuadas y sin enmiendas.

6.4.7. DATOS DE LAS PRUEBAS Y REGISTROS DE LA INSPECCIÓN

Los pares de acoples fueron sintonizados utilizando un osciloscopio de canal dual de 200 MHz y un Generador de Pulso. Para que el Analizador de Descarga Parcial rechazara el ruido eléctrico externo, los cables coaxiales que llegan a la caja terminal fueron cortados y balanceados con precisión.

Se inyectaron pulsos con tiempos cortos de levante en las líneas terminales del generador. Los pulsos, una vez que se propagaron en la misma fase, fueron observados en la caja terminal. La diferencia máxima permisible en el tiempo de propagación fue de 5 ns.

Las pruebas de PDA se tomaron bajo 4 condiciones:

- Pruebas sin carga en frío
- Pruebas a carga completa en frío
- Pruebas a carga completa en caliente
- Pruebas sin carga en caliente

Las pruebas de PDA fueron hechas bajo las mismas condiciones de carga, temperatura y voltaje; la temperatura utilizada fue la del medio ambiente, aunque otros factores impidieron duplicar las condiciones, se igualaron las condiciones lo más ajustado posible.

Las pruebas se realizaron la primera vez que utilizó el PDA en cada generador. Esto establecerá una base contra la cual se podrán comparar pruebas de PDA en el futuro.

La fuente de tensión para el PDA de la Unidades Generadoras fue conectada y energizada. Los cables de los sensores del Sistema de Descargas Parciales fueron probados y calibrados en presencia de personal de CFE y aprobados por los mismos.

A continuación se muestra la Tabla 3, que indica la forma en cómo quedaron físicamente instalados los acopladores capacitivos, cable coaxial instalado, cable coaxial de fabricante y entrada al PDA en cada unidad.

UNIDAD 1

Acoplador capacitivo Energ ID	Cable Coaxial Instalado	Cable Coaxial Adwell [15kV]	Entrada PDA
4A1	4	A1	A1
4A2	12	A2	A2
2A4	5	A21	A3
6A3	9	A22	A4
3B1	1	B1	B1
5B2	7	B21	B3
4B4	3	B2	B2
6B3	10	B22	B4
3C2	2	C1	C1
5C1	11	C2	C2
2C3	6	C21	C3
5C4	8	C22	C4

UNIDAD 2

Acoplador capacitivo Energ ID	Cable Coaxial Instalado	Cable Coaxial Adwell [15kV]	Entrada PDA
4A1	2	A1	A1
4A2	12	A2	A2
2A4	5	A21	A3
6A3	8	A22	A4
3B1	3	B1	B1
5B2	0	B21	B3
4B4	1	B2	B2
6B3	10	B22	B4
3C2	4	C1	C1
5C1	11	C2	C2
2C3	6	C21	C3
5C4	7	C22	C4

Tabla 3. Acopladores Capacitivos-PDA

Se evaluó la atenuación y los tiempos de llegada de los impulsos de descargas parciales para conocer si el equipo estaba discriminando correctamente el ruido eléctrico de la descarga parcial.

7. RESULTADOS Y APORTACIONES

Al realizar las primeras calibraciones y observar las dos señales de los pulsos en la pantalla del osciloscopio, podemos asumir que el funcionamiento del Sistema de Análisis de Descargas Parciales es adecuado, por lo tanto la instalación del sistema es correcto. Ver Gráfico 1.

