

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**



**“DIAGNÓSTICO EN LÍNEA MEDIANTE DESCARGAS  
PARCIALES COMO TÉCNICA DE MANTENIMIENTO  
PREDICTIVO DEL DEVANADO ESTATÓRICO DE LOS  
ALTERNADORES DE ELECTROPERU S.A.”**

**TESIS  
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

**LUIS ÁNGEL GÜERE RUPAY  
PROMOCIÓN 2009 - II**

**Lima - Perú  
2012**

## DEDICATORIA

*A mi familia y amigos que son mi fuente de inspiración, por estar conmigo en aquellos momentos en que el estudio y el trabajo ocuparon mi tiempo y esfuerzo.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Para poder realizar esta tesis de la mejor manera posible fue necesario del apoyo de muchas personas a las cuales quiero agradecer.

En primer lugar a Dios por haberme dado la sabiduría y la fortaleza para que fuera posible alcanzar este triunfo, a mis padres y hermanos, que sin esperar nada a cambio, han sido pilares en mi desarrollo profesional, a la empresa Electroperu S.A., a sus colaboradores del complejo Hidroeléctrico del Mantaro y en especial al grupo de ingenieros y técnicos del área de Mantenimiento Eléctrico por su dedicación y esfuerzo para el desarrollo del País, además de apoyarme incondicionalmente en mi formación profesional y por permitirme ser parte de su equipo de trabajo durante mi estadía.

## TABLA DE CONTENIDOS

<b>PRÓLOGO.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>4</b>
<b>1.1 OBJETIVO.....</b>	<b>5</b>
<b>1.2 ALCANCES.....</b>	<b>6</b>
<b>CAPÍTULO II: DEVANADOS DEL ESTATOR DE MOTORES Y GENERADORES.....</b>	<b>7</b>
<b>2.1 DISEÑO DEL DEVANADO DEL ESTATOR.....</b>	<b>8</b>
2.1.1 Estructuras de las Bobinas.....	9
2.1.2 Barra (semibobina).....	9
2.1.3 Barra multi-espira.....	10
2.1.4 Barra concéntricas.....	11
<b>2.2 TIPOS DE AISLAMIENTO.....</b>	<b>11</b>
2.2.1 Aislamiento del Subconductor.....	13
2.2.2 Aislamiento entre Vueltas.....	14
2.2.3 Aislamiento Principal.....	16
<b>2.3 PROCESO DE FABRICACIÓN DE BOBINAS.....</b>	<b>20</b>
2.3.1 Procesos de Impregnación.....	20
2.3.2 Control de Tensión de Voltaje.....	22
<b>2.4 MECANISMOS DE FALLA (MF).....</b>	<b>25</b>
2.4.1 Deterioro Térmico.....	26
2.4.2 Ciclaje de Carga.....	28
2.4.3 Impregnación Defectuosa.....	29
2.4.4 Bobinados Flojos.....	30
2.4.5 Descarga Eléctrica en la Ranura.....	31
2.4.6 Interface de Tensión de voltaje.....	32
2.4.7 Contaminación de los cabezales.....	33

2.4.8 Vibración del Cabezal.....	34
2.4.9 Espaciado Inadecuado entre bobinas.....	35
2.4.10 Calidad en la fabricación original.....	36
2.4.11 Fallas y fenómenos transitorios.....	36
<b>CAPÍTULO III: TEORÍA BÁSICA DE DESCARGAS PARCIALES.....</b>	<b>37</b>
<b>3.1 DESCARGA PARCIAL COMO UN SÍNTOMA.....</b>	<b>37</b>
<b>3.2 CONCEPTO DE DESCARGA PARCIAL.....</b>	<b>38</b>
<b>3.3 UNIDADES DE MEDIDA DE DESCARGA PARCIAL.....</b>	<b>38</b>
3.3.1 Magnitud.....	39
3.3.2 Pulsos por Segundo (PPS).....	39
3.3.3 Polaridad Ángulo Fase.....	40
<b>3.4 FORMACIÓN DE HUECOS.....</b>	<b>40</b>
<b>3.5 DESCARGAS ELÉCTRICAS.....</b>	<b>41</b>
3.5.1 Propiedades Físicas de las Descargas Parciales.....	43
3.5.2 Dependencia del Voltaje.....	44
3.5.3 Forma del Pulso.....	45
3.5.4 Recorrido del Pulso.....	46
3.5.5 Polaridad del Pulso.....	48
<b>CAPÍTULO IV: DETECCIÓN DE DESCARGAS PARCIALES.....</b>	<b>54</b>
<b>4.1 SENSORES DE DESCARGAS PARCIALES.....</b>	<b>55</b>
4.1.1 Acopladores Capacitivos.....	55
4.1.2 Acopladores de Ranura de Estator (SSC).....	58
<b>4.2 CAJA DE TERMINACIÓN.....</b>	<b>60</b>
<b>4.3 SEPARACIÓN DEL RUIDO.....</b>	<b>62</b>
4.3.1 Frecuencia.....	62
4.3.2 Impedancia Desigual.....	64
4.3.3 Tiempo de Arribo de los Pulsos.....	65
4.3.4 Forma del Pulso.....	71

<b>4.4 PRESENTACIÓN DE DATOS.....</b>	<b>72</b>
4.4.1 Análisis de Magnitud de Pulsos (PHA).....	73
4.4.2 Resumen de Variables de Descargas Parciales.....	74
4.4.3 Datos en Archivo.....	76
4.4.4 Esquemas de Resolución de Fase.....	77
<b>4.5 INSTRUMENTOS IRIS.....</b>	<b>84</b>
4.5.1 Portables (Portátiles).....	84
4.5.2 Guard (Protección).....	85
4.5.3 Instrumento Trac (Monitoreo Continuo).....	86
4.5.4 Bantam (Portátiles).....	87
<b>4.6 PRUEBAS EN LÍNEA.....</b>	<b>87</b>
4.6.1 Precauciones de Seguridad.....	88
4.6.2 Sistema de Pruebas.....	88
4.6.3 Procedimiento de Adquisición de Medida.....	92
4.6.4 Parámetros de Operación de la Máquina.....	99
<b>CAPÍTULO V: INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DE DESCARGAS PARCIALES.....</b>	<b>101</b>
<b>5.1 MÉTODOS DE PRUEBAS DE DESCARGAS PARCIALES.....</b>	<b>101</b>
5.1.1 Método de Prueba TGA-SSC.....	102
5.1.2 Método de Prueba TGA-BUS.....	103
5.1.3 Método de Prueba PDA.....	104
<b>5.2 INTERPRETACIÓN.....</b>	<b>105</b>
5.2.1 Análisis de la Tendencia.....	105
5.2.2 Comparación con Máquinas Similares.....	108
5.2.3 Características de Descargas Parciales.....	110
5.2.4 Pulsos Clásicos de Descargas Parciales.....	113
5.2.5 Pulsos No Clásicos de Descargas Parciales.....	123
5.2.6 Condiciones ambientales y de Operación.....	129
5.2.7 Características de las Descargas Parciales de los Mecanismos de Falla.....	130

<b>CAPÍTULO VI: ANÁLISIS DE DESCARGAS PARCIALES CENTRALES HIDROELÉCTRICAS.....</b>	<b>140</b>
<b>6.1 GRUPO N° 7 – CENTRAL HIDROELÉCTRICA SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO (C.H. SAM).....</b>	<b>140</b>
6.1.1 Diseño de Planta.....	140
6.1.2 Estado Actual de las Descargas Parciales.....	141
6.1.3 Tendencias de Descargas Parciales.....	141
6.1.4 Interpretación de Descargas Parciales.....	146
6.1.5 Aplicación de Falla de Descarga Parcial.....	152
<b>6.2 GRUPO N° 1 – CENTRAL HIDROELÉCTRICA RESTITUCIÓN (C.H. RON).....</b>	<b>171</b>
6.2.1 Diseño de Planta.....	171
6.2.2 Estado Actual de las Descargas Parciales.....	171
6.2.3 Tendencias de Descargas Parciales.....	172
6.2.4 Interpretación de Descargas Parciales.....	176
6.2.5 Aplicación de Falla de Descarga Parcial.....	182
<b>CAPÍTULO VII: EVALUACIÓN TÉCNICO ECONÓMICA.....</b>	<b>195</b>
<b>7.1 GENERALIDADES.....</b>	<b>195</b>
<b>7.2 PRIMER ANÁLISIS: ADQUISICIÓN DEL EQUIPO DE MONITOREO DE DESCARGAS PARCIALES IRIS POWER PDA – IV.....</b>	<b>196</b>
7.2.1 Costo por inversión inicial al comprar el equipo IRIS POWER PDA – IV y accesorios.....	196
7.2.2 Costo de monitoreo de descargas parciales realizado por una empresa de servicios.....	200
7.2.3 Retorno de inversión al adquirir el equipo IRIS POWER PDA – IV y accesorios.....	202
7.2.4 Financiamiento.....	203
7.2.5 Justificación.....	203
<b>7.3 SEGUNDO ANÁLISIS: CORRECTO DIAGNÓSTICO DE LOS MONITOREOS DE DESCARGAS PARCIALES CON EL EQUIPO IRIS POWER PDA – IV.....</b>	<b>208</b>

7.3.1 Costo de Mantenimiento Programado.....	208
7.3.2 Costo de Mantenimiento No Programado.....	215
7.3.3 Comparación de costos.....	224
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>230</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>232</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>234</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>235</b>
<b>ANEXO 1: PRESENCIA DE DP EN LA BARRA 13.8 kV DE SALIDA DEL GRUPO N° 7 – C.H. SAM.....</b>	<b>235</b>
<b>ANEXO 2: REAISLAMIENTO DE BARRAS 13.8 kV DE SALIDA DEL GRUPO N° 7 – C.H. SAM.....</b>	<b>236</b>
<b>ANEXO 3: PRESENCIA DE DP EN CABEZALES Y DEVANADO ESTATÓRICO DEL GRUPO N° 1 – C.H. RON.....</b>	<b>237</b>
<b>ANEXO 4: INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DE DEVANADO ESTATÓRICO DEL GRUPO N° 1 – C.H. RON.....</b>	<b>238</b>
<b>ANEXO 5: TABLAS DE CRITERIOS DE EVALUACIÓN SEGÚN BASE DE DATOS – IRIS POWER.....</b>	<b>239</b>



## PRÓLOGO

Tratar de evitar que los alternadores no fallen sustenta que el personal involucrado conserve su empleo, siempre y cuando lo logre con éxito. Todo lo que se debe hacer es descubrir la manera de detectar que está ocurriendo una falla en el mecanismo y cuán importante o urgente es el problema. Las descargas parciales (DP) son un síntoma de varios problemas causados por tensiones térmicas, mecánicas (vibración y choque), eléctricos (voltaje), del medio ambiente y químicas. Muy rara vez ocurre un sólo factor aislado, es decir que estas tensiones se combinan para provocar diversos procesos de deterioro. Con el aumento en los niveles de tensión, la tasa de envejecimiento aumenta. Monitorear las descargas parciales puede ser una adición útil a los procedimientos de prueba e inspección de cualquier empresa. Las descargas parciales no son solo un síntoma, sino que daña las resinas orgánicas en los materiales aislantes. Afortunadamente, la mayoría de los sistemas de aislación del devanado del estator para máquinas de más de 2300 V contienen un material resistente a las descargas llamado mica, por lo tanto la degradación de la aislación es usualmente lenta. A causa de este lento proceso de envejecimiento tiene sentido realizar monitoreos periódicos de la actividad de descargas parciales.

Los objetivos del presente trabajo es mostrar las pruebas de diagnóstico de descargas parciales en el devanado del estator utilizados en los alternadores de ELECTROPERU S.A., así como también los criterios que se tiene con estas

pruebas respecto a su efectividad, para indicar la condición del aislamiento en las máquinas generadoras.

La presente tesis consta de siete capítulos que se detallan a continuación:

En el Primer Capítulo se detallan los alcances de la presente tesis y los objetivos que me motivaron a realizar el presente trabajo.

En el Segundo Capítulo se describen los devanados del estator de motores y generadores, sus diseños, tipos de aislamiento, procesos de fabricación de bobinas y los mecanismos de falla que pueden ocurrir en el devanado del estator.

En el Tercer Capítulo se describe la teoría básica de descargas parciales, sus clasificaciones y propiedades.

En el Cuarto Capítulo se describe como se realiza la detección de las descargas parciales utilizando los instrumentos IRIS POWER y la forma de presentación de los datos adquiridos.

En el Quinto Capítulo se describe como se interpreta los resultados de las descargas parciales, para luego analizar las tendencias según la interpretación.

En el Sexto Capítulo se realiza el análisis de las descargas parciales de los alternadores de ELECTROPERU S.A., mencionando al grupo N° 7 de la Central Hidroeléctrica Santiago Antúnez de Mayolo y al grupo N° 1 de la Central Hidroeléctrica Restitución como aplicaciones directas de las descargas parciales.

En el Séptimo Capítulo se realiza la evaluación técnico – económico, analizando primero la adquisición del equipo de monitoreo de descargas parciales IRIS POWER PDA – IV, para después mostrar los beneficios que se logran con un buen diagnóstico de los monitoreos de las descargas parciales; en ambos casos se mostrarán los ahorros económicos para la empresa.

Asimismo, se presentan las Conclusiones, Recomendaciones y la Bibliografía utilizada para la elaboración de la presente Tesis.

# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

En el Perú existen generadores hidráulicos con capacidades desde unos pocos MVA hasta 120 MVA, cuyos devanados del estator están fabricados con diferentes tipos de aislamientos, dependiendo de su antigüedad, como son a base de asfalto, resina poliéster ó resina epóxica; y que utilizan diferentes medios y tipos de enfriamiento como son aire en circuito abierto ó circuito cerrado, hidrógeno enfriando indirectamente o directamente y agua.

Aun con tanta variedad en diseños de los generadores eléctricos, los mecanismos de degradación de los aislamientos del devanado del estator son los mismos; la temperatura a la que operan, los esfuerzos mecánicos de los arranques, paros y corrientes, los esfuerzos eléctricos, principalmente en tensiones a partir de 13,8 kV y el ataque de agentes químicos o ambientales. El impacto de cada mecanismo de degradación difiere dependiendo del diseño del generador eléctrico en cuanto al tipo de sistema de aislamiento utilizado y tipo de enfriamiento, así como de la magnitud y repetición o duración de los mecanismos de degradación.

Desde hace mucho tiempo se ha tratado de diagnosticar la condición de los aislamientos del devanado del estator buscando pruebas de diagnóstico que sean lo más efectivas posible para indicar el grado de deterioro, su localización específica y el mecanismo que produce la degradación. Tradicionalmente, las

pruebas de diagnóstico se han realizado fuera de línea, es decir, con la máquina desenergizada, aprovechando las salidas de las unidades a mantenimiento, con un enfoque de mantenimiento preventivo, es decir, periódico.

Desde unos años atrás, se ha buscado el enfoque predictivo, el cual se basa principalmente en diagnóstico en línea, es decir, con la máquina en operación normal, lo cual tiene la ventaja de analizar la máquina bajo todas las condiciones de operación. Hace unos 60 años se empezaron a desarrollar instrumentos para medir las descargas parciales en línea, las cuales son un buen indicador de la condición de los aislamientos. Esta técnica se inició en generadores hidroeléctricos ya que la tecnología de esos tiempos, con electrónica analógica, no permitía discriminar adecuadamente las descargas parciales del ruido eléctrico en los turbogeneradores. Con el desarrollo de la tecnología de estos instrumentos, en especial la tecnología digital, y el desarrollo de programas de computadoras, actualmente existen varias compañías que fabrican equipos de monitoreo para todo tipo y capacidad de máquinas eléctricas rotatorias.

La limitante en el uso extensivo de estas tecnologías de monitoreo en línea es el costo de los equipos. Sin embargo, en ELECTROPERU S.A. ya se han instrumentado los 10 generadores hidráulicos con este tipo de instrumentos, siendo "IRIS POWER ENGINEERING" la empresa suministradora.

### **1.1 Objetivo**

El objetivo principal es identificar los problemas de aislamiento existentes en los estatores de los grupos generadores de las centrales de ELECTROPERU S.A.,

mediante el monitoreo e interpretación de descargas parciales utilizando el equipo IRIS POWER PDA – IV para lograr la correcta confiabilidad de los grupos.

## **1.2 Alcances**

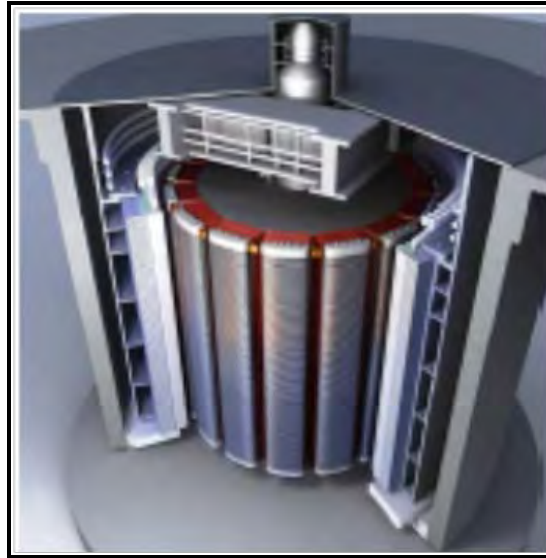
El presente trabajo analiza mediante el monitoreo de las descargas parciales los aspectos de mejora en el procedimiento de trabajo y costos económicos relacionados a la degradación del aislamiento en el devanado de los estatores de las centrales del Mantaro, para así poder gestionar mejor el mantenimiento eléctrico.

Este trabajo está dirigido a todos los ingenieros y técnicos que se dediquen al sector eléctrico especialmente a la generación de energía eléctrica (centrales hidroeléctricas) y pretendan mejorar la calidad del diagnóstico del devanado de los generadores eléctricos, con nuevos equipos de tecnología las cuales ayuden a minimizar las desconexiones forzadas relacionadas con el grado de deterioro del aislamiento para de esta manera obtener ahorros considerables.

## **CAPÍTULO II**

# **DEVANADOS DEL ESTATOR DE MOTORES Y GENERADORES**

Una máquina rotativa está compuesta por dos componentes principales: el estator y el rotor. El rotor crea un campo magnético rotativo y el estator está compuesto por una serie de conductores, o devanados que el núcleo del estator mantiene fijos. Es la conductividad y forma de la barra del rotor junto con el diseño de devanado del estator que determinan las características de encendido y funcionamiento del motor o la potencia del generador. Los devanados proveen el camino para los electrones, por ejemplo, de la electricidad, mientras el núcleo fija el campo magnético, asegura los devanados y disipa el calor. Como en el devanado de un estator de voltaje medio o alto, la diferencia entre los conductores y el núcleo puede ser de miles de voltios, es necesario separar las dos superficies con un material aislante. Este material aislante aunque es necesario para la aislación, soporte y transferencia de calor, no cumple ningún papel en la generación de electricidad o torque. Sin embargo, los materiales aislantes son proclives al envejecimiento como resultado de factores térmicos, eléctricos, medio ambientales y mecánicos. Aunque los conductores eléctricos y cualquier otra parte metálica del generador, no son materiales aislantes, si forman parte del sistema aislante, ya que su posición, geometría y potencial determinan la intensidad del campo magnético al que se someten los materiales aislantes.



**Figura 2. 1:** Máquina rotativa

Estas características de las partes metálicas en un generador (posición, geometría y potencial) son fundamentales en el estado de comportamiento y estado de materiales aislantes en una máquina eléctrica.

### **2.1 DISEÑO DEL DEVANADO DEL ESTATOR**

La principal función de la bobina o barra del devanado del estator es de proveer una conductividad a las corrientes inducidas por el campo magnético giratorio; en tal sentido los diseñadores de devanados han realizado un gran esfuerzo para asegurarse de poner la mayor cantidad de cobre y la menor cantidad de aislación posible en cada bobina o barra. La construcción que ellos decidan depende del tamaño (a la máxima eficiencia generadora) de la máquina elegida por el cliente y de la cantidad de dinero que éste quiera gastar. Las de voltaje medio a alto (>2300V) están fabricadas con bobinas de devanado concéntrico, mientras que las máquinas de bajo voltaje tienden a ser de devanado intercalado. Las bobinas de devanado concéntrico están diseñadas de manera tal que la tensión de la espira de voltaje sea constante. Son diferentes a las de motores con devanado alternativo



donde la tensión de la espira de voltaje puede variar considerablemente y puede ser el máximo voltaje fase a tierra. Aquí sólo discutiremos las bobinas de arrollado concéntrico.

### **2.1.1 Estructuras de las Bobinas**

Hay tres diseños ampliamente usados de devanado concéntricos del estator:

- ✓ Barra (semibobina).
- ✓ Bobina multi-espira, devanado diamante.
- ✓ Bobina multi-espira, devanado concéntrico.

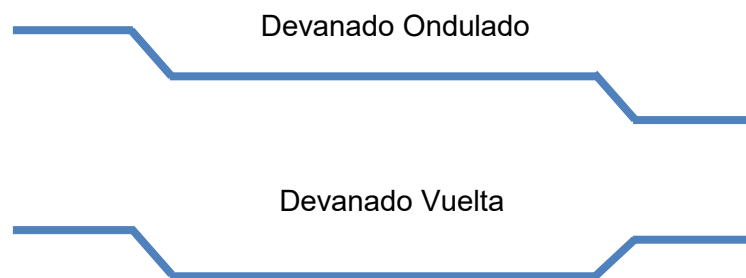
La selección del diseño se basa en los requerimientos deseados de producción para esa máquina. Típicamente, las máquinas de menos de 75MW tendrán bobinas multi-espira, mientras que las más grandes tendrán barras. Los estatores con devanados de tipo diamante pueden encontrarse en máquinas antiguas pero se utilizan casi exclusivamente en diseños modernos. El tipo de devanado concéntrico puede encontrarse en algunos motores grandes antiguos. La selección del diseño se basa en los requerimientos deseados de producción y en el factor energético. Las razones de la elección exceden la competencia de esta Tesis, pero generalmente tienen que ver con la fabricación, facilidad de instalación y reparación.

### **2.1.2 Barra (semibobina)**

Si las ranuras del núcleo son extremadamente largas o el diámetro de las perforaciones no es el apropiado, puede resultar extremadamente difícil instalar una bobina entera. Para estas máquinas las bobinas están frecuentemente fabricadas en dos mitades y se denominan barra o media-bobina. Además, se las identifica por las posiciones relativas dentro de la ranura del estator, por ejemplo de “barra

superior” a la que está más cerca del rotor y de “barra inferior” a la que está en la parte inferior de la ranura.

Esta disposición en secciones hace más fácil la instalación ya que cada barra puede ser insertada por separado y luego conectada a la otra mitad. Una barra (media bobina) está formada por un grupo de hebras de cobre aisladas iguales al área de corte transversal y aplicando luego el aislamiento exterior. Hay dos tipos comunes de barras: devanado ondulado y devanado de vuelta (ver Figura 2.2). La única diferencia entre los diseños es que las estructuras del brazo final varían para acomodarse al diseño de la barra.



**Figura 2. 2:** Diseño de Barra

### 2.1.3 Bobinas multi-espira

Una bobina multi-espira (ver Figura 2.3), se forma tomando un grupo de hebras aisladas de cobre para formar la sección transversal de la espira requerida y envolviendo, si estuviera especificado, varias capas de aislamiento alrededor de ellas. El manojó se enrolla luego en un número específico de vueltas alrededor de un calibre y eventualmente se tironea de él y se obtiene como resultado la familiar forma de “diamante”. La bobina entera se aísla con múltiples capas de aislamiento exterior.



**Figura 2. 3:** Bobinado Diamante

#### 2.1.4 Bobinas concéntricas

Una bobina concéntrica (ver Figura 2.4), se forma tomando un grupo de hebras aisladas de cobre que forman la sección transversal del conductor y si las especificaciones así lo piden, varias capas de aislación se envuelven alrededor de ellas. Estas son luego agrupadas antes de darles la forma de “u”. Luego, a excepción de los extremos, la bobina en forma de “u” se aísla con múltiples capas de aislamiento externo. Como los devanados formados en estas bobinas son concéntricos, se requieren diferentes tamaños de bobinas. El núcleo para este tipo de devanado tiene ranuras semi-cerradas, de esta manera las bobinas en forma de “u” se insertan desde un extremo y luego se conectan al otro extremo para formar una bobina concéntrica multi-espiras.

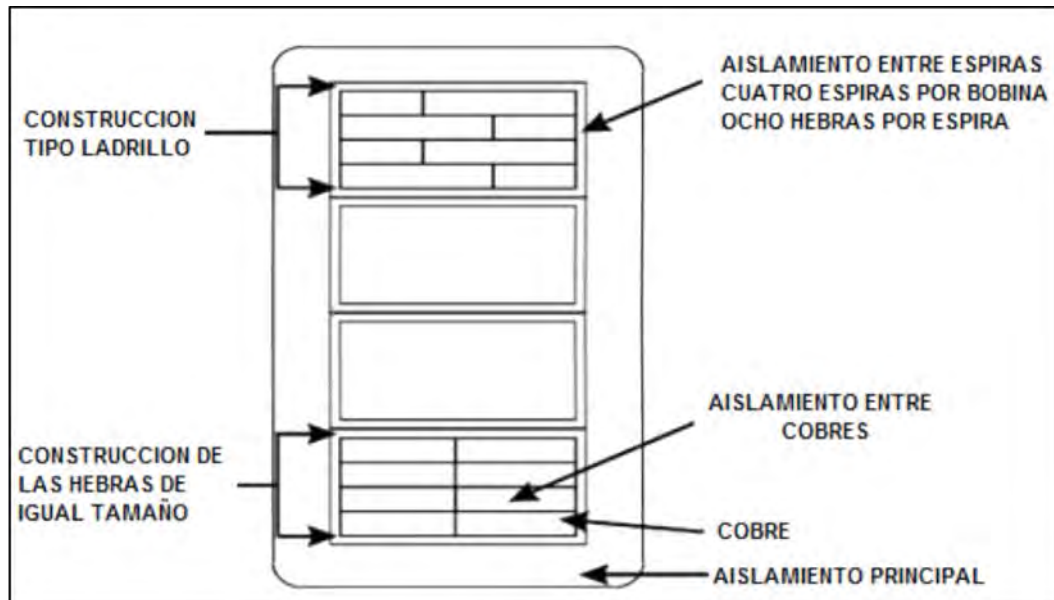


**Figura 2. 4:** Bobina Concéntrica

## 2.2 TIPOS DE AISLAMIENTO

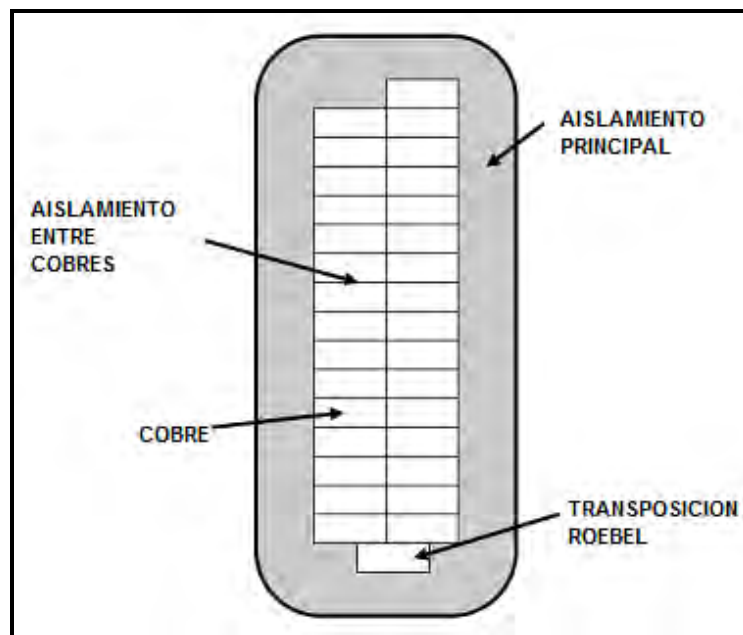
Como se muestra en la Figura 2.5, hay tres tipos de aislamiento en una bobina multi-espiras: subconductor, entre vueltas y principal. Como en una barra (semi-

bobina) no hay espiras, encontraremos sólo subconductor y principal (ver Figura 2.6).



**Figura 2. 5:** Aislamiento en una bobina Multi-espiras

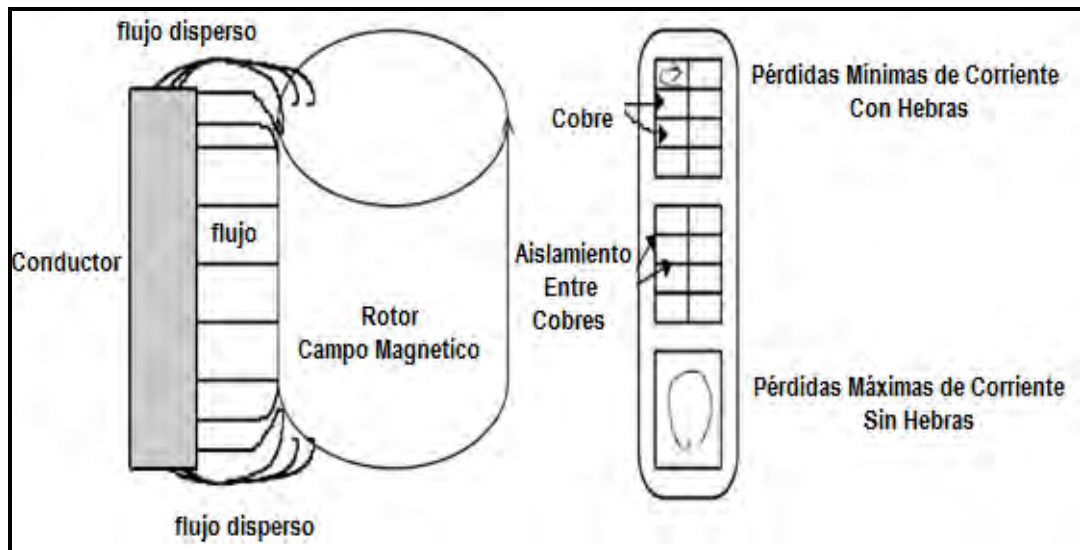
La función primaria del aislamiento es separar al conductor del núcleo del estator a fin de permitir que exista una diferencia de voltaje entre los dos. Los materiales de derivación más comunes utilizados para proveer esta separación eléctrica son vidrio, papel de mica y escamas de mica. Todos estos productos tienen excelentes propiedades aislantes, sin embargo, poseen muy malas propiedades mecánicas. El vidrio y la mica tienden a hacerse añicos cuando están expuestos a fuertes vibraciones - 100/120Hz – presentes en un generador. Para disminuir el impacto mecánico en la aislación, los diseñadores de devanados han decidido impregnar las cintas con un compuesto orgánico. Los compuestos orgánicos frecuentemente utilizados son asfalto, poliéster y epoxi. El tipo de componente existente en su motor o generador dependerá de la compañía que fabricó el devanado y del año de fabricación.



**Figura 2. 6:** Aislamiento en una barra Roebel, semi-bobina

### 2.2.1 Aislamiento del Subconductor

El propósito del aislamiento del subconductor es, bastante lógico, aislar los subconductores individuales que constituyen un paquete de espiras, las espiras son fabricadas de subconductores más pequeños 3-7 mils para reducir el efecto piel y las pérdidas de corrientes parásitas a causa del campo magnético axial. Los subconductores tienen un área superficial más grande y pueden llevar más corriente que un conductor sólido. El campo magnético axial (ver Figura 2.7), son esos campos que son perpendiculares a la mayor parte del campo magnético radial y por consiguiente induce una corriente alrededor del área de la sección transversal del subconductor conductor. La tensión de voltaje a través del aislamiento del subconductor es usualmente menos que 1 V (está en el rango de mili voltios). Dado que hay tensión mínima, la falla del aislamiento del subconductor normalmente incrementa las pérdidas parásitas; sin embargo, si al formar el arco está presente, los cortos de subconductor a subconductor pueden eventualmente llevar al fallo del bobinado.



**Figura 2. 7:** Pérdidas de Corrientes parásitas en sub conductores

Durante muchos años se utilizó asbesto, ahora se ha reemplazado por fibra de vidrio y dracón. Para maximizar la cantidad de cobre, dentro de la ranura, algunos fabricantes alternan conductores con laca y conductores con fibra de vidrio y dracón; la laca aporta una gran resistencia dieléctrica entre conductores con un espesor muy bajo, sin embargo no tiene buena resistencia a las descargas parciales.

### 2.2.2 Aislamiento entre Vueltas

Mientras que el bobinado tipo barra del estator tiene una sola vuelta solamente, no hay requerimiento de aislamiento entre vueltas; solo las bobinas multi espiras pueden tener el aislamiento entre vueltas. La presencia o ausencia del aislamiento entre vueltas, dependerá de su especificación de arrollamiento o fabricación.

El propósito del aislamiento entre vueltas es de prevenir las grandes corrientes inducidas entre vueltas o espiras. El poder de frecuencia de tensión de voltaje a través del aislamiento entre vueltas en unas bobinas de tensión es constante y es

un producto de la máquina de diseño. Esto puede ser computado basado en el voltaje fase-tierra de la máquina, el número de bobinas en serie, en un paralelo y el número de vueltas o espiras en una bobina. Normalmente, la tensión de voltaje a través del aislamiento entre vueltas es de 10 – 200 V por vuelta.

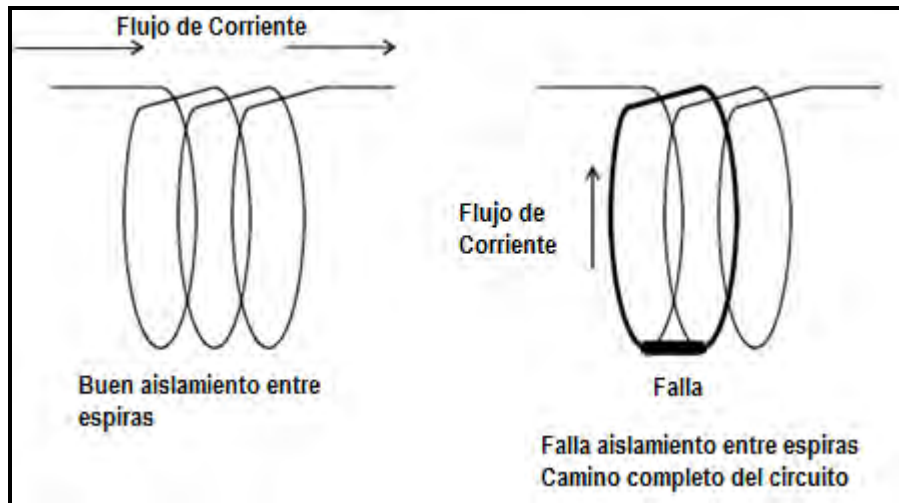
Por ejemplo, si la máquina de tensión en 13,8 kV fase a fase con 21 bobinas por paralelo y 3 vueltas o espiras por bobina, entonces los cálculos siguientes aplican:

$$\text{Voltaje fase-tierra} = \frac{13,8 \text{ kV}}{\sqrt{3}} = 7967 \text{ V a tierra}$$

$$\frac{\text{voltios}}{\text{bobina}} = \frac{\text{fase a tierra}}{\text{Bobinas}} = \frac{7967}{21 \text{ bobinas}} = 379 \text{ V/bobina}$$

$$\text{Voltios/espira} = \frac{\text{voltios/bobina}}{\text{espiras/bobina}} = \frac{379 \text{ V}}{3 \text{ espiras}} = 126 \text{ V/espira}$$

Si falla el aislamiento entre vueltas, habrá una tremenda cantidad de corriente circulante dentro de la bobina; esto es causado por una exposición completa de la trayectoria del circuito (bucle cerrado) a un fuerte campo magnético produciendo una corriente alta a través de las vueltas con un corto (ver Figura 2.8). El resultado es una muy alta tensión térmica  $I^2R$  en el aislamiento principal de bobina adyacente a la posición del corto y por ende un inminente fallo del aislamiento principal. El tiempo de falla es desconocido, pero esto podría ser tan corto como unos segundos, dependiendo de la impedancia de la falla.



**Figura 2. 8:** Falla en aislamiento entre vueltas

En tal sentido la función principal de este aislamiento, es evitar que voltajes transitorios, de frente muy rápido, puedan romperlo y conducir así una falla entre vueltas o espiras.

Originalmente se utilizó asbesto. Después, un material sintético como el nomex. Actualmente el aislamiento entre vueltas generalmente es mica.

### 2.2.3 Aislamiento Principal

El propósito del aislamiento principal es de prevenir los cortos entre los conductores de cobre y la masa del núcleo estático aterrado. El espesor del aislamiento principal dependerá únicamente del nivel de voltaje de la máquina y de la tensión volts/mm escogido por el fabricante. Por ejemplo, para la máquina descrita arriba en 13.8 kV, la más alta tensión de voltaje a tierra es 7967 V. Si la tensión máxima en volts/mm escogido por el fabricante es 2.5 kV/mm (65V/ml), entonces el aislamiento principal sería por lo menos 3mm (123 mils) de espesor. No se necesita decir que es más grueso el aislamiento y menos espeso el cobre en la ranura. Sin embargo el



aislamiento principal, la más alta tensión de voltaje por este y la alta susceptibilidad aumentan la falla o perforación eléctrica. Hay ventajas de cualquier modo, y se debe decidir con cual está más comfortable.

La tensión de voltaje a través de un aislamiento principal está basada en el voltaje calculado del devanado y de la posición del bobinado dentro del devanado. La tensión de voltaje en el aislamiento principal en la línea final del bobinado será el voltaje total de fase a tierra, en nuestro ejemplo anterior: 7967 V; sin embargo por la segunda bobina debajo de la línea, la tensión del aislamiento principal sería:

Voltaje fase-tierra – (voltios/bobina x posición de la bobina) o en nuestro ejemplo:

$$7967V - (379 \text{ V/bobina} * 1) = 7588 \text{ V (primera bobina abajo)}$$

$$7967V - (379 \text{ V/bobina} * 10) = 4173 \text{ V (decimales bobina abajo)}$$

$$7967V - (379 \text{ V/bobina} * 20) = 379 \text{ V (veinteava bobina abajo)}$$

La falla del aislamiento principal es una perforación del aislamiento y llevaría a una parada operacional y la incapacidad para volver a reparar la unidad.

El material primario usado en aislamiento es un material resistente a la descarga parcial llamado mica. La mica es eléctrica y térmicamente durable pero es extremadamente quebradizo; debido a esta característica es necesario proteger a la mica del estrés mecánico impregnando a las cintas con resina orgánica; la resina orgánica proporciona la fuerza mecánica pero puede ser impactado por tensiones eléctricas y térmicas.

A continuación mostraremos diferentes tipos de materiales utilizados como:

a) Aislamiento principal (clase A; 105 °C)

Dado que no tenía mica, este aislamiento era usado en tensiones de hasta 2300 volts. Su transferencia de calor y su capacidad para evitar el ingreso de la humedad y aceite eran deficientes.

b) Micafolium Shellac (clase B; 130 °C)

Este aislamiento se construía colocando hojuelas de mica, sobre papel con resinas shellac o copal. Hojas del tamaño de las partes rectas de las bobinas, envolvían estas partes hasta tener el espesor adecuado. Entonces se curaban en prensas calientes, los cabezales se encintaban con tela cambray barnizada.

c) Cinta de mica con asfalto (clase B; 130 °C)

Este aislamiento se aplicaba, de manera continua a toda la bobina, usando una cinta de material similar al micafolium. Conforme la bobina se encintaba, se aplicaba barniz de asfalto. Después, se impregnaba un proceso de vacío y de presión (VPI).

El mayor problema de este aislamiento, principalmente en núcleos largos, fue su vulnerabilidad a la separación o fractura, a la salida de la ranura, por efecto de expansión diferencial y ciclos térmicos.

d) Cinta de mica con resina poliéster (clase B; 130 °C)

Originalmente, este sistema utilizaba grandes hojuelas de mica sobre fibra de vidrio, y en ocasiones, una tela de fibra de poliéster para poder tensionar la cinta al aplicarla.

Cuando apareció el papel de mica, éste sustituyó a las hojuelas; el aislamiento se aplicaba, de manera continua a toda la bobina, usando cinta de ese material. Después, se impregnaba con resina poliéster usando un proceso de vacío y presión (VPI).

El mayor problema de este aislamiento, fue la baja viscosidad de la resina durante el proceso VPI y la estabilidad de la resina una vez que estaba curada, además en el generador se presentaban temperaturas relativamente altas.

e) Cinta de mica con resina epóxica (clase F; 155 °C)

Similar al sistema con resina poliéster, pero usando en su lugar resina epóxica. Esta última tiene características de cohesión mecánica y estabilidad, a altas temperaturas, superiores a la resina poliéster. Así, el aislamiento es menos susceptible de delaminación y formación de huecos.

f) Cinta de mica con exceso de resina epóxica, también llamada Resin Rich  
(clase F; 155 °C)

La resina sin polimerizar (en estado B) es aplicada en exceso, al momento de fabricar la cinta. Después, la cinta se usa para aislar las bobinas. Finalmente, la resina se polimeriza en prensas calientes. El excedente de la resina se expulsa en este último paso del proceso.

g) Baño y horneado de mica seca con barniz (clase B y F)

Para estatores pequeños de hasta 4 kV, se usa cinta totalmente curada (con resina polimerizada) para construir las bobinas. Después de montarlas en el estator, el conjunto se inunda con barniz adecuado y se hornea.

h) Hule siliconado (clase H; 180 °C)

Este material, resistente a las altas temperaturas, se deposita sobre fibra de vidrio, para fabricar cintas. Su uso como aislamiento principal de bobinas, se limita a tensiones de hasta 4 kV por la ausencia de la mica.

Este material es vulnerable a los daños mecánicos, antes, durante y después de la fabricación de las bobinas.

### 2.3 PROCESO DE FABRICACIÓN

Diferentes fabricantes usan diferentes procesos de fabricación, pero los pasos básicos están sobre el mismo. Los procesos que escogen los fabricantes deberían estar basados en sus especificaciones, su experiencia y capacidad.

Los pasos básicos para la fabricación son los siguientes:

Paso 1: Ate juntas las hebras aisladas.

Paso 2: Aplique el aislamiento a la espira o vuelta (si se usa).

Paso 3: Forme un manojo de bobinas.

Paso 4: Aplique las cintas de aislamiento principal.

Paso 5: Impregnar o presionar la cura.

#### 2.3.1 Procesos de Impregnación

a) Impregnación a presión en vacío (VPI)

Este proceso es usado normalmente en máquinas de núcleos cortos ya que son demasiado grandes para ser impregnados globalmente. El proceso es aplicar papel de mica seca o mica - desdoblada a las bobinas; estas "bobinas verdes" son insertadas en un molde (un molde por bobina) y los moldes son entonces puestos en lotes en un tanque de impregnación, luego en el tanque el vacío es arrastrado para retirar el aire atrapado entre las capas de la cinta, posteriormente una baja

viscosidad epóxica o resina de poliéster (basado en la fabricación) es inyectada en el tanque y el tanque se presuriza, la resina se mantiene a la temperatura apropiada y al nivel de presión adecuado para permitir que la resina fluya entre las capas de cinta de mica, finalmente se aplican calor y presión a las bobinas para curar (reparar) la resina y reducir el tamaño del vacío; este último paso también fija las dimensiones de la porción de la ranura de la bobina estática.

b) Global VPI

Es un proceso de impregnación comúnmente utilizado para núcleos de diámetros pequeños. Como describimos anteriormente en el grupo de procesos VPI, las bobinas están aisladas primero con papel de mica desdoblado, entonces las “bobina verde” son colocadas en las ranuras y se rellenan lateralmente y posteriormente se acuñan. La parte final de los devanados son obstruidos y atados, posteriormente el estator completo se pone en un tanque VPI y a continuación es impregnado y secado en el horno para curarlo (repararlo).

Las ventajas de un estator global VPI son que los costos de fabricación pueden reducirse, el proceso puede ser acelerado, y el producto final es mecánicamente muy bueno. La entereza mecánica es el resultado de acuñar y bloquear o obstruir las bobinas antes del proceso de impregnación; así, la impregnación ayudara a asegurar las bobinas en su lugar e incrementar la estabilidad mecánica del estator.

c) Cintas Cargadas con Resina (Etapa-B o enriquecida con resina)

Algunos fabricantes prefieren usar cintas de papel de mica que se impregnan directamente con una resina epóxica. Sin embargo estas cintas pueden ser utilizadas en cualquier tamaño de bobinas o barras y son usados por varios

fabricantes; estas cintas cargadas con resina epóxica son aplicadas directamente a la bobina y posteriormente son calentadas y colocadas en una prensa; dentro de la prensa las bobinas son calentadas y presionadas para curarlos (repararlos). El calentamiento de la cinta causa que fluya la resina y llene todos los vacíos dentro de las capas de la cinta. El buen control de calidad es para asegurar que haya suficiente resina en la cinta y que esto fluya cuando sea calentado además tenga un punto de buena consistencia “kick over”.

### 2.3.2 Control de Tensión de Voltaje

Además de los materiales de aislamiento, las hebras, las espiras, el aislamiento principal, hay que hacer un control de tensión de voltaje en máquinas de 6 KV e inferiores a dicho nivel de tensión. El propósito del control de tensión de voltaje es crear una uniforme tensión a lo largo del aislamiento en la porción del devanado del estator de hierro y eliminar la descarga parcial (corona) de la superficie que pudiera desarrollar en lugar donde el exterior del aislamiento tiene contacto con el núcleo (ver Figura 2.9).

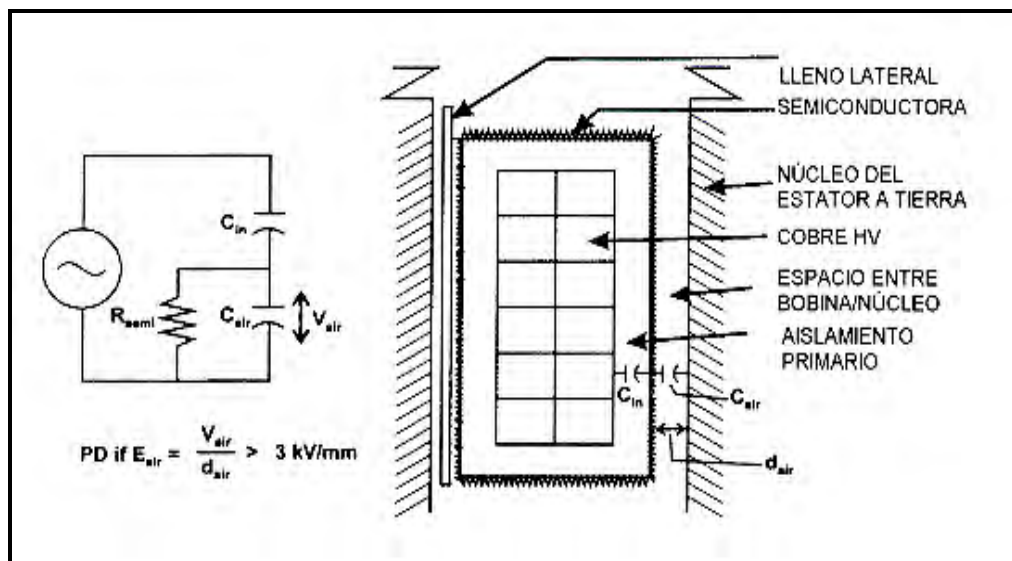


Figura 2.9: Control de tensión de voltaje

Hay dos tipos de materiales que son usados para el control de tensión de voltaje: cintas o pinturas semiconductoras (cargados de carbón) y cintas o pinturas graduadoras (carburo de silicio).

a) Capa semiconductor

Como se observa en la Figura 2.9, muestra una sección de ranura de estator observándose solo la parte de arriba y lateral de la bobina. La bobina es un paquete lateral en la ranura usando un tipo de empaquetamiento lateral semiconductor (nota: los sistemas de aislación más antiguos puede contener un empaque lateral que no es conductor. Por consiguiente los devanados tienen bobinas conectados a tierra eficazmente al estator en un solo lado). Como mostramos la bobina lateral en la figura de arriba, entre el cobre de alto voltaje y el núcleo del estator conectado a tierra, está el aislamiento y un vacío aéreo ( $d_{air}$ ). Note que, originalmente, este vacío aéreo puede haber tenido menos de 0.05 mm (2mils) basado en la mayoría de las especificaciones técnicas de la instalación. Sin embargo, durante el primer año de operación, el aislamiento recientemente aplicado se encoge ligeramente y puede dejar un vacío aéreo más grande. Desde que el aislamiento y el vacío aéreo están entre dos pedazos de metal, forman un capacitor con materiales que tienen diferentes propiedades dieléctricas ( $\epsilon$ ). Cuando el voltaje línea-tierra en CA calculado es aplicado por el capacitor, es dividida la tensión de voltaje por cada dieléctrico, esto basado en sus propiedades dieléctricas y espesor. Un arco o descarga parcial ocurriría si el voltaje a través del vacío aéreo dieléctrico exceda o supera el punto de falla por el aire:

$$E_{air} = V_{air}/d_{air} = 3 \text{ kV/mm}$$

Reducir la tensión de voltaje por el vacío aéreo, con un material semiconductor (cargado de carbón), como pintura o cinta, es usado para rodear la porción de la

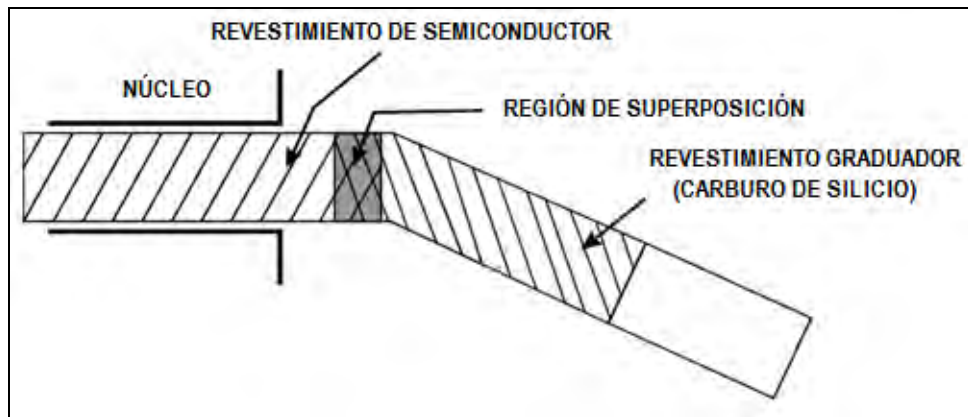
bobina que está dentro de la ranura. Los fabricantes usan este tipo de materiales semiconductivos para cortocircuitar el capacitor por el vacío aéreo, así prevenimos un incremento de voltaje, que pudiera producir una descarga parcial. Con tal que la superficie semiconductora esté intacta y continua, no debe haber oportunidad para tensiones en los espacios entre el hierro estático y la superficie de la bobina que pueden alcanzar niveles que normalmente causan una perforación del aire. Una solida puesta a tierra de la superficie de la bobina asegura una tensión de voltaje uniforme a través del aislamiento principal.

b) Capa Graduadora

El segundo componente para controlar de tensión de voltaje es un carburo de silicio basado en pintura o cinta denominado capa graduadora. En el área final del devanado, la ausencia de una definida puesta a tierra permite que la superficie de la bobina esté al mismo potencial que el conductor. Este es un voltaje fase a tierra calculada para el fin de línea de la bobina. Al borde de la cinta semiconductora justo fuera de la ranura, hay una tensión eléctrica alta ya que este voltaje superficial es de repente conectado a tierra. Para prevenir esto, los fabricantes ponen una capa graduadora en la superficie del sistema de aislamiento principal ligeramente solapando la capa semiconductora y extendiéndose de 7 a 12 cm hacia el área final del devanado como mostramos en la Figura 2.10. La longitud de esta área graduadora es gobernada por el voltaje de diseño del devanado y de las consideraciones técnicas del fabricante.

Este material de carburo de silicio tiene una propiedad resistiva no lineal en la que la resistencia disminuye con la aplicación de voltaje. El propósito de esta capa (sin descargas parciales) es decrecer lentamente el alto voltaje al final del devanado de la capa semiconductora conectada a tierra.





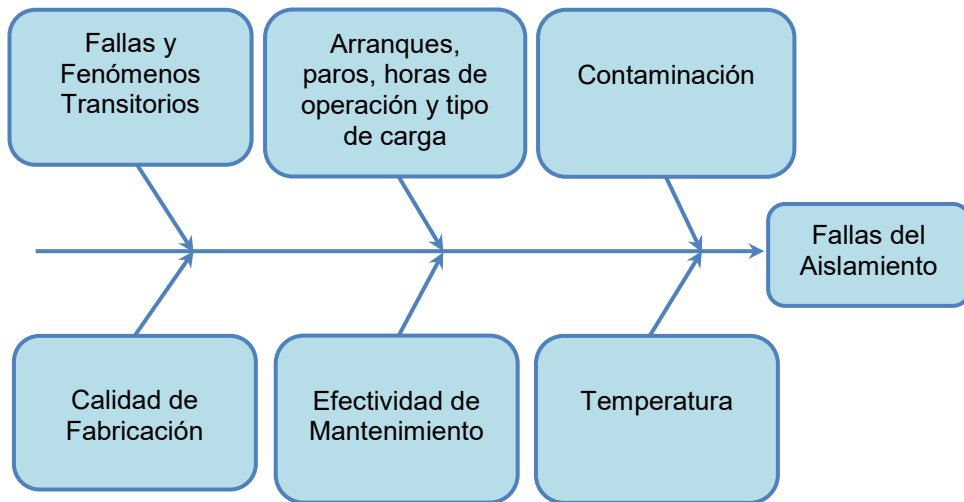
**Figura 2.10:** Localización de la capa graduadora

Este material de carburo de silicio tiene una propiedad resistiva no lineal en la que la resistencia disminuye con la aplicación de voltaje. El propósito de esta capa (sin descargas parciales) es decrecer lentamente el alto voltaje al final del devanado de la capa semiconductor conectada a tierra. Sin ninguna de las dos capas de control de tensión mencionadas, habría tensiones eléctricas severas por algunos puntos relativamente localizados en el arrollamiento. Esas tensiones podrían reducir la expectativa de vida del arrollamiento y por ende producir descargas parciales.

#### **2.4 MECANISMOS DE FALLA (MF)**

El primer paso en la mayoría de los mecanismos de falla, es la creación de vacíos llenos de gas. Estos vacíos son el resultado de la degradación de la resina impregnada. Pueden ser internos al sistema de aislamiento (deterioro térmico, ciclo de carga, impregnación incorrecta) o en la superficie de la bobina (devanado flojo, descarga en las ranuras, deterioro de las cintas o pintura semiconductor/graduadora, contaminación, espaciado inadecuado). Los pulsos de los cabezales y la penetración de un objeto extraño en el aislamiento no producen descargas y por lo tanto no pueden ser detectadas mediante la prueba de descargas parciales.

Cada usuario deberá determinar los factores de mayor impacto para su caso particular, a fin de tomar las acciones correspondientes. Para este propósito se recomienda elaborar el diagrama de causa efecto siguiente.



**Figura 2. 11:** Diagrama causa efecto para fallas de aislamiento

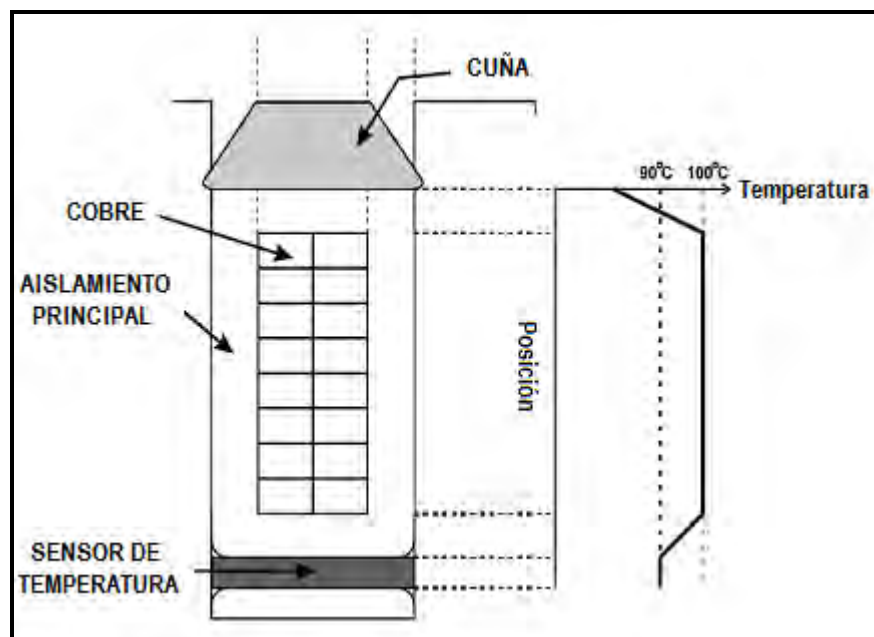
A continuación se describen algunos de los mecanismos de falla que pueden ocurrir en el devanado del estator.

#### 2.4.1 Deterioro Térmico

El deterioro térmico puede ocurrir como resultado de sobrecargas, enfriamiento deficiente, desequilibrio del voltaje entre fases y deficiencias en el diseño. Como en la mayoría de los sistemas de aislamiento, el daño es acumulativo, irreversible y da como resultado la disminución en la capacidad de la resina adherente (epoxi o poliéster) para mantener mecánicamente unidas las capas de aislamiento. Esta pérdida de unión mecánica permite la formación de vacíos entre las capas de cinta que forman el grosor del aislamiento. A medida que las capas de cinta se van deslaminando, los conductores se pueden liberar lo suficiente como para vibrar, creando descargas parciales en los vacíos.

Las Descargas Parciales (DP's), junto con la posible abrasión mecánica, pueden llevar a la producción de cortos entre los subconductores y las vueltas o espiras. La descomposición del aislante por simple recalentamiento térmico puede llevar años, dependiendo de la temperatura y el grosor del aislamiento principal.

El aislamiento normalmente utilizado en máquinas eléctricas rotativas (MER) es clase F, esto significa que puede operar 20.000 horas a 155 °C. Teóricamente, ese tiempo se duplica cada vez que la temperatura baja diez grados, y no existen otros agentes dañinos, tales como contaminación o vibración.



**Figura 2. 12:** Sensores RTD

En realidad, las MER operan a temperaturas promedio de entre 90 y 100°C, medidas con sensores RTD (temperatura). Sin embargo algunos puntos en sus devanados pueden tener temperaturas sustancialmente mayores a esos promedios, esto depende del grado de limpieza de devanados y núcleo, el estado y desempeño del sistema de ventilación y enfriamiento y el tipo de carga de la MER.

**Tabla N° 2. 1:** Indicadores relevantes por deterioro térmico

<b>Mecanismo de falla</b>	<b>Síntomas</b>	<b>Pruebas de detección</b>	<b>Tipos de aislamiento</b>
<b>Deterioro térmico</b>	Descargas parciales, descoloración del aislamiento	DP, inspección visual, tg $\delta$ , factor de potencia	Mica asfáltica

#### 2.4.2 Ciclaje de Carga

El impacto negativo de los cambios frecuentes en las cargas de la máquina, causan tensiones cíclicas de corta duración sobre el aislamiento debido a los diferentes coeficientes lineales de expansión térmica en los materiales del devanado del estator. Como el cobre se expande con el aumento de temperatura (debido a las pérdidas  $I^2R$ ), el aislamiento que está pegado al cobre y apretado firmemente entre el conductor y el núcleo, no se puede expandir debido a un coeficiente más bajo de expansión térmica y más baja temperatura. Las tensiones repetitivas debidas a cambios repentinos en la carga, fatigan la unión mecánica entre el aislamiento principal y el aislamiento de los subconductores o de las espirales, causando que la unión eventualmente se debilite y se rompa. Esto se observa principalmente en máquinas de núcleos largos, máquinas con bobinas o barras de estator más largas de 2 m. Las turbinas a gas y unidades de almacenaje y bombeo, por su forma de operación, son susceptibles a este tipo de deterioro en el aislamiento. Los motores son los que probablemente sufren el peor daño debido al ciclaje de carga porque están sujetos a arrancar y parar de forma repetitiva.

El ciclaje de carga causa movimiento del aislamiento principal de la bobina o barra

del estator con respecto al hierro del estator, sobre un largo período de tiempo, estos pequeños movimientos pueden dañar las áreas de la superficie semiconductiva del devanado.

**Tabla N° 2. 2:** Indicadores relevantes por ciclaje de carga

Mecanismo de falla	Síntomas	Pruebas de detección	Tipos de aislamiento
Ciclaje de carga	Descargas parciales	DP, inspección visual, tg $\delta$ , factor de potencia	Mica asfáltica

#### 2.4.2 Impregnación Defectuosa

Algunas veces durante el proceso de impregnación, inadvertidamente se dejan vacíos dentro del aislamiento principal. Esto puede ocurrir debido a un vacío o presión inadecuados, viscosidad muy alta de la resina, temperaturas inadecuadas, u objetos extraños encajados en las cintas. En la presencia de tensión de voltaje, ocurrirán descargas parciales a través de estos vacíos y atacarán a la resina orgánica. Este ataque puede conducir a cortos en las hebras o espiras si los vacíos están cerca de los conductores de cobre y eventualmente dentro de los 2 a 5 años puede ocurrir la falla del devanado multi-espiras. Si los vacíos están en el centro del grosor del aislamiento principal, son más benignos y de menor magnitud, por lo tanto la falla puede tomar muchos años en manifestarse. Un problema adicional debido a la impregnación deficiente es que los vacíos internos crean una barrera térmica, inhibiendo la transferencia de calor desde el cobre al núcleo dando como resultado una más alta tensión térmica. Debido a las complejidades presentes durante el proceso de impregnación, la aplicación deficiente se da más en

estatores impregnados con el sistema VPI global o en bobinas ricas en resinas fabricadas usando cintas viejas.

**Tabla N° 2. 3:** Indicadores relevantes por impregnación defectuosa

<b>Mecanismo de falla</b>	<b>Síntomas</b>	<b>Pruebas de detección</b>	<b>Tipos de aislamiento</b>
<b>Impregnación defectuosa</b>	Descargas parciales	DP, tg $\delta$ , factor de potencia	Globales VPI– bobinas cargados de resina.

#### **2.4.4 Bobinados Flojos**

Si están instalados apropiadamente, las cuñas y el empaque lateral deberían prevenir aflojamientos en el devanado. Sin embargo, como algunas resinas del aislamiento se contraen cuando se curan, las bobinas pueden achicarse y por lo tanto quedar flojas en la ranuras. También parte de las cuñas y materiales de empaque pueden volverse quebradizos y achicarse con el paso del tiempo, permitiendo que el bobinado se afloje. En presencia de aceite, el empaque lateral y los resortes ondulados se aflojarán más rápido debido al medio lubricante.

Si las bobinas están flojas, esta flojedad rápidamente permitirá que la dura superficie del núcleo laminado del estator dañe las capas que recubren la superficie del devanado. Las superficies dañadas de la bobina crean discontinuidades en la superficie, permitiendo la creación de tensiones de voltaje a través de estos lugares aislados, o entre estos y el hierro del estator. Si la tensión del voltaje excede el punto de ruptura eléctrica del medio gaseoso, ocurrirá una descarga. Eventualmente se producirá un efecto escalera donde el aislamiento principal será más delgado en el punto de contacto con el núcleo, pero mantendrá el grosor

normal en las ventilas de aire del núcleo. Aunque el tiempo absoluto entre la detección de la flojedad y la falla no es conocido, puede ser tan corto como dos años en muchos devanados (duros) termoestables, especialmente en aquellos con alta tensión eléctrica a través del aislamiento principal.

**Tabla N° 2. 4:** Indicadores relevantes por bobinados flojos

<b>Mecanismo de falla</b>	<b>Síntomas</b>	<b>Pruebas de detección</b>	<b>Tipos de aislamiento</b>
<b>Bobinados flojos</b>	Descargas parciales, descarga en ranuras, ozono, cuñas sueltas	DP, inspección visual, golpe ligero de cuña, ozono.	Sistemas epóxicos y polyester.

#### **2.4.5 Descarga Eléctrica en la Ranura**

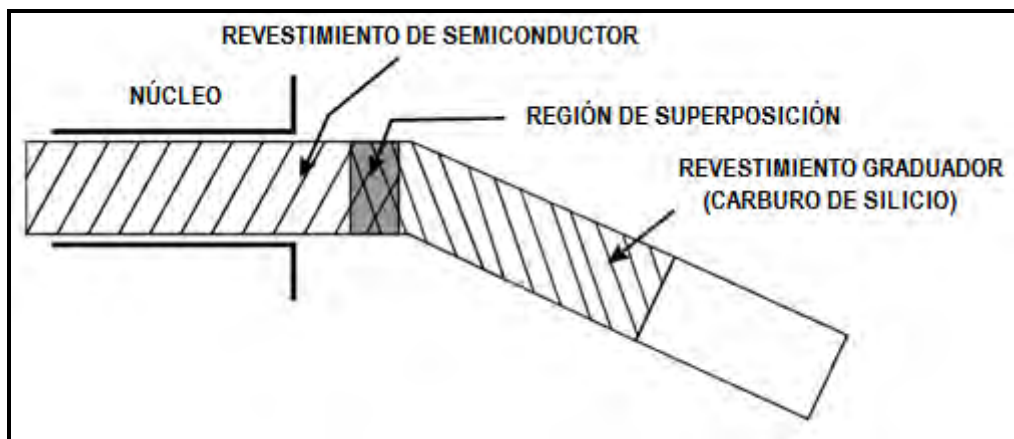
Descarga de ranura es el término dado a las descargas que ocurren entre la superficie de la bobina y el hierro del estator. Si la capa semiconductora en la superficie del bobinado se deteriora, da como resultado la creación de descargas eléctricas en la ranura (DP) y la producción de ozono. Tanto las Descargas parciales como el ozono acelerarán la descomposición de las resinas orgánicas adherentes epoxi o poliéster. Debido a esta descomposición de las resinas, las bobinas disminuirán de tamaño y pueden aflojarse. Si se permite que se aflojen, las superficies semiconductoras de las bobinas son las primeras en dañarse dando como resultado áreas de alta tensión eléctrica. Si la cubierta semiconductora está fabricada deficientemente, especialmente si se utilizó pintura, puede volverse no conductora a altas temperaturas y dar como resultado alta tensión eléctrica. Sin embargo, mientras las bobinas se mantengan fijas en las ranuras, la falla causada por ruptura eléctrica puede tomar décadas. Por eso, las máquinas con daños menores en las superficies de las bobinas pueden todavía dar muchos años de

operación confiable, siempre y cuando se evite el movimiento mediante el cambio de las cuñas dañadas. Una vez dañadas, las superficies semiconductoras son muy difíciles de restaurar, por lo tanto la prevención es lo más importante de todo. Los devanados con cintas o pintura semiconductoras severamente dañadas, requerirán su reemplazo debido a la gran producción de ozono. La descarga en las ranuras ocurre primariamente en máquinas enfriadas con aire.

**Tabla N° 2. 5:** Indicadores relevantes por descarga eléctrica en ranuras

Mecanismo de falla	Síntomas	Pruebas de detección	Tipos de aislamiento
Descarga eléctrica en la ranura	Descargas parciales, descarga en ranuras, ozono.	DP, inspección visual.	Enfriadas con aire.

#### 2.4.6 Interface de Tensión de Voltaje



**Figura 2. 13:** Capa protectora para control de tensión

A fin de controlar adecuadamente la tensión de voltaje de un devanado la interface entre las capas semiconductoras y graduante deben ser eficientes (ver Figura 2.13). Debido a las altas tensiones eléctricas y a las temperaturas, esta interface puede



deteriorarse con el paso del tiempo, especialmente con pinturas que controlen la tensión de voltaje. Como resultado de este deterioro la graduación de la capa graduante pierde contacto a tierra, flota a un voltaje más alto y hace chispa a través de la interface a tierra. En máquinas enfriadas con aire, esto producirá ozono y dejará una banda blanca de residuo en las salidas de las ranuras. Esa banda se ve claramente cuando se inspeccionan las máquinas. El daño en el aislamiento en este tipo de deterioro es muy lento ya que las Descargas parciales tienen lugar entre dos puntos de la superficie de la bobina.

**Tabla N° 2. 6:** Indicadores relevantes por interfase de tensión de voltaje

<b>Mecanismo de falla</b>	<b>Síntomas</b>	<b>Pruebas de detección</b>	<b>Tipos de aislamiento</b>
<b>Interfase semiconductor a/gradiente</b>	Descargas parciales, polvo blanco, ozono.	DP, inspección visual, tg $\delta$ , factor de potencia	Enfriadas con aire, con pinturas de control de tensión

#### **2.4.7 Contaminación de los cabezales**

Cuando cualquier clase de contaminación conductiva ya sea de humedad o aceite mezclado con polvo/suciedad contamina una máquina, es posible que se cree un conducto o senda eléctrica a través de los bloques de montaje de los cabezales o a lo largo de los cabezales mismos. El camino eléctrico se debe a que la contaminación introduce una senda conductiva entre dos bobinas adyacentes de diferente potencial y muy a menudo de diferentes fases. Como resultado de este fenómeno, descargas parciales pueden ocurrir y atacar la superficie del aislamiento. Puede ocurrir un deterioro permanente de fase a fase o de fase a tierra y eventualmente la falla del aislamiento puede ser posible. La condensación de la humedad en la sección de la ranura puede provocar problemas si la máquina ha

estado parada. El aceite tiende a disolverse, aflojar los componentes del sistema de aislamiento y puede atraer polvo que reduce la transferencia de calor desde la superficie bobinada, reduciendo por lo tanto la vida del aislamiento. En máquinas abiertas, el aceite, en combinación con el polvo, puede tapar los pasos de aire y causar sobrecalentamiento. Normalmente este es un mecanismo de falla muy lento (un período de tiempo mayor de 5 a 10 años), pero puede ocurrir en una proporción más rápida en diseños de devanados con una tensión de voltaje mayor que 3 kV/mm.

#### **2.4.8 Vibración del Cabezal**

Para encontrar las condiciones eléctricas requeridas en máquinas de clase alto voltaje, los fabricantes tienen que diseñar la máquina con largos cabezales. Estos cabezales están sujetos para fuerzas magnéticas fuertes que pueden causar vibración en máquinas diseñadas deficientemente.

Esta vibración puede eventualmente llevar a crujidos en un futuro en los conductores de cobre y a un recalentamiento local. Los efectos de la vibración de los cabezales son la abrasión en el bloque de montaje y la soldadura de los bobinados en la ranura. Si la vibración de los cabezales es sospechosa, deberá de utilizarse un acelerómetro para determinar su severidad. La inspección visual del bloque puede indicar el movimiento en los cabezales. La vibración del bobinado desgasta a menudo el aislamiento del bloque de montaje y la posición de las ataduras, apareciendo con mayor frecuencia un polvo blanco a causa de los materiales utilizados, este polvo no debe confundirse con la presencia de descargas parciales. Una inspección visual muy completa confirmara la causa real si la descarga parcial no ha sido detectada.

**Tabla N° 2. 7:** Indicadores relevantes por vibración de cabezal

<b>Mecanismo de falla</b>	<b>Síntomas</b>	<b>Pruebas de detección</b>	<b>Tipos de aislamiento</b>
<b>Vibración de cabezales</b>	Bloque de bobinas suelto, polvo blanco.	Acelerómetro, inspección visual	De alto voltaje con brazos finales largos

#### **2.4.9 Espaciado Inadecuado entre Bobinas**

A fin de reducir el tamaño de las bobinas/barras y ahorrar cobre o reducir pérdidas, los fabricantes ocasionalmente fallan en dejar el espaciado adecuado entre las bobinas en los cabezales del devanado o en los buses anillo. Si usted tiene dos componentes adyacentes de diferentes fases e insuficiente espaciado entre ellos, es casi seguro que ocurrirá una actividad de descarga parcial entre los dos. En máquinas enfriadas con aire esto dejará como residuo un polvo blanco. Estas descargas erosionarán lentamente el aislamiento y eventualmente la pincharán. Cuanto más cerca estén las bobinas o los componentes más rápido se producirá la falla. Generalmente estas fallas de fase a fase toman años en desarrollarse, pero producen grandes cantidades de ozono en máquinas enfriadas por aire. La combinación de espacio inadecuado y ambiente de operación contaminado puede proveer un terreno fértil para la actividad de descarga parcial.

**Tabla N° 2. 8:** Indicadores relevantes por espacio inadecuado

<b>Mecanismo de falla</b>	<b>Síntomas</b>	<b>Pruebas de detección</b>	<b>Tipos de aislamiento</b>
<b>Espacio inadecuado</b>	Descargas parciales, polvo blanco, ozono.	DP, inspección visual.	Enfriadas con aire.

#### **2.4.10 Calidad en la fabricación original**

El diseño y procesos empleados en la fabricación original del aislamiento, pueden tener una relación causa efecto con su falla. El uso de altos gradientes de tensión y el acomodo del conjunto núcleo-bobinas, en un volumen pequeño, facilitan la generación de DP's; ambas decisiones de diseño conducen a una alta probabilidad de falla del aislamiento.

Huecos entre costados de bobinas y laminaciones del núcleo, producidos por una VPI global, o huecos en el aislamiento principal, también conducen a la generación de DP's.

#### **2.4.11 Fallas y fenómenos transitorios**

Los cortos, rechazos de carga, sincronizaciones fuera de fase y fenómenos resonantes de alta frecuencia, dan lugar a corrientes muy altas, que imponen grandes fuerzas sobre las bobinas. Estas fuerzas afectan principalmente la sujeción del devanado; sus efectos en los cabezales son: ruptura o aflojamiento de amarres, fisuras o fracturas del aislamiento, deformación de bobinas, entre otros.

Sus efectos en las ranuras del núcleo son: agotamiento del relleno ondulado, aflojamiento de cuñas, frotamientos de costados de bobinas con laminación del núcleo, pérdida de pintura o cinta graduadora, entre otros.

## **CAPÍTULO III**

### **TEORÍA BÁSICA DE DESCARGAS PARCIALES**

#### **3.1 DESCARGA PARCIAL COMO UN SÍNTOMA**

Tratar de evitar que los motores, generadores, transformadores y dispositivos de conmutación no fallen hace que usted conserve su empleo, siempre y cuando lo logre con éxito. Todo lo que usted debe hacer es descubrir la manera de detectar que está ocurriendo una falla en el mecanismo y cuán importante o urgente es el problema. Las descargas parciales (DP) son un síntoma de varios problemas causados por tensiones térmicas, mecánicas (vibración y choque), eléctricos (voltaje), del medio ambiente y químicas. Muy rara vez ocurre un sólo factor aislado, es decir que estas tensiones se combinan para provocar muy diversos procesos de deterioro. Con el aumento en los niveles de tensión, la tasa de envejecimiento aumenta. Monitorear las descargas parciales puede ser una adición útil a los procedimientos de prueba e inspección de cualquier empresa. Las descargas parciales no son solo un síntoma, sino que daña las resinas orgánicas en los materiales aislantes. Afortunadamente, la mayoría de los sistemas de aislación del devanado del estator para máquinas de más de 2300 V contienen un material resistente a las descargas llamado mica, por lo tanto la degradación de la aislación es usualmente lenta. A causa de este lento proceso de envejecimiento tiene sentido realizar monitoreos periódicos de la actividad de descargas parciales.

La regla empírica respecto al lapso de tiempo entre la detección de las descargas parciales y el daño debido a falla en el mecanismo es:

- ✓ 10 años para máquinas > 18kV.
- ✓ 5 años para máquinas de 13.8kV.
- ✓ 2-3 años para máquinas de 6kV.
- ✓ Varios meses para máquinas de 4kV.

### **3.2 CONCEPTO DE DESCARGA PARCIAL**

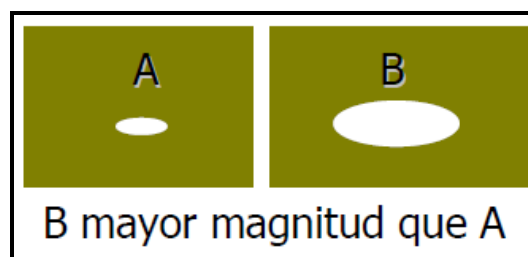
Una descarga parcial (DP) de acuerdo a la definición de la IEEE, es una descarga eléctrica o chispa que puentea (cortocircuita) solo parcialmente el aislamiento de un conductor. Es decir la chispa se produce entre el conductor y el aislamiento y no termina de descargarse hacia otro elemento conductor, de ahí el término "Parcial", esto indica que no hay una ruptura del aislamiento, pues el resto del sistema aislante puede seguir cumpliendo su función. Esto está en contraste con una descarga llena que mide el hueco entre dos conductores, llamado de otra manera falla de aislamiento.

### **3.3 UNIDADES DE MEDIDA DE DESCARGAS PARCIALES**

Los pulsos DP se registran junto con sus diferentes parámetros de pulsos, como son: magnitud, pulsos por segundo, fase y polaridad. No existe una unidad de medida específica para las descargas parciales, que como se sabe son pequeños pulsos de corriente eléctrica dentro del sistema aislante, sin embargo existen ciertas unidades de medida que toman en cuenta los parámetros de las DP, las cuales han ayudado mucho a la hora de presentar datos y describir patrones gráficos.

### 3.3.1 Magnitud

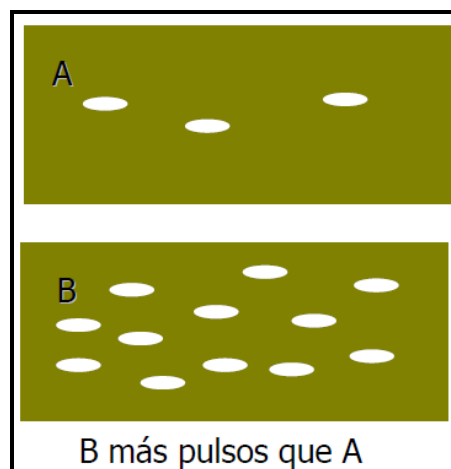
La magnitud de una DP está estrechamente ligada con el tamaño de los agujeros o lo que es lo mismo a la gravedad del daño del sistema aislante, esto quiere decir que a mayor magnitud de DP, mayor es el tamaño de los agujeros en el sistema aislante. La unidad de medida más aplicable para la magnitud de DP es el “Mili voltio (mV)”. La Figura 3.1 trata de explicar mejor este concepto.



**Figura 3. 1:** Magnitud de pulso de descarga parcial

### 3.3.2 Pulsos por Segundo (PPS)

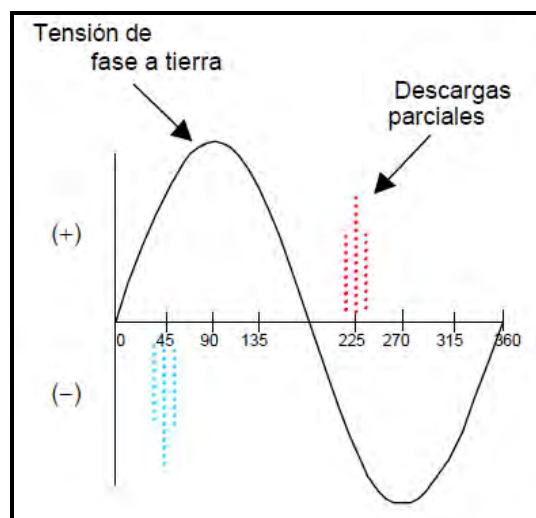
Esta unidad está directamente relacionada con la cantidad de agujeros o lo que es lo mismo, con la extensión del daño dentro del sistema aislante, representa el conteo de pulsos en la unidad de tiempo, ver Figura 3.2.



**Figura 3. 2:** Cantidad de pulsos de descarga parcial

### 3.3.3 Polaridad Ángulo Fase

Esta medida tiene relación directa con la ubicación de los agujeros, es decir, el tipo de daño. Respecto a la tensión de la red los pulsos DP que se agrupan durante el semiciclo positivo de la tensión son de polaridad negativa y las DP originadas en el semiciclo negativo, son de polaridad positiva, ver Figura 3.3.



**Figura 3. 3:** Polaridad de la descarga parcial

### 3.4 FORMACIÓN DE HUECOS

El primer paso de la mayoría de los mecanismos de falla es la creación de huecos llenos de gas tal como se muestra en la Figura 3.4. Estos vacíos son el resultado de la degradación de la resina impregnada, y puede estar interno al sistema de aislamiento (deterioro térmico, ciclaje de carga, impregnación inapropiada) o en la superficie del bobinado (bobinas sueltas, deterioro semiconductor o gradiente, contaminación, espaciado inadecuado). La vibración de los cabezales y la penetración del objeto por un objeto extraño no desarrollan vacíos en tal sentido; estos dos mecanismos no pueden ser detectados mediante una prueba de descarga parcial.



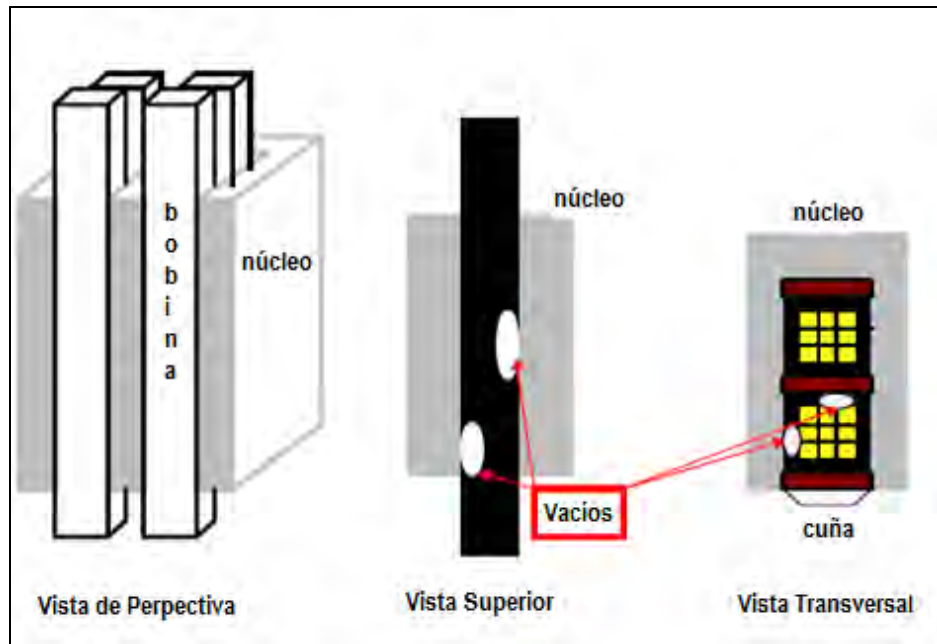


Figura 3. 4: Localización de cavidades

### 3.5 DESCARGAS ELÉCTRICAS

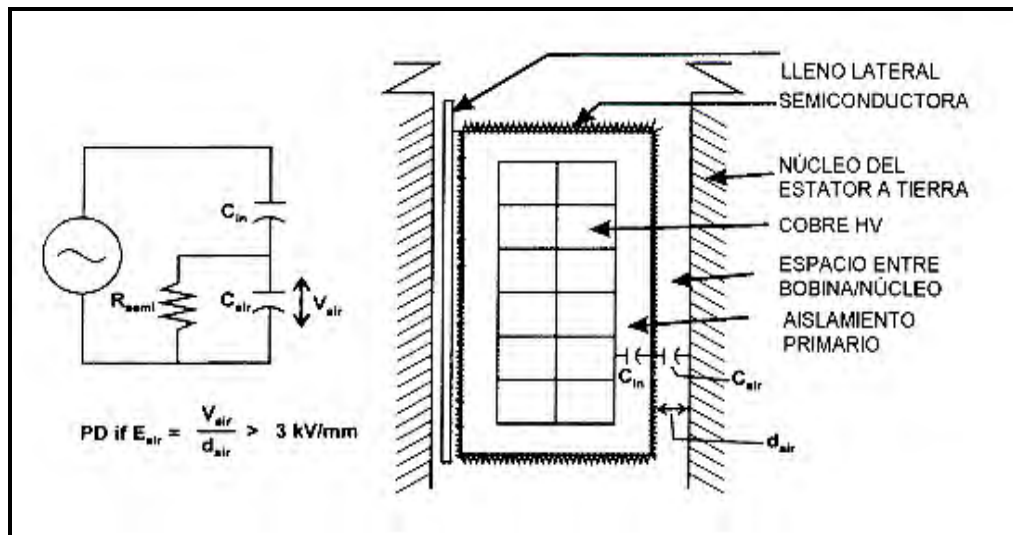


Figura 3. 5: Tensión Eléctrica en un Vacío entre bobina y núcleo

Una vez que se crea un vacío en la masa o en la superficie del aislamiento, se creará una diferencia de potencial a través de ese vacío. La magnitud de ese voltaje dependerá del voltaje aplicado, de la capacitancia del aislamiento y del tipo de gas

en el vacío; examinemos el siguiente criterio:

- ✓ Un aislamiento impregnado con resina epóxica de 5mm de espesor.
- ✓ Una máquina de 13.8 kV, refrigerado con aire.
- ✓ Un hueco aéreo vacío de 0,5 mm de espesor.

El voltaje que se desarrollaría a través del hueco (o vacío) se modelan en la Figura 3.5.

$$\text{Capacitancia (C)} = \frac{\epsilon A}{d} \text{ donde } \epsilon = \epsilon_0 * \epsilon_r$$

Para la resina epóxica,  $\epsilon_r$  es aproximadamente 4.

Así la capacitancia del aislamiento  $C_{\text{ais}} = 4 \epsilon_0 A / d_{\text{air}}$  y la capacitancia del vacío lleno de aire  $C_{\text{air}} = \epsilon_0 A / d_{\text{air}}$ .

Ahora, desde que el voltaje divide a través de circuito basado en el efecto divisor del voltaje capacitivo, de la teoría del circuito.

$$V_{\text{air}} = \frac{C_{\text{ais}}}{C_{\text{ais}} + C_{\text{air}}} * V_{\text{aplicado}}$$

$$\text{Sustituyendo } V_{\text{air}} = \frac{4 \epsilon A / d_{\text{ais}}}{4 \epsilon A / d_{\text{ais}} + \epsilon A / d_{\text{air}}} * V_{\text{aplicado}}$$

Si asumimos que el área de la sección cruzada del aislamiento es igual al del vacío, por cancelación:

$$V_{\text{air}} = \frac{4 / d_{\text{ais}}}{4 / d_{\text{ais}} + 1 / d_{\text{air}}} * V_{\text{aplicado}}$$

Para nuestro ejemplo:  $d_{\text{ais}} = 5\text{mm} - 0,5\text{mm} = 4,5\text{mm}$  y  $d_{\text{air}} = 0,5\text{mm}$ , y aplicando el voltaje es  $13,8 \text{ kV} / \sqrt{3} = 7962\text{V}$ , así:

$$V_{air} = \frac{4 / 4,5\text{mm}}{4/4,5\text{mm} + 1/0,5\text{mm}} * 7962\text{V} = 2450\text{V a través del vacío.}$$

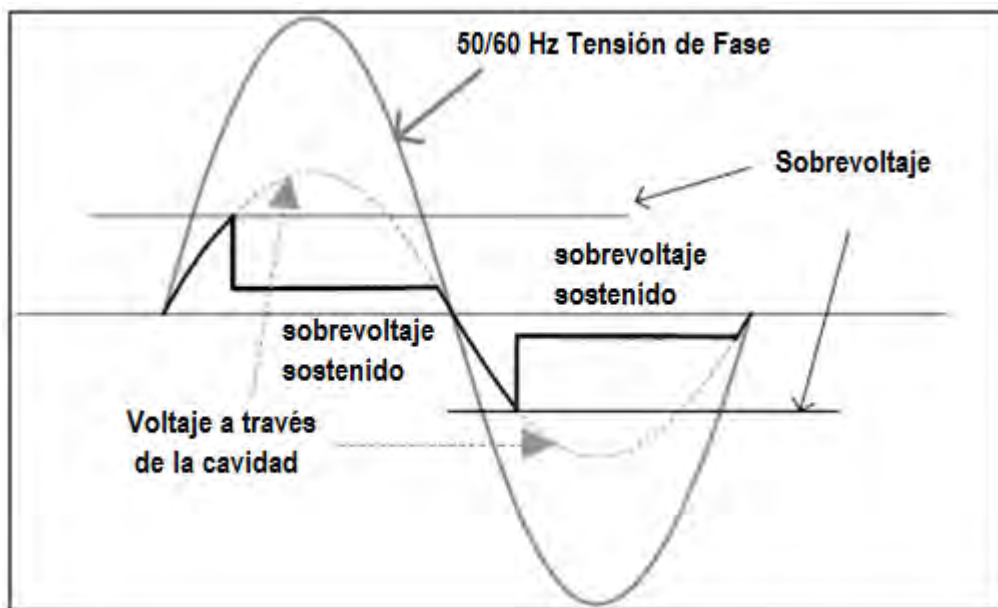
Una descarga solo puede ocurrir cuando la tensión eléctrica (V/mm) excede el punto de ruptura eléctrica para el gas en el vacío, basado en la ley de Paschen, eso es 3kV/mm para el aire y superior para el hidrógeno; en nuestro ejemplo la tensión eléctrica fue  $2450\text{V} / 0.5\text{mm} = 4,9 \text{ kV} / \text{mm}$  así el punto de ruptura eléctrica presurizada podría ocurrir en este caso.

Otros problemas además del tamaño del hueco, que puede afectar la tensión eléctrica en un vacío son: diámetro, el gas interno y presión, y la naturaleza de la superficie en el vacío. El producto de la separación del vacío y la presión del gas establecen el voltaje necesario para producir una descarga, por ejemplo voltaje de ruptura.

### **3.5.1 Propiedades Físicas de las Descargas Parciales**

Cuando la aplicación de 50/60Hz aumenta sinusoidalmente, la aparente tensión eléctrica a través del vacío aumenta hasta que alcanza 3kV/mm o el equivalente al voltaje de ruptura en el vacío. El sobre voltaje es el estado en el cual el voltaje a través de un vacío excede el voltaje de ruptura requerido para el tamaño del vacío y el gas. Cuanto más grande es el sobre voltaje, más intensos los efectos de carga espacial en el vacío. Aunque el vacío puede estar en un estado de sobre voltaje, la ruptura no ocurrirá hasta que un electrón libre (debido a la radiación cósmica o natural) aparece dentro del hueco y desencadena una avalancha de electrones. Esta avalancha es un flujo de electrones a través del hueco que crea un pulso de corriente de elevación (unos pocos nanosegundos) muy rápida, llamado descarga parcial (DP).

La dependencia en los electrones libres para que una descarga parcial se establezca hace la ocurrencia de descargas parciales un evento estadístico y por lo tanto no previsible. Una vez que se produce la ruptura, el voltaje a través del hueco colapsa a un voltaje de nivel suficiente para mantener la descarga. La mayoría de los instrumentos sólo detectan el pulso inicial de ruptura. No ocurrirán más descargas detectables hasta que el voltaje del vacío se haya revertido en polaridad y se haya establecido otra condición de sobrevoltaje. Por lo tanto, (como se muestra en la Figura 3.6) por cada vacío habrá una Descarga Parcial detectable ocurriendo dos veces en un ciclo de Corriente Alterna.



**Figura 3. 6:** Ocurrencia de las descargas parciales

### 3.5.2 Dependencia del Voltaje

La chispa (descarga parcial) no solamente es una indicación de que existe un vacío lleno de gas, y que un síntoma de deterioro existe, sino que también rompe las uniones de carbono de las resinas orgánicas y acelera el envejecimiento. Dado que la magnitud de la tensión de voltaje a través del vacío depende del voltaje aplicado,

muchas descargas parciales sólo ocurren en bobinas de alto voltaje (final de línea). Las bobinas de final neutral no tienen la suficiente tensión de voltaje a tierra para exceder el punto eléctrico de ruptura del aire o el hidrógeno. Algunos vacíos no producen un pulso de chispa, pero en su lugar tienen características de luminosidad y semi-luminosidad. Los detectores de vacíos parciales más convencionales no detectan esta actividad. El modelo mostrado en la Figura 3.5 es un modelo extremadamente simplista; la frecuencia y magnitud de la descarga en un vacío es un fenómeno complejo que depende del tamaño, forma, presión interna del gas, y naturaleza de la superficie del vacío.