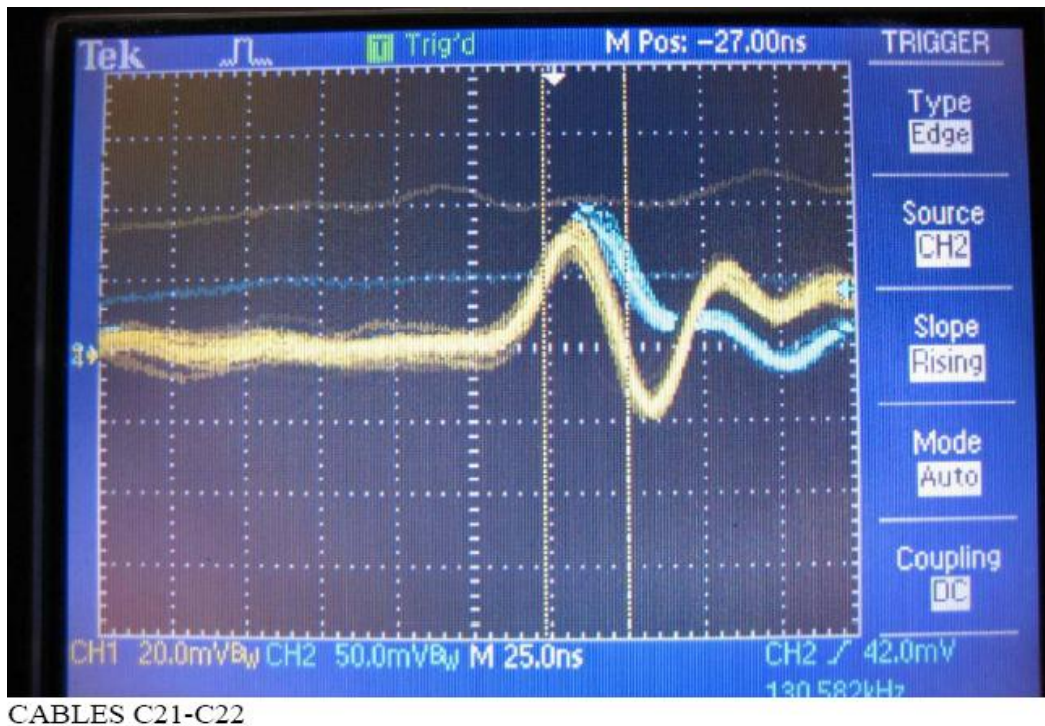


Gráfico 1. Calibración de cableado en Osciloscopio

Con la Unidad Generadora en operación, señales de todos los sensores fueron medidos y arrojaron valores de $200\text{ mV} \pm 10\%$, lo cual es satisfactorio. Después del giro del generador, la primera medición fue hecha. Todos los acopladores capacitivos emitieron datos válidos. Las Pruebas PDA reducen significativamente tiempo de parada y la posibilidad de daño de generador al dar un aviso temprano del de del sistema de aislamiento del estator.

A continuación se muestran los gráficos que representan medidas puntuales de los niveles de descargas parciales de ambas unidades. Teniendo estos gráficos iniciales, no es posible saber si el nivel de descargas parciales se encuentra alto o bajo. Por lo tanto, se deberá hacer un gráfico de tendencia correspondiente de acuerdo a un periodo que sea conveniente para el operador. Con éste gráfico de tendencia se podrá indicar un nivel alto o bajo de descargas parciales.

Los datos están asociados a la central, fecha, hora y operador. Permite la comparación de resultados en distintas fechas o entre ambas unidades para evaluar tendencias. Los gráficos tienen una excelente resolución en tres dimensiones para orientarse según las preferencias del operador.

GRÁFICOS DEL SOFTWARE DEL SISTEMA DE DESCARGAS PARCIALES EN FUNCIONAMIENTO

MONITOREO DE DP'S

Los datos de DP'S ($Q_{m\acute{a}x.}$) y los parámetros de funcionamiento asociados son recogidos y visualizados automáticamente para su comparación. Ver Gráfico 2.

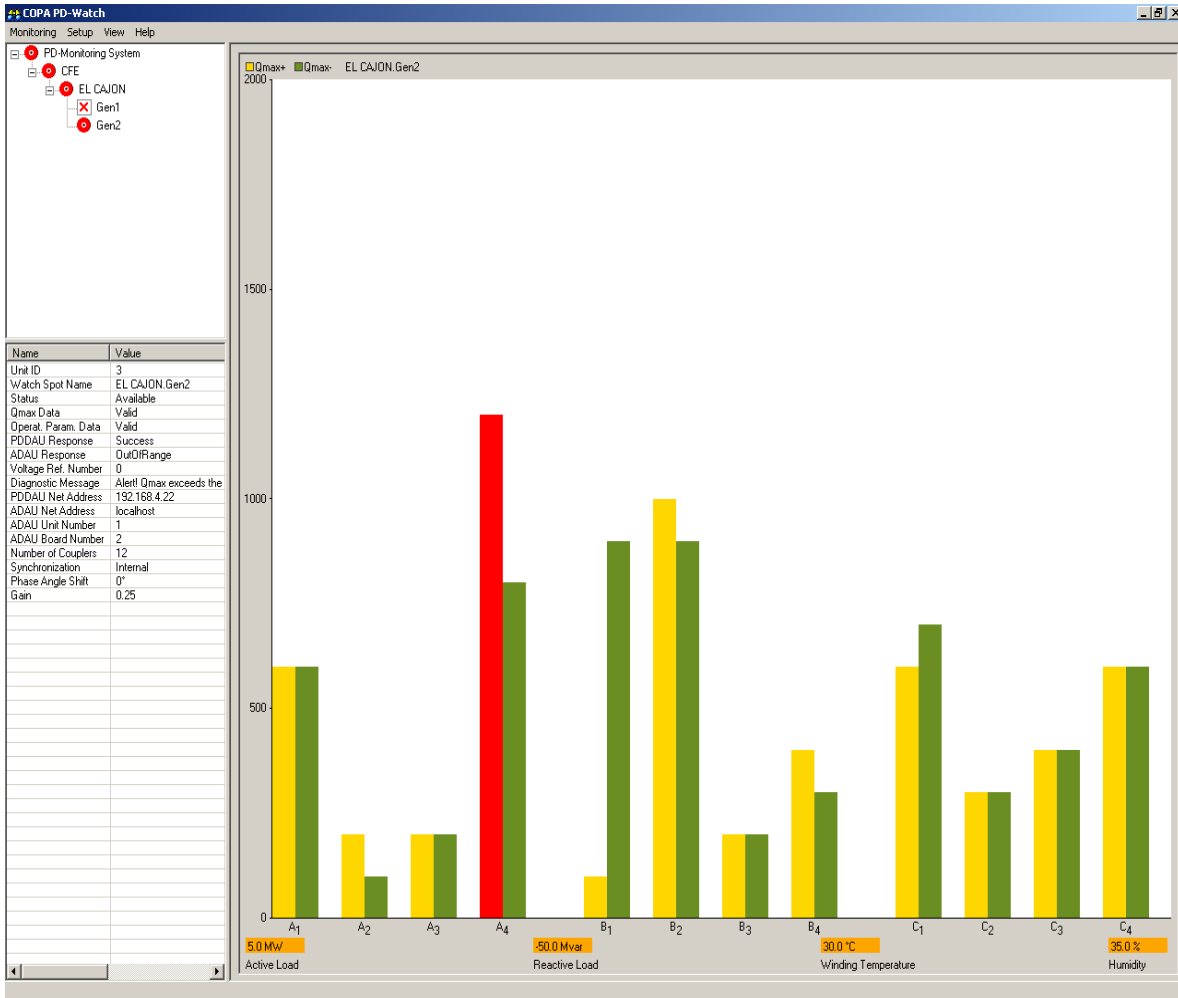


Gráfico 2. Pantalla principal del monitoreo del Programa DP's Watch

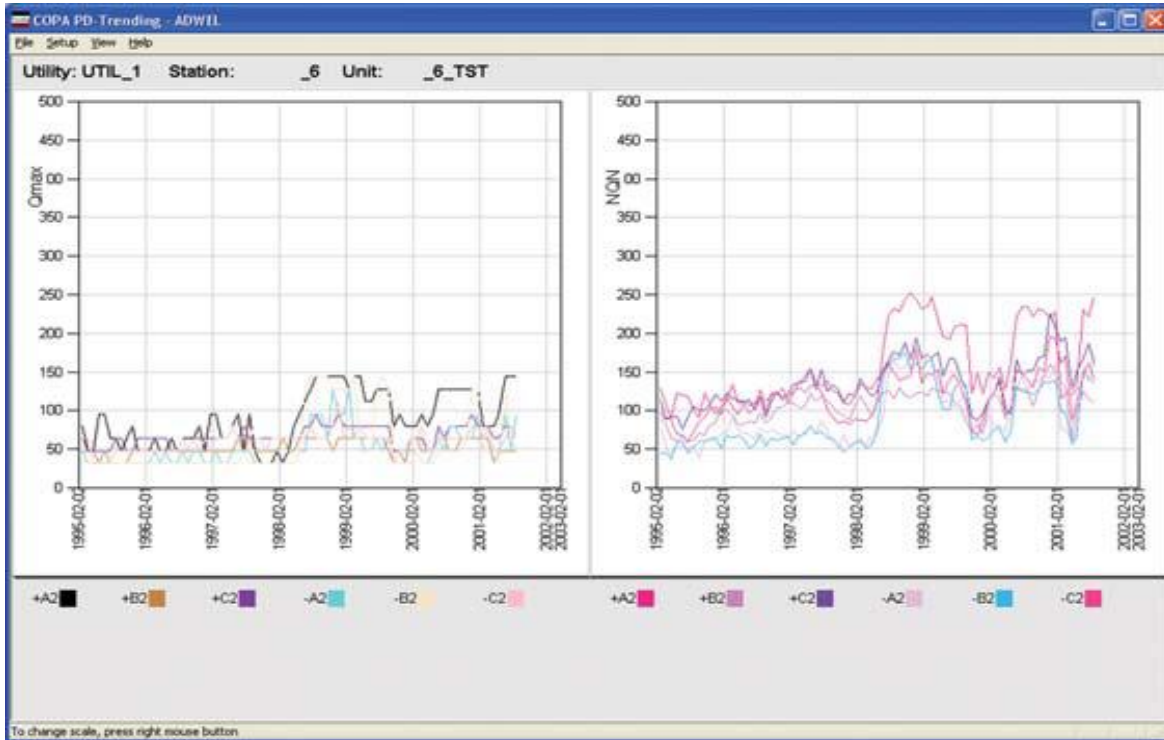


Gráfico 3. Análisis de tendencia de DP's de largo plazo.