### **3.5.3 Forma del Pulso**

El Pulso de una descarga parcial es unipolar con un tiempo rápido de elevación y una corta amplitud de Pulso. El período de oscilación, los tiempos de elevación y las magnitudes de los subsecuentes picos varían para cada pulso. Estos dependen de la geometría de la máquina, la ubicación del pulso y los materiales de aislamiento. Como las descargas parciales son efectivamente pulsos, producirán energía a través del espectro de frecuencia desde Hz a GHz. Además de los pulsos que producen chispas, hay también otros menos detectables en frecuencias más lentas provenientes de las colas iónicas. Por lo tanto, es posible detectar actividad de descarga parcial a través de varias bandas de frecuencia con ventajas y desventajas para cada una. También significa que ningún instrumento puede detectar toda la energía disipada debido a las descargas parciales.

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

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

Por ejemplo, un pulso con un tiempo de elevación de 3ns tendría un periodo  $T = 4 * 3ns = 12ns$ , y una frecuencia,  $f = 1/T = 1/12ns = 83MHz$ .

De esta manera, el rango de elevación de 1-5ns corresponde al rango de frecuencia de 50-250MHz.

#### 3.5.4 Recorrido del Pulso

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

##### a) Transmisión

El método más ampliamente entendido y predecible para que un pulso viaje es mediante la transmisión a través de los conductores de cobre, similar a la señal de potencia de 50/60Hz. Cuando los pulsos de alta frecuencia viajan como ondas de transmisión, sufren severas distorsiones debido a la inductancia de las bobinas. La inductancia de las bobinas del estator, que es una característica normal y necesaria para la producción eléctrica, es una propiedad que desarrolla un campo electromagnético cuando impide cambios repentinos en la corriente. Aunque esto tiene un efecto positivo en la señal de potencia de baja frecuencia de 50/60Hz, disminuye los pulsos de alta frecuencia (50-250MHz) de descargas parciales. La distorsión es atenuación de la señal e incremento de los tiempos de elevación (reacción a más baja frecuencia). De hecho los pulsos se distorsionan al punto tal de no poder ser reconocidos como descargas parciales de alta frecuencia, luego de atravesar sólo algunas bobinas.

A pesar de este fenómeno hay dos condiciones que hacen posible la detección de la descarga parcial: primero, que el envejecimiento (por ejemplo el desarrollo de mecanismos de falla) normalmente afecta en alguna medida a todas las bobinas; y segundo que las descargas parciales sólo pueden ocurrir cuando hay suficiente voltaje a tierra para causar una ruptura eléctrica del aire en el vacío. Este último aspecto sólo ocurre en bobinas de alto voltaje (bobinas de final de línea). De esta manera la detección de descargas parciales en las bobinas de alto voltaje, seguramente detectarán el envejecimiento típico y hallarán las bobinas de más riesgo, por ejemplo las bobinas de alto voltaje. Lo que no puede detectarse a causa de estas características de distorsión es un defecto excepcional en una bobina de bajo voltaje.

b) Acoplamiento Capacitivo

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

La magnitud del acoplamiento capacitivo depende de: el grosor del aislamiento, el espacio de separación y la integridad de la resina orgánica; todos los cuales cambian constantemente con la temperatura, humedad y carga. De manera tal que aunque nosotros sepamos que el acoplamiento capacitivo ocurre y podemos detectarlo, no es posible predecir como un pulso puede acoplarse capacitivamente

a través del devanado. Sin embargo, una vez que el comportamiento se establece a través de pruebas empíricas, éste puede ser monitoreado.

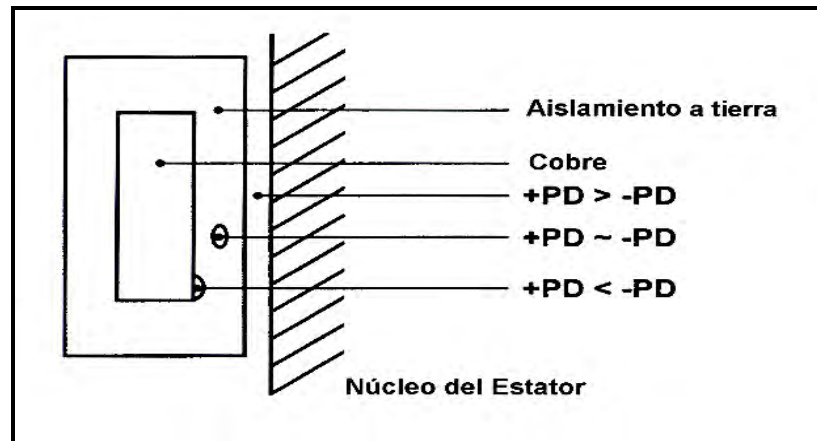
c) Radiación

El último método que discutiremos mediante el cual viajan los pulsos, es la radiación: que ocurre cuando un pulso de alta frecuencia crea una onda que viaja a través de un medio. Este es el mismo fenómeno observado cuando escuchamos estática en nuestra radio porque pasamos por debajo de una línea de energía. A causa de esta característica, una antena de radio-frecuencia ubicada en cercana proximidad de una descarga parcial que tenga corona, detectará el disturbio. La dificultad de usar este método para monitorear descargas parciales es que, como en la transmisión, el pulso se distorsiona muy rápidamente, perdiendo su identidad como descarga parcial de alta frecuencia. De manera que, a fin de asegurarnos que es la chispa de un vacío, usted tendría todavía que monitorear a altas frecuencias y muy cerca de la fuente de descargas parciales, que son las bobinas de alto voltaje.

### **3.5.5 Polaridad del Pulso**

Modelar las características actuales de una descarga es difícil ya que las dimensiones del vacío, el gas y la presión del vacío, la inductancia, capacitancia, geometría, entre otros temas pueden afectar la magnitud y frecuencia del pulso. Sin embargo, hay algunas características básicas del pulso, que pueden ser predecidas basadas en la ubicación del vacío como se muestra en la Figura 3.7.



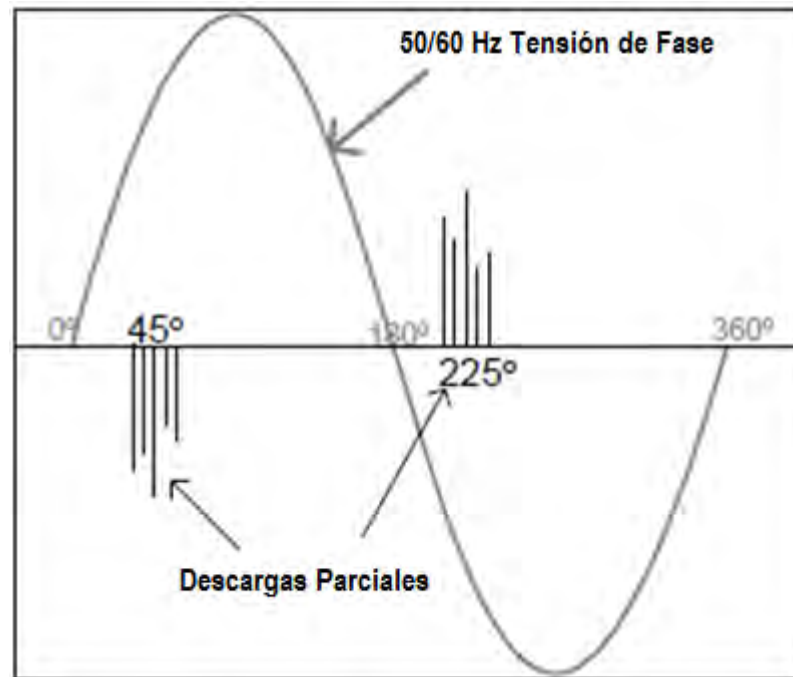


**Figura 3.7:** Polaridad del pulso basada en la ubicación del vacío

a) Vacíos dentro del volumen de Aislamiento

Las máquinas que no han sido impregnadas apropiadamente o que han estado funcionando por varios años a altas temperaturas tienden a desarrollar vacíos dentro del aislamiento. Como se describió anteriormente, descargas parciales ocurrirán a través de ese vacío cuando la condición de sobrevoltaje exista y un electrón libre esté presente. Una vez que ocurre la descarga parcial, el voltaje a través del hueco se estabiliza al nivel requerido para mantener la actividad de descarga. Durante este proceso, las cargas dentro del vacío se redistribuirán de acuerdo a la carga aplicada. Como el ciclo de Corriente Alterna revierte la polaridad, estas cargas causarán otra condición de sobrevoltaje en la polaridad opuesta y entonces ocurrirá otra descarga parcial. Si ambos lados del vacío tienen materiales similares de aislamiento, entonces la distribución de la carga será igual durante los ciclos positivo y negativo. En teoría, como se muestra en la Figura 3.8 habrá dos pulsos de descargas parciales observables en cada ciclo de Corriente Alterna de igual magnitud y polaridad opuesta por vacío dentro de la masa del aislamiento. Estos pulsos se agrupan en las posiciones clásicas de pulsos

dependientes de fase a tierra, esto es, pulsos negativos a  $45^\circ$  y pulsos positivos a  $225^\circ$  con referencia al voltaje fase-tierra de 50/60Hz.

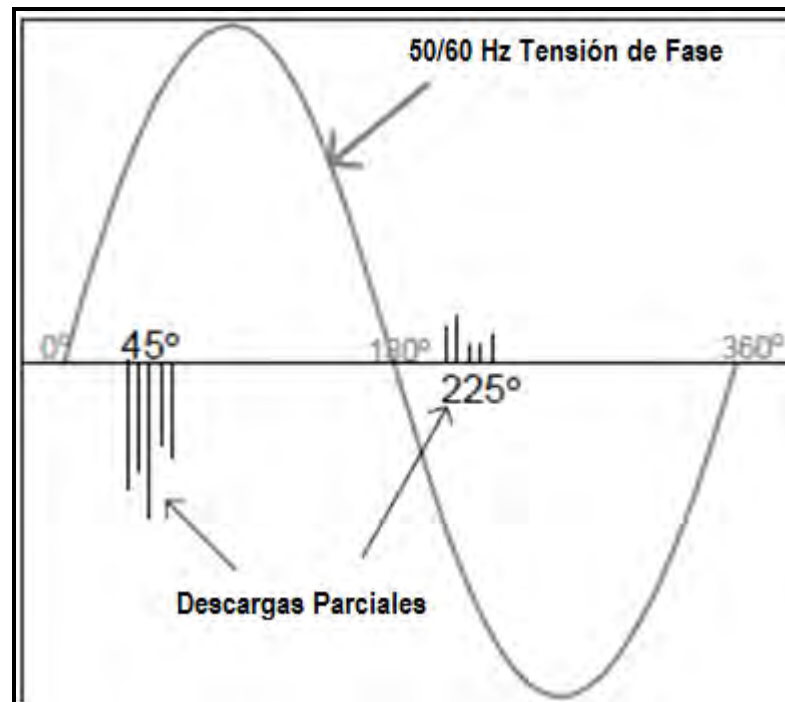


**Figura 3. 8:** Vacíos dentro del cuerpo de la aislación

b) Vacíos cercanos a los Conductores

Una máquina que frecuentemente se carga y descarga (ciclaje de carga) o que se recalienta severamente, desarrolla vacíos cerca de los conductores de cobre. Un vacío entre el conductor de cobre y el aislamiento, exhibe un fenómeno diferente a aquellos que se encuentran en la masa del aislamiento. Aunque los mecanismos básicos de ruptura son los mismos, a causa de que los electrodos son de distintos materiales, ocurre un predominio en la polaridad. La movilidad de los iones positivos en la superficie del aislamiento es menor que la de los iones negativos en la superficie del conductor. El resultado es el predominio de iones negativos migrando a través del hueco hacia la superficie positiva del aislamiento. En este caso habrá, usualmente, un predominio observable de pulsos de descargas

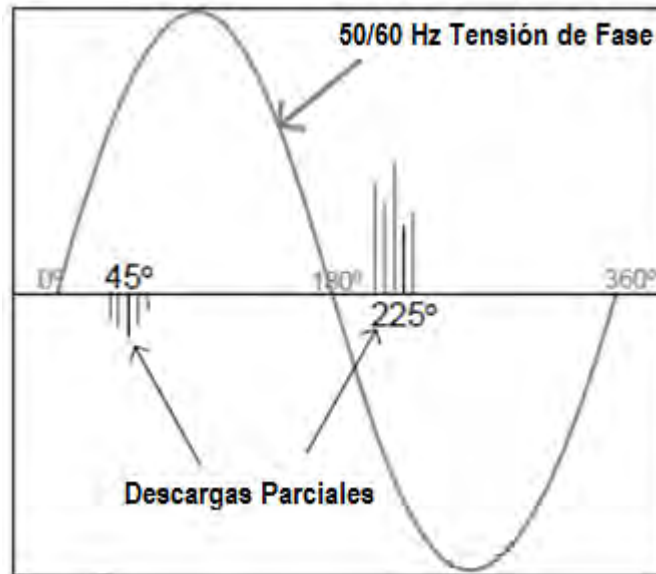
parciales negativos agrupados a  $45^\circ$  durante el ciclo positivo de Corriente Alterna, como se muestra en la Figura 3.9.



**Figura 3. 9:** Vacíos cercanos a los Conductores

c) Vacíos Cercanos al Hierro del Núcleo

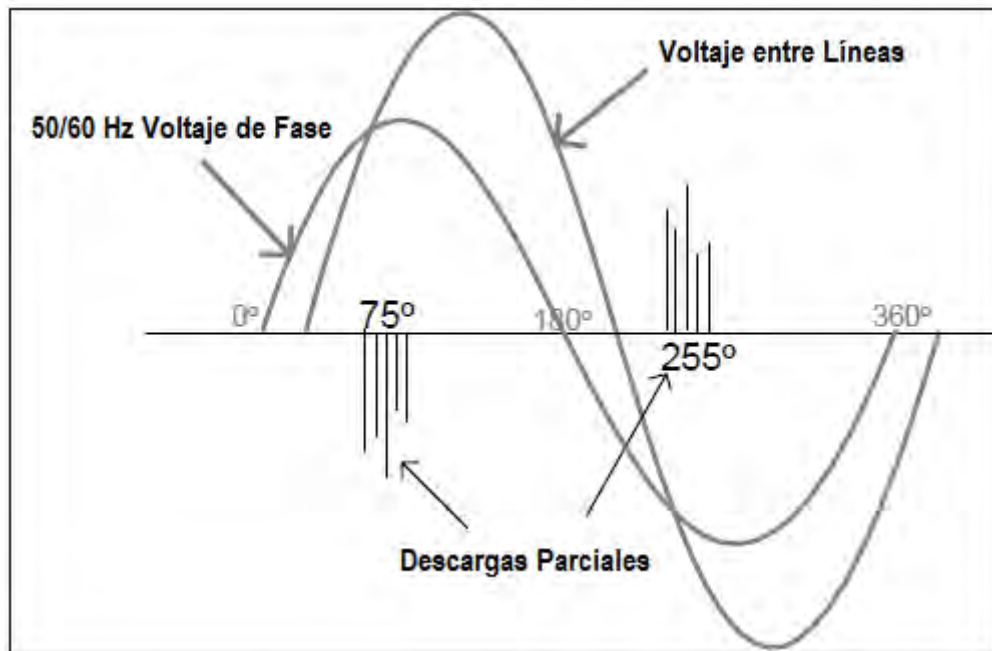
Bobinas flojas, cintas o pintura semiconductiva de baja calidad y problemas con la interfase de graduación/semiconducción pueden causar descargas en la superficie entre las barras del estator y el hierro del núcleo conectado a tierra, llamadas descargas de ranura. Como con aquellas cercanas a los conductores de cobre, estas descargas ocurren entre electrodos hechos de diferentes materiales. Aquí las cargas positivas inmóviles en el aislamiento y las cargas móviles negativas del electrodo metálico a tierra hacen que los pulsos ocurran durante el ciclo negativo de Corriente Alterna. Como el electrodo metálico está a tierra, los pulsos de descargas parciales observables serán predominantemente positivos agrupadas a  $225^\circ$ , como se muestra en la Figura 3.10.



**Figura 3.10:** Vacíos cercanos a la Plancha del Núcleo

d) Descargas en los Cabezales

La contaminación y/o el espaciado inadecuado en el área de los cabezales, en los buses anillo, o en los cables del motor pueden producir una actividad de descarga parcial en estas áreas. A diferencia de los pulsos descritos previamente que son dependientes del voltaje fase-tierra, estos pulsos se basan en el voltaje fase-fase. Aunque estos pulsos tienden a ser muy erráticos, es posible, a veces, distinguirlos de otros, observando su ubicación con referencia al voltaje fase- tierra. Típicamente, a causa de la dependencia de voltaje de fase a fase hay un desplazamiento de fase de  $30^\circ$  desde las posiciones clásicas, asociadas con pulsos que son dependientes del voltaje fase-tierra, como se muestra en la Figura 3.11. Los pulsos fase-fase tienden a agruparse a  $15^\circ$ ,  $75^\circ$ ,  $195^\circ$ , y  $255^\circ$ , basados en la ubicación de los pulsos y la rotación de fase de la máquina. Algunas veces es posible determinar cuáles son las dos fases involucradas, pero más frecuentemente, es difícil extraer esa información de los pulsos detectados, en forma precisa.



**Figura 3. 11:** Descarga en los cabezales

## CAPÍTULO IV

### DETECCIÓN DE DESCARGAS PARCIALES

***Cómo detectar las descargas parciales y sólo las descargas parciales en las máquinas.*** Saber que existen descargas parciales es una cosa, pero ¿cómo podemos detectarla? Más importante aún, ¿cómo utilizar la información que usted ha obtenido para comprobar la condición de la máquina y por lo tanto realizar cualquier mantenimiento y reparaciones que sean necesarias? para descargas parciales; nosotros sabemos que la magnitud depende del tamaño del hueco, que la cantidad está relacionada con el número de vacíos, y que algunas veces la polaridad y la posición de la fase pueden identificar la ubicación de los vacíos. Ahora sólo tenemos que fijarnos cómo detectar la magnitud, cantidad, polaridad y posición de la fase con referencia al voltaje fase-tierra de las descargas parciales originadas dentro del devanado, sin detectar los pulsos de alta frecuencia de otras fuentes.

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

- ✓ Magnitud de descargas parciales ⇒ se refiere al tamaño o volumen de los vacíos.
- ✓ Conteo de Pulsos de descargas parciales ⇒ se refiere al número de vacíos o defectos.

- ✓ Polaridad de descargas parciales  $\Rightarrow$  se refiere a la ubicación de los vacíos dentro de la masa del aislamiento.
- ✓ Posición relativa al voltaje fase-tierra de las descargas parciales  $\Rightarrow$  se refiere a la ubicación de los defectos tanto en la ranura como en los cabezales.

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

#### **4.1 SENSORES DE DESCARGAS PARCIALES**

El primer paso hacia la detección de descargas parciales es el emplazamiento de sensores en un lugar cercano a la fuente de las descargas parciales. Iris utiliza dos tipos de sensores:

- ✓ Acopladores capacitivos. Capacitores Epoxi Mica (EMC) para motores, hidrogenadores y pequeños turbogeneradores.
- ✓ Acopladores de ranura del Estator (SSC) - para grandes turbos (>100MW).

##### **4.1.1 Acopladores Capacitivos**

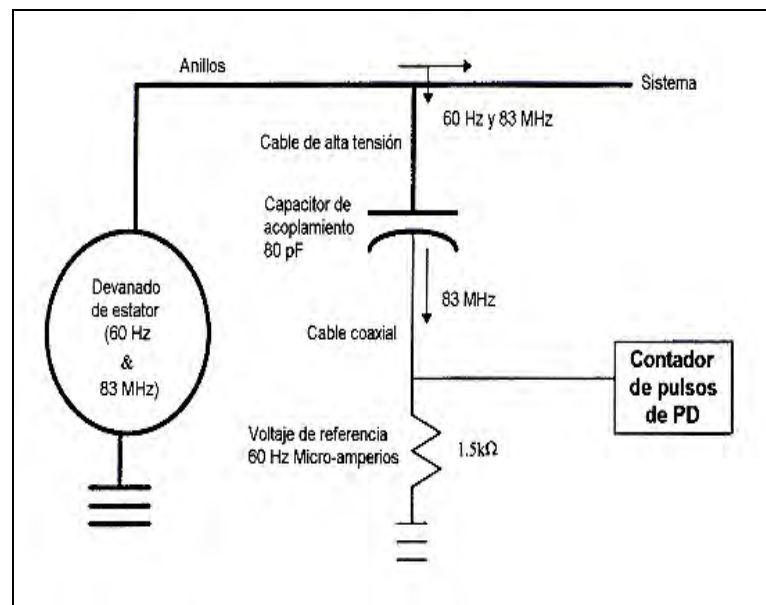
Los acopladores capacitivos utilizados son 80pF  $\pm$  3pF (Figura 4.1). Estos acopladores bloquean la señal de 50/60Hz y pasan la señal de descargas parciales de alta frecuencia, como se muestra en la Figura 4.2. Esto resulta obvio comparando la impedancia de un capacitor de 80pF a una frecuencia de potencial típico (60Hz) a una frecuencia de típica de descargas parciales (83MHz).

$$X_{C(60\text{ Hz})} = 1/2\pi(60)80\text{pF} = 33\text{ M}\Omega \text{ (alta impedancia- bloquea).}$$

$$X_{C(83\text{MHz})} = 1/2\pi(83\text{M})80\text{pF} = 24\Omega \text{ (baja impedancia - pasa).}$$



**Figura 4. 1:** Acopladores EMC



**Figura 4. 2:** Ubicación del Acoplador Capacitivo

De apariencia y construcción elegantemente simples, estos capacitores de acoplamiento son robustos y confiables, presentando mínimo riesgo para la maquinaria en la cual se van a instalar. Están fabricados con tolerancias eléctricas



mínimas y son libres de corona a niveles superiores de los voltajes que normalmente se encuentran en las máquinas en funcionamiento. Estos capacitores se instalan permanentemente a la fase, al bus de la fase o a los anillos de los circuitos (ver Figuras 4.3 – 4.4).



**Figura 4. 3:** Acoplador Capacitivo en Unidad 7 C.H. SAM – Electroperu S.A.



**Figura 4. 4:** Sistema acopladores fase "S" Unidad 7 C.H. SAM - Electroperu S.A.

Al conectar los acopladores a estos puntos de alto voltaje están muy cerca de las áreas que tienen la actividad más alta de descargas parciales en el devanado.

Recuerde que las descargas parciales dependen del voltaje aplicado, por lo tanto, sólo las bobinas de final de línea serán proclives a tener actividad de descarga.

#### 4.1.2 Acopladores de Ranura de Estator (SSC)

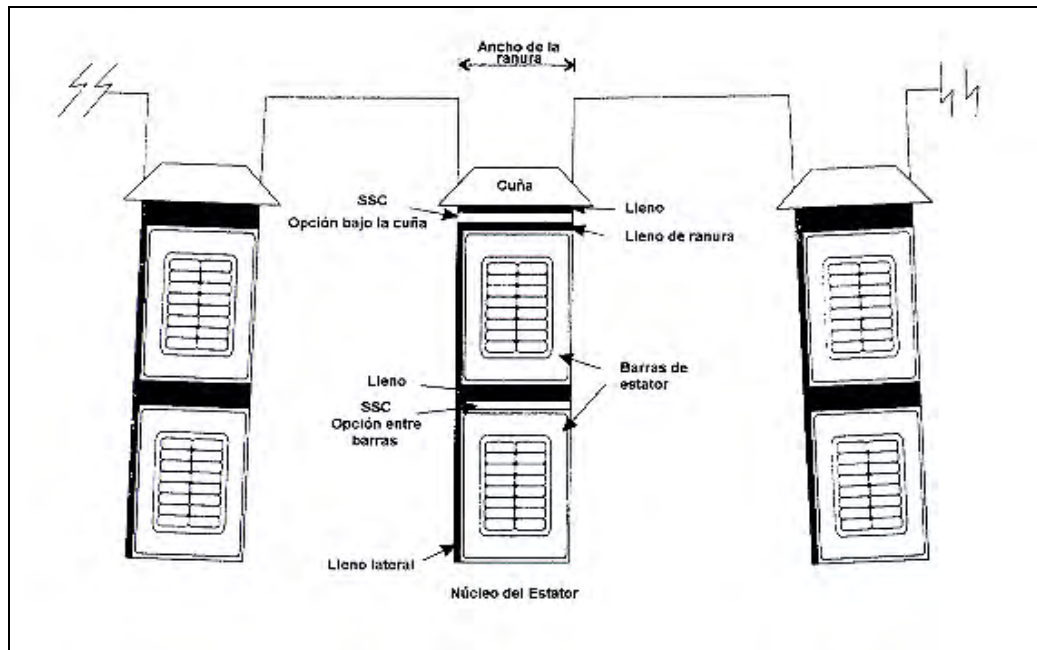
En muchos turbogeneradores grandes de alta velocidad (>100MW) hay pulsos parecidos a las descargas parciales que son arcos producidos por el núcleo. Es imposible discriminar entre estos pulsos y las descargas parciales verdaderas en el aislamiento usando acopladores capacitivos externos, así que se recomienda que sea utilizado un sensor de tipo antena. Este sensor de tipo antena, o acoplador de ranura de estator, está compuesto de una estructura de electrodo impreso en un laminado de epoxi-vidrio (ver Figura 4.5).



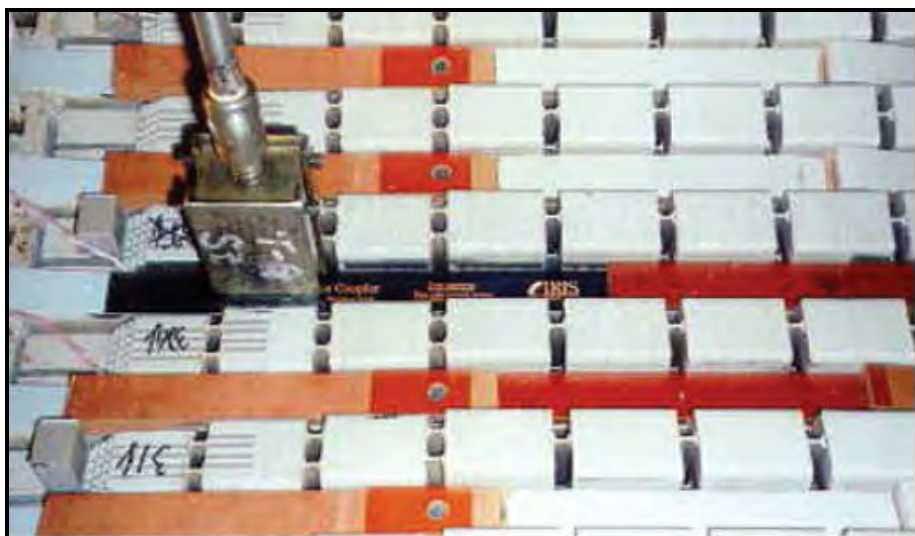
**Figura 4. 5:** Acopladores de ranura de estator - SSC

El SSC se ubica en la ranura, incrustado, bien entre las bobinas superior e inferior, o directamente debajo de la cuña como muestra la Figura 4.6. Como los acopladores capacitivos, los SSC bloquean los pulsos de baja frecuencia pero dejan pasar los pulsos parecidos a las descargas parciales de alta frecuencia. Sin embargo, como no se hace conexión eléctrica al devanado, el SSC es sólo

sensible a las descargas parciales que ocurre dentro de la ranura que alberga al sensor. Aunque esto limita la cantidad de cobertura del sensor, garantiza la detección de las descargas parciales producidas en la ranura solamente y no del núcleo.



**Figura 4. 6:** Ubicación de acopladores SSC



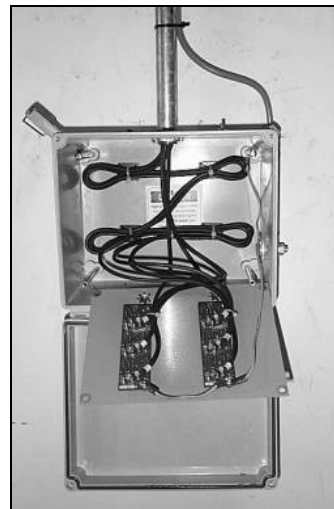
**Figura 4. 7:** Instalación de los acopladores SSC

## 4.2 CAJA DE TERMINACIÓN

Los cables coaxiales de los EMCs y los cables entrelazados (RJ45) del SSC son ruteados desde los sensores a través del núcleo del generador a una caja de terminación montada de manera convencional (ver Figura 4.8). Los cables se aseguran de manera permanente a la parte posterior del panel en la caja de terminación como se muestra en la Figura 4.9. Dentro de la caja de terminación hay protectores de picos eléctricos y resistores para mejorar el proceso de lectura de datos de descargas parciales. Para mayor información respecto de la caja de terminación por favor consulte la *Guía de Instalación de Sensores* correspondiente.



**Figura 4.8:** Caja de Terminación



**Figura 4.9:** Interior de la Caja de Terminación

Para obtener datos sobre descargas parciales, el instrumento portátil se conecta temporalmente a la caja de terminación, vía cable coaxial usando generalmente conectores BNC para instalaciones EMC y conectores SMA para instalaciones de SSC. Un ordenador laptop controla el instrumento Portátil como se muestra en la Figura 4.10. Los sistemas continuos (ver Figura 4.11) van montados de manera permanente y pueden ser configurados para dispararse basados en las

condiciones de funcionamiento, activar alarmas y proveer señales de pulsos basados en los niveles de descargas parciales.



**Figura 4. 10:** Muestra de un Sistema Portátil de Prueba



**Figura 4. 11:** Sistemas Continuos

### **4.3 SEPARACIÓN DEL RUIDO**

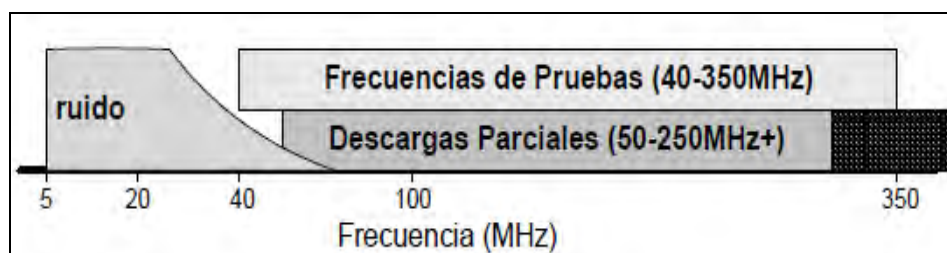
La mayoría de las empresas prefieren que la prueba de descargas parciales pueda ser realizada por el personal de la empresa durante las horas de funcionamiento normal de la máquina. Hasta hace poco tiempo este procedimiento de prueba de descargas parciales “en línea” era difícil debido a la presencia de ruido eléctrico que tiene características similares a las descargas parciales. El ruido eléctrico proveniente de la operación de herramientas eléctricas, causada por los conmutadores y las fuentes de frecuencias de radio, etc. se confunde fácilmente con las descargas parciales de los devanados de las máquinas. Esto puede llevar a errores de diagnóstico haciendo que se tomen como deteriorados los devanados en buenas condiciones, disminuyendo así la credibilidad de los resultados de la prueba. Una prueba en línea mejorada se ha desarrollado que puede reducir significativamente la influencia del ruido, conduciendo a una indicación más confiable de la condición del aislamiento de la máquina. Los Instrumentos de Prueba Iris utilizan varios métodos de separación del ruido.

#### **4.3.1 Frecuencia**

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

Los sensores de 80pF terminados a una impedancia de 50 ohms, limitan la banda de detección de baja frecuencia a 40MHz. A esta frecuencia la señal de ruido es virtualmente eliminada y por lo tanto el coeficiente señal-ruido (CSR) es extremadamente alto. Limitando el sensor para que sólo detecte señales de alta frecuencia, reduce un poco la cantidad total de energía de descargas parciales, pero elimina la necesidad de recurrir a un experto para discriminar entre ruido y descargas parciales. La idea es tener una prueba que pueda ser realizada y analizada por una persona no experta.

El segundo nivel de control de frecuencia es el instrumento de prueba. El instrumento de prueba tiene una amplitud de banda de 0.1-350MHz. Es capaz de detectar el tiempo de elevación rápido de los pulsos iniciales y las frecuencias altas (50-250MHz) típicas de descargas parciales originadas en el devanado. Utilizando la frecuencia de cierre de 40MHz del sensor y la limitación de frecuencia superior de 350MHz del instrumento, se monitorea la banda de frecuencia de 40-350MHz. Como se muestra en la figura que sigue, esto permite la detección del tiempo de elevación rápido de los pulsos de descargas parciales sin interferencia de ruido.



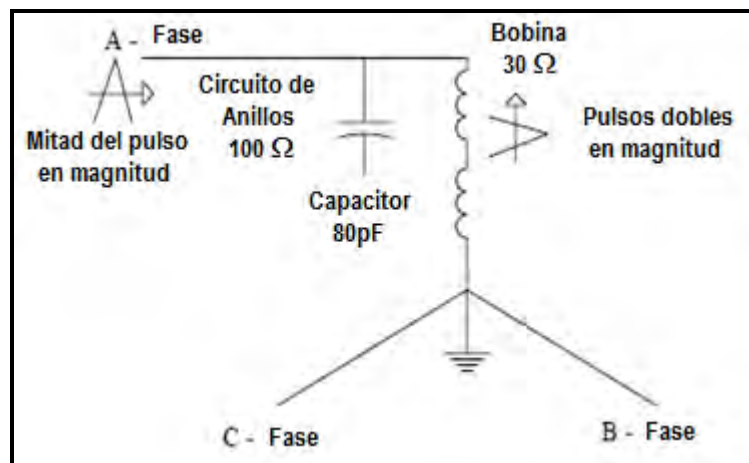
**Figura 4. 12:** Características de la Frecuencia

Las señales de alta frecuencia se atenúan bastante rápido dentro del devanado así que sólo los pulsos que ocurren a través de los huecos, en las bobinas que están cerca de la parte de alto voltaje del devanado serán detectadas con la prueba de

alta frecuencia, por ejemplo,  $>40\text{MHz}$ . Sin embargo, como hemos establecido anteriormente, los pulsos a través de los huecos son altamente dependientes del voltaje aplicado a tierra, por lo tanto las bobinas que están cerca del final de alto voltaje son las más proclives a tener descargas parciales, ya que la mayoría de las fallas ocurren en éstas bobinas y los mecanismos comunes de falla afectan al devanado completo; las pruebas de alta frecuencia son muy acertadas en la detección de mecanismos de falla.

#### 4.3.2 Impedancia Desigual

Otro método para la separación de ruido es utilizar la tendencia natural del pulso de alta frecuencia a distorsionarse cuando atraviesa un conductor de un nivel de impedancia (característica) de sobretensión hacia otro, o a través de una impedancia diferente. El efecto es un cambio en la magnitud (atenuación) y el aumento en el tiempo de elevación (frecuencia) del pulso. Como la impedancia típica de sobretensión del anillo de un circuito es  $100\Omega$ , y la de la bobina es  $30\Omega$ , un pulso de alta frecuencia que viaja a través de este empalme, será alterado (ver Figura 4.13).



**Figura 4.13:** Impedancia dispareja



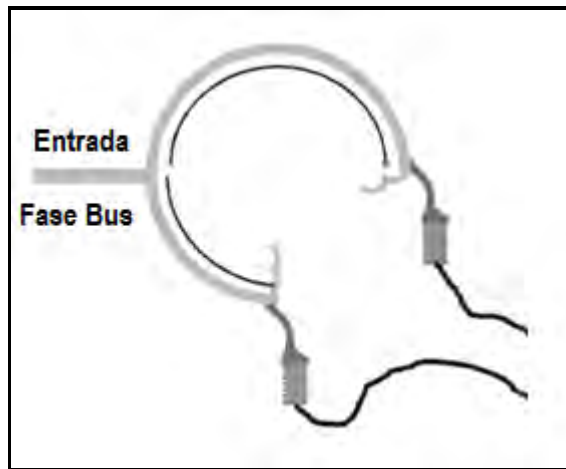
Un pulso que se origina en el devanado casi se duplicará en magnitud a medida que viaja desde una bobina de baja impedancia a un bus de alta impedancia. Mientras tanto, los pulsos del sistema (ruido) se atenuarán a la mitad de la magnitud original viajando de un bus de alta impedancia a una bobina de baja impedancia. A causa de este fenómeno, los cables de alto voltaje de los capacitores de detección deben ser fijados en el devanado tan cerca como sea posible (menos de un metro) al empalme de la primera bobina con el anillo del circuito (Bus). Los sensores colocados en esta posición, tendrán un máximo de sensibilidad a las descargas parciales de la máquina y un máximo de atenuación para el ruido.

#### **4.3.3 Tiempo de Arribo de los Pulsos**

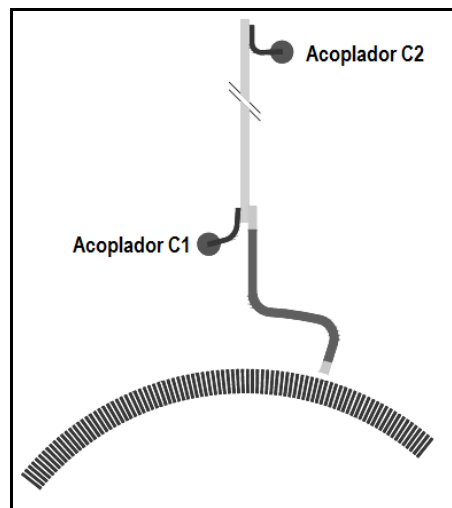
Quizás el medio más efectivo para eliminar el ruido dentro de la frecuencia de descargas parciales es a través del método de tiempo de llegada. Aunque este método requiere esfuerzo extra durante la instalación, asegura que los pulsos externos sean clasificados como ruido. Pueden utilizarse dos configuraciones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

##### *a) Separación Diferencial del Ruido atendiendo al tiempo de arribo simultáneo (PDA)*

En los hidrogeneradores, se ubican pares de acopladores en una fase y la longitud de los cables coaxiales se ajusta de tal manera que cualquier pulso del sistema (ruido) detectado por los dos acopladores llega al instrumento (PDA-IV™) de manera simultánea. El instrumento efectuará una comparación diferencial del tiempo de llegada junto con la forma, tamaño y polaridad del pulso, consecuentemente separando el ruido de las descargas parciales de la máquina.



**Figura 4. 14:** Ubicación de acopladores en una fase



**Figura 4. 15:** Circuito con acopladores externos a la máquina

***El instrumento de prueba desarrollará una comparación diferencial del tiempo de arribo junto con las formas, tamaños, polaridades del pulso, separando el ruido de las descargas parciales de la máquina.***

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

los efectos del ruido externo. El estilo diferencial de instalación de acoplador puede ser aplicado en hidrogenadores que tengan por lo menos 1 metro (3 pies) de anillo de bus en cada uno de los paralelos a ser monitoreados, para una distancia total entre acopladores de por lo menos dos metros (seis pies). Para máquinas con longitud insuficiente de anillos de circuito, se recomienda una instalación direccional PDA (ver Figura 4.15).

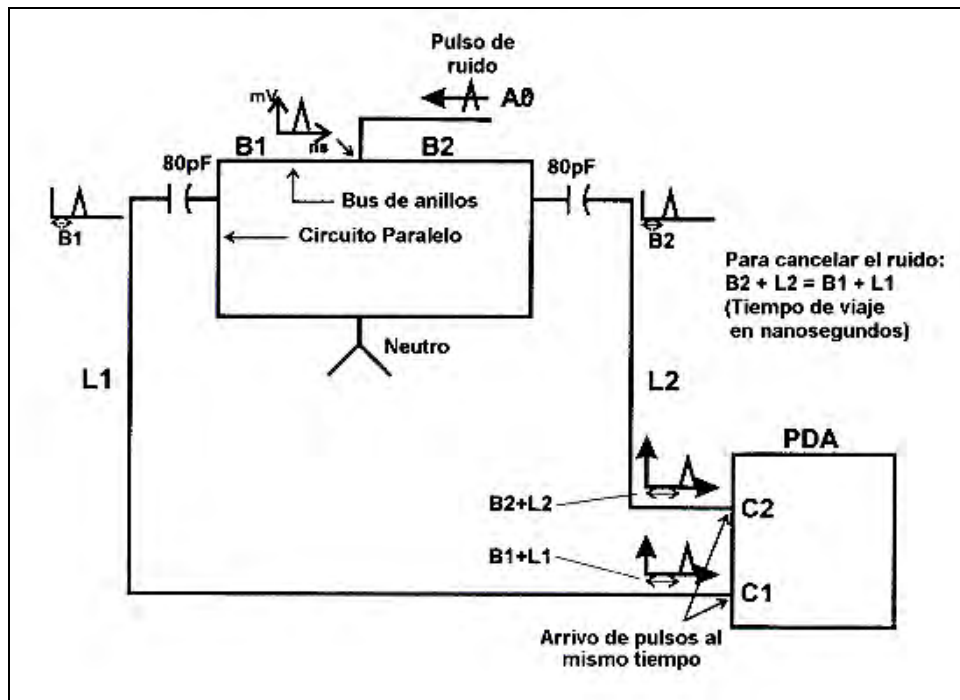
En máquinas de menos de 100 MW, se instalan generalmente dos acopladores, uno al final de cada uno de los distintos circuitos paralelos del estator. Si un generador tiene más de dos paralelos por fase, es posible instalar un acoplador en cada paralelo para una cobertura extra del devanado. Esto se acostumbra en unidades grandes (>100MW) o para unidades pequeñas muy importantes donde se justifica el costo extra. Cuando se realiza el calibrado de máquinas con más de dos acopladores por fase, los acopladores se “aparean” para el calibrado y para la adquisición de datos.

Esta configuración se utiliza con instrumentos o sistemas PDA-VI, PDA Bantam, HydroTrac and HydroGuard. Los instrumentos de prueba separan los pulsos de acuerdo con el siguiente criterio de tiempo de llegada:

**Tabla N° 4. 1:** Criterio de tiempos de llegada - PDA

<b>Clasificación</b>	<b>Sensor C1</b>	<b>Sensor C2</b>
<b>C1</b>	L1	B1+B2+L2
<b>C2</b>	B2+B1+L1	L2
<b>Ruido*</b>	B1+L1	B2+L2

\* Calibrar de manera que  $B1+L1=B2+L2$



**Figura 4. 16:** Separación de ruido por tiempo de llegada diferencial

Durante el calibrado, los cables coaxiales se cortan de manera tal que:

$$B1+L1 = B2 +L2$$

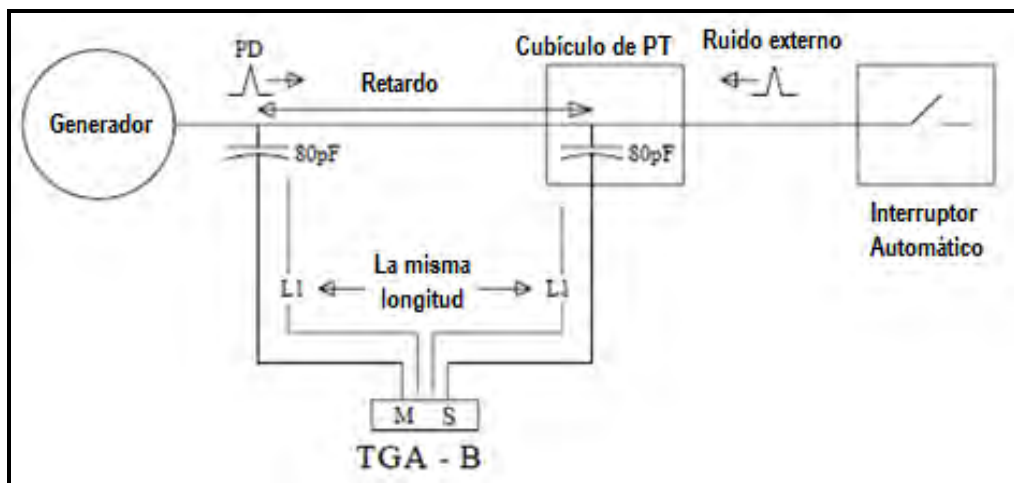
Los pulsos de ruido originados en el sistema llegan al mismo tiempo al final de los cables coaxiales conectados a cada acoplador y son clasificados como ruido. Todos los demás pulsos (descargas parciales) serán asignados al acoplador que lo detecta primero y serán clasificados como descargas parciales. Esta es una separación diferencial de ruido por tiempo de arribo.

*b) Separación Direccional de Ruido atendiendo al tiempo de arribo - (Bus)*

Si no hay anillo del circuito, o el anillo es menos de dos metros (seis pies) de largo (según se requiere para el estilo diferencial) una instalación direccional es necesaria. Para una instalación direccional, un acoplador (máquina) se coloca tan cerca como sea posible del empalme entre la bobina de final de línea y el anillo del

circuito. El segundo acoplador (sistema) se instala en el bus de la fase, en un lugar conveniente hacia el sistema y a por lo menos a dos metros (seis pies) del primer acoplador. Si se usa el instrumento TGA-B, los cables coaxiales deberán tener la misma longitud (ve Figura 4.17).

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



**Figura 4. 17:** Separación Direccional de Ruido atendiendo al tiempo de arribo

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

Esta configuración se utiliza para instrumentos y sistemas TGA-B, BusTrac, BusGuard y el TGA Bantam. El instrumento de prueba separa los pulsos de acuerdo al siguiente criterio de tiempo de llegada:

**Tabla N° 4. 2:** Criterio de tiempos de llegada - Bus

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

\* Ruido del Sistema y Bus se muestran juntos como Ruido Total del Sistema.

c) Separación Direccional de Ruido atendiendo al tiempo de arribo – (SSC)

De la misma manera que en la instalación Direccional (BUS), la instalación SSC tiene dos sensores, uno en cada final de la antena. El SSC categoriza los pulsos de acuerdo a la dirección de llegada. El tiempo de demora entre el arribo de pulsos es una función del diseño del sensor y no requiere calibración durante la instalación.

El instrumento de prueba separa los pulsos de acuerdo con el siguiente criterio de tiempo de llegada:

**Tabla N° 4. 3:** Criterio de tiempos de llegada - SSC

Clasificación	Sensor de Cabezales (EW)	Sensor de Ranura
DP de los cabezales	Cabezales	Cabezales + demora
Ranura*	Ranura + demora	Ranura
Debajo*	EW + < demora	Ranura + < demora

\* DP Ranura y Debajo se muestran juntos como Ruido Total de Ranura.

#### 4.3.4 Forma del Pulso

Otro método de separación de ruido usado por los SSC y acopladores 80pF es examinar la Forma de los Pulsos.

##### a) SSC

Los experimentos muestran que los pulsos de ruido interno, cuando son detectados por un SSC, tienen un ancho  $> 8\text{ns}$ , donde las descargas parciales en la ranura tiene una amplitud de pulso de  $< 6\text{ns}$ . El instrumento TGA-S, además de la separación direccional descrita arriba, mide el ancho de cada pulso y lo clasifica como descargas parciales o como pulsos anchos. Por eso hay tres clasificaciones adicionales para los SSC:

**Tabla N° 4. 4:** Clasificación adicional para los SSC

Clasificación	Sensor (EW)	Sensor de Ranura
Ancho de los cabezales	$> 8\text{ns}$	NA
Ancho de ranura	NA	$> 8\text{ns}$
Ruido	$> 20\text{ns}$	$> 20\text{ns}$

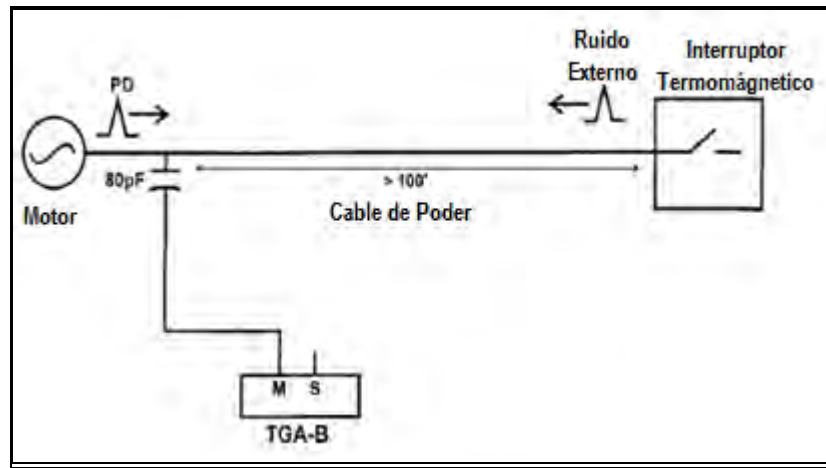
##### b) Un solo Acoplador por Fase

En algunas instalaciones, particularmente en motores, la unidad está conectada al sistema de tensión eléctrica a través de un cable relativamente largo. Si el cable es de 30 metros (100 pies) de largo o más, los pulsos de ruido de alta frecuencia del sistema de tensión pueden ser atenuados y dispersados severamente. Si el pulso tiene un tiempo de elevación rápido, entonces, probablemente se trate de descargas parciales. Si el pulso tiene un tiempo de elevación lento, entonces se tratará de ruido. En estos casos solamente un acoplador por fase y tres por unidad

es necesario. Este tipo de instalación se le llama a menudo como “Instalación de un solo acoplador” donde no se requiere calibración, aunque se recomienda una prueba de sensibilidad. Esta es la configuración utilizada para sistemas PDTrac. El instrumento de prueba clasifica los pulsos de acuerdo al siguiente criterio:

**Tabla N° 4. 5:** Criterio de separación de pulsos – un acoplador por fase

Clasificación	Sensor de Máquina	Sensor de Sistema
DP Unidad	Todos los pulsos	Nulo



**Figura 4. 18:** Un acoplador por fase

#### 4.4 PRESENTACIÓN DE DATOS

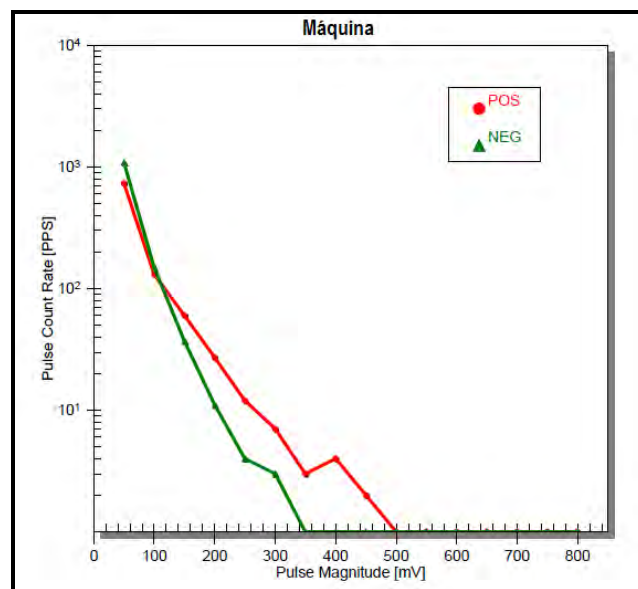
Este es un resumen de los instrumentos y procedimientos de recolección de datos. Los instrumentos de recolección de datos pueden ser portátiles para pruebas periódicas, o montados de manera permanente para monitoreo continuo. Adicionalmente, los instrumentos de recolección de datos pueden ser capaces de crear esquemas de análisis de la magnitud de los pulsos, resumen de variables de descargas parciales, información de descargas parciales en archivo, y/o análisis de la posición de fase de los pulsos de descargas parciales.



Los cuatro grupos principales de instrumentos de recolección de datos son: Portables, Guards, Tracs y Bantams.

#### 4.4.1 Análisis de Magnitud de Pulsos (PHA)

Los esquemas de Análisis de Magnitud del pulso (PHA) representan la relación entre la magnitud de los pulsos y la frecuencia de repetición de esos pulsos para los contadores de descargas parciales de polaridades positiva y negativa, como por ejemplo Machine PD+ y Machine PD- como se muestra en la Figura 4.19.



**Figura 4. 19:** Esquema de Análisis de Magnitud del Pulsos

El eje horizontal es la representación lineal de la magnitud de los pulsos (mV), mientras que el eje vertical es la representación logarítmica del número de pulsos por segundo (PPS). Los instrumentos Iris pueden ser operados usando varios rangos de prueba y cada rango permite dos distintas velocidades para las pruebas: 1 segundo y 5 segundos. Los pulsos siempre se muestran con base a 1 segundo. Cuanto más grande el número de pulsos por segundo, más generalizado es el deterioro en el devanado. Cuanta más alta es la magnitud de los pulsos de

descargas parciales, más severo es el deterioro. El ascenso de las líneas diagramadas hacia la esquina derecha superior de pruebas tomadas en una máquina a través del tiempo, indicaría que el devanado se está deteriorando. Ambas actividades de descargas parciales, la positiva (●) y la negativa (▲) se detallan en el diagrama. La comparación de descargas parciales positivas y negativas indicaría que las descargas parciales están dentro de la masa del aislamiento, o cerca de la superficie del aislamiento. Sólo los pulsos negativos que ocurren dentro de  $-15^\circ$  y  $135^\circ$  y los pulsos positivos dentro de  $165^\circ$  y  $315^\circ$  relativo a la frecuencia de la tensión se muestran en el esquema PHA.

Esta información se muestra basada en la clasificación de pulsos de los instrumentos Iris:

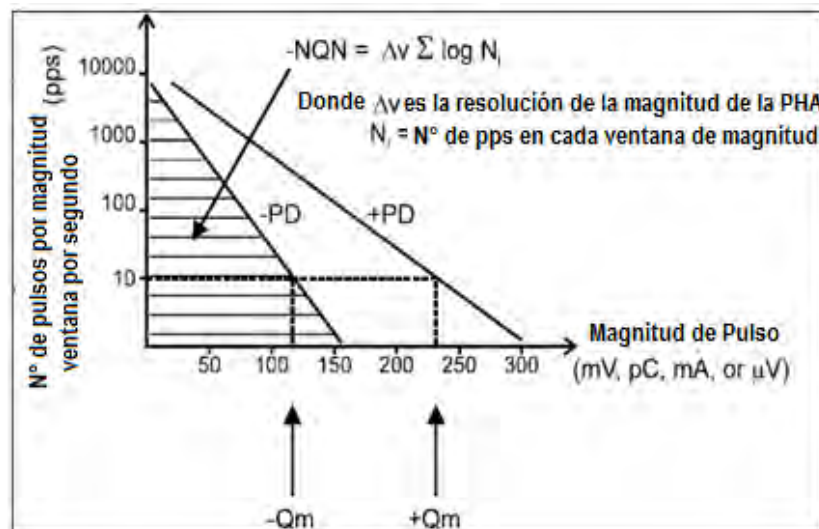
**Tabla N° 4. 6:** Clasificación de pulsos en instrumentos Iris Power

Instrumento	Clasificación de los pulsos	
PDA-IV / HidroGuard	C1	C2
TGA-B / BusGuard	Máquina	Ruido total del sistema
TGA-S / TurboGuard	Cabezales	Total de ranura
PD Trac	Máquina	Nulo
Hydro Trac / PDA Bantam	C1	C2
Bus trac / TGA Bantam	Máquina	Ruido total del sistema

#### 4.4.2 Resumen de Variables de Descargas Parciales

Los instrumentos Iris calculan las cantidades de Qm y NQN basados en el esquema de Análisis de Magnitud de los Pulsos (PHA). El NQN, Cantidad Numérica

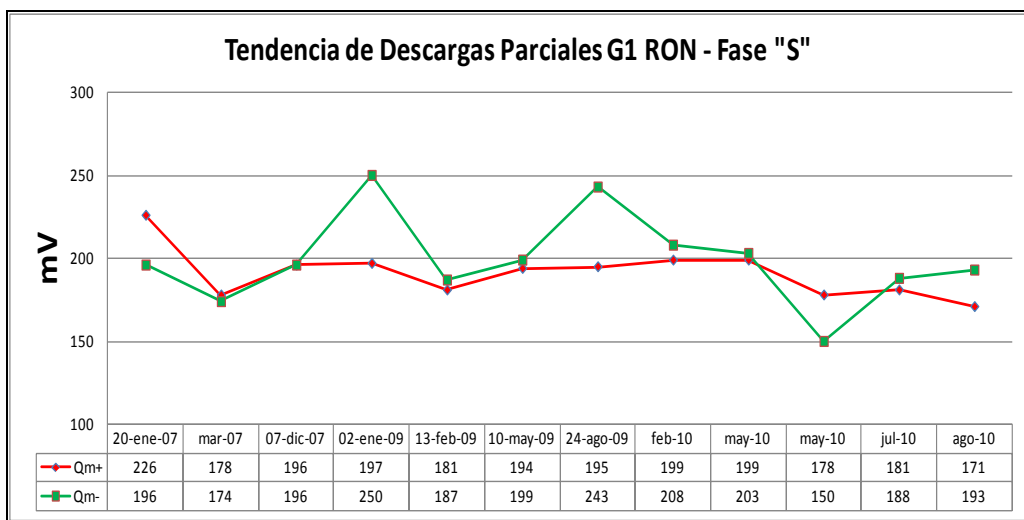
Normalizada, es una cantidad de descarga parcial que es proporcional al total de la descarga parcial medida por un sensor de descargas parciales. El NQN negativo se refiere al total de actividad de pulsos de descargas parciales negativos, mientras que el NQN positivo, se refiere al total de la actividad de descargas parciales proveniente de pulsos positivos. NQN es un indicador de la condición promedio del aislamiento del devanado del estator (ver Figura 4.20). El  $Q_m$ , o Magnitud Máxima, es la magnitud de los pulsos para una categoría fundamental de pulsos (medidos directamente) que tiene una frecuencia de repetición de 10 pulsos por segundo, y que corresponde a la máxima actividad de descargas parciales. El  $Q_m$  es un indicador de la severidad de las descargas parciales en la parte más deteriorada del devanado. El  $Q_m$  positivo o negativo se refiere a la máxima actividad de descargas parciales provenientes de pulsos de descargas parciales positivas o negativas, respectivamente.



**Figura 4. 20:** Resumen de variables DP

Para nuestros propósitos,  $Q_m$  y NQN se derivan de los datos del resultado de una prueba y son valiosos para realizar comparaciones entre distintas máquinas o para

ver el comportamiento de la tendencia a través del tiempo. El Esquema de Tendencias representa el resumen numérico de la tendencia de las descargas parciales, específicamente NQN y Qm, y por lo tanto provee una representación gráfica de la progresión del envejecimiento del aislamiento. El Esquema de Tendencias puede mostrar tendencias de hasta 10 parámetros en un set de datos previamente seleccionados,  $\pm$ NQN y  $\pm$ Qm, carga y temperatura (ver Figura 4.21).



**Figura 4. 21:** Diagrama de tendencias G1- Central Hidroeléctrica Restitución

#### 4.4.3 Datos en Archivo

Por naturaleza las descargas parciales pueden ser bastante erráticas debido a las fluctuaciones de las condiciones ambientales y de los parámetros de funcionamiento. A fin de facilitar la tendencia a largo plazo, algunos de los sistemas de monitoreo continuo condensarán las lecturas horarias del resumen de variables de descargas parciales computando todo o parte de los siguientes valores estadísticos:

▪ Máximo Diario	▪ Máximo Mensual
▪ Mínimo Diario	▪ Mínimo Mensual
▪ Promedio Diario	▪ Promedio Mensual
▪ Desviación Diaria Estándar	

Estos valores se calculan por cada uno de los cuatro resúmenes de variables de descargas parciales, por cada una de las categorías de descargas parciales descritas.

#### **4.4.4 Esquemas de Resolución de Fase**

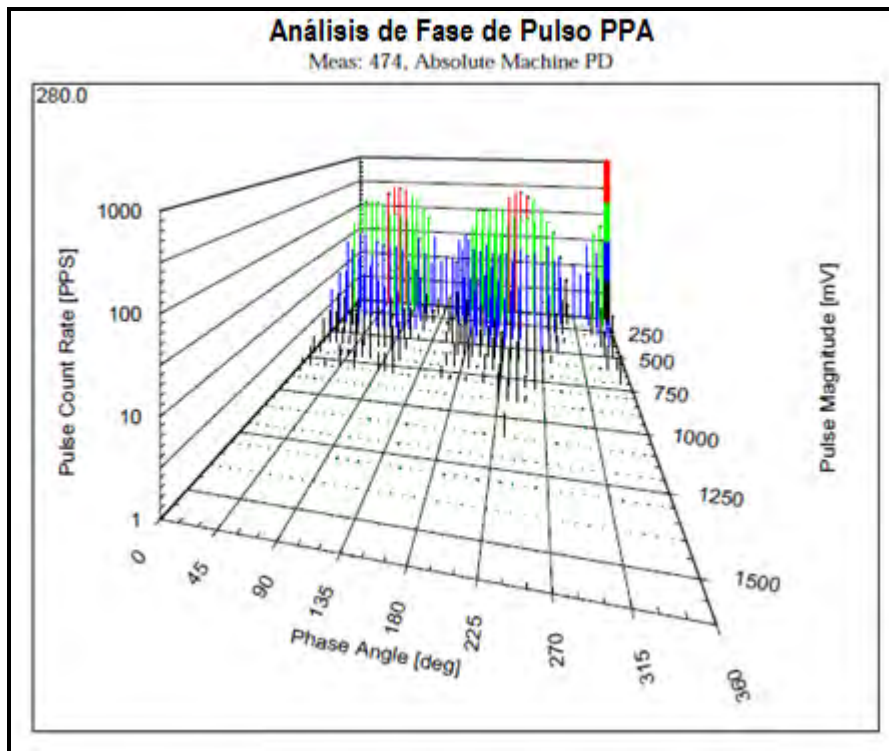
Durante la recolección de datos utilizando un instrumento Portable o Guard, cada ciclo se divide en 100 ventanas por fase para permitir la presentación de la información relativa a la referencia del voltaje específico de fase a tierra. La experiencia ha mostrado que tal análisis de fases de pulsos puede utilizarse para identificar si múltiples mecanismos de deterioro están ocurriendo y cuáles pueden ser éstos mecanismos. Los tres tipos más importantes de esquemas de resolución de fase son:

- ✓ Análisis de la Posición de Fase de los Pulsos (PPA)
- ✓ Esquema Lineal de la Densidad de los Pulsos (LPD)
- ✓ Esquema Polar de la Densidad de los Pulsos (PPD)

La herramienta más útil para analizar las descargas parciales no clásicas es el Esquema Lineal de Densidad de los Pulsos (PPD).

##### *a) Análisis de Posición de Fase de los Pulsos (PPA)*

El Esquema de Análisis de la posición de Fase de los Pulsos – a menudo referido como el esquema tridimensional o 3D – representa la relación entre el ángulo de la posición de los pulsos (en un ciclo sea este 60 o 50 Hz) en el dominio de frecuencia (eje-x), la tasa de repetición del pulso (eje-y), y la magnitud del pulso (eje-z), (ver Figura 4.22).



**Figura 4. 22:** Análisis de Fase de Pulso PPA

El esquema PPA permite la identificación de las fuentes de descargas parciales ubicadas en la porción de la ranura del devanado y/o fuentes de descargas parciales ubicadas en el área de los cabezales. Específicamente las descargas parciales que ocurren en la parte de la ranura correspondiente al devanado tienen pulsos de descargas parciales de polaridades positivas y negativas, centradas cerca de los ángulos de fase de  $45^\circ$  y  $225^\circ$  respectivamente, con referencia al voltaje fase-tierra.

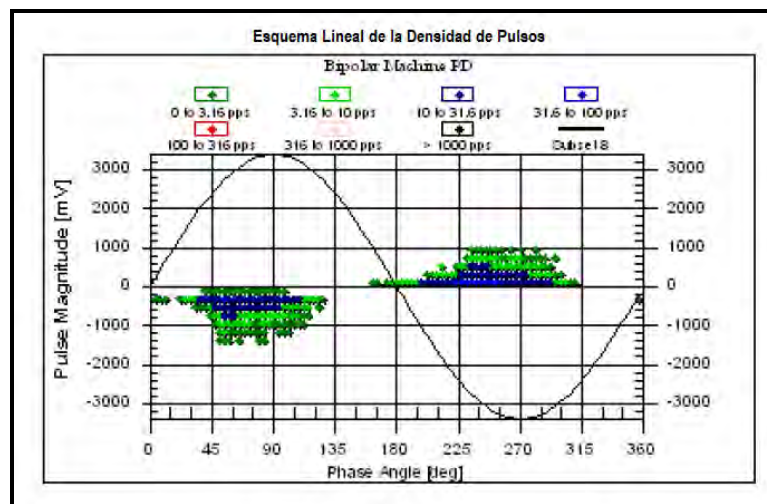
Las descargas parciales no clásicas o interfásicas originadas en los cabezales o buses de anillo están desplazadas con relación a estas posiciones.

*b) Esquema lineal de la Densidad de los pulsos (LPD)*

El Esquema Lineal de la densidad de los pulsos es el tipo de gráfico más comúnmente utilizado para presentar los datos de descargas parciales de la

posición de los pulsos en la fase (ver Figura 4.23). Este esquema en dos dimensiones muestra la magnitud de descarga parcial (eje vertical) como una función del ángulo de la fase de la señal de referencia sinusoidal de 50/60Hz (eje horizontal). Un código de color provee información acerca de la frecuencia en que el pulso ocurre para cualquier combinación de fase-ángulo y magnitud.

En el análisis de fase, la referencia de voltaje usualmente elegida para una medición dada es la referencia del voltaje de fase-tierra de la fase sujeta a la prueba en línea. Se debe tener en cuenta que la unidad más grande de la escala en la fase en el esquema (eje x) es de  $45^\circ$  y la más pequeña es de  $15^\circ$ . Esto permite una rápida identificación del valor del ángulo de la fase en la cual se centra un grupo de descargas parciales dado. Específicamente, esto permite una rápida discriminación entre las fuentes de descargas parciales en la ranura y las fuentes de descargas parciales interfaciales.



**Figura 4. 23:** Esquema lineal de la Densidad de Pulsos

El reporte estándar de LPD contiene seis gráficos organizados en tres filas, una por fase, y dos columnas, cada una para cada clasificación de las descargas parciales.

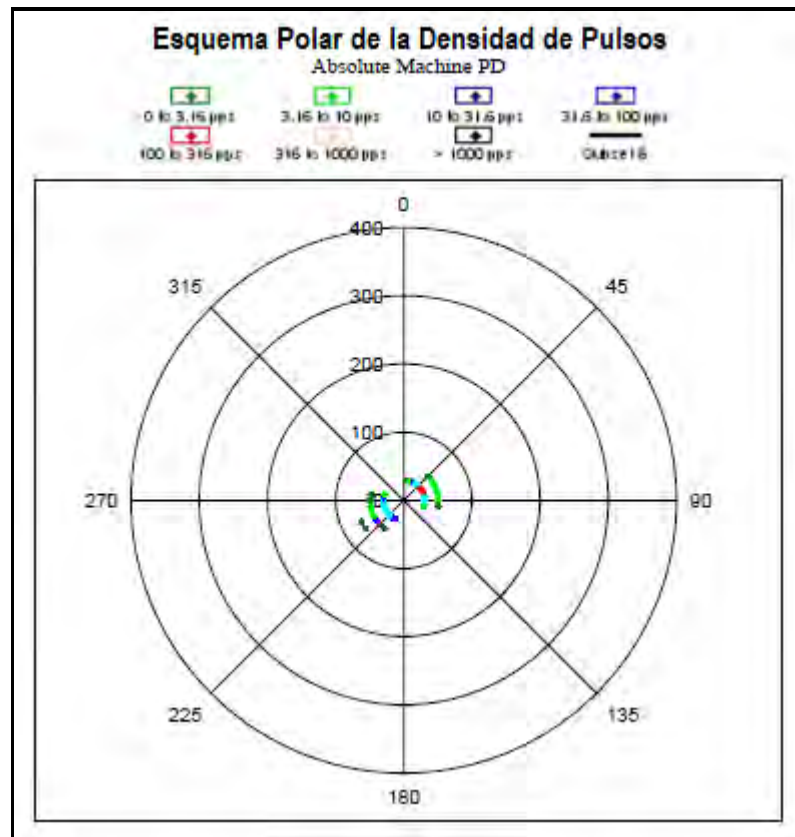
Los datos pueden presentarse en una forma Estándar, donde las tres fases se muestran con relación a sus voltajes respectivos de fase-a-tierra (ver Figura 4.25). Alternativamente, los datos pueden ser presentados con un desplazamiento de fase, donde la primera fila de gráficos muestre los datos medidos en una fase sin ningún desplazamiento de fase, y la segunda fila de gráficos exhibe los datos medidos en la segunda fase pero con un desplazamiento de  $120^\circ$  en relación a la primera fase. La tercera fila de gráficos presenta los datos medidos en la tercera fase con un desplazamiento de  $240^\circ$  en relación a la primera fase (ver Figura 4.26). Por lo tanto, los voltajes sinusoidales de las fases se muestran simultáneamente en el dominio del tiempo. Esto permite la rápida identificación de las fuentes de descargas originadas de fase a fase y grupos de descargas parciales de acoplamiento cruzado. En esta configuración, los pulsos de la misma fuente, como arcos interfásicos o acoplamiento cruzado, se alinearán verticalmente.

c) Esquema Polar de la Densidad de los Pulsos (PPD)

El Esquema Polar de Densidad de pulsos es un esquema bidimensional de la actividad de las descargas parciales como función del ángulo de fase (ver Figura 4.24). Un código de color provee información sobre la tasa de repetición de pulsos para una combinación dada de fase-ángulo y magnitud. El eje radial representa la magnitud, mientras que el eje circunferencial es el ángulo de fase de la señal sinusoidal de referencia de 50/60Hz.

La información es presentada como valores absolutos, determinándose fácilmente si las fuentes de descargas parciales están en las clásicas posiciones de  $45^\circ$  y  $225^\circ$  o desplazadas debido a fuentes no clásicas, como se muestra en la Figura 4.24, donde los pulsos se agrupan a  $75^\circ$  y  $255^\circ$  mostrando actividad interfásica.





**Figura 4. 24:** Esquema Polar de la Densidad de Pulsos

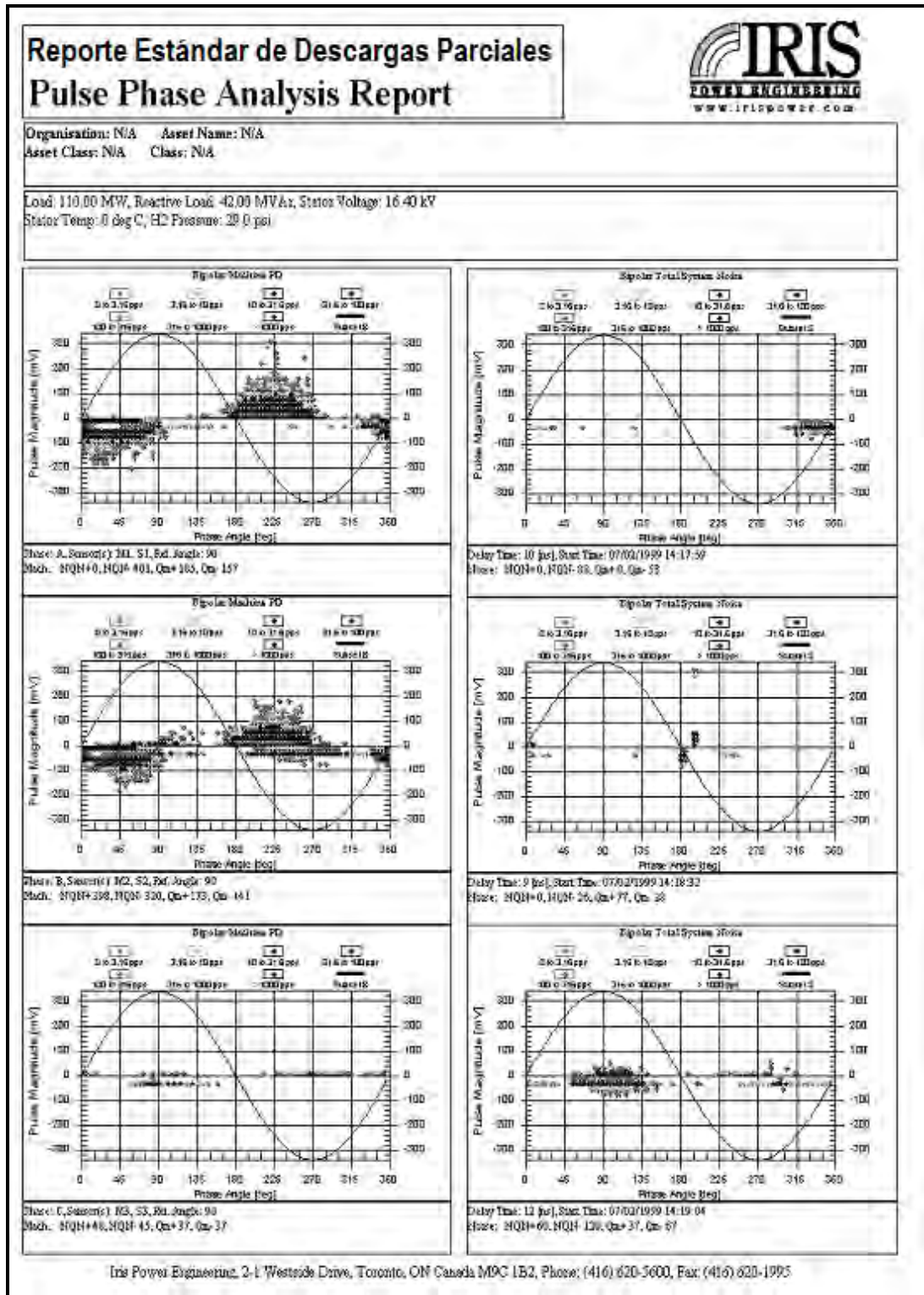


Figura 4. 25: Reporte Estándar de descargas parciales para LPD

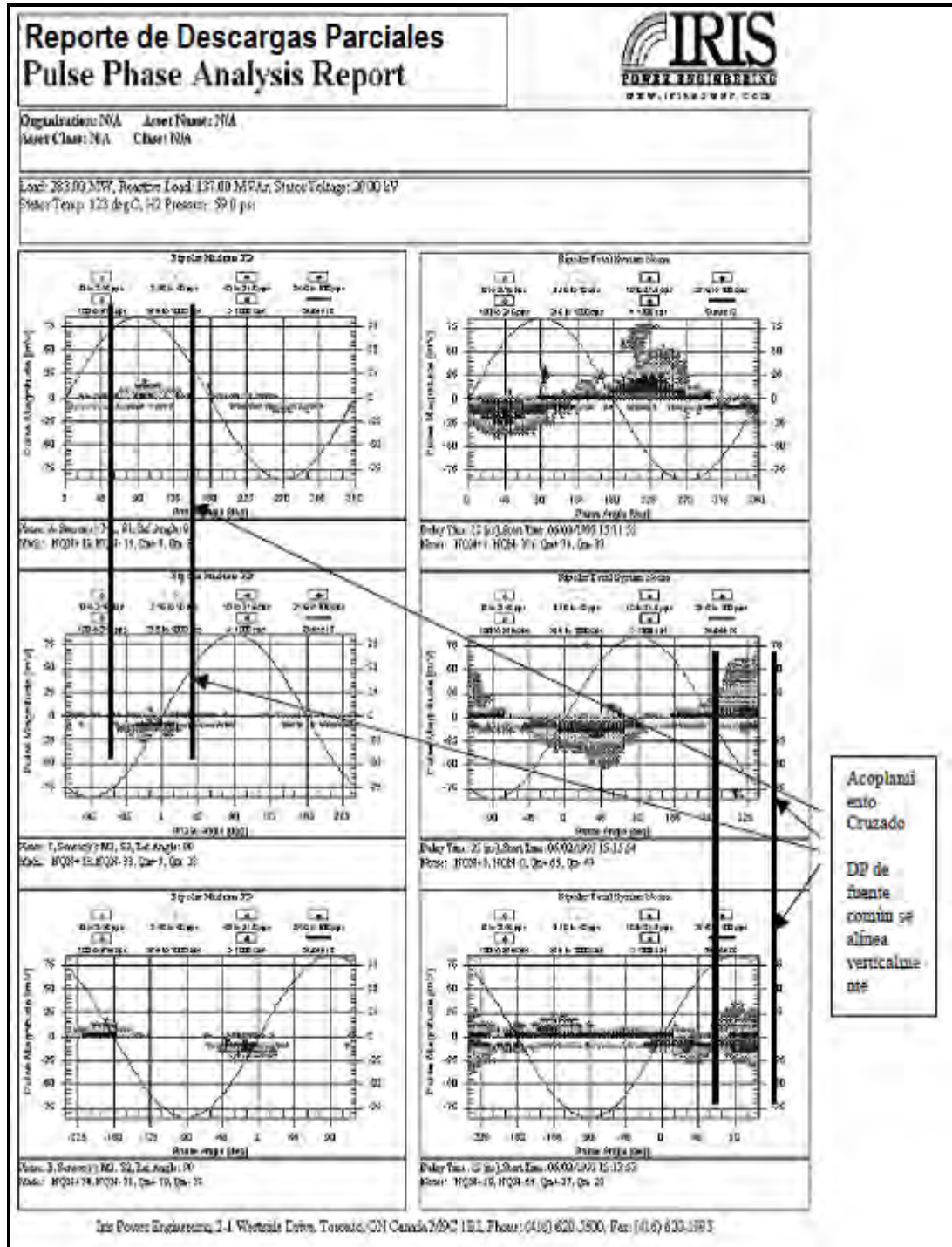


Figura 4. 26: LPD - Reporte de descargas parciales - Rotación ACB

#### 4.5 INSTRUMENTOS IRIS

Los instrumentos Iris se clasifican en dos grandes categorías: Continuos y Portátiles. Los sistemas Continuos (Cont) están permanentemente conectados a los sensores y proveen tanto las funciones de alarma como las de recolección programada de datos de descargas parciales. Los instrumentos Portátiles (Port) se conectan temporalmente a los sensores y requieren la intervención del usuario para recolectar los datos de las descargas parciales. Hay cuatro tipos de instrumentos de prueba para utilizar con los sensores Iris: Portables, Guards, Tracs y Bantams. La Tabla 4.7 presenta un resumen de la funcionalidad de estos grupos:

**Tabla N° 4. 7:** Resumen de funcionalidad de instrumentos Iris

Instrumento	Sensores	Cont Port	Esquema PHA	NQN/ Q <sub>m</sub>	Fase Resuelta
Portables	PDA/BUS/SSC/ Un solo capacitor	Port	•	•	•
Guards	PDA/BUS/SSC/ Un solo capacitor	Cont	•	•	•
Hydro/Bus Tracs	PDA/BUS	Cont	• <sup>1</sup>	•	
PD Trac	Un solo capacitor	Cont	•	•	
Bantams	PDA/BUS/ Un solo capacitor	Port	•	•	

<sup>1</sup> Sólo si es controlado remotamente por una computadora secundaria.

\* Información actualizada hasta el año 2010.

##### 4.5.1 Portables (Portátiles)

Hay tres tipos de instrumentos Portátiles: TGA-S (instalaciones SSC), TGA-B (instalaciones BUS) y PDA-IV (instalaciones PDA). Pueden ensamblarse individualmente o como una combinación de cualquiera de dos instrumentos. Requieren de un computador Laptop como controlador.



**Figura 4. 27:** Instrumento Portátil

- ✓ **Sensores:** SSC (TGA-S), BUS (TGA-B), PDA (PDA-IV, TGA-P).
- ✓ **Frecuencia de Prueba:** no programada, de modo que requiere interacción del usuario para realizar la prueba bianual recomendada de devanados de rango >6kV
- ✓ **Tipos de Datos:** PHA, NQN/Qm y fase resuelta.
- ✓ **Software de Control:** PDLitePro
- ✓ **Software de Visualización:** PDView3 (IID)
- ✓ **Salida de Alarma:** Ninguna disponible
- ✓ **Tipo de Instrumento:** Portátil
- ✓ **Sensores de entrada:** Ninguno disponible

#### 4.5.2 Guard (Protección)

Hay tres tipos de instrumentos **Guard**: **TurboGuard** (instalaciones SSC), **BusGuard** (instalaciones BUS) y **HydroGuard** (instalaciones PDA). El instrumento **Guard** proporciona monitoreo continuo y requiere que se conecte un computador conectado remotamente para que funcione como controlador. El sistema puede configurarse para funcionar en una red local **LAN** o una red ancha **WAN**.



**Figura 4. 28:** Sistema Guard

#### **4.5.3 Instrumento Trac (Monitoreo Continuo)**

Hay tres tipos de instrumentos Trac: **BusTrac** (instalaciones Bus), **HydroTrac** (instalaciones PDA e instalaciones con un solo acoplador por fase PDTrac). El instrumento **Trac** proporciona monitoreo continuo y es conectado por medio de una red, conexión LAN o WAN, a un computador remoto, utilizado como controlador.



**Figura 4. 29:** Bus Trac

#### 4.5.4 Bantam (Portátiles)

Hay dos tipos de instrumentos Bantam: **TGA Bantam** (instalaciones BUS) y **PDA Bantam** (instalaciones PDAs). El instrumento Bantam es portátil y requiere un computador Laptop como controlador.



**Figura 4. 30:** Instrumento Bantam

#### 4.6 PRUEBA EN LÍNEA

La mejor prueba de diagnóstico en línea del devanado del estator de los generadores eléctricos que existe actualmente es la medición de descargas parciales, la cual se ha constituido en la herramienta más poderosa de diagnóstico del aislamiento del devanado del estator ya que se realiza con el generador eléctrico en operación, bajo los esfuerzos eléctricos, mecánicos y térmicos propios de esa condición. Las ventajas de esta técnica son: la medición se realiza en minutos en el momento que uno decida y dependiendo del sistema utilizado, puede interpretarse por una persona que haya recibido un sencillo curso. Además, no requiere calibración de equipos ya que los sensores son fijos.

El propósito es observar las DP que ocurre en una máquina durante su operación normal, esto requiere un instrumento y una computadora portátil.

#### 4.6.1 Precauciones de Seguridad

El apantallado del cable axial debe conectarse a tierra conjuntamente con la caja de terminales, el voltaje en AC (50/60 Hz) entre el centro del pin y la carcasa del equipo PDA y el bus instalados debería estar entre 100-600 mV<sub>AC</sub>. Si no está conectada a tierra es posible que este voltaje pueda elevarse a un valor más alto. Los acopladores no están conectados eléctricamente al alto voltaje (HV), en tal sentido no hay una señal de 50/60 Hz firme disponible.

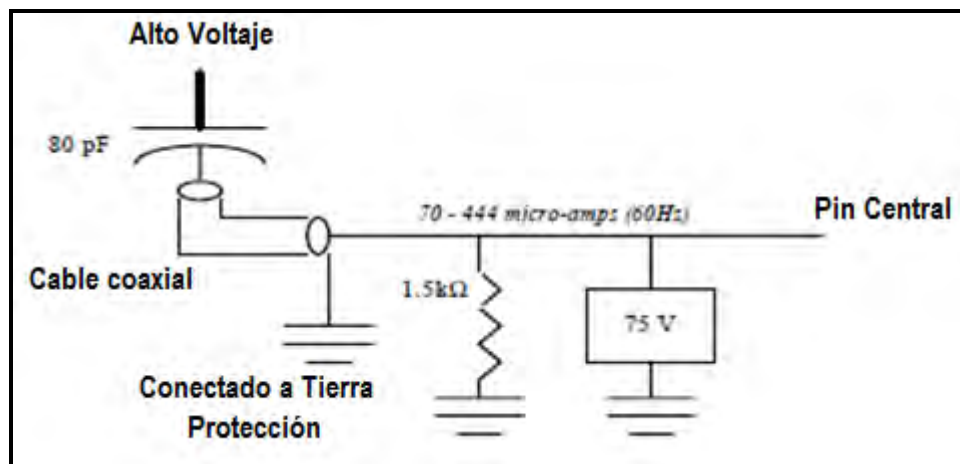


Figura 4. 31: Diagrama del circuito de prueba del cable coaxial

#### 4.6.2 Sistema de Pruebas

Primero debe realizarse un chequeo del instrumento para asegurarse tanto la computadora como el instrumento estén propiamente comunicados. Asegurarse de tener el cable de red conectado antes de encender cualquiera de los dos equipos (el instrumento o la computadora). Esto permitirá a la tarjeta de red escoger propiamente el protocolo de la red. Secuencialmente los cables coaxiales deben de conectarse en el orden previamente definido, obsérvese la Figura 4.32.





**Figura 4. 32:** Conexionado para el monitoreo de DP

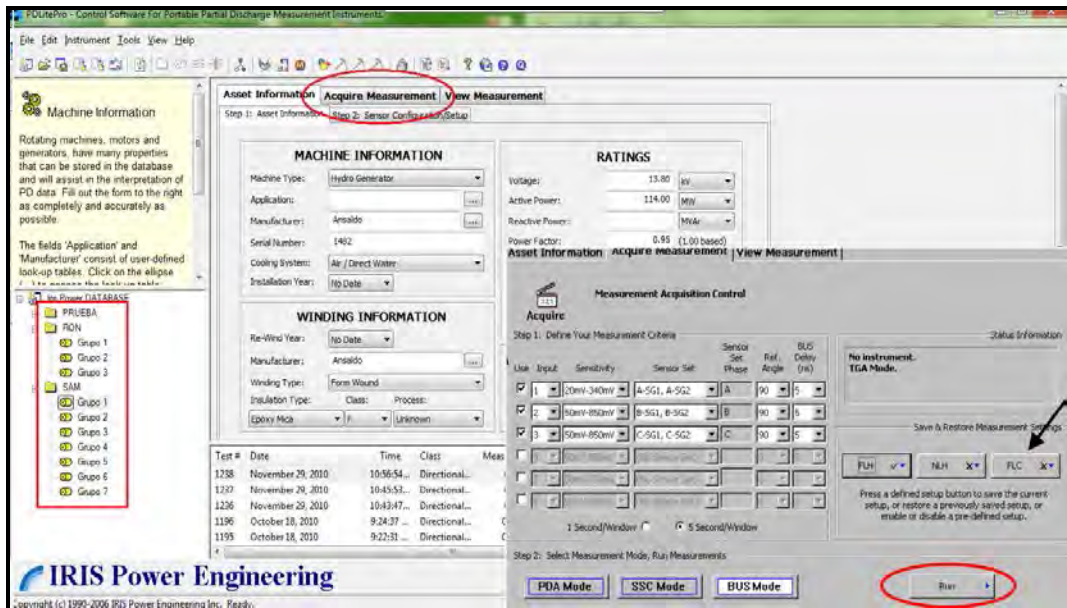
Para verificar la óptima operatividad del equipo IRIS POWER PDA – IV es necesario seguir los siguientes pasos:

1. Conectar el cable de alimentación del instrumento al equipo de medición y al supresor de picos y conectar la fuente de alimentación de la PC portátil al supresor de picos.
2. Conectar los cables 1M y 1SYS en el equipo de medición de descargas parciales de la siguiente manera: el cable 1M hacia los puertos MACHINE Y MACHINE 1; el cable 1SYS hacia los terminales SYSTEM y SYSTEM 1 (ver Figura 4.33).



**Figura 4. 33:** Conexionado para prueba de operatividad

3. Conectar la PC portátil con el equipo de medición de descargas parciales mediante el cable de comunicación.
4. Encender el equipo de descargas parciales y la PC portátil.
5. Encendida la PC portátil abrir el programa **PDLitePro**.
6. Una vez dentro del programa **PDLitePro** realizar la conexión virtual entre el equipo de medición y la PC portátil oprimiendo el botón F10; comprobando la conexión en la parte inferior derecha del monitor de la PC (en caso no se realice la conexión entre la PC portátil y el equipo de medición, revisar la conexión física entre la PC portátil y el equipo de medición, reintentar la conexión virtual de la manera descrita anteriormente).
7. Realizada la conexión entre el equipo de medición y la PC portátil, hacer clic izquierdo en el icono TGA que se encuentra en la carpeta Prueba en la ventana inferior izquierda del monitor de la PC Portátil.
8. Una vez abierta la ventana de datos de la prueba, hacer clic izquierdo en la pestaña **ACQUIRE MEASUREMENT**.
9. Abierta la pestaña **ACQUIRE MEASUREMENT**, hacer clic izquierdo en el botón **BUS Mode** (ver Figura 4.34).



**Figura 4. 34:** Vista de secuencia para la prueba del equipo

10. A continuación hacer clic izquierdo en el botón **Run**, seguidamente se abrirá una ventana.
11. En esta ventana debe hacer clic izquierdo en la opción **Current Setting Only** para empezar la prueba.
12. Una vez terminada la prueba, el gráfico obtenido en la prueba debe ser igual al gráfico que se tiene como referencia en una hoja impresa dentro de la maleta del equipo.
13. Cerrar el programa **PDLitePro**, apagar la PC Portátil y el equipo de medición de DP, desconectar los equipos y finalmente ir al lugar donde se realizará los controles.

**Nota:** Si la gráfica obtenida en la prueba resulta ser la misma que la gráfica que se tiene en la hoja impresa, significa que el equipo se encuentra en óptimas condiciones para realizar los controles correspondientes, de no obtener dicha gráfica avisar al jefe de turno, porque esto podría significar una descalibración del equipo.

#### **4.6.3 Procedimiento de Adquisición de Medida**

Este procedimiento es aplicable al control de descargas parciales de los grupos generadores de las centrales Hidroeléctricas Santiago Antúnez de Mayolo (SAM) y Restitución (RON) utilizando el equipo IRIS POWER PDA – IV.

Los pasos a seguir son los siguientes:

1. Ubicación del Grupo Generador para ser monitoreado y delimitar el área de trabajo:

Estatores de los 7 Grupos Generadores de la C.H. SAM y de los 3 Grupos Generadores de la C.H. RON.
2. Condición del equipo:

Los controles de Descargas Parciales (DP) se realizarán con los Grupos Generadores en servicio (ON – LINE).
3. Prevenciones de seguridad:

Disponer de los elementos de protección personal (EPP) y herramientas adecuadas.
4. Cantidad de personal que participa en la ejecución de las actividades como mínimo deberán ser dos (02) personas:
  - ✓ 01 Ingeniero Electricista o un Técnico Electricista capacitado en el uso del equipo de control de descargas parciales.
  - ✓ 01 Asistente técnico.
5. Obtención de recursos:
  - ✓ 01 Equipo de medición de descargas parciales PDA-IV IRIS POWER ENGINEERING.
  - ✓ 07 Cables conectores de puerto (3 para cada fase de la máquina; 3 para cada fase del sistema)
  - ✓ 02 Cables de alimentación.

- ✓ 01 Adaptador de Puerto USB a Puerto Serial.
- ✓ 01 Cable de comunicación PC – Equipo.
- ✓ 01 PC Portátil (Laptop) con el Software de medición de Descargas Parciales.
- ✓ Cable de alimentación.
- ✓ Fuente de alimentación para la PC.