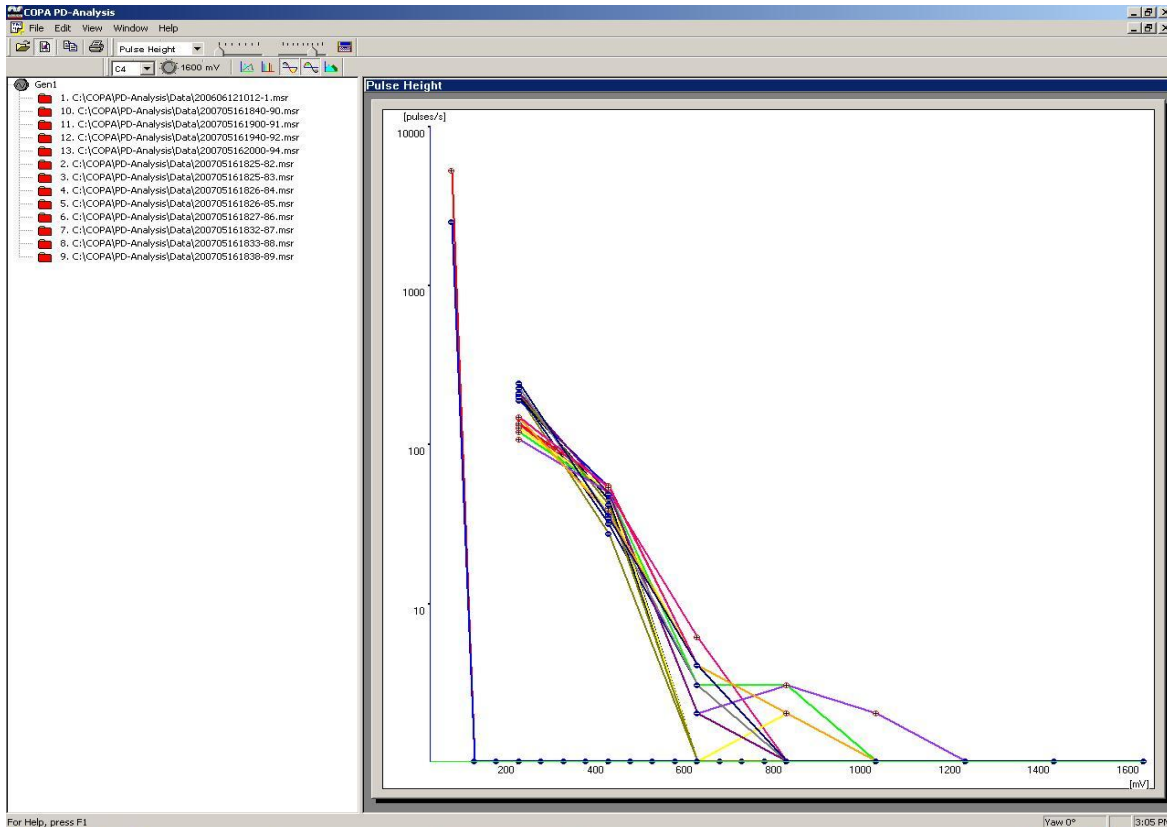


Gráfico 4. Gráfica de la altura del pulso

La tendencia de la actividad de DP'S para NQN y Q_{máx} revela los signos prematuros de deterioro del aislamiento. Muestra las actividades de la DP'S en el tiempo, muestra la tendencia para evaluar de mejor manera las condiciones del estator. Así el personal de mantenimiento, implementa decisiones basadas en las condiciones de la máquina a través de análisis de tendencias. Ver Gráfico 3.

La gráfica de la distribución de los pulsos revela la severidad de la actividad de DP'S y cómo cambia en función del tiempo. Ver Gráfico 4.

Los resultados en fase, indican donde está ocurriendo la descarga parcial (DP'S), en relación al voltaje de la onda senoidal. Esto ayuda a identificar el tipo de actividad de la DP'S, (por ejemplo, descarga en los cabezales de las bobinas), y confirma el rechazo del ruido. Ver Gráfico 5.

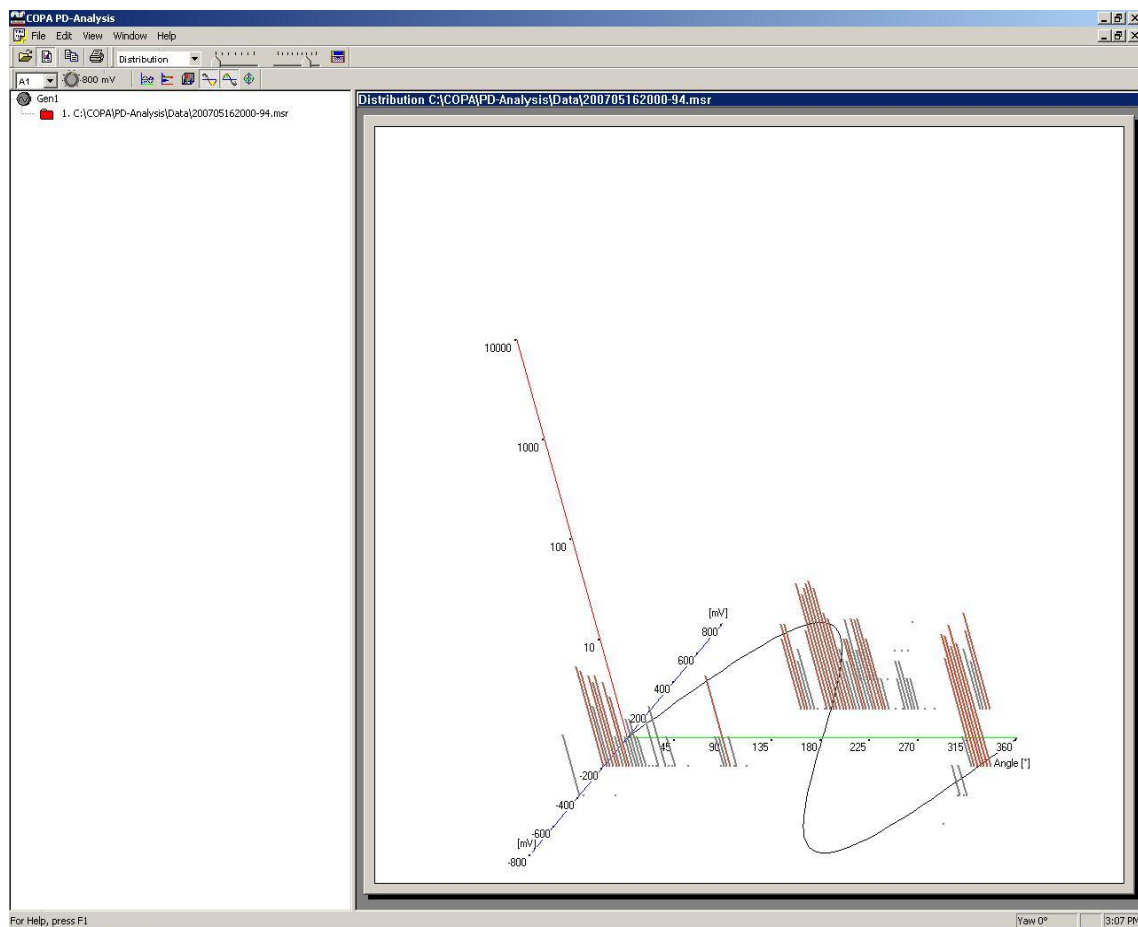


Gráfico 5. Gráfica por fase

Los resultados de los gráficos de descargas parciales están resumidos por algunos parámetros numéricos claves. Estos parámetros (NQN, Q_{max}) se obtienen de las distribuciones de descargas según amplitud y según la fase. Ambos parámetros se calculan para la distribución de máximos y promedios de descargas según la fase.

A8. CONCLUSIONES

Por medio de este informe de actividades, se ha proporcionado una guía técnica del proceso de instalación y puesta en servicio del Sistema de Análisis de Descargas Parciales en línea de los generadores eléctricos del Proyecto Hidroeléctrico “El Cajón”, como parte sustancial del programa de mantenimiento predictivo, el cual debe ser considerado a fin de garantizar el óptimo funcionamiento de los generadores eléctricos de ésta central. Así mismo difundir sus bondades y la experiencia que ha tenido durante su aplicación en nuestro país, con el fin de introducir este aspecto del campo tecnológico en el sector eléctrico y tomarse como antecedente en la realización de futuros trabajos y proyectos que contemplen el tema de Descargas Parciales.

El sistema de análisis de descargas parciales en el Proyecto Hidroeléctrico “El Cajón”, está funcionando adecuadamente. En relación a las primeras mediciones, existe un parámetro para acompañar el comportamiento de las máquinas a lo largo del tiempo. Por ser máquinas nuevas, existen muchas partes con puntas, que se redondean con el tiempo, y muchas partes se acomodan quedando en su posición final. Por eso, la tendencia es que los valores de descargas parciales leídos estén más altos que los que las máquinas irán a presentar de aquí en algunos años.