6. Ejecución de la actividad:

- Con el Grupo Generador en funcionamiento y medido a:
  - ✓ 93% - 95% de la carga nominal del Generador.
  - ✓ Carga nominal Generador Síncrono SAM: 114 MW
  - ✓ Carga nominal Generador Síncrono RON: 70 MW
- Condiciones Previas ( ya descritas en el ítem 4.6.2)
- Conectar los cables 1M, 2M, 3M, 1SYS, 2SYS y 3SYS de la siguiente manera: los conectores del cable 1M hacia los terminales MACHINE 1 del equipo de medición y MACHINE A de la caja de salidas de señales del generador, los conectores del cable 1SYS hacia los terminales SYSTEM 1 del equipo de medición y SYSTEM A de la caja de salidas de señales del generador, así correlativamente para los demás cables (ver Figura 4.35).
- Conectar la PC portátil con el equipo de medición de descargas parciales mediante el cable de comunicación, encender el equipo de descargas parciales y la PC portátil.
- Encendida la PC portátil abrir el programa **PDLitePro**, hacer clic izquierdo en el icono TGA que se encuentra en la carpeta Prueba en la ventana inferior izquierda del monitor.

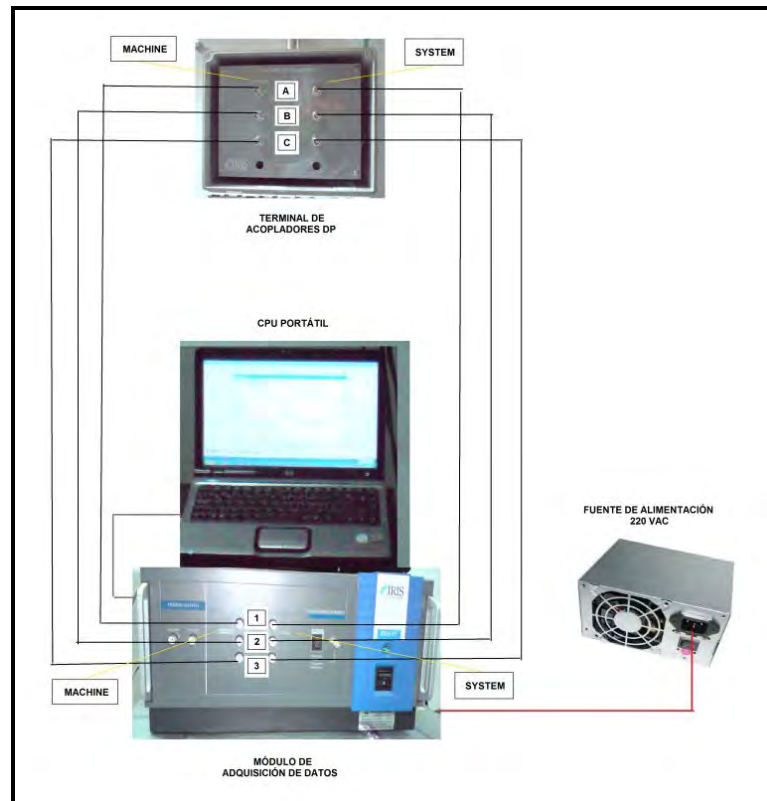


Figura 4. 35: Conexionado de los cables coaxiales

- Una vez abierta la ventana de datos de la prueba, hacer clic izquierdo en la pestaña **ACQUIRE MEASUREMENT** (ver Figura 4.36).

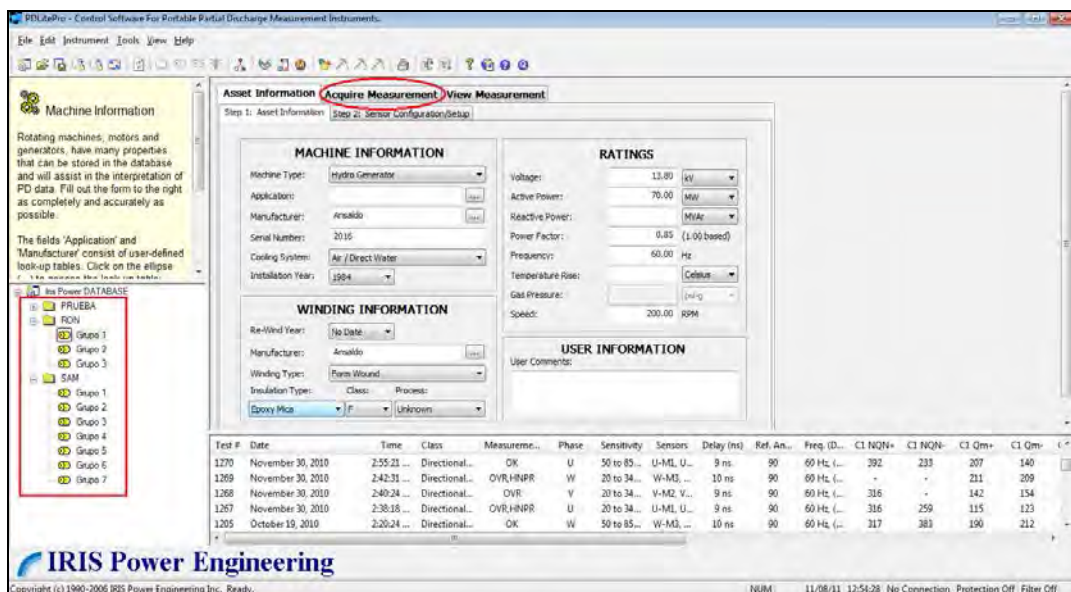
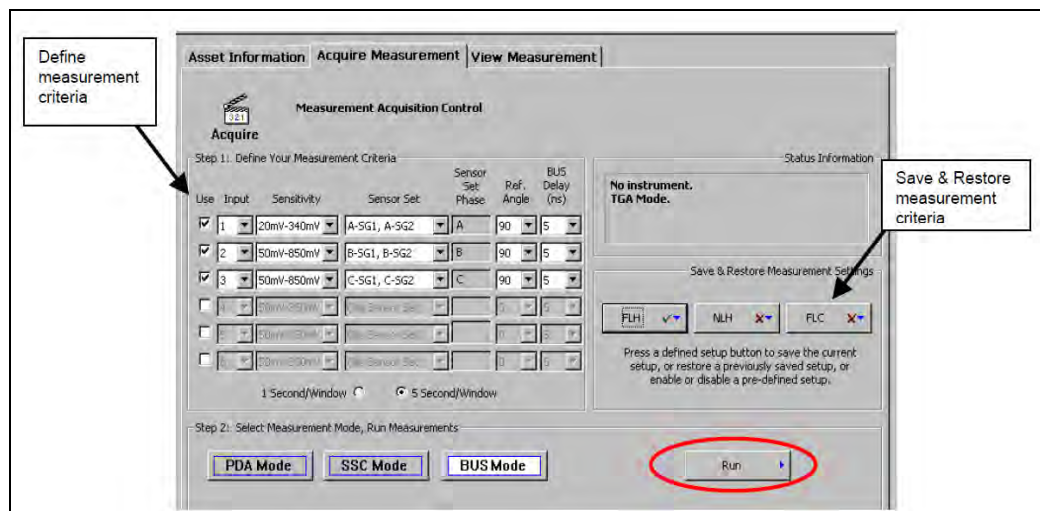


Figura 4. 36: Ventana principal del software PDLitePro

- Abierta la pestaña **ACQUIRE MEASUREMENT**, verificar que los datos en la columna **BUS DELAY** (ns) sean los correctos para el respectivo grupo generador.
- En la columna Sensitivity seleccionar el rango de sensibilidad de 20mV-340mV en las tres fases.
- Hacer clic izquierdo en el botón **BUS Mode**.
- Hacer clic izquierdo en el botón **Run**, seguidamente se abrirá una ventana.



**Figura 4. 37:** Ventana de adquisición de datos

- En esa ventana debe hacer clic izquierdo en la opción **Current Setting Only** para empezar la prueba.



**Figura 4. 38:** Vista de la opción para empezar la prueba

- Terminada la prueba hacer clic izquierdo en el botón **SAVE ALL** que se encuentra en la parte superior derecha de la ventana **MEASUREMENT**.

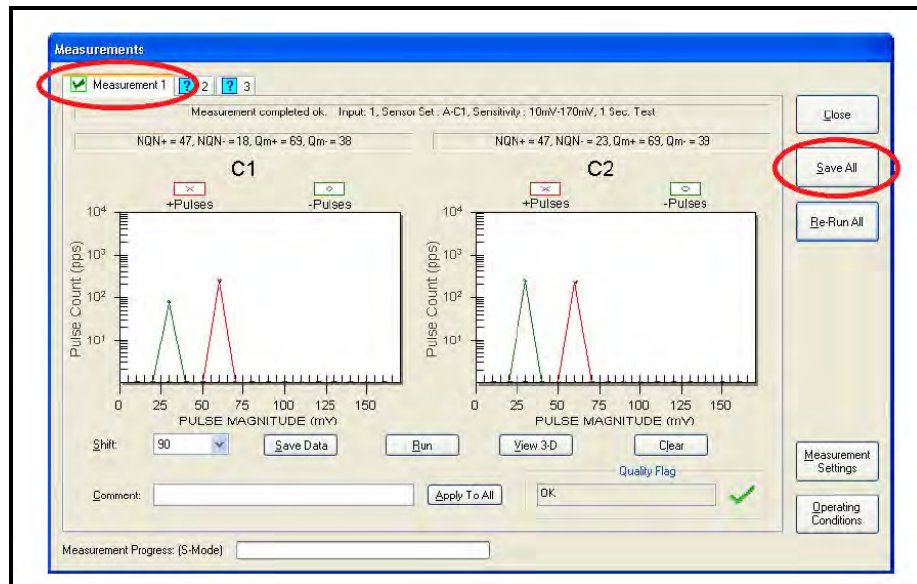


Figura 4. 39: Ventana de medición de un instrumento PDA – IV

- A continuación se abrirá la ventana **Asset Operating Conditions**. En la ventana **Asset Operating Conditions** ingresar los datos de prueba con los que se realizaron en ese momento.

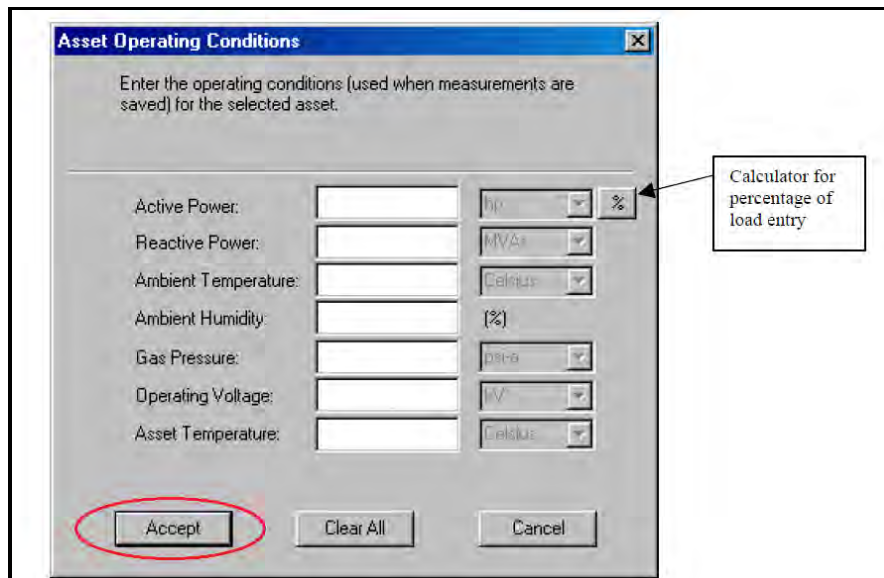





Figura 4. 40: Ventana de condiciones de funcionamiento de la máquina

- Ingresando los datos hacer clic izquierdo en el botón **Accept**, con lo que se regresará a la ventana **MEASSUREMENT**.



- Hacer clic izquierdo en el botón **CLOSE**.

**Observación:** Si el resultado de la prueba se ve que alguna de las fases tiene alguna observación o falla, se deberá realizar la prueba nuevamente cambiando el rango de sensibilidad al rango siguiente de 50mV - 850mV y repetir la prueba. Estas observaciones o fallas se representan por símbolos y nombres de calidad, los nombres de calidad se utilizan para evaluar la sensibilidad de los datos obtenidos (ver Figura 4.41 y Tabla 4.8).

	Indicates that a test has not yet been done.
	Indicates that an error, or a quality flag other than OK, has occurred.
	Indicates that a test has been successfully completed.

**Figura 4. 41:** Iconos de las pestañas según el estado de la medición

**Tabla N° 4. 8:** Nombres de calidad de la gama de sensibilidad de los datos obtenidos

Nombre Corto	Nombre Largo	Descripción
OK	Bien	Todas las DP están dentro del rango de sensibilidad seleccionada.
UND	Bajo-Magnitud de Pulsos	Las DP están debajo del rango de sensibilidad seleccionada; si es posible, seleccionar un rango lentamente y probar nuevamente.
OVR	Sobre-Magnitud de Pulsos	Los pulsos están presentes con cada magnitud mayor que el presente rango de pulso de magnitud, el instrumento puede medir exactamente. La NQN no aparecen calculados, y el Qm puede estar en error. El resultado de las pruebas no deberían ser guardadas, a menos que quiera registrar exactamente las magnitudes lentas de DP. La prueba

		debería ser repetida para un mayor rango de ajuste.
<b>PVRL</b>	Pulso-Contar con sobre Carga	El rango puede ser fijado para sensibilidad y/o algunas son magnitudes lentas de DP o pulso de ruidos. Esto puede causar que el pulso de repetición esta en error. El cálculo del NQN es probable también este lento. Esta advertencia puede estar ignorada si solo están comparando las Qm. Seleccione un mayor rango de magnitud de prueba para prevenir la advertencia.
<b>HNPR</b>	Alto-Ruido Tipo de Pulso	Un mayor número de pulso de ruidos donde algunas medidas pueden indicar que la DP leídas pueden estar en error. Si la repetición del pulso de ruido es demasiado repetitiva que la DP, entonces cuenta de la DP puede estar en error. Antes de realizar un costoso mantenimiento en el devanado, los resultados deberían ser confirmados por un off-line prueba de DP y/o inspección visual.
<b>HNM</b>	Magnitud de Ruido Alto	Los mayores niveles de ruido eléctrico se han detectado. El ruido es suficientemente alto que algunas de los pulsos de las DP graficadas pueden en hecho estar debido hacia la mayor magnitud de ruido. Primero repetimos la prueba a un mayor rango y se observa si el HNM el estado es nuevamente visualizado. Si el HNM detecta advertencia incluso que el rango de magnitud más alta, se debería tener

		preacciones antes de concluir que el aislamiento en el devanado del estator pueda estar deteriorado. La actividad de DP puede estar confirmada por una inspección visual y/o una prueba de DP off-line.
--	--	---

- Finalmente cerrar el programa PDLitePro, apagar la PC portátil y el equipo de medición de DP y desconectar las conexiones hechas para la prueba.
- Terminada la Prueba se puede analizar las gráficas obtenidas del monitoreo de las descargas parciales desde la PC portátil (ver Figura 4.42).

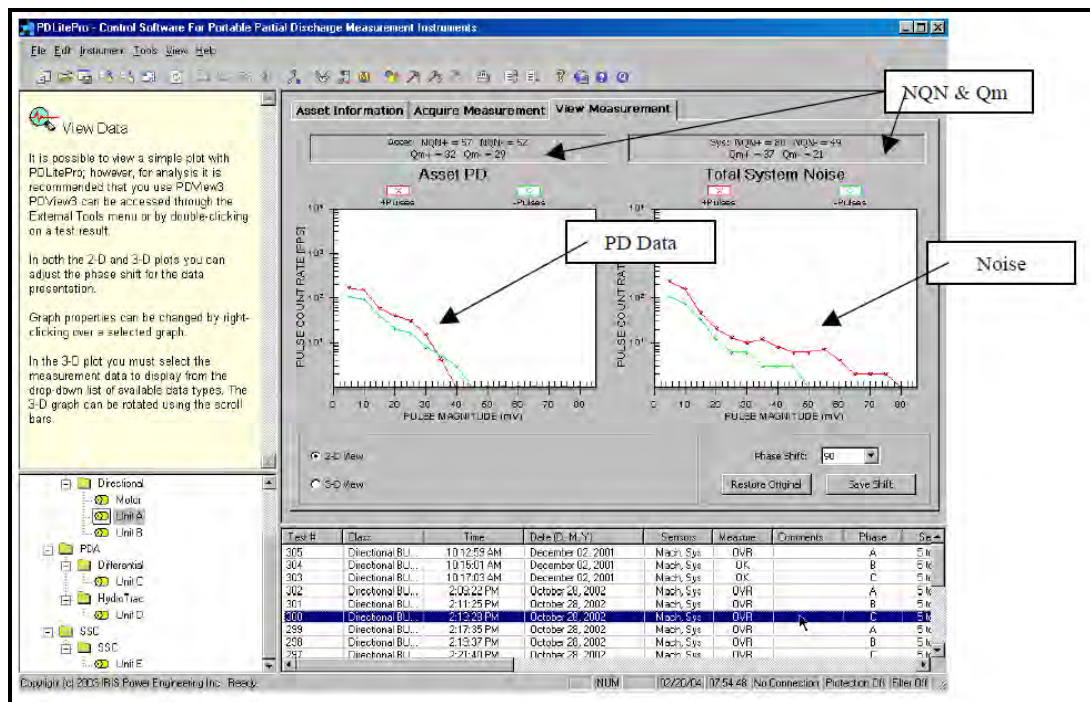


Figura 4.42: Vista de la medida tomada

#### 4.6.4 Parámetros de Operación de la Máquina

Ya que varios parámetros de operación afectan los resultados de pruebas de DP. Para que las pruebas sean directamente comparables necesitamos probar los parámetros de operación similar. En realidad, es impráctico pensar que las pruebas

subsecuentes se probaran con idénticos parámetros de operación; por consiguiente es indispensable que para cada prueba, y los de operación sean grabados. Por ahí, si hay un cambio en las DP desde la última prueba puede ser posible determinar si la diferencia es debida a los cambios en los parámetros o en el devanado.

Por directa comparación los parámetros de operación deben estar dentro de los rangos recomendados siguientes:

- ✓ Voltaje: +/- 200 V.
- ✓ Temperatura: +/- 5° C.
- ✓ Carga: +/- 10%.
- ✓ Presión del hidrogeno: +/- 5° PSI.
- ✓ Humedad (puede afectar los resultados de las pruebas): desconocido

a) Efectos de Carga

Si se tiene un predominio positivo fuerte, debe realizarse la prueba a cargas diferentes para determinar los cambios en las fuerzas mecánicas de las DP's. Debe haber por lo menos un 40 % de diferencia en la carga actual.

b) Efectos de la Temperatura

Los tamaños de los huecos son extremadamente dependientes de la temperatura. Se ponen más pequeños cuando el cobre llega a expandirse debido a las pérdidas I<sup>2</sup>R. Así, se espera que la DP baje con la temperatura; sin embargo, con problemas pendientes es posible que la DP suba con la temperatura. Si tenemos una predominancia positiva y ninguna dependencia de carga, se tienen que probar a dos temperaturas de en por lo menos 20°C de diferencia para ver el efecto en las DP's.

## **CAPÍTULO V**

### **INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DE DESCARGAS PARCIALES**

Se tienen instalados los sensores además de una cantidad de datos recolectados y ahora ¿qué hacemos?, es una pregunta que nace como inicio para interpretar los datos obtenidos. La colección de datos podría repetirse cada seis meses para máquinas de 6kV a más. Si un problema se desarrollará, entonces la frecuencia de recolección de datos necesita ser incrementada. Debido al pequeño tiempo entre la detección y la falla para motores menores a 4kV, se recomienda que las pruebas de DP se realicen con mayor frecuencia. Usando el resumen de las variables, podríamos realizar la tendencia de datos que es sencillo y útil; la colección de datos de diferentes parámetros de operación puede ayudar a determinar la condición del devanado estático.

#### **5.1 MÉTODOS DE PRUEBAS DE DESCARGAS PARCIALES**

La detección de descargas parciales involucra la medición de cuatro características de los patrones de DP.

- ✓ **Magnitud de DP**, relacionado con el tamaño o el volumen del vacío.
- ✓ **Cantidad de pulsos de DP**; relacionado al número de vacíos o defectos.

- ✓ **Polaridad de DP;** relacionado con la ubicación de los vacíos dentro del volumen del aislamiento.
- ✓ **Posición relativa de voltaje fase a tierra de DP;** relacionado a la ubicación de los defectos en cualquiera de los dos ya sea en la ranura o en los cabezales.

Los sensores montados de forma permanente bloquean las señales de poder en AC, pero pasan los pulsos de DP de alta frecuencia. Durante la operación normal, un instrumento IRIS conectado a los sensores separa el ruido y clasifica correctamente la DP, el tipo de sensor y el instrumento de prueba instalado dependen de la máquina o equipamiento que se desea monitorear.

#### **5.1.1 Método de Prueba TGA – SSC**

Esta prueba de DP requiere la instalación previa de sensores de DP dentro del devanado del estator llamados acopladores de ranura del estator (SSC). Este sensor de tipo antena o acoplador de ranura de estator, está compuesto de una estructura de electrodo impreso en un laminado de epoxi-vidrio (ver Figura 4.5). El SSC se ubica en la ranura, incrustado bien entre las bobinas superior e inferior o directamente debajo de la cuña como muestra la Figura 4.6. Típicamente, 6 SSCs son instalados pero 9 o 12 unidades podrían ser instaladas en grandes unidades generadoras. Los SSCs son de 50 cm de longitud, 1.7 mm de espesor y son fabricados a medida de tal forma que se tenga la misma anchura como el de la ranura del estator. Los pulsos son diferenciados del pulso del ruido basado en el ancho del pulso eléctrico detectado por el SSCs.

Durante la operación normal de la máquina, un instrumento llamado TGA-S es temporalmente conectado a cada uno de los sensores conectados (previamente instalados). La prueba del TGA-SSC es el medio más fiable para monitorear la actividad de DP en la operación de grandes turbinas generadoras. El TGA separa las señales de DP del ruido del sistema basado en las características del pulso y mide la cantidad, la magnitud, la ubicación (en los cabezales o en la ranura) y la posición de la fase (AC) de los pulsos de DP. El instrumento de prueba TGA en su configuración puede responder fiablemente por el ruido del sistema y asegurar que no haya impacto en la unidad de medidas de DP; por tanto este es un medio fiable de monitoreo de actividades de DP en un turbogenerador donde el ruido de la máquina interior puede ser un problema.

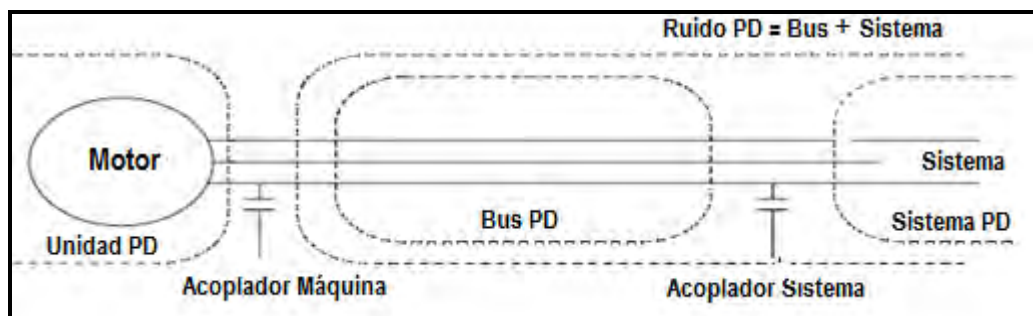
#### **5.1.2 Método de Prueba TGA – BUS**

Durante la operación normal de la máquina, un instrumento llamado TGA-B Lite es conectado temporalmente a los acopladores instalados previamente en cada fase. El acoplamiento, usualmente capacitivo, bloquea la señal de 50/60Hz y pasan la señal de descargas parciales de alta frecuencia, como se muestra en la Figura 4.2. El TGA separa el ruido del sistema basado en las características de tiempo de llegada del pulso, tiempo de llegada y medidas de la cantidad, de la magnitud y de la posición de fase (AC) del pulso de DP. Esto es un medio fiable de monitoreo de actividad de DP en operaciones de pequeños turbinas generadoras (menos de 100 MVA) y motores donde el ruido de la máquina interna generalmente no es un problema.

Cuando se instalan dos acopladores por fase, el instrumento TGA tiene la capacidad de separar los pulsos en tres categorías:

- ✓ Unidad de DP; DP que provienen dentro de la zona del acoplador de máquina hacia la máquina.
- ✓ Sistema; pulsos que provienen lejos de la máquina más allá del sistema de acoplador.
- ✓ Bus; pulsos que provienen entre la máquina y el sistema de acopladores.

La separación del pulso del ruido en el bus y en el sistema puede ser observada usando el software de visualización PDView. Note que la zona de área de cobertura por el acoplador de la máquina abarca todo el área tras del sensor de la máquina en el devanado, si es así entonces nuevas investigaciones serán garantizadas debido a las altas DP que siempre empezaran en los terminales de la máquina.



**Figura 5. 1:** Método de prueba TGA – BUS

### 5.1.3 Método de Prueba PDA

Durante la operación normal de la máquina, un instrumento llamado PDA Lite se conecta temporalmente a los acoplamientos capacitivos previamente instalados en cada fase, dos acopladores por fase son instalados cerca a la unión del anillo del circuito (anillo bus) y a las bobinas de alto voltaje de paralelos diferentes por fase. El paralelo seleccionado debería estar en lados opuestos del bus de fase entrante. Estos acopladores bloquean la señal de 50/60Hz y pasan la señal de descargas parciales de alta frecuencia, como se muestra en la Figura 4.3. El instrumento PDA-



IV separa las DP del ruido del sistema basado en el tiempo de llegada simultáneo y las características del pulso. El número (cantidad), la magnitud y la posición de fase AC de los pulsos de DP son medidos con el PDA-IV. En esta configuración, el PDA-IV puede explicar fiablemente para el sistema de ruidos y asegurar que no hay impacto en unidad de medidas de DP. Esto es un medio de monitoreo de actividad de DP fiable en un hidrogenerador donde el ruido interno de la máquina generalmente no es un problema.

## 5.2 INTERPRETACIÓN

### 5.2.1 Análisis de la Tendencia

La primera comparación realizada durante cualquier análisis de prueba y evaluación es comparar los resultados de la prueba actual con cualquier resultado de prueba anterior. Si la unidad de parámetros de operación son el voltaje, la carga y la temperatura del devanado, entonces tendrán que ser similares a aquellos parámetros de la prueba anterior, una comparación directa puede ser realizada entre el resultado de dos pruebas. Para casos donde los parámetros de operación no sean los mismos consulte las siguientes secciones. Para comparar las pruebas es mejor mantener las condiciones de operación dentro de ciertos rangos, tales como se muestra en la Tabla 5.1.

**Tabla N° 5. 1:** Criterio de análisis de tendencia en DP

<b>Voltaje</b>	+/- 200 V	La DP incrementa con el voltaje, así que las varianzas en voltaje pueden conducir a variaciones de niveles de DP
<b>Carga</b>	+/- 10%	Si una máquina tiene DP que es mecánicamente dependiente tal como bobinas conexiones flojas, entonces es
<b>Potencia Real</b>	+/- 10%	
<b>Potencia</b>	+/- 10%	

<b>reactiva</b>		probable que los niveles de DP puedan cambiar con la carga.
<b>Temperatura del estator</b>	+/- 5°C	La temperatura de operación impacta el volumen interno del vacío, el cual impacta los niveles de DP.
<b>Presión del Hidrogeno</b>	+/- 5 psi +/- 35kPA	La presión del gas impacta la perforación eléctrica de la tensión y por consiguiente, el nivel de DP.
<b>Humedad</b>	Desconocida	La humedad puede impactar superficialmente las DP, especialmente las DP en los cabezales o anillo de buses

Las condiciones medioambientales como la humedad puede tener un impacto muy notable, especialmente si la superficie contaminada llega a ser en parte conductiva, por lo que debe de registrarse (la temperatura) para ser tomado en cuenta en una próxima prueba. Se aprecia que a veces puede ser muy dificultoso reproducir las mismas condiciones de prueba, particularmente la temperatura. Sin embargo, el énfasis debe ser siempre en intentar lograr en lo posible a una condición uniforme. Esto significa tomar pruebas cuando las unidades estén calientes y la temperatura se haya estabilizado. A lo largo de la prueba la temperatura estará en un estado de transición cuando en una máquina realicemos una reducción de carga o no. En estos casos, es muy importante realizar rápidamente la prueba para minimizar los efectos de diferencias de temperatura.

Cuando se establece una tendencia lineal para las pruebas de DP tomadas durante un período, es obvio que se mostraran variaciones altas y bajas entre las sucesivas pruebas. Sin embargo la antigüedad del aislamiento de un sistema, hará más fácil de comprender el incremento de DP con el tiempo. El envejecimiento es un proceso lento por lo tanto no es de esperarse un incremento repentino de DP en

los resultados de las pruebas. Si se duplica la actividad de DP (el valor de  $Q_m$  es el doble de la prueba anterior) cada seis meses, nos indica que hay una falla en rápido proceso de desarrollo en el mecanismo. Otras tendencias son posibles, con cada indicativo de un cambio en la condición del aislamiento, aunque las condiciones del devanado del estator pueden ser evaluado, la falla nunca se puede predecir. Una falla real normalmente es originada por esfuerzos inusuales de tensión en el aislamiento como chispas, fallas de sincronización o sobrecalentamiento excesivo.

El mantenimiento puede hacerse a menudo a una máquina para bajar la actividad de DP. Los ejemplos de mantenimiento que se han conocido para reducir el nivel de DP con éxito se han realizado limpiando y haciendo reparaciones de las capas causados por la tensión del voltaje. Si la fuente de DP está dentro del volumen del aislamiento, entonces las reparaciones no pueden ser eficaces.

a) Descripciones típicas para tendencias

- ✓ Línea base - no hay datos disponibles para tendencia.
- ✓ Estable - ninguna evidencia de cambios en la condición del devanado del estator (+/- 25%).
- ✓ Tendencia descendente en una máquina nueva - es típico en nuevos devanados donde la DP decrecen durante los 12 – 18 meses de operación
- ✓ Tendencia ascendente – no requieren acción inmediata, las pruebas futuras son requeridas para determinar la continuidad de la tendencia.
- ✓ Tendencia descendente - común a menos que disminuya rápidamente, que a menudo indica un cambio en la condición del aislamiento como la carbonización de huecos internos.

- ✓ Deterioro rápido - Rápido incremento de DP es un indicador de alarma, pruebas posteriores determinaran la continuidad de la tendencia.
- ✓ Fluctuaciones – las DP generalmente fluctúa debido a cambios o variaciones en el ambiente y en las condiciones de operación y no necesariamente indican cambios en las condiciones de devanados.
- ✓ Tendencia descendente debido al mantenimiento - mantenimiento exitoso actividad que normalmente conduce a la mejora, tendencia a la baja de DP.

### **5.2.2 Comparación con Máquinas Similares**

Los datos coleccionados de la misma máquina que opera bajo parámetros similares usando el mismo sistema de pruebas es directamente comparable y el más útil. Esto es posible mas o menos comparando los resultados de una máquina con otras máquinas similares. Debido a la influencia en los resultados de la frecuencia de pruebas, el sistema de pruebas (sensores e instrumentos de pruebas) debe ser el mismo para todas las comparaciones. Basado en el análisis estadístico, el tipo de máquina no parece tener un gran efecto en los niveles de DP y a pesar de que los tipos de aislamientos tienen diferentes tipos de mecanismos de falla, si nos basamos sólo en la comparación general parece no haber mucha diferencia en los resultados globales de actividad DP.

La carga y la temperatura también pueden afectar grandemente los resultados de pruebas, pero dependen del tipo y de las condiciones del sistema aislante y en consecuencia no pueden usarse para realizar comparaciones generales. Las variables restantes de operación (voltaje y el gas refrigerante) deben ser también similares para comparar los resultados.

Las Tablas 5.2 - 5.3 presentan resúmenes estadísticos de valores +Qm basados en la base de datos IRIS 2003, estos contienen más de 60, 000, resultados de pruebas. Los datos están separados por sensor, gas refrigerante y rango de voltaje. Todos estos datos fueron adquiridos con el instrumento de pruebas IRIS. Cada tabla muestra los promedios, máximos y los 25<sup>th</sup>, 50<sup>th</sup>, 75<sup>th</sup>, 90<sup>th</sup>, y 95<sup>th</sup> rangos percentiles. El 25<sup>th</sup> percentil es la magnitud de +Qm cuyo 25% de los resultados de pruebas son inferiores y son muy pequeños como para interpretar. De igual forma para 50%, 75%, 90%. Normalmente existe preocupación por un devanado si es que +Qm en una máquina es más alto que el percentil 90<sup>th</sup> y incrementándose.

**Tabla N° 5. 2:** Valores de +Qm para PDA y BUS – Máquina refrigerado por aire

Calificación V	6-9kV	10-12kV	13-15kV	16-18kV	> 19kV
Promedio	115	227	312	373	290
Máximo	1870	3410	3680	3548	3552
25%	21	42	38	93	97
50%	38	74	96	213	157
75%	78	153	194	413	278
90%	241	334	392	838	449
95%	691	534	647	1317	1255

**Tabla N° 5. 3:** Valores de +Qm para BUS – Máquina refrigerado por hidrógeno

Calificación V	BUS 2-4	BUS 6-8	BUS 10-12	BUS 13-15	BUS > 16
Promedio	117	99	190	222	267
Máximo	3200	1942	3200	3314	3200
25%	7	17	35	44	37
50%	27	42	88	123	69
75%	100	116	214	246	195
90%	242	247	454	508	615
95%	583	340	706	789	1249

**Tabla N° 5. 4:** Valores de +Qm para SSCs ranura – Máquina refrigerado por hidrógeno

Calific. V	13-15kV			16-18kV			19-22kV			23-26kV	
H2 (psi)	11-20	21-30	31-50	21-30	31-50	> 50	21-30	31-50	>50	31-50	>50
Promedio	44	13	20	14	16	3	16	12	6	2	5
Máximo	773	361	155	199	142	87	75	307	243	192	128
25%	0	0	8	0	0	0	5	0	0	0	0
50%	0	0	13	5	3	0	10	0	0	0	0
75%	18	13	21	17	15	0	20	8	3	0	4
90%	102	38	40	33	59	7	42	35	11	3	11
95%	235	55	58	63	77	15	59	57	28	6	25

**Niveles típicos de comparación:**

- Despreciable < 25%.
- Bajo < 50%.
- Típica < 75%.
- Moderado < 90%.
- Alto < 95%.
- Muy alto > 95%

**Figura 5. 2:** Niveles típicos de comparación

### 5.2.3 Características de Descargas Parciales

a) Comparaciones entre fases:

Cuando el nivel de DP y los patrones son similares entre las fases, entonces se sospecha de un deterioro uniforme, de lo contrario, un problema aislado es lo más probable. Normalmente bobinas flojas, deterioro térmico, contaminación y problemas con la tensión del voltaje en las capas son generalizados o uniformes, considerando una inadecuada fabricación e inadecuado espaciamiento comúnmente son problemas aislados.

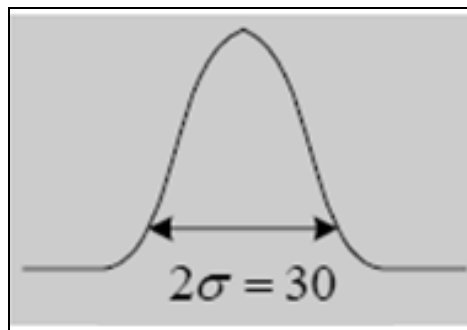
**Comparación de fases:**

- Uniforme
- Problema de aislamiento
- No DP

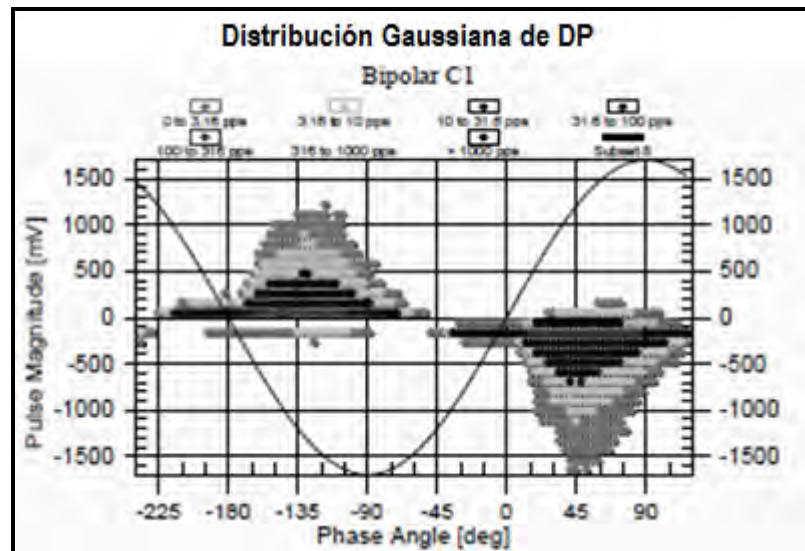
**Figura 5. 3:** Características de comparación de fases

b) Distribución de Pulsos

El pulso de distribución con respecto a la posición de la fase AC en el gráfico 3D puede ayudar determinando la fuente de algunos problemas en el devanado del estator. La distribución normal del pulso es una distribución Gaussiana, con una desviación estándar de  $15^\circ$  y es indicativo de vacíos o agujeros de forma esféricos dentro de la sección de la ranura del núcleo (observar la Figura 5.5).



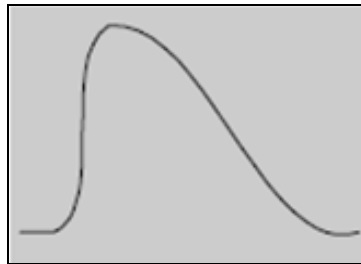
**Figura 5. 4:** Curva Gaussiana



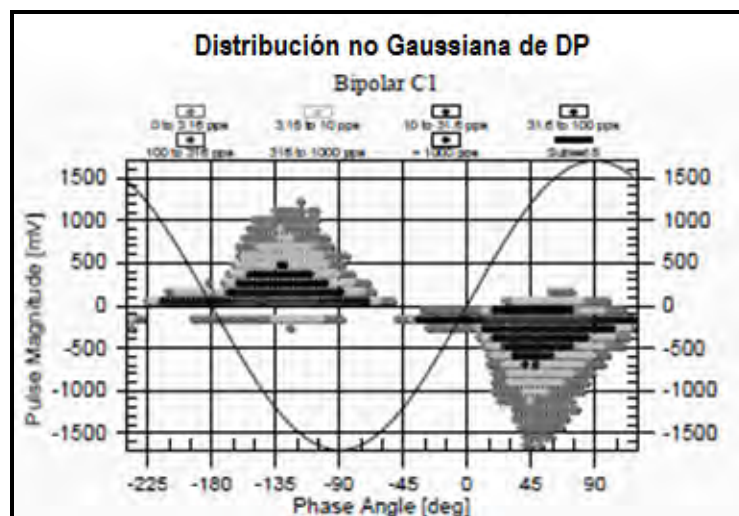
**Figura 5. 5:** Distribución Gaussiana de DP

Una banda estrecha de pulsos usualmente proviene de DP que ocurre en las esquinas metálicas, como conexiones. El ancho de banda de los pulsos puede

indicar múltiples mecanismos de fallas o quizás huecos alargados. Patrones dispersos a través del ciclo de AC nos hace pensar en la contaminación, el ruido o quizás en un combinación de varios mecanismos de falla que ocurren simultáneamente. Si la DP esta uniformemente distribuido a través del ciclo AC, por lo general fluidos distinguibles, entonces la fuente de los pulsos es típicamente del sistema de excitación estática y no un indicativo de un problema con el devanado (observe la Figura 5.24). Las formas de huecos son raramente normales y a menudo resultan patrones inusuales que no pueden describirse fácilmente. Un ejemplo de un patrón inusual es cuando las DP es sesgado (inclinado), distribución no gaussiana, a causa de los efectos de carga espacial dentro de los huecos (observe la Figura 5.7).



**Figura 5. 6:** Curva no Gaussiana

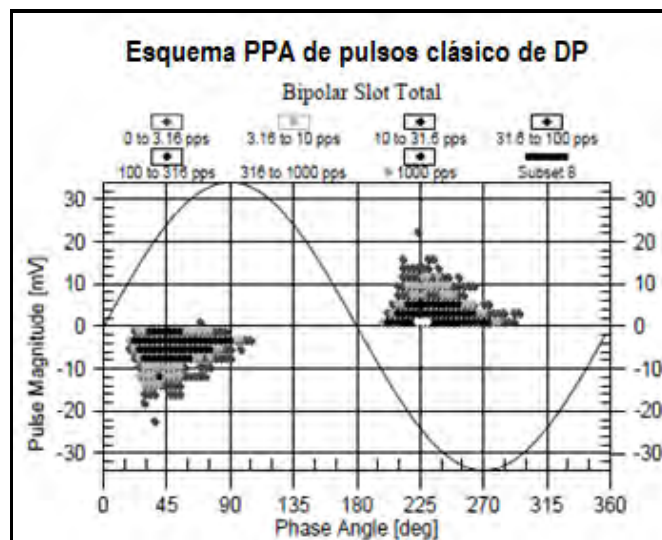


**Figura 5. 7:** Distribución no Gaussiana de DP

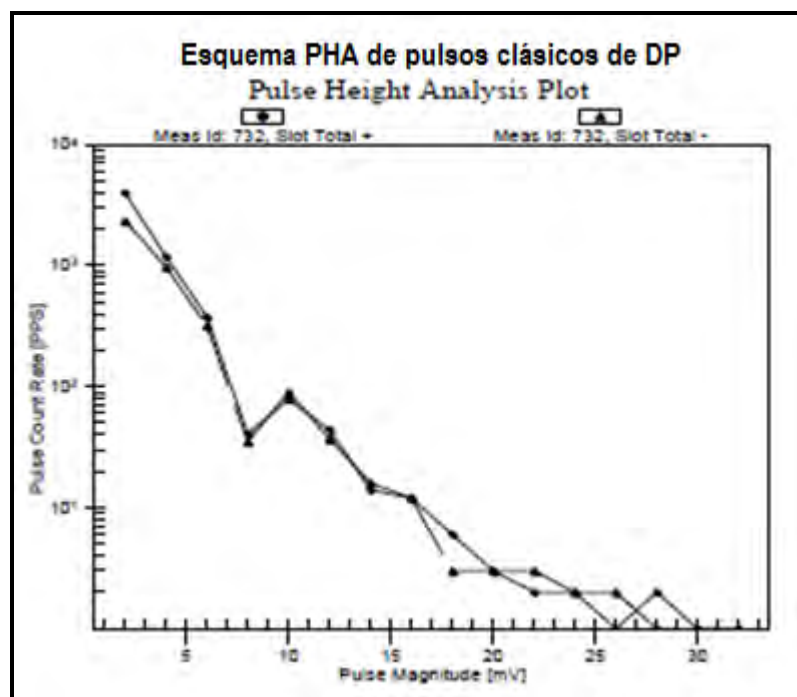


### 5.2.4 Pulsos Clásicos de Descargas Parciales

La inspección de los datos de descargas parciales revela la relación del ángulo de fase entre los pulsos de descargas parciales y la referencia del voltaje de fase a tierra. Como se describió, las descargas parciales que se originan dentro de la porción de la ranura en la bobina se centran a  $45^\circ$  para pulsos negativos y  $225^\circ$  para los pulsos positivos. Esta es la posición clásica para los pulsos dependientes de los niveles de voltaje de fase a tierra para la fase específica que está siendo medida. Las tensiones de voltaje fase a tierra ocurren a través de todas las bobinas a medida que pasan sobre el largo de la ranura en el hierro del estator. Por lo tanto, este patrón es indicativo de que ocurren descargas parciales en la ranura y se refieren como descargas parciales de ranura. El predominio positivo es una indicación de descargas parciales de superficie debido a desajuste de las bobinas, descargas eléctricas en las ranuras o arcos en la superficie de las cintas o pinturas de control de la tensión de voltaje. El predominio negativo indica descargas parciales internas por deterioro térmico, daño debido a cambios de carga o excesivas puestas en marcha/sobretensión o impregnación inadecuada durante la fabricación.



**Figura 5. 8:** Esquema PPA de pulsos clásicos de DP

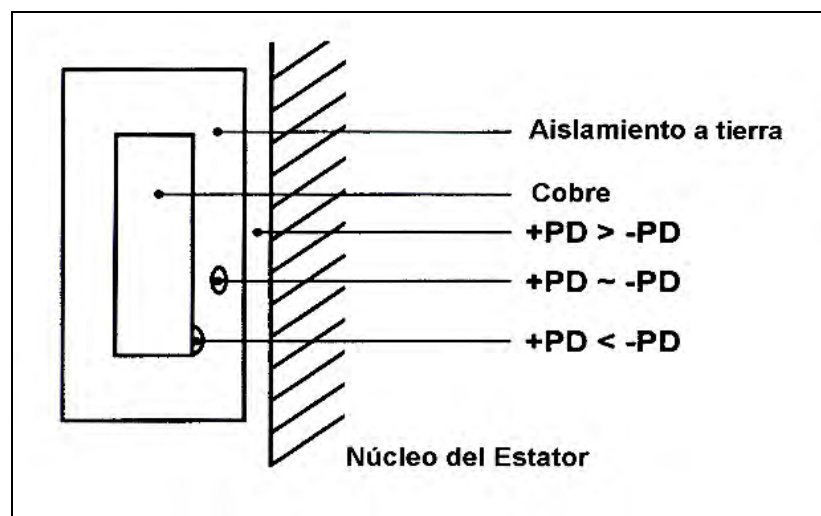


**Figura 5. 9:** Esquema PHA de pulsos clásicos de DP

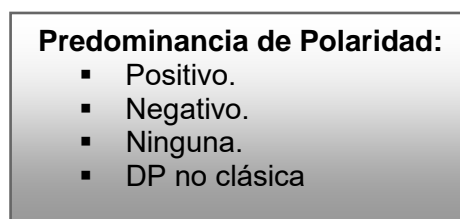
a) Predominancia de polaridad

La polaridad de los pulsos clásicos y su predominancia dice mucho sobre el mecanismo de falla pertinente como se muestra en la Figura 5.10. Debido al efecto de carga espacial, un pulso ocurrirá en una dirección basado en la proximidad del hueco a una sustancia metálica. Por esta razón es posible determinar donde se originan los pulsos y por consiguiente, la ubicación de los huecos o vacíos en el sistema de aislamiento.