Los gráficos de tendencia de una máquina padrón comienzan alto, disminuyen con el tiempo y después de algunos años comienza a elevar. En caso que se perciba una elevación en los valores leídos en el gráfico de tendencia, en relación a los valores iniciales, se puede decir que la máquina está presentando problemas. La información recabada es de gran utilidad para poder establecer los programas de mantenimiento de las máquinas y prever el alcance de los mismos, evitando salidas no programadas. Los resultados de estas pruebas ayudan a determinar las posibles soluciones prácticas al problema de aislamiento que se presente. Se constató además en las pruebas realizadas a los generadores, que éstos se encontraban con su aislamiento en buen estado, lo cual convierte a esta prueba en una herramienta conveniente de ser usada para un plan de mantenimiento predictivo.

La medición de descargas parciales ha mostrado ser la forma más confiable de determinar el estado dieléctrico del sistema de aislamiento principal del devanado de armadura de los generadores eléctricos. Cuando esta prueba se aplica en línea (ON-LINE) constituye un medio económico, confiable y rápido de asegurar el estado dieléctrico de la máquina.

En el reconocimiento de los patrones de descargas parciales se han estado buscando nuevas filosofías que ayuden a determinar el proceso de deterioro específico que las produce. A este proceso se necesita trabajar en relación al reconocimiento de los patrones de DP's, para crear sistemas que faciliten su interpretación. El conocimiento de la teoría de las descargas parciales ayuda a conocer el fenómeno y sus efectos sobre el aislamiento de los equipos eléctricos.

Los métodos para detectar descargas parciales en máquinas rotatorias, pueden ser aplicados de acuerdo a si el equipo al cual se le realizará la prueba presenta la facilidad para aplicarle un método.

La prueba OFF-LINE es aplicable a generadores los cuales pueden estar fuera de servicio durante el período que dure la prueba. El método ON-LINE se presenta como alternativa del

método OFF-LINE, aplicable a generadores los cuales por su importancia estratégica no pueden salir de servicio

Este es un ejemplo del desarrollo de sistemas permanentes de monitoreo en línea de generadores en nuestro país. Con ello se espera que además de poder evaluar continuamente el estado del aislamiento de la máquina, también se pueda establecer un sistema de control que indique la presencia de altos niveles de descargas y genere una señal de alarma en casos extremos.

Los generadores eléctricos son máquinas muy confiables, tienen alta resistencia a elevados esfuerzos eléctricos, mecánicos, térmicos y ambientales. Se espera de estos equipos una vida útil de treinta años de trabajo continuo. Sin embargo, pueden sufrir fallas que es necesario prevenir. La detección de fallas en los generadores eléctricos en una central hidroeléctrica, es de gran interés para los operadores de centrales que necesitan la máxima disponibilidad de sus sistemas. Allí radica la importancia de conocer los mecanismos de deterioro que permitan tomar acciones preventivas que eviten su salida por falla.

9. ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO.

Las cada vez mayores exigencias de competitividad a las que se ve sometida la industria han repercutido directamente en la evolución del mantenimiento aplicado a los equipos eléctricos de alta tensión.

Son muchos los esfuerzos que se están realizando orientados hacia lograr los objetivos de aumento de la disponibilidad de los equipos y reducción de fallas intempestivas, los que además deber ser alcanzados con una optimización del binomio calidad/costo de mantenimiento.

Los continuos avances tecnológicos registrados en la última década han permitido el desarrollo de nuevas herramientas de diagnóstico del estado de equipos, potenciando el mantenimiento predictivo.

La evolución de las técnicas de mantenimiento ha ido siempre en concordancia con las evoluciones tecnológicas que ha permitido incrementar significativamente el aprendizaje acerca del comportamiento degenerativo interno de los equipos que hace tan solo unos cuantos años era prácticamente desconocido.

Cabe destacar la idea de que el mantenimiento tiene como principal función hacer que los sistemas no se averíen y que además permanezcan en operación durante el mayor tiempo posible.

Los equipos o sistemas, aparte de presentar su lógico envejecimiento por progresivo deterioro de sus cualidades, pueden fallar como consecuencia de otras causas externas, que son las más difíciles de evitar.

El conocimiento del estado de los equipos, por tanto, permitirá definir intervenciones o no en éstos con el fin de lograr los objetivos del mantenimiento.

La introducción en el mercado de nuevas herramientas predictivas de diagnóstico, como consecuencia del progreso de los avances tecnológicos está respondiendo adecuadamente a las exigencias actuales de mantenimiento. Estas técnicas predictivas tienen como filosofía realizar intervenciones únicamente cuando sea necesario. La conjunción de esta idea con la del mantenimiento basado en la fiabilidad de los equipos permite optimizar los costos y desde luego, reducir la tasa de fallas.

10. SOLUCIONES PRÁCTICAS.

El estado del aislamiento de los equipos eléctricos es sin duda una de las principales preocupaciones en el área de mantenimiento de las máquinas eléctricas, en particular motores y generadores de media tensión y gran potencia.

El ingeniero de mantenimiento dispone de una variedad de recursos experimentales que le permiten determinar el estado general en que se encuentra el aislamiento de dichas máquinas, pero en el caso de encontrar aislamientos que presenten un comportamiento anormal en las pruebas difícilmente el método utilizado indicará donde está exactamente radicado el problema, solo la experiencia, los antecedentes históricos del equipo, la combinación de uno o más ensayos permitirán determinar el manejo o solución que se dé en cada caso.

Los aislantes normalmente son afectados por agentes externos o del medio tales como la contaminación y humedad y por el envejecimiento propio de los materiales que lo constituyen, envejecimiento que se puede ver afectado seriamente por el estrés térmico y electromagnético al que sea sometido el equipo durante su vida útil. No menos importante es la correcta ejecución de los trabajos de confección de bobinas y montajes de ellas, este solo hecho ya garantiza una larga vida de trabajo a un motor o generador.

El correcto análisis de los resultados de un ensayo al que ha sido sometida una máquina permitirá determinar que otras pruebas deben realizarse para focalizar mejor el problema y establecer las acciones posibles de ejecutar para mejorar la condición del equipo.

Normalmente la primera prueba que se realiza a una máquina eléctrica es la medida de aislamiento para 1 y 10 minutos, con ello es posible determinar el índice de polarización el cual permite en una primera aproximación conocer el estado de sus aislantes. Si el índice de polarización no es satisfactorio o se desea saber un poco más del estado del equipo se puede recurrir al ensayo de los escalones de tensión continua, prueba que aplicada en forma correcta aportará información suficiente acerca del estado del equipo y permitirá establecer un buen diagnóstico y decidir sobre las acciones correctivas que se puedan aplicar.

Como se ha establecido anteriormente, una de las causas de fallas prematuras de los materiales aislantes, son las descargas parciales, cuando éste es el caso ellas afectarán en mayor medida a las bobinas que se encuentran sometidas a mayor potencial. Si se divide un bobinado en sectores o grupos y se realiza una medida controlada de aislamiento o aún mejor si se aplica la prueba de escalones de tensión continua a cada uno de los sectores del bobinado, se tendrá con plena seguridad que el índice de polarización de la aislamiento y todos los otros indicadores del estado de los aislamientos serán mejores en el grupo que corresponda a los niveles de voltaje más bajos o cercanos al neutro. De aquí que una solución simple y eficaz sea invertir las conexiones de los grupos para dejar las bobinas con aislamiento más envejecida sometida a niveles de tensión menor.

Si el resultado de las pruebas indica igualdad o similitud en todos los grupos, es muy probable que se esté en presencia de un bobinado con problemas constructivos y es muy probable que tenga cavidades internas donde se desarrolla un proceso de descargas parciales, en este caso es posible obtener alguna mejoría en su condición realizando un proceso de reacuñamiento. Este trabajo consiste en retirar las cuñas existentes y reemplazarlas por otras de mayor

espesor o en su defecto suplir con material aislante adicional, para lograr un mayor apriete y de esta forma eliminar las cavidades desplazando el aire contenido en ellas. Cabe destacar que este fenómeno se presenta regularmente en equipos con muy poco uso o relativamente nuevos por defectos constructivos como ya se mencionó.

Uno de los problemas que actualmente no tiene solución práctica es la forma de ubicar con cierta precisión el lugar donde se encuentra el o los puntos del aislamiento más deteriorados. Existen métodos que utilizan sofisticados sistemas de monitoreo con sensores de emisión electromagnética o ultrasonido, bobinas exploradoras y filtros, que permiten registrar los fenómenos que se producen al interior de una máquina en condiciones normales de operación. Toda esta información es analizada computacionalmente y comparada con bases de datos que poseen los fabricantes de estos equipos de medición para realizar los diagnósticos.

Un método práctico, sencillo y fácil de realizar por cualquier especialista en máquinas eléctricas consiste en una prueba de efecto corona a la máquina para visualizar las descargas parciales superficiales, con la ayuda de un marcador se dejarán señalizado los puntos donde aparece el efecto corona, para poder a continuación analizar cada uno de los puntos, estos pueden ser entre bobinas de distinta fase o entre bobinado y el núcleo. Otro indicador de esta prueba es la tonalidad de la aura o corona que se observe, cuando el daño en el aislamiento es leve será blanco e irá cambiando de color hasta llegar al naranja o rojizo cuando hay daño o aislamiento comprometido.