Varios mecanismos de falla producen predominantemente huecos en una cierta ubicación del aislamiento. Observando la polaridad del pulso esto es a menudo posible determinar cual mecanismo de falla es dominante. Observe que el predominio de polaridad solo debe ser basado en los patrones de pulsos clásicos de descargas parciales y en la ausencia de DP clásicos, el predominio de polaridad no es aplicable.



**Figura 5. 10:** Predominancia de polaridad

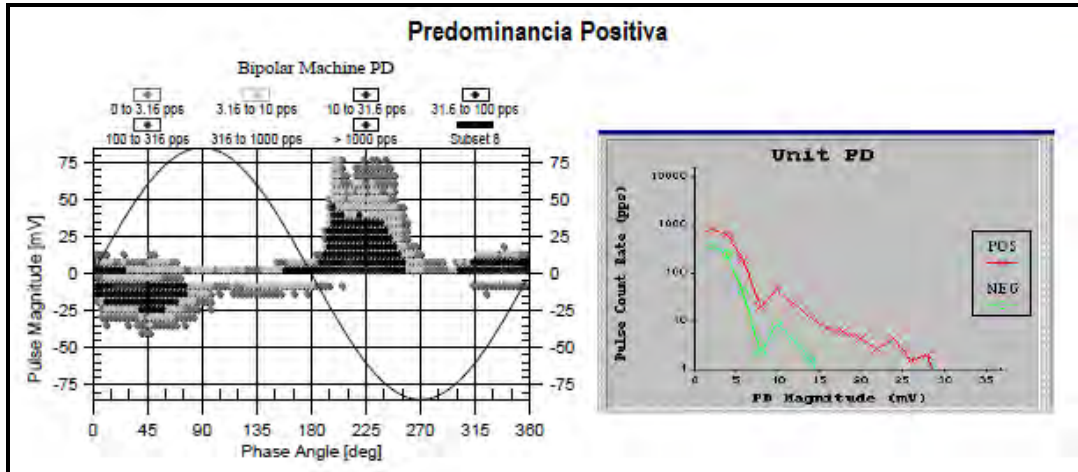


**Figura 5. 11:** Características de la predominancia de polaridad

### **Predominancia positiva**

El esquema de densidad lineal de pulsos es inspeccionado para determinar si hay o no hay un predominio fuerte de pulsos positivos de DP clásicos centrado cerca a  $225^\circ$  (observe Figura 5.12). Debido al comportamiento del pulso, la predominancia positiva normalmente indica que la DP es originada en la superficie del sistema de aislamiento, tal como la descarga en la ranura, seguido de cabezales y el deterioro de capas gradientes o semiconductoras. Las DP en la superficie suceden cuando una bobina no tiene íntimo contacto con el núcleo debido al encogimiento, instalación inapropiada, soldaduras o quizás a la degradación de las capas de control de tensión de voltaje. A menudo los problemas son asociados con las DP en la superficie y estas son reparables por prácticas de mantenimiento comunes tales

como: reasiamiento del devanado, limpieza y las reparaciones de las capas o recubrimientos que tienen tensiones de voltaje.

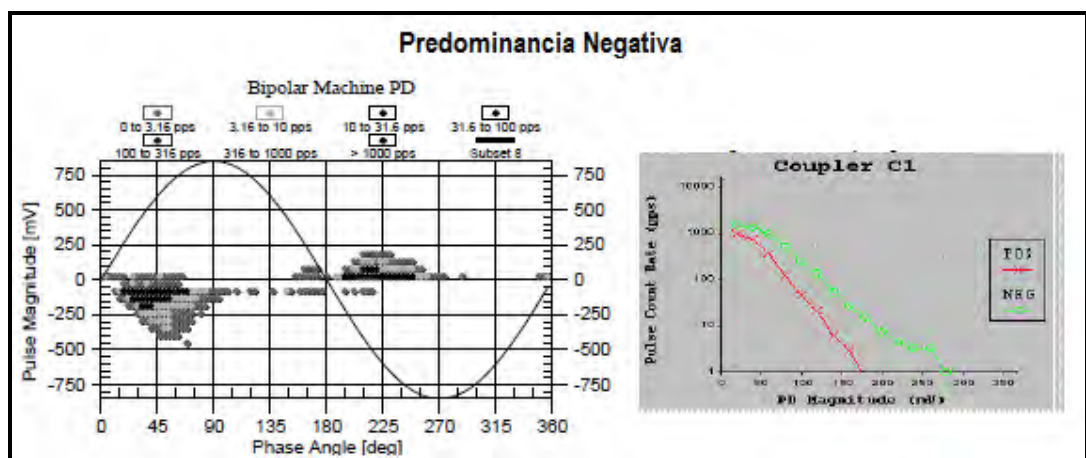


**Figura 5. 12:** Predominancia positiva (cerca a 225°) en un generador hidráulico

### **Predominancia negativa**

El esquema de densidad lineal de pulsos es inspeccionado para determinar si hay o no hay un predominio fuerte de pulsos negativos de DP clásicos, centrados cerca a 45° (ver Figura 5.13). Debido al comportamiento del pulso, el predominio negativo normalmente indica DP que se originan cerca de la superficie del conductor y dentro del sistema de aislamiento. Las DP pueden ser los resultados de huecos o vacíos creados en la inapropiada fabricación y a cargas cíclicas que han estresado la unión entre el conductor y las primeras capas de cinta aislante. Esta separación interna del aislamiento principal del conductor debido a la carga cíclica es debido a la alta temperatura del conductor y a las fuerzas de expansión térmica que causan fallas en la unión entre el conductor y el aislamiento. Eventualmente, después de algunos años de servicio incluso los devanados bien fabricados empezaran a mostrar señales de deterioro en esta área. Debido a la ubicación de hueco, esto es cerca a los conductores de cobre, en este caso no hay un mecanismo de

reparación fiable para este problema. Puede ser posible retardar el deterioro alterando los procedimientos de operación, tales como reducir más la carga (balanceándolo) o aumentar mejores técnicas sofisticadas de refrigeración que restrinja el rango de temperatura de la máquina en operación. La DP cerca del aislamiento de vuelta (espira) en bobinas multi espiras pueden llevar a la falla del devanado más rápido que una DP similar en las barras de Roebel.

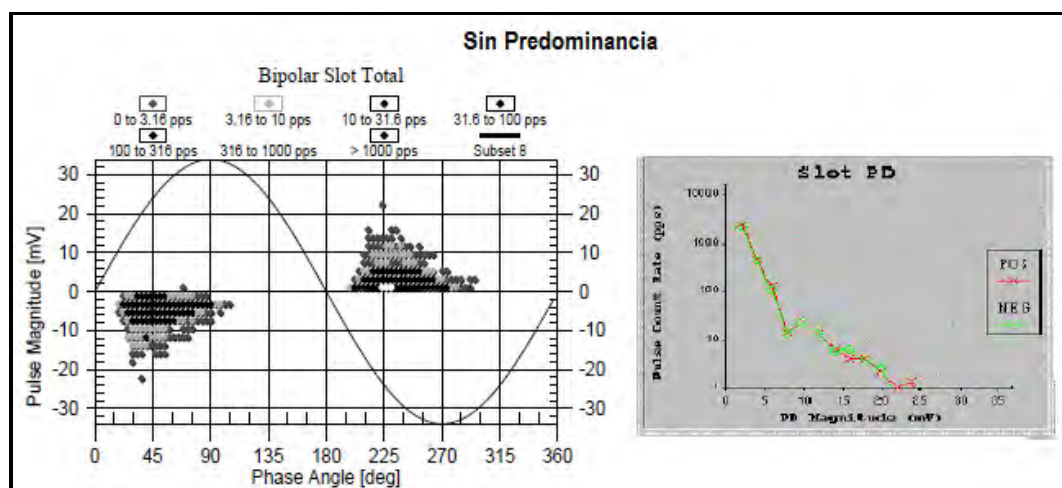


**Figura 5. 13:** Predominancia negativa (cerca a  $45^\circ$ ) en un generador hidráulico

### **No Predominancia**

Si los gráficos de predominancia positiva y negativa se superponen virtualmente en el esquema de análisis de pulsos altos, entonces la mayoría de DP está ocurriendo probablemente dentro del volumen del aislamiento principal (ver Figura 5.14). Cuando las DP ocurre en las posiciones clásicas de  $45^\circ$  y  $225^\circ$  en el esquema en 3D, las descargas fase a tierra son dependientes y ocurren de huecos o vacíos dentro de la porción de la ranura de la bobina. Las DP normalmente es el resultado del deterioro térmico (sobre temperatura) del sistema de aislamiento que ha obligado al material de vinculación orgánica del aislamiento a perder su fuerza adhesiva. Cuando esto ocurre, las cintas aislantes ya no están contenidas en una

forma consolidada y las capas llegan a separarse. Las DP ocurren así en los vacíos creados.



**Figura 5. 14:** No predominancia de polaridad (centrado cerca a 45° y 225°) en un generador hidráulico SSC

En un sistema de aislamiento nuevo, la presencia excesiva de DP de este tipo podría ser un indicador de una pobre impregnación dando como resultado en inclusiones de huecos dentro de la construcción del aislante. Como los huecos están cerca del conductor de cobre, esos huecos en el volumen del aislamiento no son reparables. Aunque no es posible la restauración del aislamiento dañado, las reducciones en la temperatura de operación del devanado puede bajar la degradación lentamente.

#### b) Efecto de la Carga

Si son tomadas pruebas a cargas que difieren de por lo menos en 40%, puede ser posible determinar el efecto de las fuerzas magnéticas en la vibración del bobinado. Para devanados sueltos, las DP pueden ser extremadamente dependientes de la carga con una actividad de DP positivas que se incrementa con la carga. Esto es debido al incremento de fuerzas magnéticas causando un incremento en el

movimiento de bobina y en consecuencia actividad de DP (positiva) en la superficie (ver Figura 5.15). El efecto es más significativo con devanados termoestables (duros) sueltos tal como devanados aislados con mica epóxica. Los devanados termoplásticos (suaves) se expanden cuando se calientan y tienden a asegurarse por sí mismos dentro del núcleo. Si la dependencia de la carga en las DP está presente, siempre es una preocupación que los bobinados sueltos pueden llevar a una falla prematura del devanado. Si se presentan estos movimientos de bobinas pueden dañar rápidamente la cubierta semiconductora en la parte de la bobina y si no lo controlamos entonces puede desgastarse el propio aislamiento. En casos extremos, este mecanismo de falla puede destruir de una u otra forma un buen devanado en pocos años.

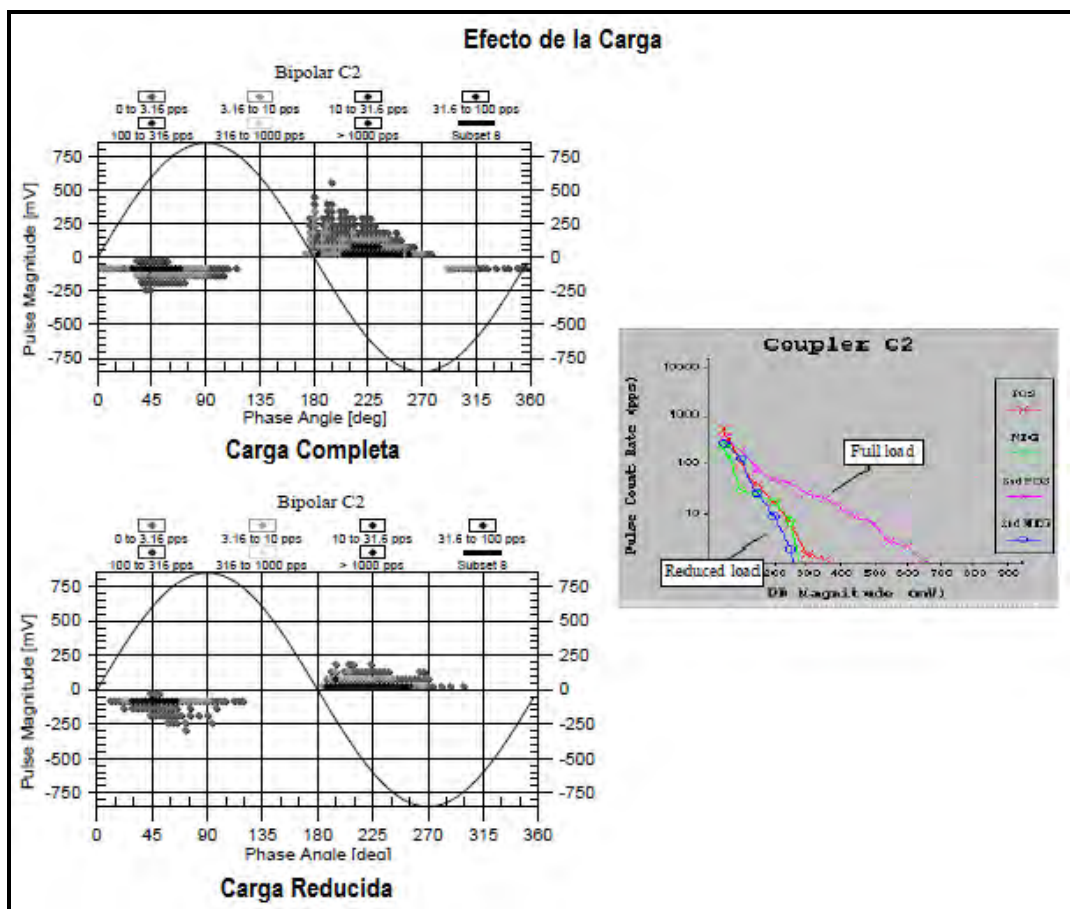


Figura 5. 15: Efecto de la carga (alta carga y baja carga)

La actividad de descargas en la ranura usualmente se desarrolla en dos estados. Durante el primer estado, la capa (armadura) semiconductor está todavía intacta, pero como separación intermitente del núcleo aterrado entonces la barra o bobinado vibra el cual conlleva a un contacto con chispa. Como la armadura o capa semiconductor se deteriora, la superficie de la bobina pierde un contacto íntimo con la puesta a tierra y el segundo estado de descarga positiva en la ranura, ranura – base, ocurre la DP en la superficie. Las DP dependientes de la carga sin la predominancia positiva indica que también es mecánicamente dependiente pero no dentro de la ranura, como la vibración del conductor, conexiones o en el núcleo de hierro arqueado (negativo – con carga). La ausencia de la dependencia de la carga no sugiere soldadura o que se vea afectada por medios de fuerzas mecánicas (ninguna).

<b>Efecto de carga:</b>
▪ Positivo - con carga
▪ Positivo - sin carga
▪ Negativo - con carga
▪ Ninguna.
▪ Desconocido.

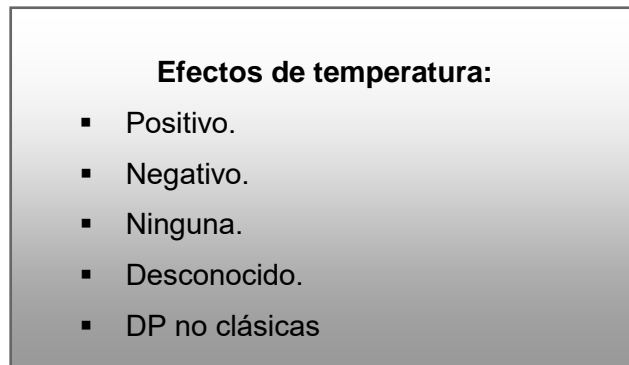
**Figura 5. 16:** Características del efecto de carga

c) Efecto de la Temperatura

La temperatura de operación puede afectar grandemente los resultados de pruebas de descarga parcial, varios materiales responden diferentemente a cambios en temperatura. Estos cambios pueden ser sutiles para varianzas pequeñas de +/- 5°C o drásticos, duplicando y triplicando para diferencias mayores a +/- 20°C. Realizando la prueba de DP con la máquina a la misma carga, pero a diferente



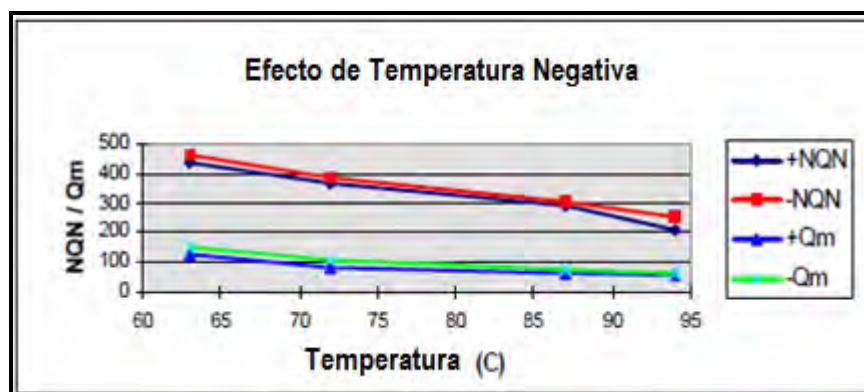
temperaturas por ejemplo por lo menos  $\pm 20^{\circ}\text{C}$  puede ayudar además de identificar qué mecanismos de falla están ocurriendo. Esto es a menudo llamado como pruebas en frío y en caliente.



**Figura 5. 17:** Características del efecto de temperatura

### Efecto negativo

Los tamaños de los huecos dentro del devanado estático usualmente son inversamente proporcionales a la temperatura de operación. Cuando aumenta la temperatura, el cobre y el aislamiento principal conlleva a que el material se extienda cerrando los huecos y así las DP decrecen (observe la Figura 5.18) este efecto es más significativo en devanados de asfalto y poliéster, pero pueden ser solamente observados en devanados epóxicos.

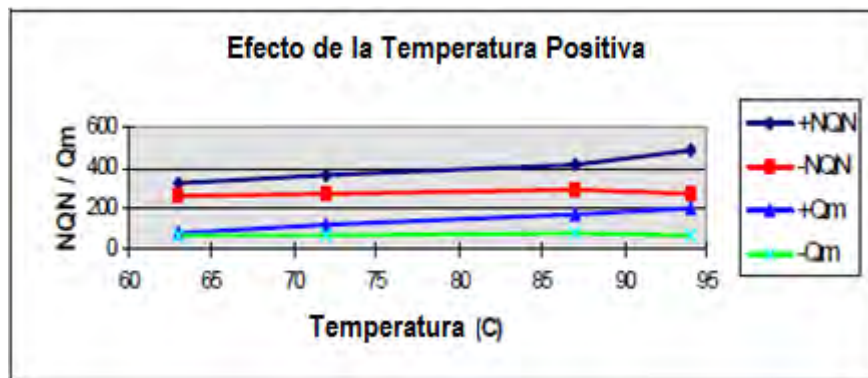


**Figura 5. 18:** Efecto de temperatura negativa

El mayor efecto de la temperatura es la más interna delaminación presente. Note que las temperaturas de las RTD se toman fuera del aislamiento principal y no reflejan cambios rápidamente en el conductor de cobre o en el aislamiento interno.

### **Efecto positivo**

Puede ser posible que la DP positiva en realidad se incrementan con la temperatura (observe Figura 5.19). Este fenómeno frecuentemente es un indicador de la deterioración de la capa semiconductor / gradiente. Como la temperatura del devanado estático se incrementa, la resistencia de las capas se incrementa y el resultado es un aumento de actividad de DP (positivo) en la superficie. Si los devanados son mantenidos bien apretados, entonces generalmente será un mecanismo de falla muy lento, pero podría llevar a una alta producción de ozono.



**Figura 5. 19:** Efecto de temperatura positiva

### d) Efecto de la Presión del hidrógeno

Desde la ocurrencia de una descarga parcial este es impactado grandemente por la forma del agujero y la presión de gas dentro del vacío, las variaciones en la presión del hidrogeno de operación pueden llevar a grandes fluctuaciones en las actividades de DP totales. Estos cambios pueden ser útiles, para variaciones pequeñas de +/- 2 psi o drástico, duplicando y triplicando para diferencia mayores a

+/- 5 psi. Realizando las prueba de DP con la máquina a la misma carga pero a presiones de operación diferente, por ejemplo +/- 10 psi, quizá pueda a ayudar a identificar qué mecanismos de falla están ocurriendo. Si la DP disminuye con aumentos pequeños en la presión del hidrógeno (efecto negativo), entonces la fuente de las DP probablemente estén dentro del ambiente del hidrógeno. Si no hay un cambio notable en el patrón de DP a diferente presión de hidrógeno o a una disminución en DP a presiones más bajas (efecto positivo), entonces es probable que la DP son de fuentes externas al ambiente del hidrógeno en los terminales de la máquina. Note que esta última declaración sólo aplicarán a instalaciones de BUS en máquinas refrigeradas con hidrógeno, no es para aplicaciones de SSC.

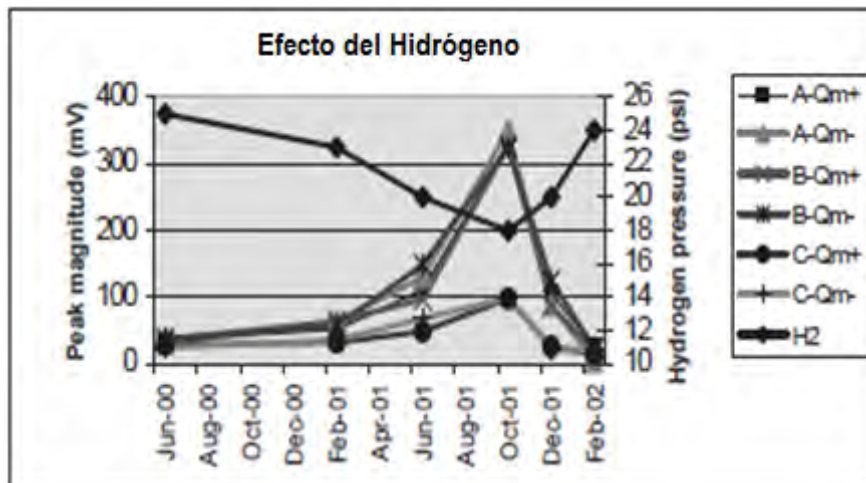
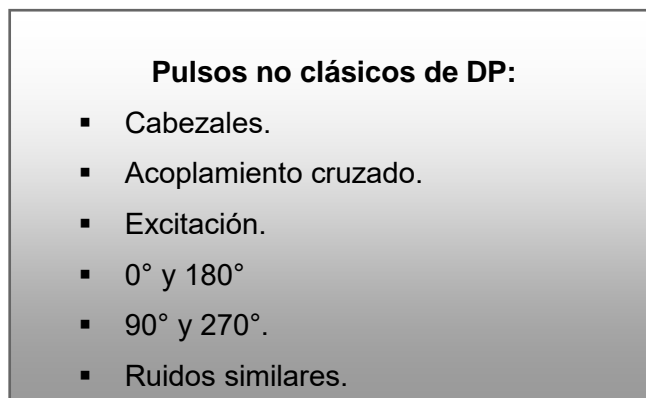


Figura 5. 20: Efecto del hidrógeno en un turbogenerador

### 5.2.5 Pulsos No Clásicos de Descargas Parciales

Los pulsos centrados en otras posiciones en el ciclo de cada fase pueden ser dependientes de otras referencias de voltaje, tal como voltaje de fase a fase o de fase a tierra de otra fase o excitación. Puede haber algunos pulsos desplazados por otros ángulos, pero éstos son infrecuentes. Desde que el gráfico PHA solo muestra los pulsos negativos que ocurren entre  $-15^\circ$  y  $135^\circ$  y los pulsos positivos entre  $165^\circ$

y 315°, una manera muy rápida de determinar si o no los pulsos son clásicos o no clásicos se hace comparando los resultados 2D con los resultados 3D. Si hay pulsos en el gráfico 3D que no indican en el gráfico 2D, entonces está ocurriendo definitivamente una DP no clásico.



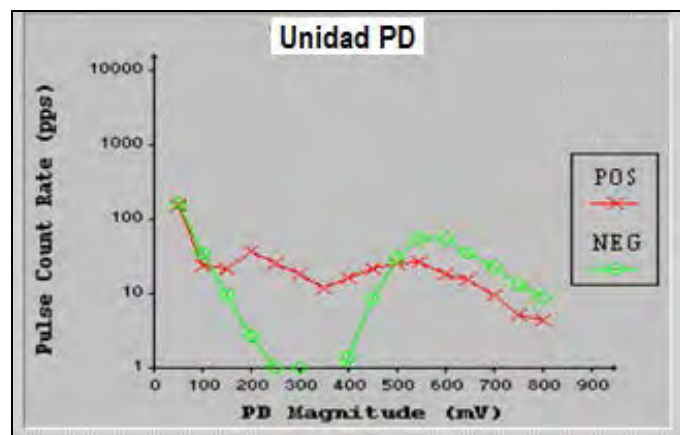
**Figura 5. 21:** Características de pulsos no clásicos de DP

a) Descargas parciales de fase a fase

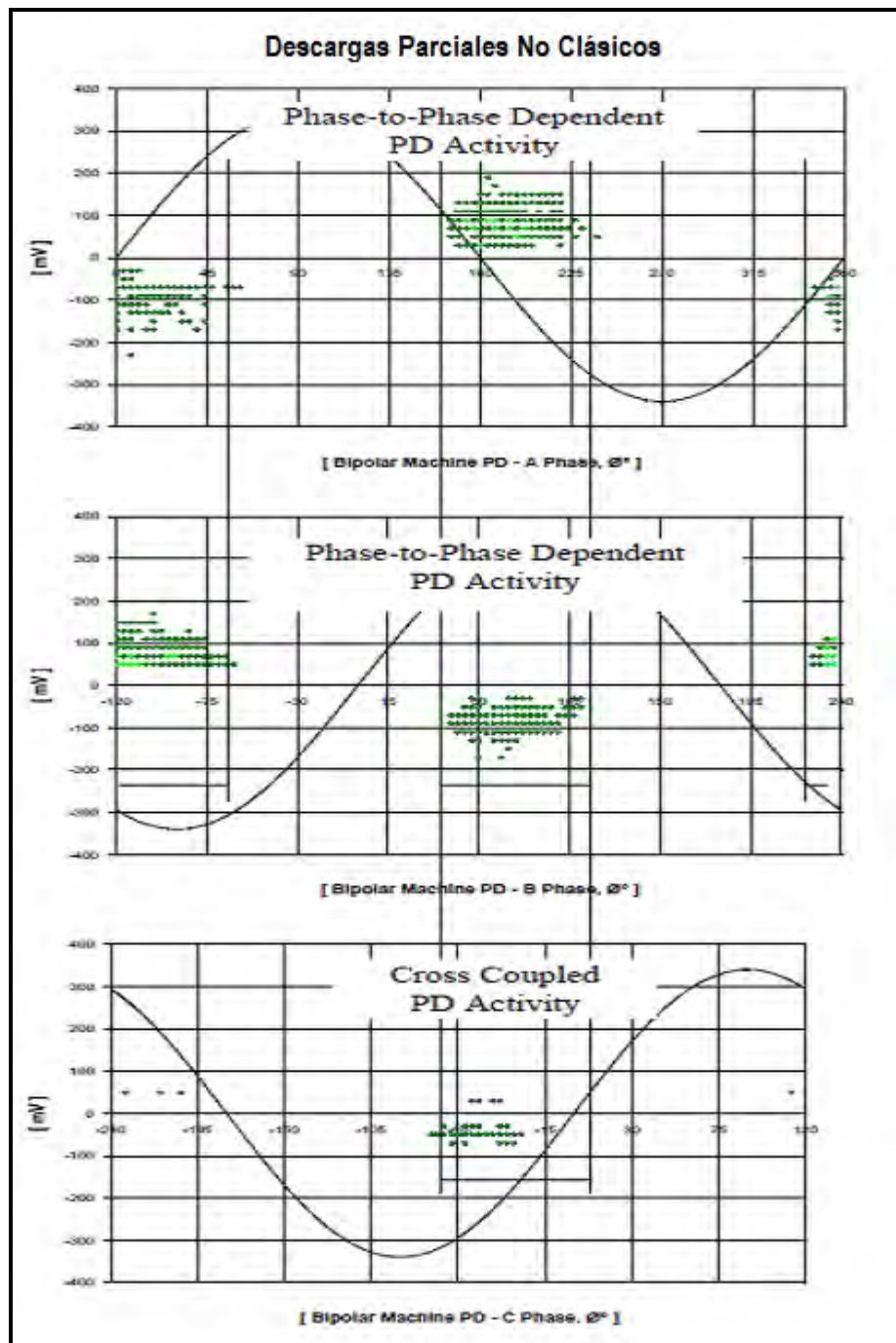
En una máquina rotativa puede haber varias fuentes de descargas parciales fuera de la ranura. A menudo, la presencia de estas fuentes de descargas puede relacionarse con superficies contaminadas con polvo, espacio inadecuado y/o poco contacto entre el material semiconductor y el graduante (interface del control de tensión). En el caso de descargas parciales en el aislamiento principal podría deberse a devanados con una impregnación muy pobre. La mayoría de los fenómenos antes mencionados dan como resultado el aumento de descargas de superficie, que es lo contrario a las descargas internas del aislamiento y que pueden eventualmente conducir a una falla de fase a fase o de fase a tierra. La actividad de descarga en los buses de anillo o entre los buses mismos es también una actividad de descarga dependiente de fase a fase.

La distribución del campo eléctrico controla las descargas parciales. Ya que los campos en el área de los cabezales son dependientes del voltaje fase a fase y los campos eléctricos en el área de la ranura son de voltaje fase a tierra, es a menudo posible distinguir entre las descargas que ocurren en la parte de la ranura versus la que ocurre en los cabezales del devanado, utilizando Esquemas de Resolución de Fase. Los pulsos de descargas parciales que son dependientes del voltaje de fase a fase estarán desplazados  $\pm 30^\circ$  en relación a la posición clásica o centradas en posiciones  $15^\circ$ ,  $75^\circ$ ,  $195^\circ$  y  $255^\circ$  a lo largo de la señal sinusoidal representativa.

Creando para cada fase de una determinada máquina un esquema lineal de densidad de pulsos (LPD), con el voltaje de referencia fase a tierra desplazado en  $120^\circ$  entre fases basadas en la fase de rotación, la actividad de descargas podría ser representada en el dominio del tiempo (observe la Figura 5.23), hay una fuente de DP fase a fase que está ocurriendo entre los componentes de alto voltaje de la fase A ( $195^\circ$ ) y la fase B ( $75^\circ$ ). Esta DP es un acoplamiento cruzado para la fase C ( $315^\circ$ ).



**Figura 5. 22:** Despliegue tipo “Joroba” propia de DP en cabezales



**Figura 5. 23:** DP no clásicos

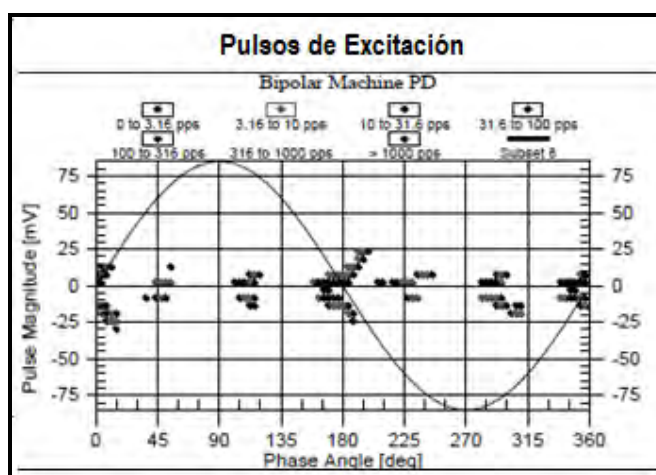
b) Acoplamiento Cruzado

Los pulsos de descargas parciales son pulsos de alta frecuencia que pueden acoplarse capacitivamente de una fase a otra a lo largo de los cabezales o de los anillos de los circuitos (anillo bus). Como resultado, un acoplador conectado a una

fase puede detectar pulsos irradiados desde otra fase. Este comportamiento es llamado acoplamiento cruzado y se detecta por la presencia de pulsos de descargas parciales desplazados  $\pm 120^\circ$  de las posiciones clásicas o centrados a  $345^\circ$ ,  $105^\circ$ ,  $165^\circ$  y  $285^\circ$ . La actividad inter fasial de acoplamiento cruzado sería desplazado en  $\pm 30^\circ$  en fase cambiado de esas posiciones mostradas para la fase C ( $315^\circ$ ) en la Figura 5.23. Los pulsos de descargas parciales de acoplamiento cruzado dependen de la geometría del devanado del estator y no indican necesariamente un problema dentro del aislamiento.

c) Pulsos de Excitación

Algunas veces los acopladores de descargas parciales detectan los disparos de alta frecuencia de los tiristores en los sistemas de excitación estática. Estos pulsos usualmente tienen un comportamiento predecible de repetición, son de baja magnitud y ocurren con la misma frecuencia (6 por ciclo) a través del ciclo de Corriente Alterna. Usualmente sólo son discernibles cuando hay baja actividad de DP en la unidad y la escala de prueba más sensitiva del instrumento de descargas parciales está siendo usada (rango más bajo) Estos pulsos usualmente no indican problema alguno.



**Figura 5. 24:** Pulsos de excitación

d) Efecto de humedad

Quizás el más influyente, pero todavía imprevisible, los impactos de la condición ambiental en las DP son los efectos de variaciones en la humedad del ambiente en máquinas refrigeradas mediante aire. La humedad puede causar que la tensión de la perforación eléctrica del aire disminuya y por consiguiente cause un incremento en la DP superficial. La humedad puede impactar el rastreo eléctrico de la DP en la superficie, y por consiguiente causa una disminución en DP. Así, en algunas circunstancias, las DP pueden subir, mientras en otras podrían bajar con incrementos en la humedad relativa. El efecto de la humedad en algunas circunstancias se ha conocido para causar una fluctuación en las DP en más de 300%. Puesto que cada escenario es diferente, es sumamente importante que la humedad del ambiente sea grabado en el momento de la prueba para que las tendencias puedan ser evaluadas correctamente y las decisiones no sean hechas sobre tendencias ascendentes que ocurren debido al efecto de la humedad y no haya cambios en la condición del devanado. La experiencia presente indica que la humedad sólo impacta en la actividad superficial.

e) Otros pulsos no clásicos

Hay otras dos posiciones donde comúnmente ocurren descargas parciales no clásicas:  $0^\circ$  y  $180^\circ$ , o  $90^\circ$  y  $270^\circ$ . Cuando los pulsos ocurren en los cruces de cambio de polaridad en la Corriente Alterna a  $0^\circ$  y  $180^\circ$ , las descargas parciales son usualmente de una fuente afectada por vibraciones mecánicas, como por ejemplo una conexión floja u oxidada. Los pulsos que se agrupan alrededor de los  $90^\circ$  y  $270^\circ$  son usualmente corona, que ocurre a lo largo de la superficie de los anillos de los circuitos o en la interface de control de la tensión cuando está severamente deteriorada. Las fuentes de ruido con características de descargas



parciales tienden a producir patrones que son de banda ancha a través del ciclo de Corriente Alterna. La magnitud de esta actividad es bastante baja con el envejecimiento del devanado, las DP originados dentro del devanado alcanzarán altas magnitudes y será más visibles más allá de estas DP similares al ruido.

### **5.2.6 Condiciones Ambientales y de Operación**

Como se describió ya anteriormente, las descargas parciales son muy dependientes del voltaje, así que mínimos cambios en el voltaje pueden afectar los resultados de las descargas parciales. Cuando el problema predominante se debe a vacíos en el aislamiento principal debido a la fabricación defectuosa, el deterioro térmico, los cambios constantes de carga y/o las descargas en la ranura, las pruebas a bajas temperaturas de funcionamiento tienden a tener niveles de descargas parciales mucho más altos, que las pruebas realizadas a altas temperaturas. Este fenómeno ocurre porque el cobre y el aislamiento se expanden a altas temperaturas reduciendo el volumen de los vacíos y por lo consiguiente de las descargas parciales resultantes (ver Tabla 5.5).

Si el problema predominante se debe a tensiones mecánicas, como por ejemplo bobinas flojas o arcos provenientes del núcleo, la actividad de descargas parciales a cargas menores será significativamente más baja que las pruebas a cargas mayores, ya que las fuerzas mecánicas presentes serán más débiles con las carga más bajas. Si el problema predominante es descargas parciales de fase a fase o debido a contaminación, la humedad en la superficie puede afectar enormemente los resultados. Dado que las fuentes de descargas parciales pueden variar debido a pequeños cambios en las condiciones ambientales o de funcionamiento, las pruebas deben realizarse bajo condiciones similares. Adicionalmente, considerando

que el punto de ruptura eléctrica es directamente dependiente de la presión en los vacíos, las pruebas a menor presión operativa tendrán más descargas parciales que las pruebas hechas a más alta presión.

**Tabla N° 5. 5:** Efectos de las Condiciones de Funcionamiento

Efecto de la Temperatura	Negativo	DP disminuyen a temperaturas más altas
	Positivo	DP aumentan a temperaturas más altas
Efecto de la carga	Negativo	DP disminuyen con más carga
	Positivo	DP aumentan con más carga
Efecto del Hidrogeno	Negativo	DP disminuyen con más presión
	Positivo	DP aumentan con más presión

### 5.2.7 Características de las Descargas Parciales de los Mecanismos de Falla

Muchos mecanismos de falla tienen su propio patrón de descargas parciales, por lo tanto la detección de este patrón puede ayudar a determinar que mecanismo de falla es el predominante.

#### a) Deterioro térmico

El deterioro térmico resulta de operar un sistema de aislamiento durante largos períodos de tiempo a temperaturas cercanas a las temperaturas máximas permitidas por las especificaciones de diseño o por períodos más cortos por encima del límite dictado por esas especificaciones. Como es el caso usual con todos los sistemas de aislamiento, el daño incurrido es acumulativo, no reversible y da como resultado la disminución en la habilidad de la resina adhesiva (epoxi o poliéster) para unir mecánicamente las capas de aislamiento.

La pérdida de la adherencia mecánica permite la formación de vacíos entre las capas de cinta que forman el grosor del aislamiento. Estos vacíos están distribuidos a lo largo del aislamiento y pueden producir descargas sin importar la “dirección” de la tensión eléctrica a través de ellos. A causa de esto, los pulsos producidos en dichos vacíos no muestran ninguna real predominancia en la polaridad y las descargas parciales se agrupan cerca de los 45° y 225°. Por lo tanto, una distribución similar de las descargas positivas y negativas en las posiciones clásicas, es indicativa de deterioro térmico generalizado o de envejecimiento.

Debido al coeficiente térmico de expansión, los vacíos que se encuentran en la porción de la ranura se reducen en tamaño a medida que la temperatura aumenta, produciendo un efecto negativo de temperatura. Esto ocurre a causa de la relación del tamaño del vacío respecto de la tensión eléctrica los vacíos más pequeños requieren menos tensión de voltaje para que se produzca la chispa.

La magnitud de este cambio en términos de descargas parciales afectadas por el cambio en las temperaturas es dependiente del grado de delaminación en el aislamiento. Las variaciones de carga afectan las descargas parciales en forma mínima.

**Tabla N° 5. 6:** Características de DP por deterioro térmico como mecanismo de falla

Mecanismo de falla	Polaridad	Efecto de carga	Efecto de temperatura	Ubicación de fase
Deterioro térmico	Sin predominancia	Ningún efecto	Negativa	45° y 225°

b) Ciclaje de carga

El “Ciclaje de carga” es una forma específica de deterioro térmico que se manifiesta como un deterioro de la adhesión entre el aislamiento principal de la bobina y tanto el aislamiento de las espirales o entre vueltas (devanado multi vueltas) o entre el aislamiento principal de la barra y el aislamiento de los filamentos o subconductores (Barras Roebel).

Los cambios de tensión repetitiva provenientes de repentinos cambios de carga que se imponen en la adhesión mecánica entre el aislamiento de la bobina o barra y tanto el aislamiento de las espirales o el aislamiento de los semiconductores, pueden causar que ésa adhesión se debilite y se rompa. Esto forma vacíos dentro del aislamiento en las proximidades de los conductores de cobre.

Las descargas parciales que ocurren en esta situación son predominantemente negativas y centradas cerca de los 45°. De la misma manera que con la “deterioración térmica” tiende a haber un efecto negativo de temperatura. Si los vacíos son muy grandes, es posible que las descargas parciales negativas aumenten con la carga debido a mayor vibración del conductor asociada con fuerzas mecánicas más grandes.

**Tabla N° 5. 7:** Características de DP por ciclaje de carga como mecanismo de falla

Mecanismo de falla	Polaridad	Efecto de carga	Efecto de temperatura	Ubicación de fase
Ciclaje de carga	Predominancia negativa	Pequeños cambios con carga	Negativa	45°

c) Devanados flojos

Cuando los devanados se aflojan en las ranuras, el problema es que, si no se soluciona a tiempo, esa flojedad hará que la superficie dura laminada del núcleo del estator dañe las capas de pintura o cinta en la superficie de las bobinas, rápidamente. Las superficies dañadas de las bobinas crean discontinuidades en la superficie permitiendo la formación de tensiones de voltaje a través de esos lugares aislados o entre ellos y el núcleo del estator.

Descargas se producirán si la tensión del voltaje excede el punto de ruptura eléctrica del medio gaseoso. Como resultado de esto, los pulsos causados por devanados flojos son predominantemente debidos a actividad superficial dentro de la porción de la ranura y por lo tanto positivos y centrados cerca de los  $225^\circ$ . El signo más obvio de devanados flojos es un incremento notable de la actividad de descargas parciales, especialmente positiva, cuando la carga se incrementa. Recuerde que cuando la corriente de la carga aumenta la vibración mecánica de las bobinas también aumenta. Este aumento en la vibración causa que el hueco que se encuentra entre la bobina y el núcleo a tierra también se agrande. El aumento en el tamaño del hueco (vacío o falla) resulta en un incremento en la magnitud de descargas parciales positiva con la corriente de carga. Tenga en cuenta que el aumento en la corriente de carga incrementará la temperatura, que puede reducir las descargas parciales debido a los efectos negativos de la temperatura.

Consecuentemente, cuando esté chequeando devanados flojos, realice la prueba con la máquina a diferentes cargas pero al mismo voltaje, temperatura y presión de hidrógeno. Tener en cuenta que para un devanado con problemas de “flojedad de bobinas” solamente las descargas parciales positiva es el único componente que

cambiará con la carga; el componente negativo cambiará muy levemente, si es que cambia. Los cambios en el componente negativo de las descargas parciales con cambios en la carga pueden ser una indicación de vibración de conductores debido a vacíos cerca de los conductores.

**Tabla N° 5. 8:** Características de DP por devanados flojos como mecanismo de falla

<b>Mecanismo de falla</b>	<b>Polaridad</b>	<b>Efecto de carga</b>	<b>Efecto de temperatura</b>	<b>Ubicación de fase</b>
Devanados flojos	Predominancia positiva	Incremento positivo con carga	Negativa	Predominante 225°

d) Descargas eléctricas en la ranura

Descargas en la ranura es el término dado a las descargas que ocurren entre la superficie de la bobina y el núcleo del estator. Se puede decir que las descargas parciales causadas por un devanado flojo crean descargas en la ranura, pero no todas las descargas en la ranura son debidas a un devanado flojo. Algunas se deben a problemas con las capas semiconductoras, lo cual se llama “descargas eléctricas en la ranura”.

El patrón de descargas parciales para descargas eléctricas en la ranura es muy similar al patrón de los devanados flojos con descargas parciales predominantemente positivas cercanas a 225° y efecto de temperatura negativo. Dado que las descargas eléctricas en la ranura pueden ocurrir antes de que los

devanados se aflojen, no hay un efecto de carga visible para las descargas eléctricas en la ranura. Las descargas eléctricas en la ranura pueden ser muy intensas y de hecho una fuente de deterioración en sí misma.

**Tabla N° 5. 9:** Características de DP por descarga eléctrica en la ranura como mecanismo de falla

Mecanismo de falla	Polaridad	Efecto de carga	Efecto de temperatura	Ubicación de fase
Descarga eléctrica en la ranura	Predominancia positiva	Ningún efecto de carga	Negativa	Predominante 225°

e) Impregnación deficiente

Cuando las resinas, las cintas, los procesos VPI u otros factores entran en juego durante la fabricación del devanado varios vacíos pueden formarse dentro del mismo. Como en el deterioro térmico, estos vacíos están esparcidos dentro del asilamiento sin que predominen los vacíos en el cobre o en el núcleo. No hay predominio notable de la polaridad de las descargas parciales con actividad centrada cerca de los 45° y 225°.

Como establecimos anteriormente cuando describimos el deterioro térmico, el incremento en la temperatura tiende a disminuir las descargas parciales en los vacíos internos, lo cual se refiere como efecto negativo de temperatura, pero que no se modifica con la carga.

**Tabla N° 5. 10:** Características de DP por impregnación inapropiada como mecanismo de falla

Mecanismo de falla	Polaridad	Efecto de carga	Efecto de temperatura	Ubicación de fase
Impregnación inapropiada	Sin predominancia	Ningún efecto de carga	Negativa	45° y 225°

f) Contaminación en cabezales

Desde que el área de los cabezales de las máquinas está específicamente diseñado para estar alejado de los planos de tierra, las descargas parciales que ocurren debido a contaminación en los cabezales es normalmente dependiente de voltajes de fase a fase, y estarán desplazadas 30° de las posiciones clásicas de 45° y 225°. La dirección del desplazamiento depende de la ubicación de la contaminación y de los voltajes de las bobinas afectadas y es por lo tanto impredecible.

La identificación o inspección del sitio donde se están produciendo los arcos o chispas puede ser difícil debido a la limitada visibilidad en el área. Aunque puede haber algún efecto de temperatura o de cambios de carga en la actividad de descargas parciales debido a la contaminación, es difícil predecir los resultados esperados. No obstante, las condiciones del medio ambiente tal como la humedad puede tener efectos muy notorios, especialmente si la superficie contaminada se vuelve semiconductora cuando se humedece.



**Tabla N° 5. 11:** Características de DP por contaminación como mecanismo de falla

<b>Mecanismo de falla</b>	<b>Polaridad</b>	<b>Efecto de carga</b>	<b>Efecto de temperatura</b>	<b>Ubicación de fase</b>
Contaminación	Sin predominancia	Ningún efecto de carga	Ningún efecto predecible	15°, 75°, 195° y 255°

g) Espaciado inadecuado

Esta fuente de descargas parciales, como la de contaminación, da como resultado actividad que es dependiente de fase a fase y por lo tanto desplazada 30° de las posiciones clásicas. Como esta actividad se produce en un área específica de la máquina, el patrón de descargas parciales puede revelar cuáles fases están involucradas. Esto es posible solamente si las dos fases afectadas tienen actividad detectable en los cabezales y sus respectivos desplazamientos de fase de 30° corresponden a lo que sería esperado de acuerdo a la rotación de la máquina. Como estas descargas parciales pueden ocurrir entre una bobina superior y otra inferior en una ranura, la verificación visual puede ser difícil.

**Tabla N° 5. 12:** Características de DP por espacio inadecuado entre bobinas como mecanismo de falla

<b>Mecanismo de falla</b>	<b>Polaridad</b>	<b>Efecto de carga</b>	<b>Efecto de temperatura</b>	<b>Ubicación de fase</b>
Espaciado inadecuado entre bobinas	Sin predominancia	Ningún efecto de carga	Ningún efecto predecible	15°, 75°, 195° y 255°

h) Interfase de las capas de control de tensión

Las descargas parciales que ocurren en la interfase de las capas semiconductiva/graduante de control de tensión, es una actividad de tipo superficial que es dependiente del voltaje fase-tierra. Esta es una actividad predominantemente positiva y centrada cerca de los 225°.

A diferencia de los devanados flojos, ésta actividad no es usualmente afectada por los cambios de carga; no obstante, los materiales involucrados en esta área son principalmente conductivos por diseño y la conductividad cambia con la temperatura. Por lo tanto, un aumento en la temperatura puede aumentar la actividad de descargas parciales de esta área. Si un patrón de descargas parciales es predominantemente positivo, centrado cerca de los 225° y aumenta con la temperatura, es muy probable que se trate de un deterioro en la interfase semiconduciva/graduante. Una interfase severamente deteriorada muestra pulsos agrupados a 90° y 270° posiciones típicas de corona.

**Tabla N° 5. 13:** Características de DP por interfase de capas de control de tensión como mecanismo de falla

Mecanismo de falla	Polaridad	Efecto de carga	Efecto de temperatura	Ubicación de fase
Interfase de capas semiconductiva / gradiente	Predominancia positiva	Ningún efecto de carga	Incremento positivo con la temperatura	Predominante 225°

i) Vibración de los cabezales

Las descargas parciales no son un síntoma de la vibración de los cabezales. Sin embargo, una de las consecuencias de las vibraciones en los cabezales es la formación de una grieta en el sistema de aislamiento varios centímetros (o pulgadas) desde el final de la ranura. Es posible que esta grieta se desarrolle hasta el punto en que las descargas parciales pueden ser detectadas como efecto secundario de las vibraciones de los cabezales.

## CAPÍTULO VI

### ANÁLISIS DE DESCARGAS PARCIALES CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

#### 6.1 GRUPO N° 7 – CENTRAL HIDROELÉCTRICA SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO (C.H. SAM)

##### 6.1.1 Diseño de Planta

Tabla N° 6. 1: Características generales del Grupo N° 7 – C.H. SAM

<b>Voltaje</b>	13.8 kV	<b>RPM</b>	450
<b>MW</b>	114	<b>Aislamiento</b>	Mica epóxica
<b>Fecha de fabricación</b>	1979	<b>Fecha de puesta en servicio</b>	1979
<b>Tipo de máquina</b>	Generador hidráulico	<b>Fabricante</b>	Ansaldo
<b>Sensor DP</b>	EMC	<b>Bobinado</b>	De doble capa
<b>Conexión Interna</b>	Estrella	<b>Refrigeración</b>	Con aire en circuito cerrado

### 6.1.2 Estado Actual de las Descargas Parciales

Con fecha 12-08-2010 se realizó el monitoreo de las descargas parciales en el arrollamiento de las fases R, S, T del generador del Grupo N° 7 - C.H. SAM, los valores de los pulsos positivos (rojo es Qm+) y negativos (verde es Qm-) de las descargas se encuentran por encima de los 719 mV, encontrándose en un nivel de tipo “**MUY ALTO**” según criterios de evaluación establecidas en las tablas estadísticas de la base de datos de IRIS POWER (Ver Figura 6.1).

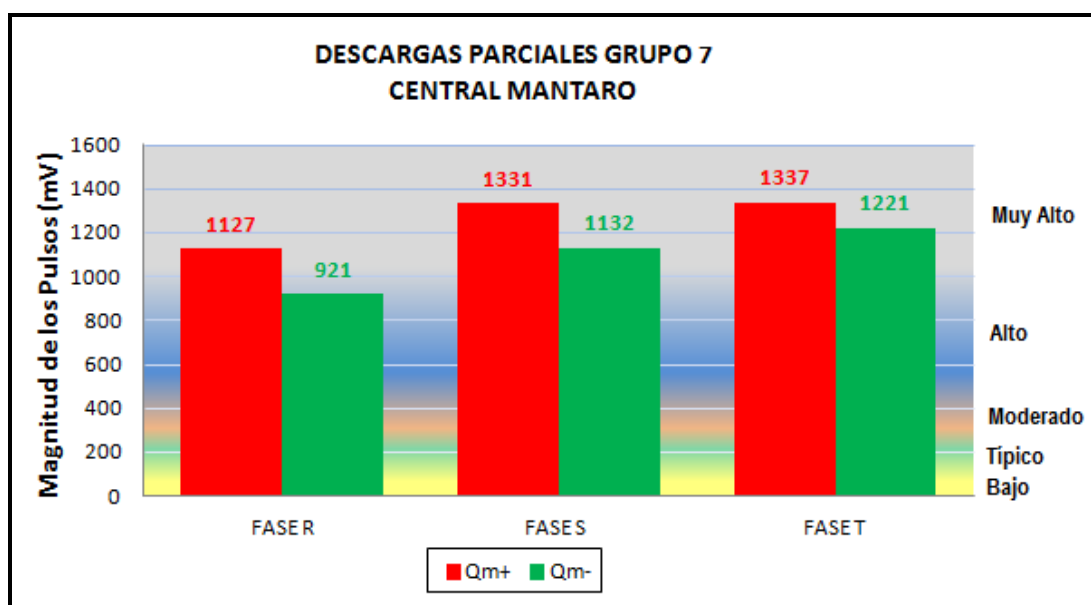


Figura 6. 1: Evaluación de tablas estadísticas – IRIS POWER

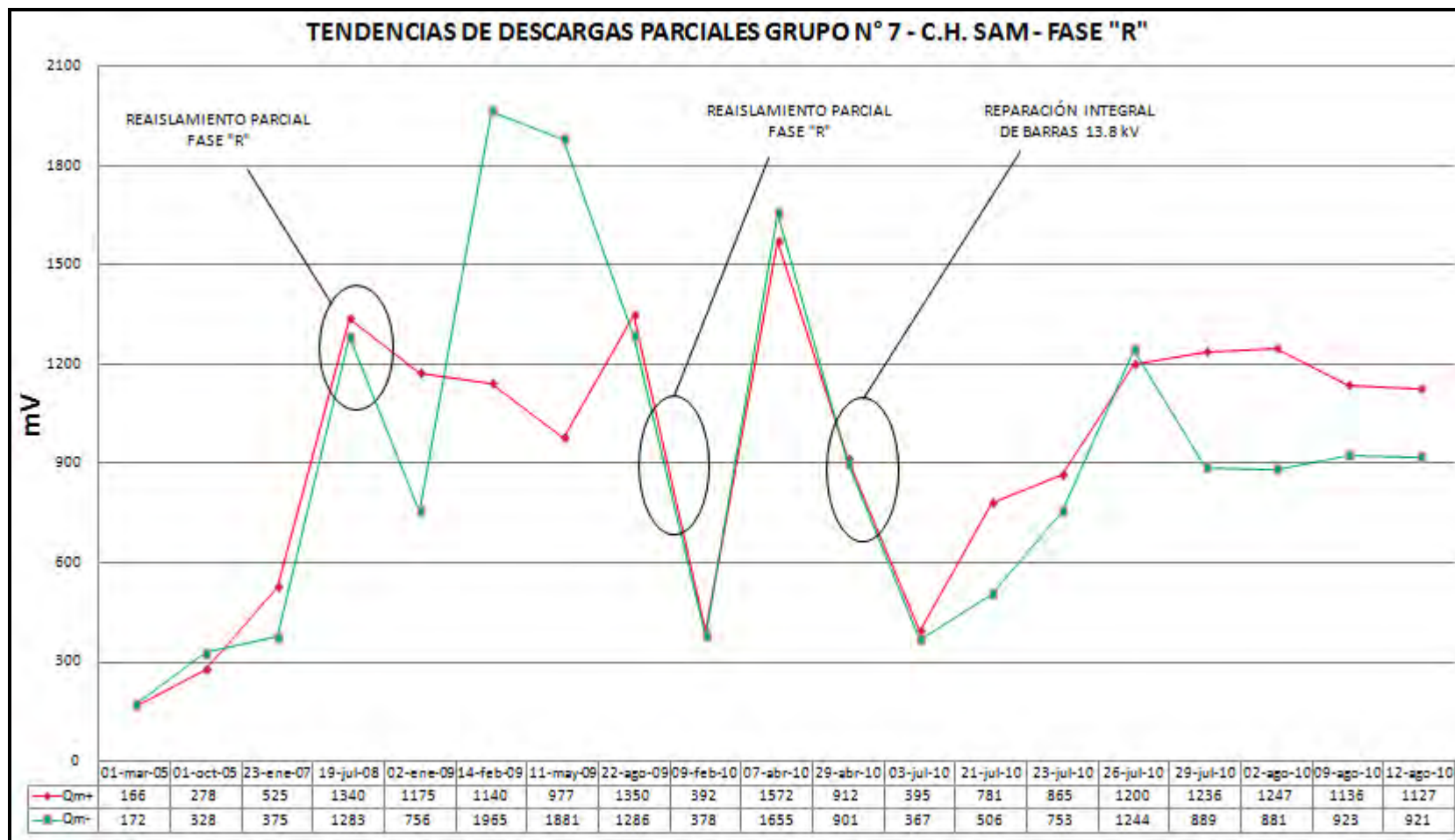
### 6.1.3 Tendencias de Descargas Parciales

El Grupo N° 7 – C.H. SAM viene siendo monitoreado sus descargas parciales desde el 2005, para analizar las tendencias de las descargas parciales se mostrará en la Tabla N° 6.2 los valores de Qm+ y Qm- por fases obtenidos desde el 2005 al 2010 y así visualizaremos el incremento de las descargas parciales en el devanado del estator.

**Tabla N° 6. 2:** Monitoreo de las Descargas Parciales en el Grupo N° 7 – C.H. SAM

FECHA	FASE R		FASE S		FASE T	
	QM+	QM-	QM+	QM-	QM+	QM-
01/03/2005	166	172	332	199	194	317
01/10/2005	278	328	432	339	384	275
23/01/2007	525	375	2720	2500	768	1070
19/07/2008	1340	1283	979	980	990	984
02/01/2009	1175	756	1573	1515	1916	1571
14/02/2009	1140	1965	1654	1533	1938	1558
11/05/2009	977	1881	2359	1498	1788	1550
22/08/2009	1350	1286	1400	1405	1474	1482
09/02/2010	392	378	1876	1156	1265	1378
07/04/2010	1572	1655	1208	1187	1441	2242
29/04/2010	912	901	2428	3435	982	986
03/07/2010	395	367	395	396	795	390
21/07/2010	781	506	1493	1992	978	956
23/07/2010	865	753	1224	1064	1117	1162
26/07/2010	1200	1244	1238	1090	1000	775
29/07/2010	1236	889	1156	1078	1188	1146
02/08/2010	1247	881	1190	1155	1200	1175
09/08/2010	1136	923	1337	1100	1317	1181
12/08/2010	1127	921	1331	1132	1337	1221

A continuación se establecen los gráficos de tendencia de las tres fases donde se pueden apreciar los trabajos de mantenimiento en la salida de barras 13.8 kV. Las descargas parciales en este grupo se incrementaron significativamente desde el 2007.



**Figura 6.2:** Curva de tendencia de las Descargas Parciales Grupo N° 7 – C.H. SAM – Fase R

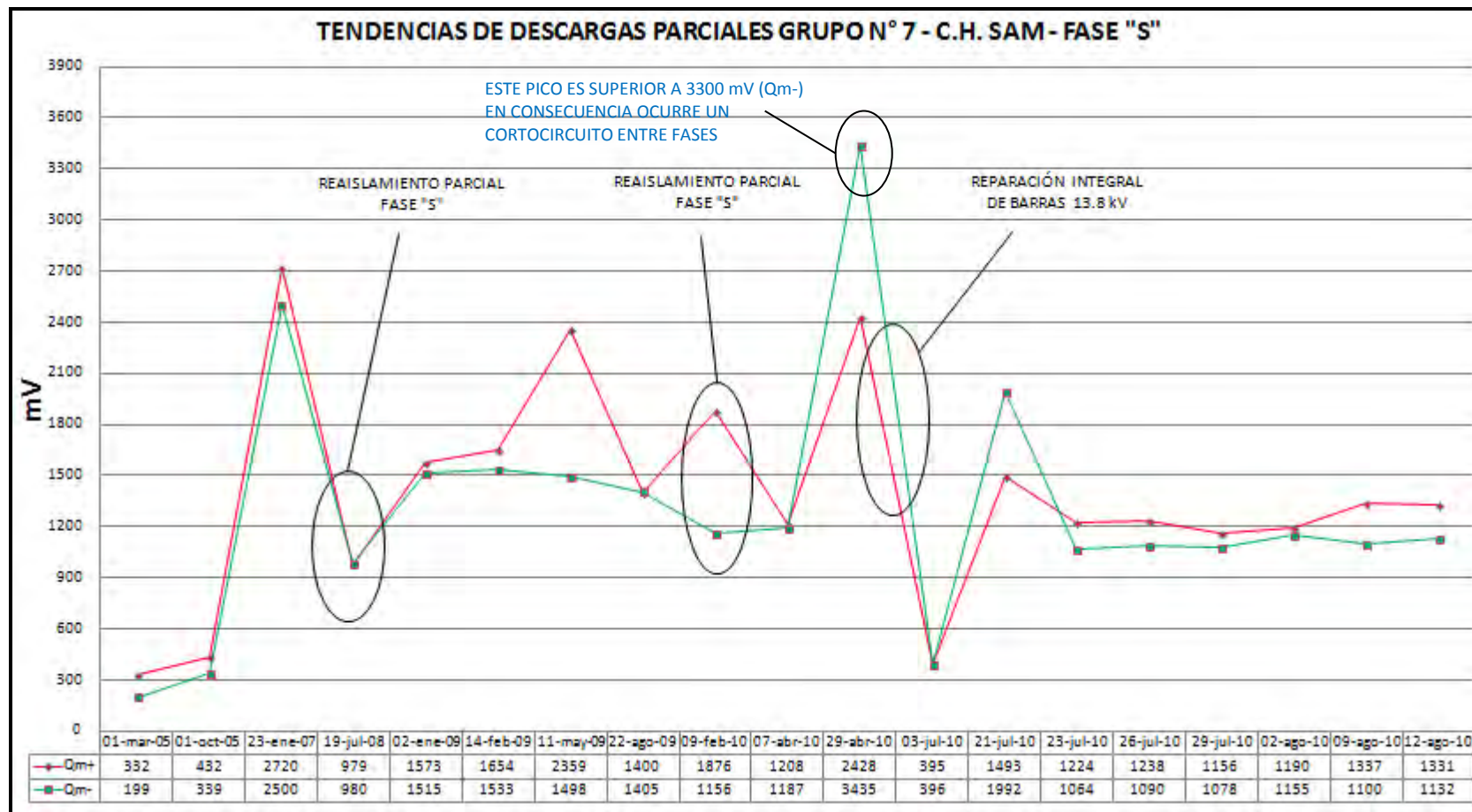
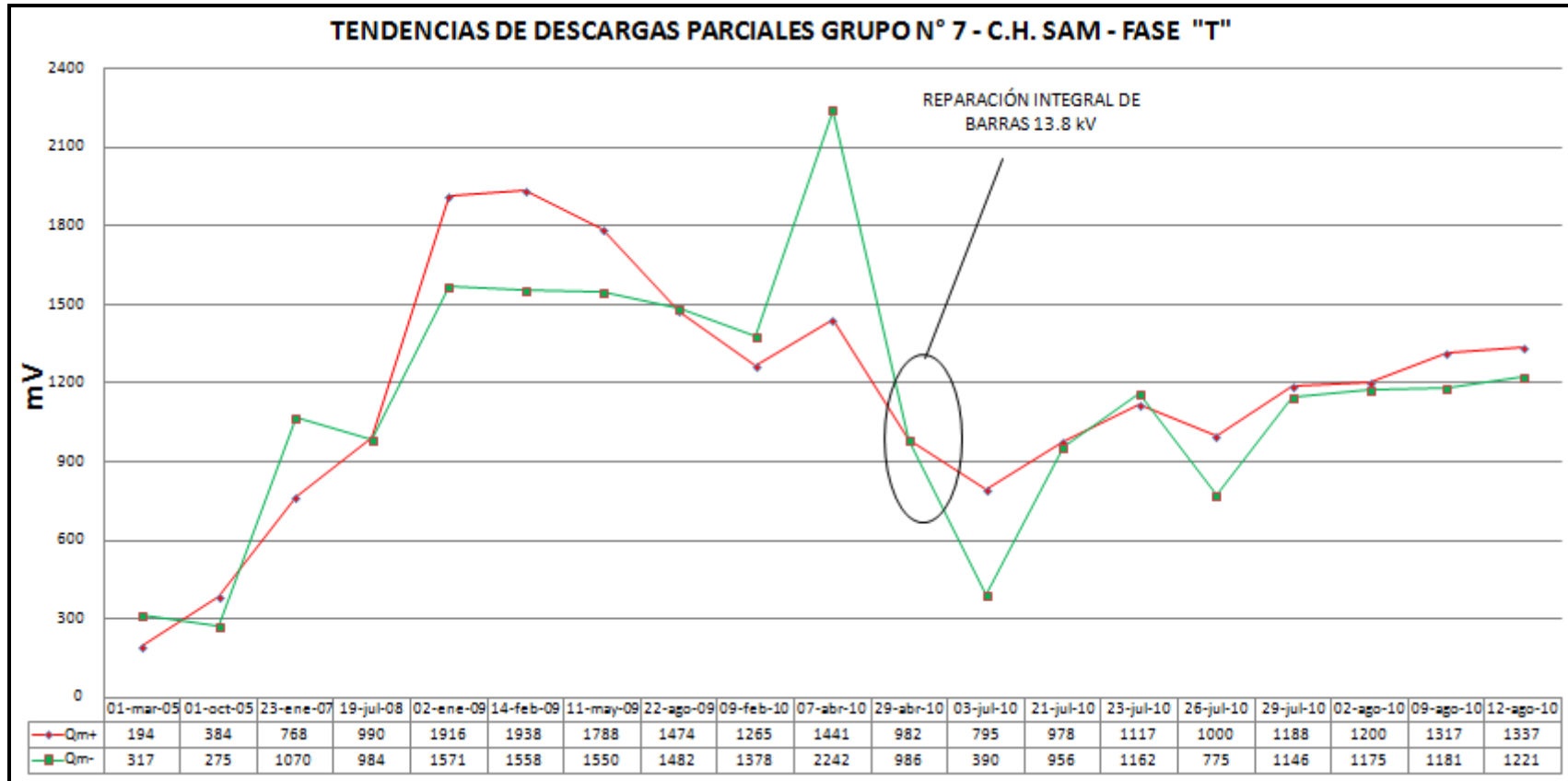


Figura 6.3: Curva de tendencia de las Descargas Parciales Grupo N° 7 – C.H. SAM – Fase S





**Figura 6.4:** Curva de tendencia de las Descargas Parciales Grupo N° 7 – C.H. SAM – Fase T

### 6.1.4 Interpretación de Descargas Parciales

a) Fase "R"

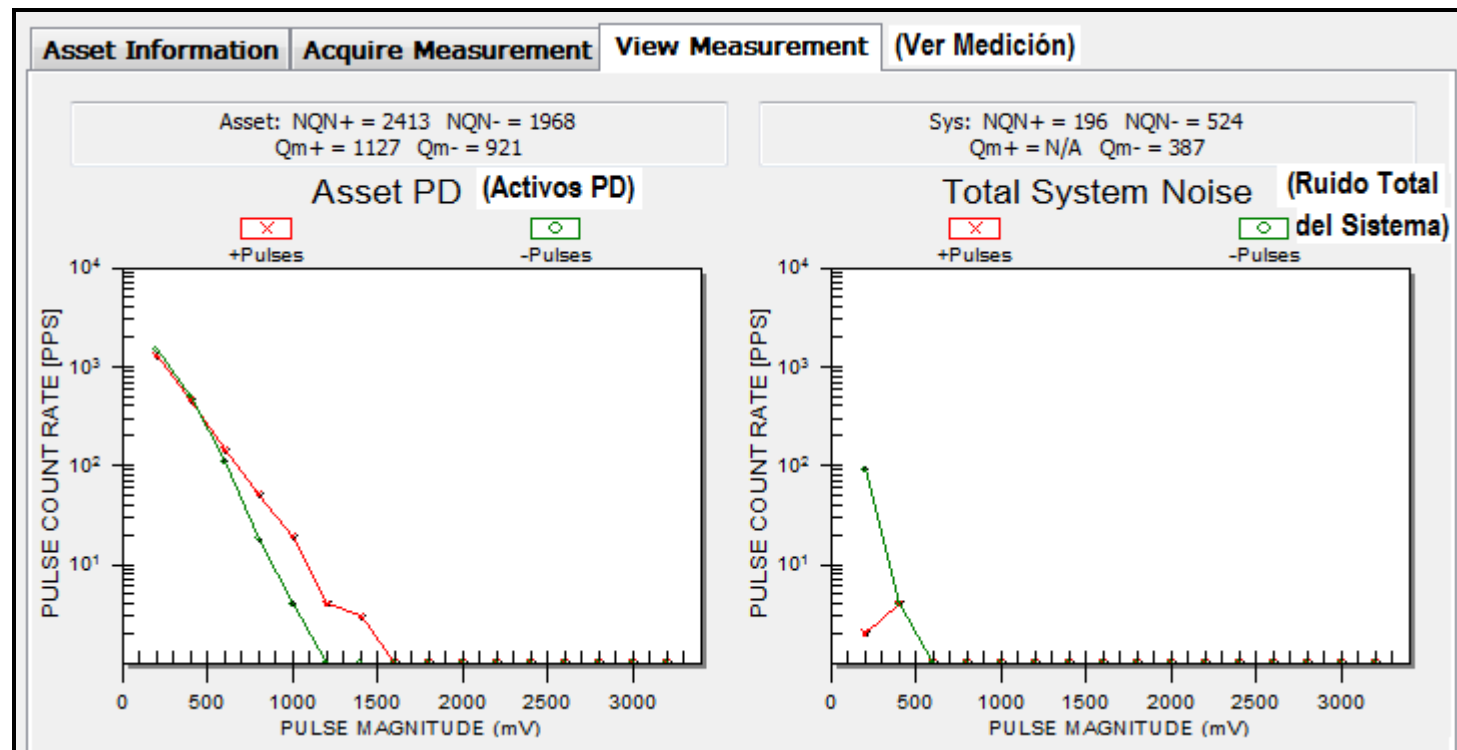
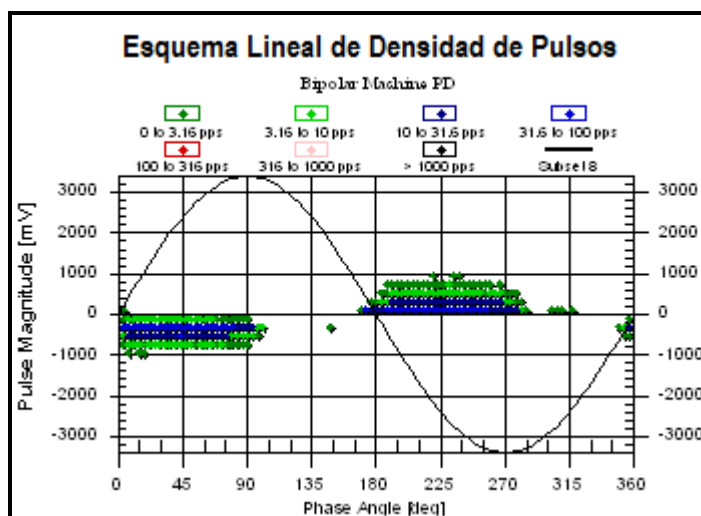


Figura 6. 5: Análisis de magnitud de pulsos Fase R – Grupo N° 7 – C.H. SAM



**Figura 6. 6:** Esquema lineal densidad de pulsos Fase R – Grupo N° 7 – C.H. SAM

En el gráfico de "Análisis de pulsos elevados" se establece que existe un predominio de los pulsos positivos, que se evidencia claramente por la existencia en la separación y adelanto de los pulsos positivos con relación a los pulsos negativos.  $(Q_m (+) / Q_m (-) > 1.5)$ .

Estas descargas parciales de polaridad positiva en un gráfico "Densidad de Pulso" se concentran alrededor de los 225° durante el semiciclo negativo de la tensión fase a tierra, e indica que las descargas parciales se vienen originando en la **superficie del aislamiento** y pueden ser tipo:

- ✓ Descarga en ranura, al dañarse el recubrimiento semiconductor en las semibobinas y perderse la referencia a tierra.
- ✓ Deterioro de la pintura graduadora o semiconductor a la salida de barra de ranura.

b) Fase "S"

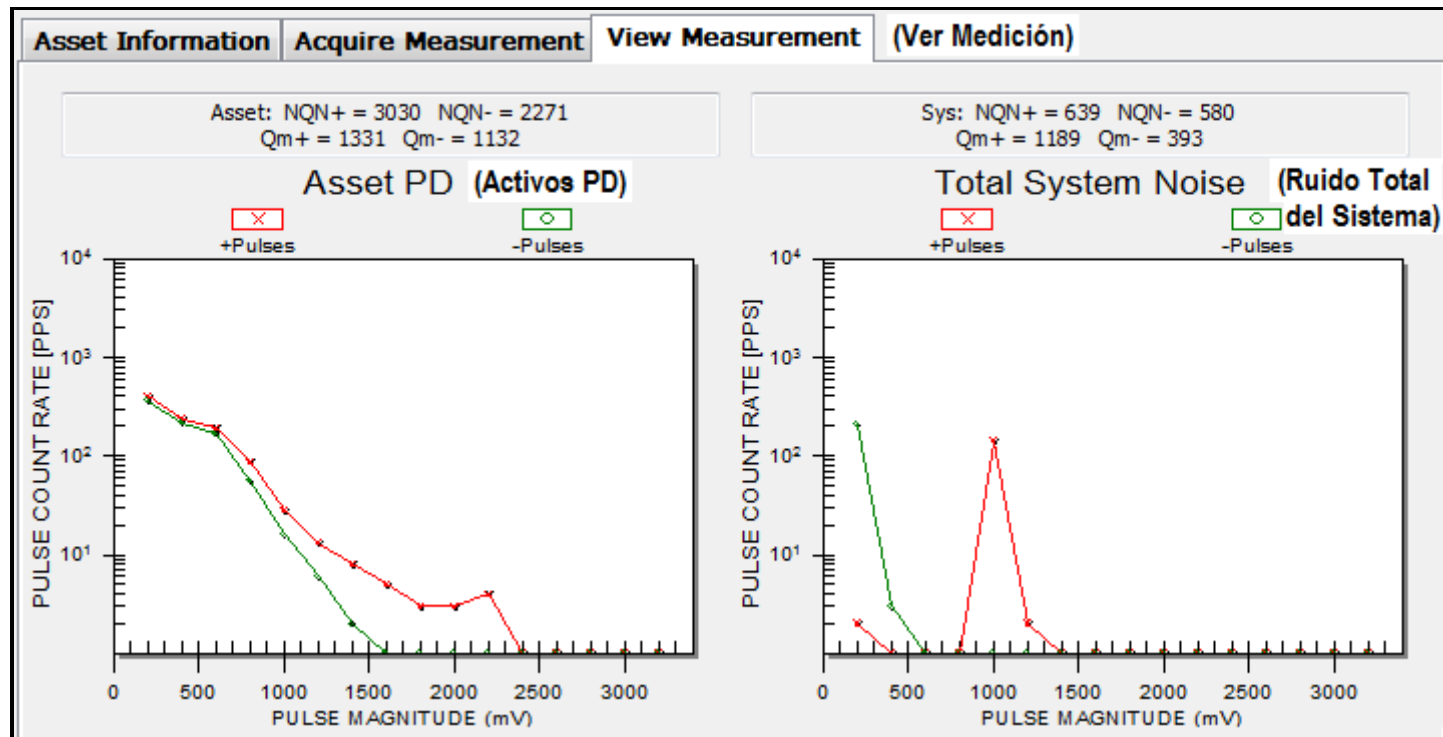
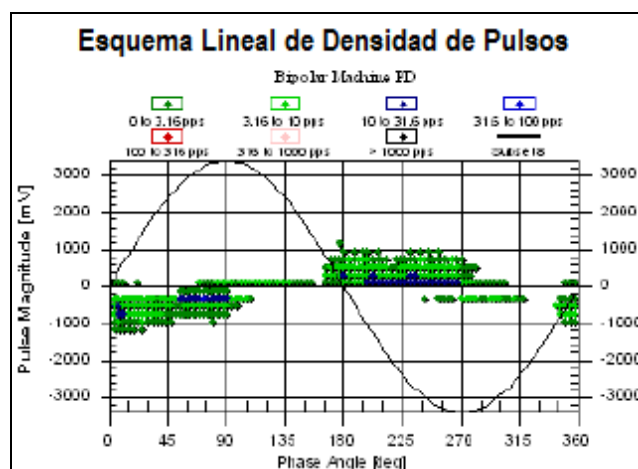


Figura 6. 7: Análisis de magnitud de pulsos Fase S – Grupo N° 7 – C.H. SAM

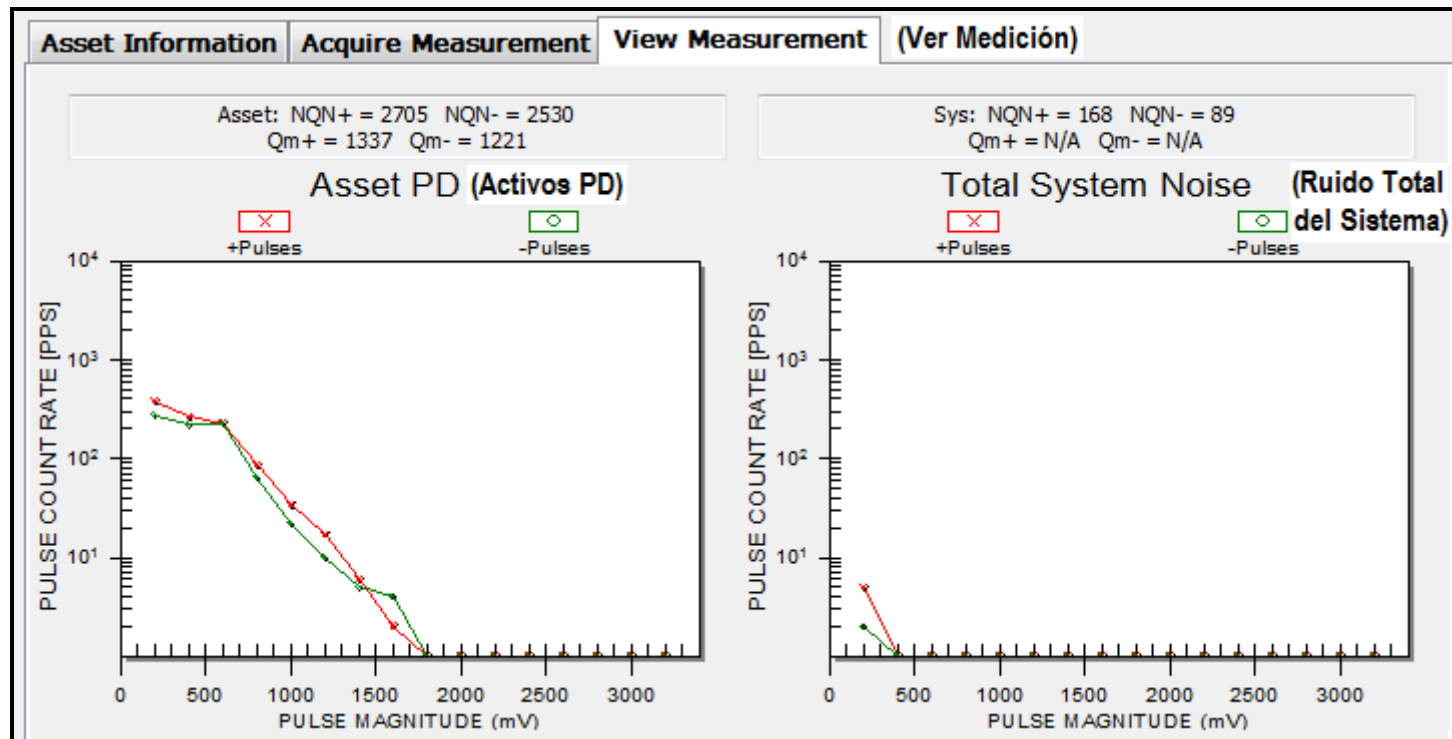


**Figura 6. 8:** Esquema lineal densidad de pulsos Fase S – Grupo N° 7 – C.H. SAM

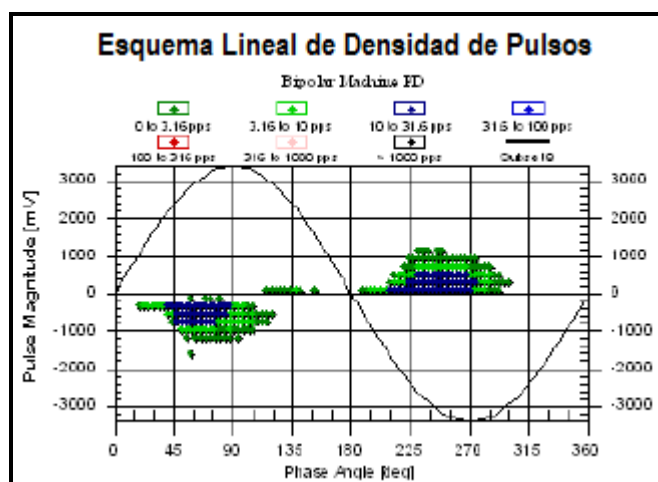
En el gráfico de "Análisis de pulsos elevados" se establece que existe un predominio de los pulsos positivos, que se evidencia claramente por la existencia en la separación y adelanto de los pulsos positivos con relación a los pulsos negativos. ( $Q_m (+) / Q_m (-) > 1.5$ ).

Estas descargas parciales de polaridad positiva en un gráfico "Densidad de Pulso" se concentran alrededor de los  $15^\circ$  y  $225^\circ$  durante el semiciclo positivo y negativo respectivamente de la tensión fase a tierra. A  $15^\circ$  indica que las descargas parciales se vienen originando en la salida de los terminales debido a **contaminación, espaciamiento inadecuado** y  $225^\circ$  cuando las descargas parciales se viene originando **en la superficie del aislamiento** y pueden ser de tipo:

- ✓ Descarga en ranura, al dañarse el recubrimiento semiconductor en la semibobinas y perderse la referencia a tierra.
- ✓ Deterioro de la pintura graduadora o semiconductor a la salida de barra de ranura.

c) Fase "T"

**Figura 6. 9:** Análisis de magnitud de pulsos Fase T – Grupo N° 7 – C.H. SAM



**Figura 6. 10:** Esquema lineal densidad de pulsos Fase T – Grupo N° 7 – C.H. SAM

En el gráfico de "Análisis de pulsos elevados" se establece que no existe predominancia de polaridad, que se evidencia claramente por la existencia en la magnitud y cantidad de descargas parciales de ambas polaridades son similares. ( $Q_m (+) \sim Q_m (-)$ ).

Estas descargas parciales sin predominancia de polaridad en un gráfico "Densidad de Pulso" se concentran alrededor de los  $75^\circ$  y  $240^\circ$  durante el semiciclo positivo y negativo respectivamente de la tensión fase a tierra. La actividad de descargas parciales indica que estas se vienen originando en los cabezales debido a **contaminación y espaciamiento inadecuado**. Al no existir predominancia de polaridad las descargas parciales se presentan también en el aislamiento **principal por la presencia de huecos** y pueden ser debido a:

- ✓ Deterioro térmico (sobrecalentamiento) del sistema aislante en el cual se ha forzado el material orgánico del aglutinante hasta perderse la fuerza adhesiva.
- ✓ Existe alta probabilidad de que la cinta aislante no se halle en toda su longitud consolidada y posea separación entre capas.

### 6.1.5 Aplicación de Falla de Descarga Parcial

En la Figura 6.2 – 6.3, se puede observar las curvas de tendencias de las descargas parciales ocurridas desde la fecha 2005 – 2010, donde se aprecia los mantenimientos de reaislamiento de salida de barras 13.8 kV (reaislamiento parcial Fase “R” y reaislamiento parcial Fase “S”). Estos mantenimientos fueron programados (mantenimiento preventivo) en consecuencia de un correcto diagnóstico en línea mediante descargas parciales (mantenimiento predictivo), logrando así la disminución de las cantidades **Qm+** y **Qm-**.

En la Figura 6.3 se aprecia un pico de magnitud de descarga parcial superior a 3330 mV. Esta descarga parcial elevada origina una falla de cortocircuito entre fases, como **Qm-** es la que predomina quiere decir que la descarga parcial ocurrió cerca al cobre (Cu). Para este caso especial se describirá el procedimiento del mantenimiento correctivo (mantenimiento no programado) de la salida de barras 13.8 kV como una aplicación directa de falla de descarga parcial, logrando así presentar un modelo de solución aplicable y entender cómo se soluciona el problema ante una falla de descarga parcial en la salida de barras 13.8 kV con el propósito de disminuir las cantidades de **Qm+** y **Qm-**; cabe resaltar que esta falla ocurrió por varios motivos:

- ✓ Regular diagnóstico de los esquemas de descargas parciales.
- ✓ Se optó a que el grupo generará, sabiendo que tenía una magnitud de descarga parcial elevada.
- ✓ Algunos materiales usados en el mantenimiento programado en el mes de febrero no se encontraban en buen estado, originando el cortocircuito ya que el aislamiento de la fase se encontraba degradado.



a) Reparación Integral de Salida de Barras 13.8 kV (Falla Cortocircuito entre Fases)

**Objetivo:**

- ✓ Realizar la reparación de la salida de barras 13.8 kV por presentar efecto de corto circuito entre fases.
- ✓ Rellenar los agujeros formados por el cortocircuito en las barras U – V.
- ✓ Limpieza de la parte afectada del estator, salida de barras y terminales flexibles.
- ✓ Reemplazar la ferretería afectada por el cortocircuito (pernos, tuercas, abrazaderas)
- ✓ Ejecutar todo el mantenimiento correctivo en la fecha prevista.

**Previsiones de seguridad:**

Disponer de los equipos de protección personal (EPP'S) y herramientas adecuadas:

- ✓ El personal debe estar provisto de su ropa de trabajo: mameluco, casco protector, zapatos de seguridad, protector auditivo, guantes, faja para proteger la columna y cuando sea necesario lentes de protección, correas de seguridad y respirador.
- ✓ El personal de Generación conjuntamente con el responsable de la orden trabajo (O/T), cumplirán con realizar las prevenciones necesarias (el grupo a intervenir se realizará estando fuera de servicio).
- ✓ Delimitar la zona de trabajo, iluminación de la zona de trabajo.
- ✓ Verificar la zona de trabajo, que no haya existencia de material u objeto que dificulte el trabajo del personal.

- ✓ Verificación de hoja de control de riegos de caídas y procedimiento de trabajo en alturas.
- ✓ Instalación de línea de vida en la zona de trabajo donde se requiera.
- ✓ Herramientas de trabajo en buen estado.
- ✓ Los materiales a usar sean los adecuados.

### **Programa de Trabajo por días:**

#### **Sábado 26/06/2010:**

- ✓ El día 26 de Junio se produjo el bloqueo del grupo por actuación del relé diferencial y máxima corriente, se observa que las salidas de las barras: Fase U, V presentan perforación considerable por descarga a tierra en las abrazaderas de sujeción de dichas barras.
- ✓ En la fase W el aislador pasa muro se encuentra calcinado por efecto de calentamiento.
- ✓ Alrededor de las 7:30 p.m. el Grupo N° 7 – C.H. SAM se bloquea (sale de servicio). El personal de sala de control verifica que el grupo está bloqueado.

#### **Domingo 27/06/2010:**

- ✓ El personal de mantenimiento eléctrico es informado de la falla ocurrida en el Grupo N° 7 – C.H. SAM, se dirigen hacia el lugar de los hechos para confirmar la falla existente, observando que ocurrió un cortocircuito entre las Fases U y V de los terminales de salida de barras 13.8 kV.
- ✓ El área de mantenimiento eléctrico realiza un diagrama de Gantt, programando la ejecución de las actividades a realizar las acciones correctivas en el grupo afectado (ver Figura 6.11).

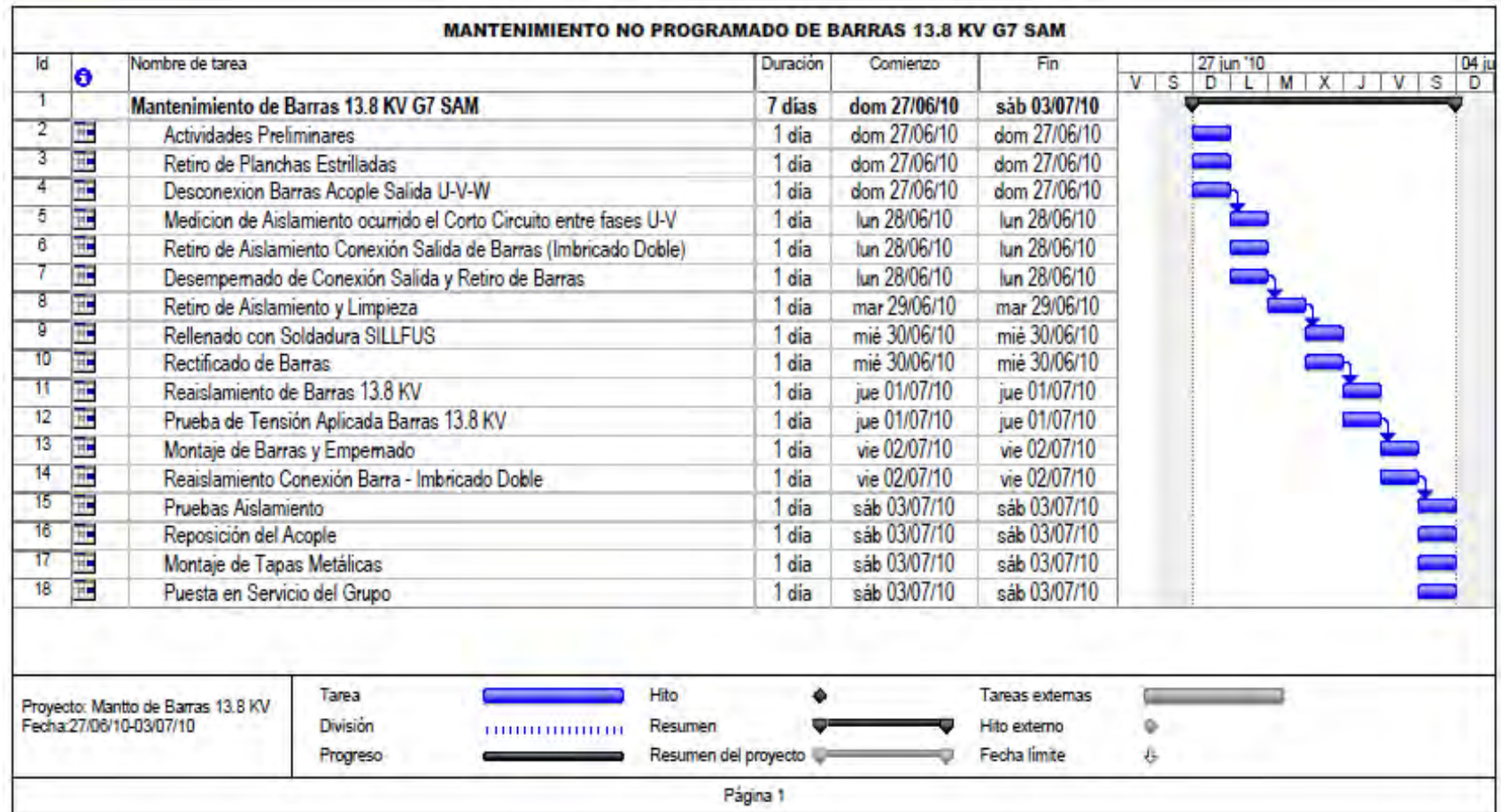


Figura 6. 11: Diagrama de Gantt

**Domingo 27/06/2010:****▪ Retiro de las planchas estrilladas:**

Para poder observar mejor la falla ocurrida en la salida del estator de los terminales de 13.8 kV, observándose el cortocircuito existente en las dos fases U y V. Se observó la presencia de quemaduras en la barra del estator, la conexión doble estrella, los cabezales superiores y quemadura total del aislador pasante del terminal 13.8 kV de la fase W de salida hacia ductos. Esto es consecuencia de que al ocurrir el cortocircuito entre fases, la corriente de cortocircuito circuló en sentido hacia sala de ductos y retornó hacia el estator por la fase W, en el retorno la corriente de cortocircuito se encontró con el aislador pasante del terminal 13.8 kV quemándolo por completo.