11. BIBLIOGRAFÍA

1. Avelino J. González, M. Stanley Baldwin, J. Stein, E. Nilsson. "Monitoring and diagnosis of turbine -driven generators", Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, U.S.A. 1995.
2. A Wilson, "High and low intensity slot discharge", Conference record of the 1990 IEEE, International Symposium on Electrical Insulation, Toronto, Canada, June. (1990).
3. Cajetan Pinto, Peter Kantardziski, "On-line monitoring of H. V. stator winding insulation using PDA technology". Studies and Evaluation of Insulating Materials and Systems. CIGRE Session IV-Paper 7. (IEEE)
4. E. Gulski, A. Krivda, "Neural networks as a tool for recognition of DP", IEEE Transactions on Electrical Insulation, October 1993, p. 984.
5. Edgar Robles P., Javier García H., "Rehabilitación del generador de la U-2 de la C.H. Ing. Carlos Ramírez Ulloa". Sexto congreso nacional de máquinas eléctricas rotatorias y quinto simposium internacional de ingeniería mecánica y eléctrica. Octubre 1996.
6. E. Robles, A. García, O. Reyes, A. González, J. García, C. Rojas. "Diagnóstico de los generadores de la C.H. de Chixoy, Guatemala", Reporte Final IIE/03/32/5220/RF-02/97. Cuernavaca Morelos, Marzo 1997.
7. H.G. Sedding, S.R. Campbell, C.G. Stone, G.S. Klempner, "A new sensor for detecting partial discharges in operating turbine generators" IEEE Transactions Energy Conversion, December 1991, p.700.
8. IEEE Std 1434-2000. IEEE Trial-Use guide to the measurement of partial discharges in rotating machinery. New York. Abril 2000.
9. Iris Power Engineering, Instalación de sensores para la medida de descargas parciales <http://www.asing.es/p6.htm>
10. J Johnson, M. Warren, Detection of Slot Discharges in High Voltage Stator Windings During Operation - Trans. AIEE, Part II, 1951, p. 1993. (IEEE)
11. Larry S. Dorfman, et. al., "Torsional Monitoring of Turbine-Generators for Incipient Failure Detection", Sixth EPRI Steam Turbine-Generator Workshop, August 17-20, 1999, St. Louis Missouri.
12. Leonardo G., Arturo García, Alfredo M, Jesús Tapia, "Diagnostico del aislamiento de rotores de generadores eléctricos" IEEE Sección México. Reunión de Verano Acapulco Guerrero 1992: RVP'92-GEN-07.
13. M.Kurtz, J.F. Lyles, G.C. Stone, "Application of partial discharge testing to hydro generator maintenance". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No 8, August 1984

14. M.Kurtz, J.F. Lyles, G.C. Stone, "Experience with PDA diagnostic testing on hydraulic generators maintenance". IEEE Transactions on Energy Conversion. Vol. 3, No 4, December 1988.
15. Oscar Reyes, Alejandro González, Cornelio Rojas, "Diagnóstico de la condición del sistema aislante de un generador de 16 MW propiedad de la compañía Petrocel, mediante pruebas de operación y fuera de operación", Reporte Final IIE/03/32/5220/RF-01 /2003. Cuernavaca Morelos, Abril 2003.
16. Oscar Reyes, Arturo García, Edgar Robles, "Experiencias en el desarrollo e implantación de técnicas para el monitoreo en línea de generadores eléctricos". Reunión de Verano RVP'98-GEN-05.
17. Oscar A. Reyes M., H. Octavio de la Torre V, "Sistema Ángel: Aspecto Teórico Prácticos para el diagnóstico de Generadores en Operación", Boletín IIE, Abril-Junio, 2005.
18. Pedro Fernández Díez, "Turbinas Hidráulicas" Universidad de Cantabria, 1996.
19. Roberto Campuzano, A. Medina, "Análisis de las causas de deterioro prematuro del estator del generador de la U-1 de la C.H. Carlos Ramírez Ulloa". Tercer Congreso Nacional de Máquinas Eléctricas Rotatorias. Veracruz 1993
20. Roberto Campuzano Mtz., "Deterioro del Sistema Aislante de Grandes Generadores por el Fenómeno de Descargas a la Ranura". IEEE Sección México. Reunión de Verano Acapulco Guerrero 1995: RVP'95-GEN-05.
21. S.R. Campbell , C.G. Stone "Practical on-line partial discharge test for turbine generators and motors" IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 9, No 2, June 1994.