Para iniciar la reparación integral de los puntos afectados por el cortocircuito se necesita la obtención de recursos:

- ✓ **Humanos:** La cantidad de personal que participara en la ejecución de las actividades son 01 Técnico Supervisor, 04 Técnicos Electricistas y 02 Ayudantes Electricistas.
- ✓ **Materiales:**

Aproximadamente se necesitará para las 3 barras (Fase U, V y W):

- 08 Rollos de Cinta de Mica Porosa de 0.15 mm
- 03 Rollos de Cinta de Fibra de Vidrio de 0.14 mm
- 03 Kg de Resina Colrepox D
- 01 Kg de Endurecedor 1956
- 01 Rollo de Cinta Platinada Autoadhesiva
- 02 Kg de Pintura Graduadora de Potencial F6542 + F6540
- 03 Kg de Barniz Aislante 182.264.01 SUMATE COMPONENTE B y 197.900.06A

- 25 Varillas de Silfos
- 01 Rollo de Papel de Aluminio
- 01 Rollo de Cinta de Algodón

✓ **Herramientas:**

- 04 Unid. de Llaves N°19 - 17
- 03 Unid. de Formones de ½”, ¼”
- 02 Unid. de Extensión de luz
- 03 Unid. de Martillos de baquelita o goma
- 30 Kg de Trapo industrial
- 03 Galones de Solvente Dieléctrico
- 06 Unid. de Tacos de madera
- 04 Unid. de Destornillador Plano, Estrella
- 15 mts de Plástico Doble Transparente
- 04 Unid. de Paños de Fibra de Vidrio 50 cm x 50 cm
- 02 Unid. de Caballetes de Metal
- 06 Unid. de Lija Fina o de Madera
- 04 Unid. de Linternas
- 02 Unid. de Tecles
- 04 Unid. de sogas de Nylon de 10 mts

✓ **Equipos:**

- 01 Meghometro Metrisko
- 01 Máquina de Soldar de Bobinas
- 01 Máquina Oxicorte
- 01 Torno Universal
- 01 equipo de Tensión Aplicada Phenix – Modelo 475 20

- **Desconexión barras acople de salidas U – V – W:**

Se observa que las abrazaderas y los pernos de las fases U y V, se encuentran completamente fundidas y es necesario reemplazarlas. Los pernos que sujetaban para el acople también se encuentran fundidos en algunos puntos (ver Figura 6.13).



**Figura 6. 12:** Salida de barras cortocircuitadas



**Figura 6. 13:** Pernos de sujeción de salida 13.8 kV fundidos

**Lunes 28/06/2010:**

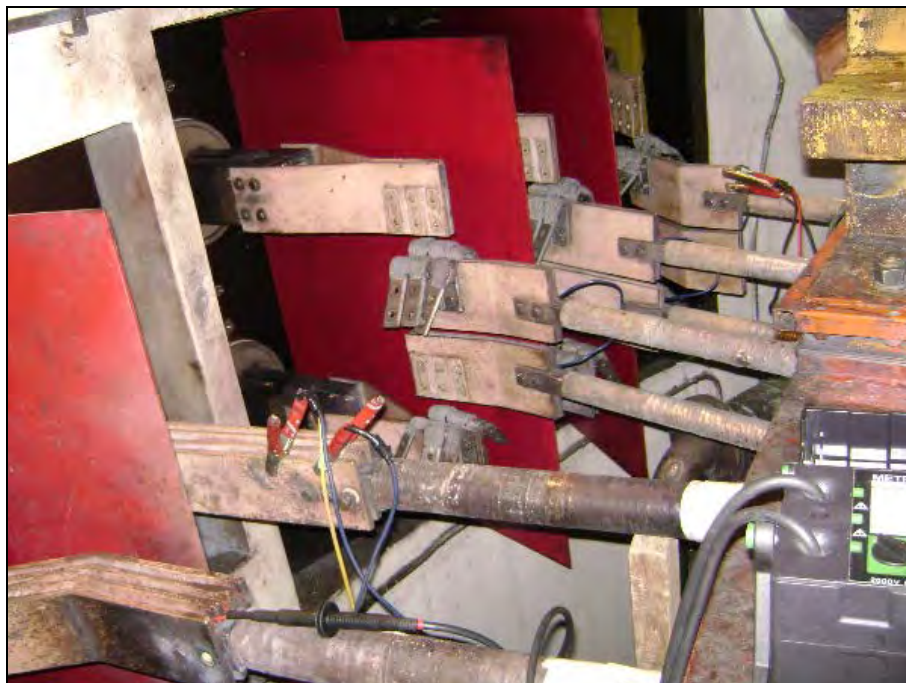
- **Medición de aislamiento ocurrido el cortocircuito entre fases U – V:**

Se realiza medición de aislamiento del estator, para tener la certeza que el cortocircuito, no afecto a las bobinas del estator o al estator en sí. Para ello se recubre con cinta de papel las tres barras como se observa en la Figura 6.14.

Se recubre de esta manera para evitar el contacto de las barras con la carcasa.



**Figura 6. 14:** Salida de barras 13.8 kV



**Figura 6. 15:** Conexión para la medida de aislamiento del estator

**Tabla N° 6. 3:** Resultados de Medición de Aislamiento del Estator

Condición	Fase	Temperatura bobinado C°	Resistencia de aislamiento	
			Después de 1' (1 min) R1 (M ohm)	Después de 10' (10 min) R10 (M ohm)
Fase - Tierra	U	39	1500	6500
	V	49	1500	7000
	W	36	1600	7200
Entre fases	U	-	3800	
	V	-	3500	
	W	-	3500	

- **Retiro de aislamiento conexión salida barras (Doble ramal):**

Se ilumina el ambiente a trabajar, para de este modo evitar algún inconveniente al momento de retirar el aislamiento que recubre a la salida de las barras, como se muestra en la Figura 6. 16.

**Figura 6. 16:** Retirando el aislamiento deteriorado

Seguidamente se procede a retirar el aislamiento, haciendo uso del formón y el martillo de goma.



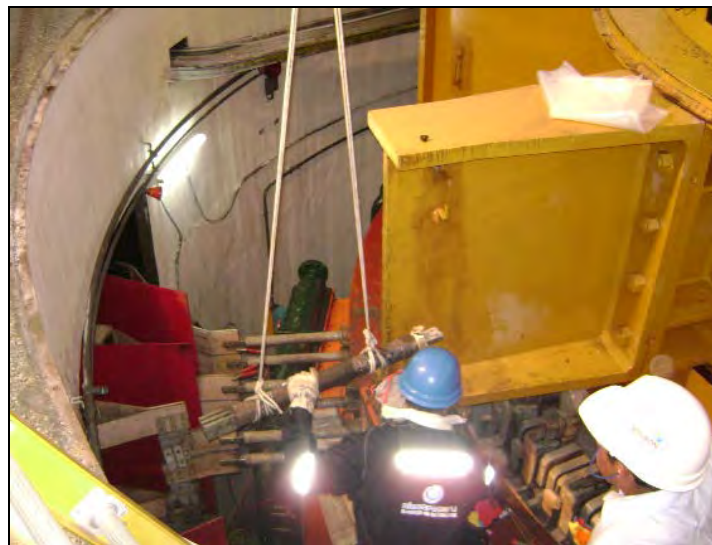
Tener presente que se debe evitar el contacto del formón al momento de retirar el aislamiento con la barra de cobre.



**Figura 6. 17:** Retirando el aislamiento deteriorado

▪ **Desempernado de conexión salida y retiro de barras:**

Se desconectan las salidas de los terminales de 13.8 kV de las 3 fases, para de este modo poder trasladarlas al lugar donde se realizaran las reparaciones. Para el retiro de las 3 barras, se hace uso del puente grúa (para sujetar las barras y levantarlas hasta a la parte superior del grupo) para facilitar el trabajo del personal.



**Figura 6. 18:** Retirando las barras de salida 13.8 kV para su reparación

**Martes 29/06/2010:**

▪ **Retiro del aislamiento de las barras:**

Se retira el aislamiento que recubre a las barras de los terminales de 13.8 kV. Para ello se usa el martillo de goma y el formón, el retiro del aislamiento se realiza cuidadosamente evitando el contacto con las barras.



**Figura 6. 19:** Retirando el aislamiento envolvente de la barra



**Figura 6. 20:** Barra de cobre afectada por el cortocircuito

Luego de quitar todo el aislamiento de las barras 13.8 kV, se procede a limpiarlas haciendo uso de una lija fina o de madera, dejando al descubierto la barra.



**Figura 6. 21:** Barra limpiada en su totalidad

**Miércoles 30/06/2010**

▪ **Rellenado con soldadura Silfos:**

Se fija la barra a soldar en los caballetes metálicos y se aísla el contacto de la barra con el caballete, para ello se utiliza paños de fibra de vidrio, como se observa en la Figura 6. 22. Luego se fija la prensa de la máquina de soldar de bobina, en los extremos de la superficie a rellenar con silfos, se calienta la barra de cobre hasta el punto que al hacer contacto el silfos con la superficie a rellenar el silfos empieza a derretirse y de este modo se inicia el recubrimiento del agujero con los silfos.



**Figura 6. 22:** Fijación de la barra a soldar en los caballetes



**Figura 6. 23:** Rellenado de la perforación de la barra con silfos

Para poder completar el recubrimiento del agujero, se utiliza la máquina oxicorte y se aprovecha que la barra de cobre se encuentra a una elevada temperatura y de ese modo, se funde el silfos con la máquina oxicorte y se recubre por completo.



**Figura 6. 24:** Perforación de barra rellanado con silfos

- **Rectificado de barras:**

La barra rellanada con soldadura es trasladada hacia el taller mecánico, donde se torneará las partes que sobresalen en la superficie de la barra.

De este modo se nivela la superficie rellenada con soldadura y dejarla uniforme.



**Figura 6. 25:** Torneando la barra reparada

Finalmente se limpia la barra, hasta dejarla como se muestra en la Figura 6.26.



**Figura 6. 26:** Torneado finalizado de la barra reparada

**Jueves 01/07/2010:**

▪ **Reaislamiento de las barras 13.8 kV:**

El porcentaje de la mezcla es de: Resina – 100% y Endurecedor – 30%



**Figura: 6. 27:** Mezcla de resina y endurecedor para realizar el reaislamiento

Se aplica la resina en la barra y luego se procede a encintar con la cinta mica porosa (previamente humedecida en la mezcla de resina y el endurecedor) en un 50% en forma continua hasta cubrir toda la barra, el encintado se realiza hasta la medida de espesor que tenía el aislamiento en principio la barra.



**Figura 6. 28:** Encintado de la barra reparada

▪ **Prueba de tensión aplicada barras 13.8 kV:**

Se realiza la prueba tensión aplicada, a las tres barras reparadas U, V y W, la tensión de prueba a la que fueron sometidas las barras es desde 5 kV hasta 28.7 kV. La barra que se somete a prueba, es recubierta con papel de aluminio así como se ve en la Figura 6.29, se enrolla un conductor de cobre por encima del papel de aluminio, luego se recubre el conductor de cobre con la cinta de algodón. Se hace la conexión de los conductores de equipo para la prueba y se toman los datos. La prueba se realiza para medir la corriente de fuga existente por el aislamiento hacia tierra, se obtienen valores dentro de los rangos permisibles.

**Tabla N° 6. 4:** Datos de prueba de tensión aplicada

PRUEBA DE TENSIÓN APLICADA					
Fase U	I ( $\mu$ A)	Fase V	I ( $\mu$ A)	Fase W	I ( $\mu$ A)
5 kV	0.40	5 kV	0.53	5 kV	0.031
10 kV	0.93	10 kV	0.96	10 kV	0.2
15 kV	2.65	15 kV	2.97	15 kV	0.40
20 kV	7.65	20 kV	10.56	20 kV	0.64
25 kV	28.8	25 kV	26.9	25 kV	4.29
28.7 kV	124	28.7 kV	61.5	28.7 kV	31.1



**Figura 6. 29:** Prueba de tensión aplicada a las barras reparadas

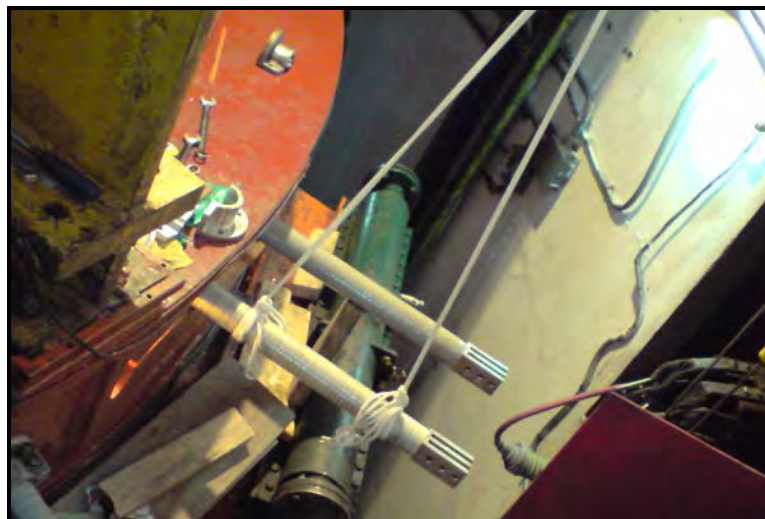


**Figura 6. 30:** Equipo Phenix para prueba de tensión aplicada

**Viernes 02/07/2010:**

- **Montaje de barras y empernado:**

Se reubican los las barras de 13.8 kV haciendo uso del puente grúa.



**Figura 6. 31:** Fijando las barras reparadas en el estator

Una vez fijadas las barras, se conectan las barras hacia los terminales flexibles como se muestra en la Figura 6.32.





**Figura 6. 32:** Realizando la conexión del imbricado doble del devanado del estator

- **Reaislamiento conexión barra – imbricado doble:**

El porcentaje de la mezcla es de: Resina – 100% y Endurecedor – 30%

Se recubre las barras del estator (imbricado doble) y se rellena con araldit las partes que no se pueden recubrir con la cinta mica porosa.



**Figura 6. 33:** Imbricado doble recubierto con araldit

**Sábado 03/07/2010:**

▪ **Pruebas de aislamiento:**

Se realiza la medición de aislamiento después de la reparación de las barras. Los valores obtenidos se encuentran en el rango permitido de nivel de aislamiento del estator.

**Tabla N° 6. 5:** Medida de aislamiento después de la reparación de las barras

Condición	Fase	Temperatura bobinado C°	Resistencia de aislamiento
			Después de 1' R1 (M ohm)
Fase - Tierra	U	26	2100
	V	34.6	2100
	W	23.9	2300
Entre fases	U	-	5000
	V	-	5800
	W	-	5900

▪ **Reposición del acople:**

Se reponen los acoples de las barras de 13.8 kV y de la conexión doble estrella.

▪ **Montaje de tapas metálicas:**

Se reponen las cubiertas metálicas (planchas estrilladas).

▪ **Puesta en servicio del grupo:**

Se informa a sala de control que el grupo generador se encuentra listo para su puesta en operación y su conexión con el sistema interconectado.

## 6.2 GRUPO N° 1 – CENTRAL HIDROELÉCTRICA RESTITUCIÓN (C.H. RON)

### 6.2.1 Diseño de Planta

Tabla N° 6. 6: Características generales del Grupo N° 1 – C.H. RON

<b>Voltaje</b>	13.8 kV	<b>RPM</b>	200
<b>MW</b>	72	<b>Aislamiento</b>	Mica epóxica
<b>Fecha de fabricación</b>	1981	<b>Fecha de puesta en servicio</b>	1981
<b>Tipo de máquina</b>	Generador hidráulico	<b>Fabricante</b>	Ansaldo
<b>Sensor DP</b>	EMC	<b>Bobinado</b>	De doble capa
<b>Conexión Interna</b>	Estrella	<b>Refrigeración</b>	Con aire en circuito cerrado

### 6.2.2 Estado Actual de las Descargas Parciales

Con fecha 09-08-2010 se realizó el monitoreo de las descargas parciales en el arrollamiento de las fases R, S, T del generador del Grupo N° 1 – C.H. RON, los valores de los pulsos positivos (rojo es Qm+) y negativos (verde es Qm-) de las descargas se encuentran por encima de los 98 mV y por debajo de los 461 mV, encontrándose en un nivel de tipo “**TÍPICO**” y “**MODERADO**” según criterios de evaluación establecidas en las tablas estadísticas de la base de datos de IRIS POWER (Ver Figura 6.34).

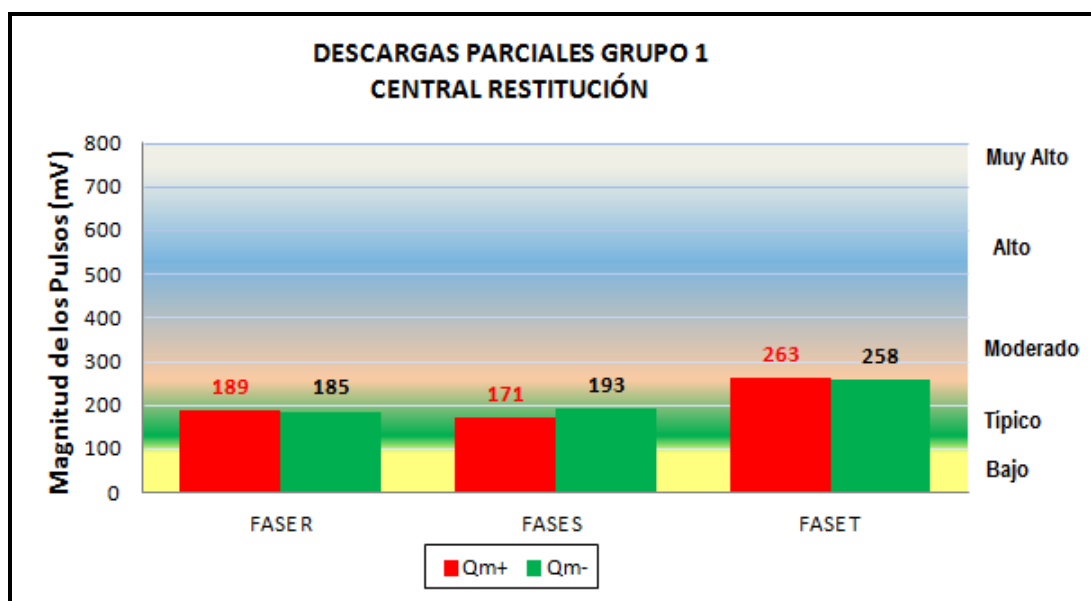


Figura 6. 34: Evaluación de tablas estadísticas – IRIS POWER

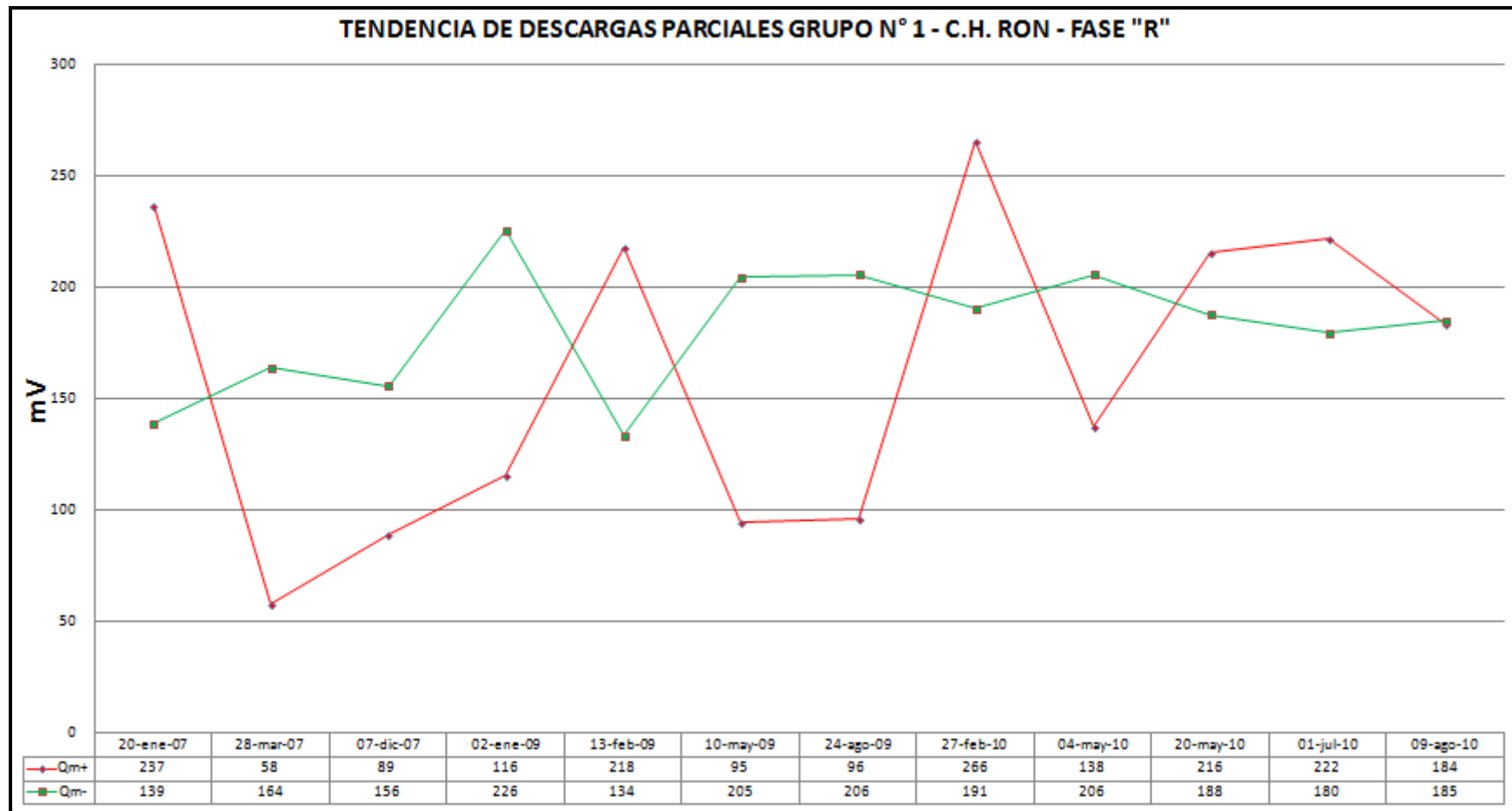
### 6.2.3 Tendencias de Descargas Parciales

El Grupo N° 1 – C.H. RON viene siendo monitoreado sus descargas parciales desde el 2007, para analizar las tendencias de las descargas parciales se mostrará en la Tabla N° 6.7 los valores de **Qm+** y **Qm-** por fases obtenidos desde el 2007 al 2010.

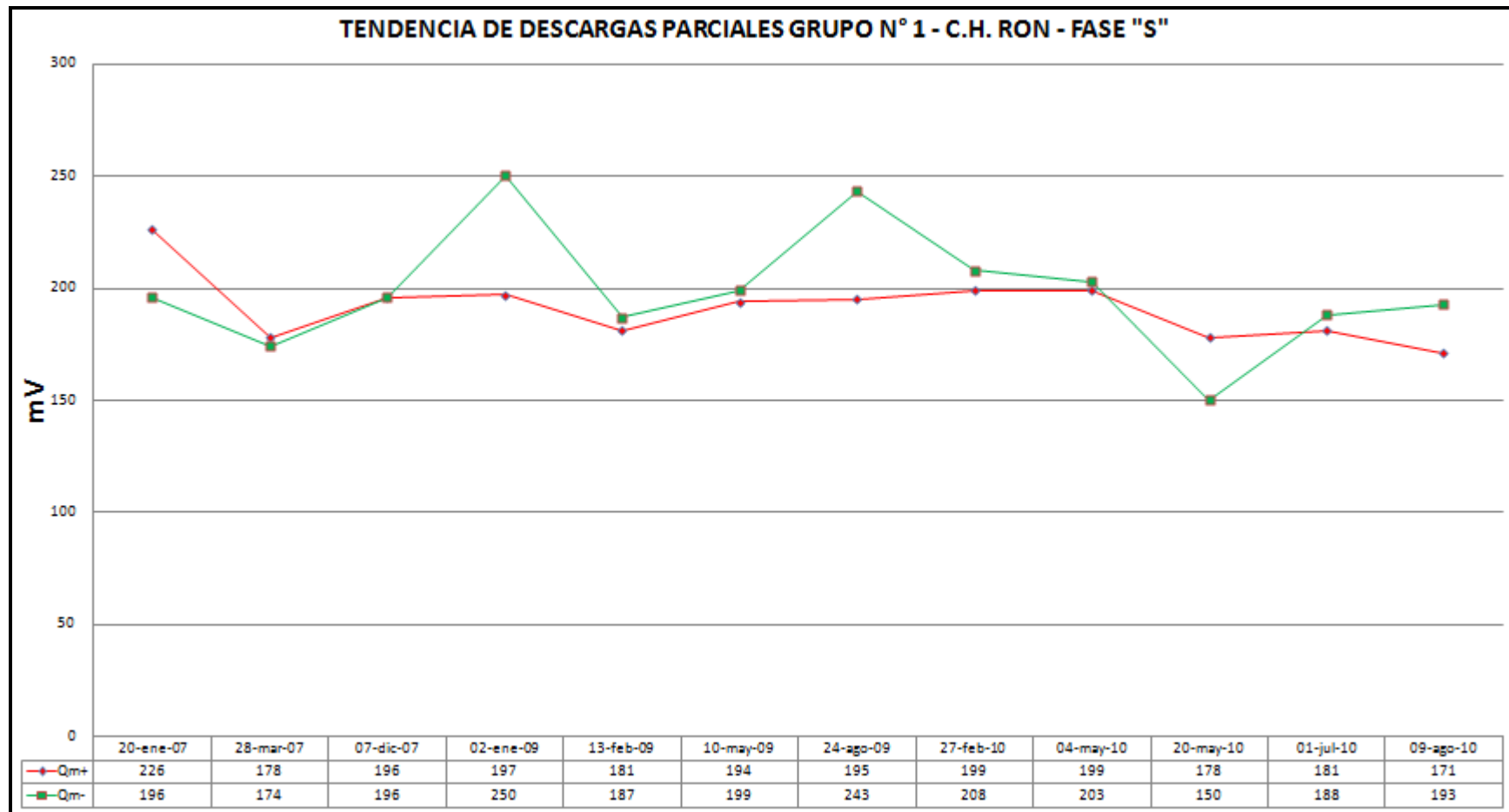
Tabla N° 6. 7: Monitoreo de las Descargas Parciales en el Grupo N° 1 – C.H. RON

FECHA	FASE R		FASE S		FASE T	
	QM+	QM-	QM+	QM-	QM+	QM-
20/01/2007	237	139	226	196	190	278
28/03/2007	58	164	178	174	112	95
07/12/2007	89	156	196	196	138	143
02/01/2009	116	226	197	250	304	159
13/02/2009	218	134	181	187	72	133
10/05/2009	95	205	194	199	241	144
24/08/2009	96	206	195	243	268	154
27/02/2010	266	191	199	208	249	320
04/05/2010	138	206	199	203	265	168
20/05/2010	216	188	178	150	370	384
01/07/2010	222	180	181	188	322	321
09/08/2010	184	185	171	193	263	258

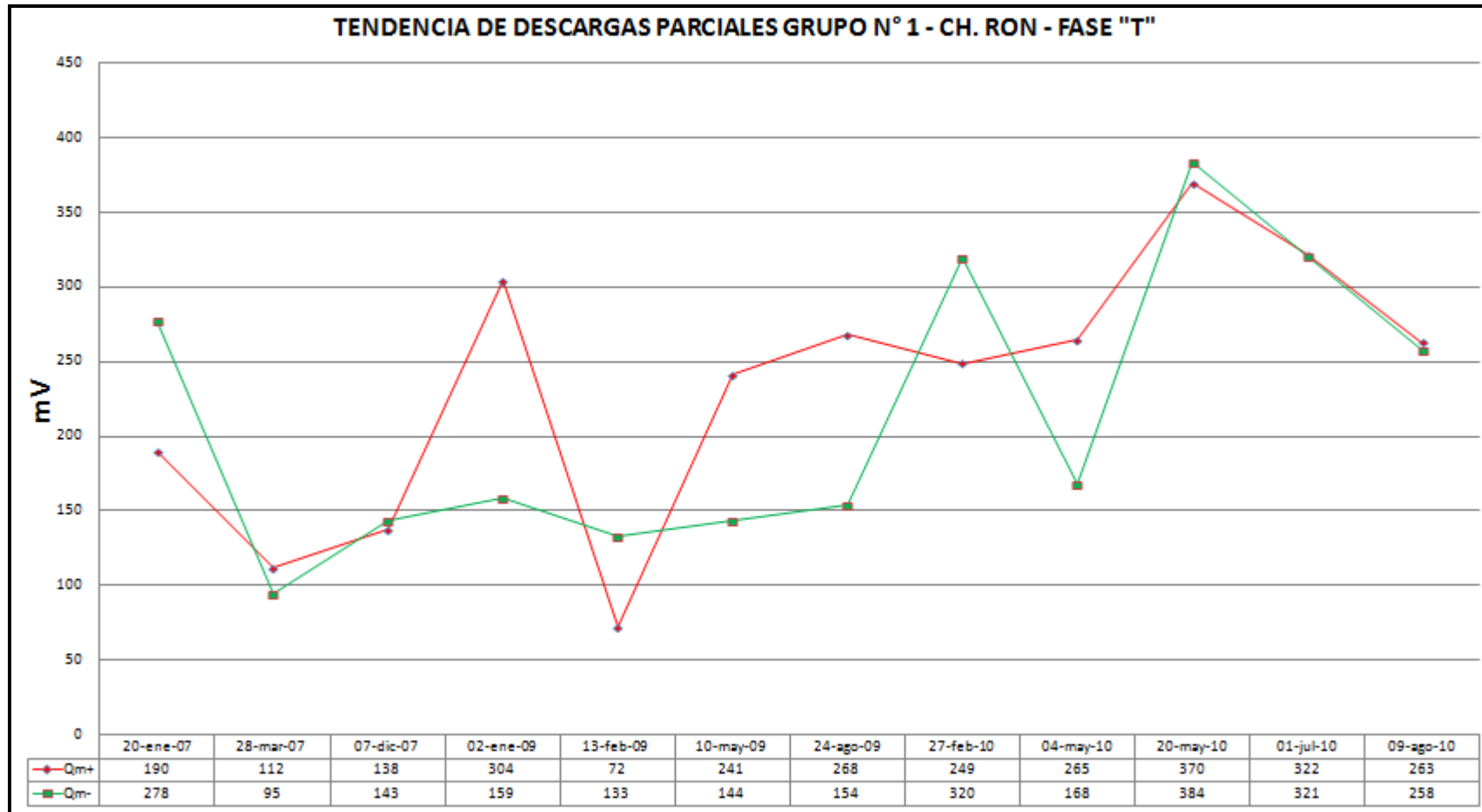
A continuación se establecen los gráficos de tendencia de las tres fases para mejor apreciación:



**Figura 6. 35:** Curva de tendencia de las Descargas Parciales Grupo N° 1 – C.H. RON – Fase R



**Figura 6. 36:** Curva de tendencia de las Descargas Parciales Grupo N° 1 – C.H. RON – Fase S



**Figura 6. 37:** Curva de tendencia de las Descargas Parciales Grupo N° 1 – C.H. RON – Fase T

## 6.2.4 Interpretación de Descargas Parciales

a) Fase "R"

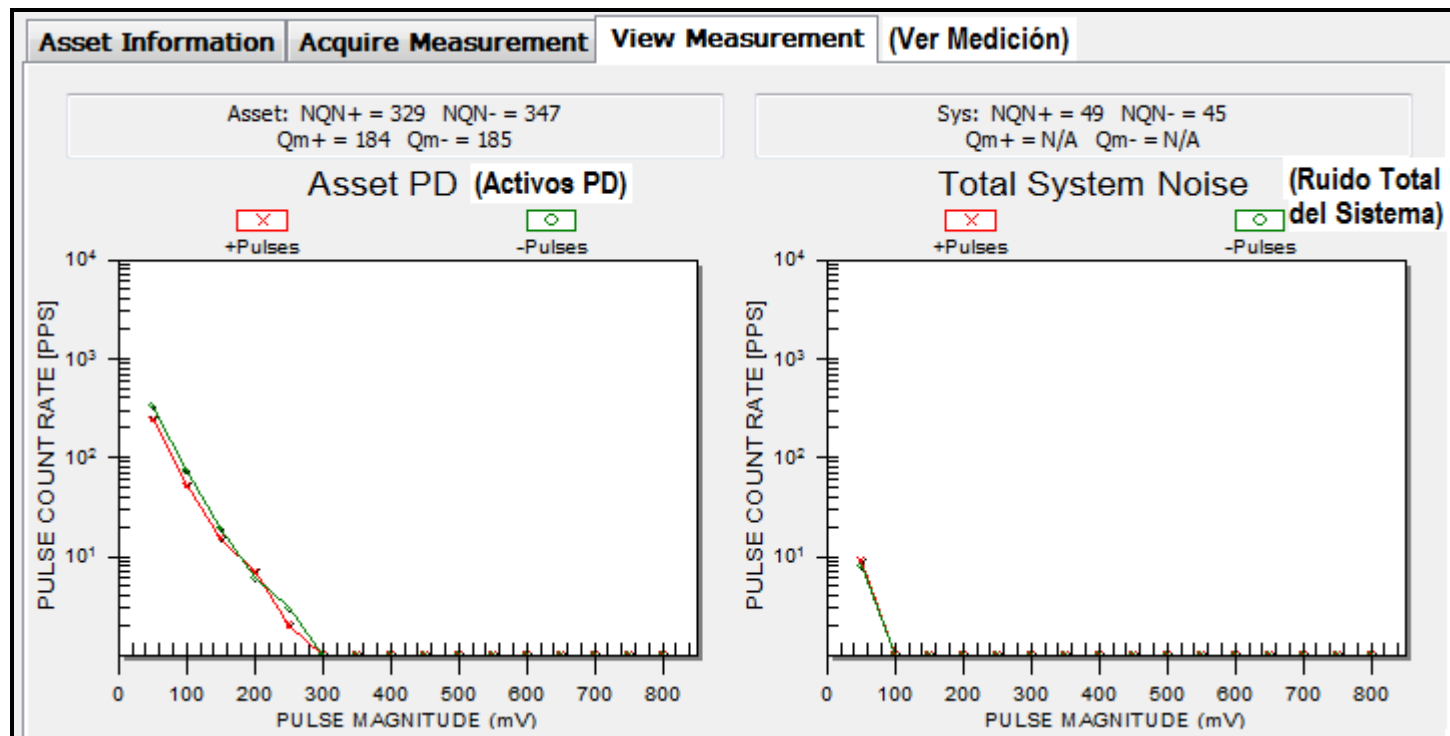
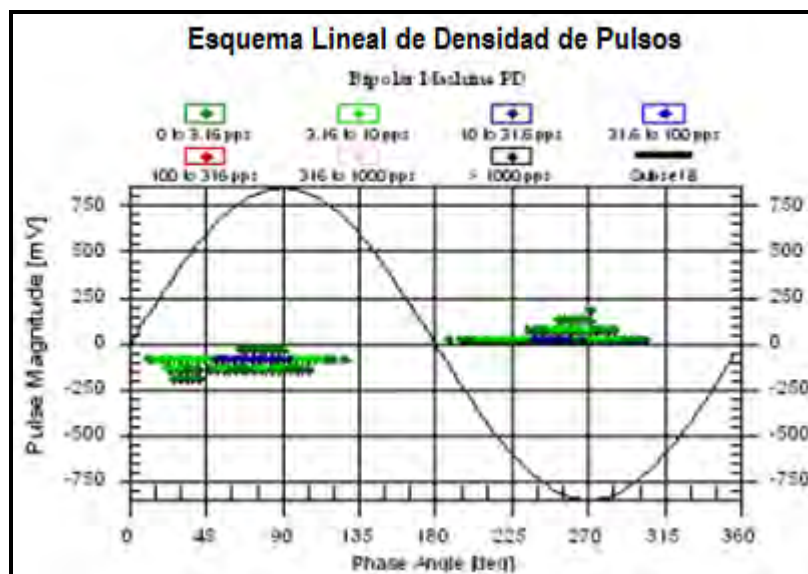


Figura 6. 38: Análisis de magnitud de pulsos Fase R – Grupo N° 1 – C.H. RON





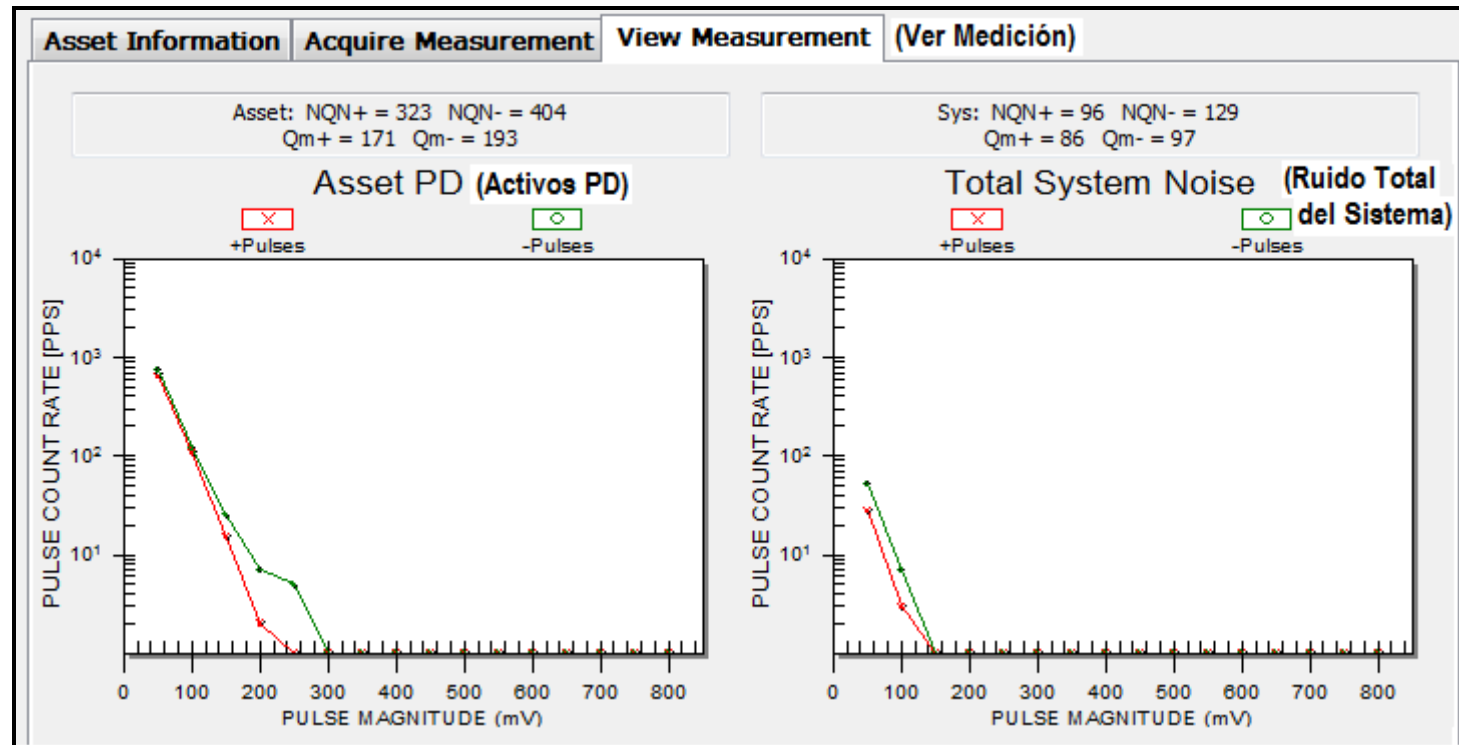
**Figura 6. 39:** Esquema lineal densidad de pulsos Fase R – Grupo N° 1 – C.H. RON

En el gráfico de "Análisis de pulsos elevados" se establece que no existe predominancia de polaridad, que se evidencia claramente por la existencia en la magnitud y cantidad de descargas parciales de ambas polaridades son similares. ( $Q_m (+) \sim Q_m (-)$ ).

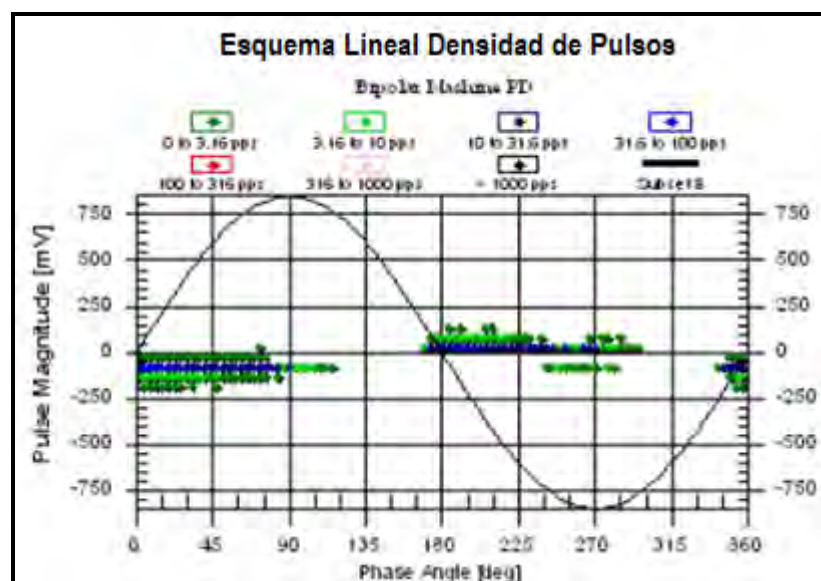
Estas descargas parciales sin predominancia de polaridad positiva en un gráfico "Densidad de pulso" se concentra alrededor de los 45° y 225° durante el semiciclo positivo y negativo respectivamente de la tensión fase a tierra, e indica que las descargas parciales se vienen originando en el aislamiento **principal por la presencia de huecos** y pueden ser debido a:

- ✓ Deterioro térmico (sobrecalentamiento) del sistema aislante en el cual se ha forzado el material orgánico del aglutinante hasta perderse la fuerza adhesiva.
- ✓ Existe alta probabilidad de que la cinta aislante no se halle en toda su longitud consolidada y posea separación entre capas.

b) Fase "S"



**Figura 6. 40:** Análisis de magnitud de pulsos Fase S – Grupo N° 1 – C.H. RON

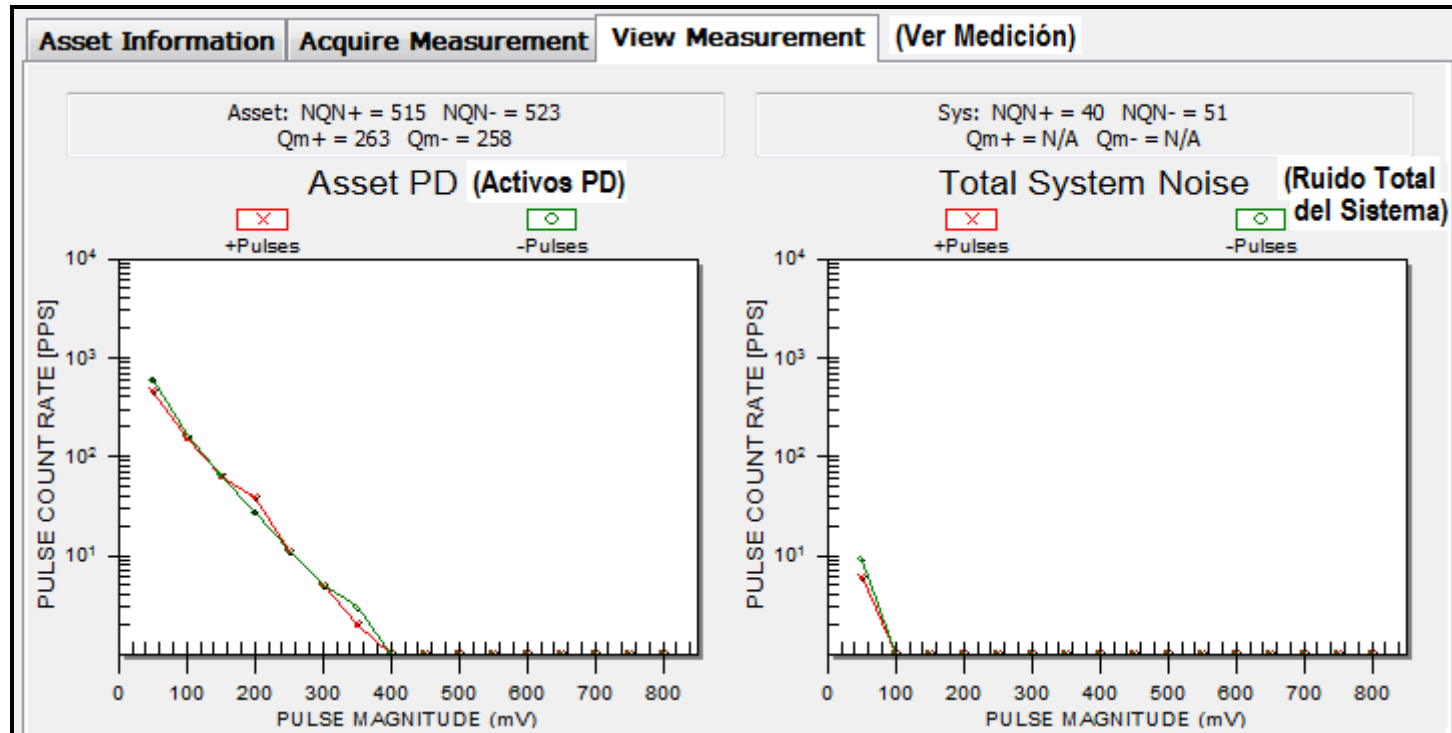


**Figura 6. 41:** Esquema lineal densidad de pulsos Fase S – Grupo N° 1 – C.H. RON

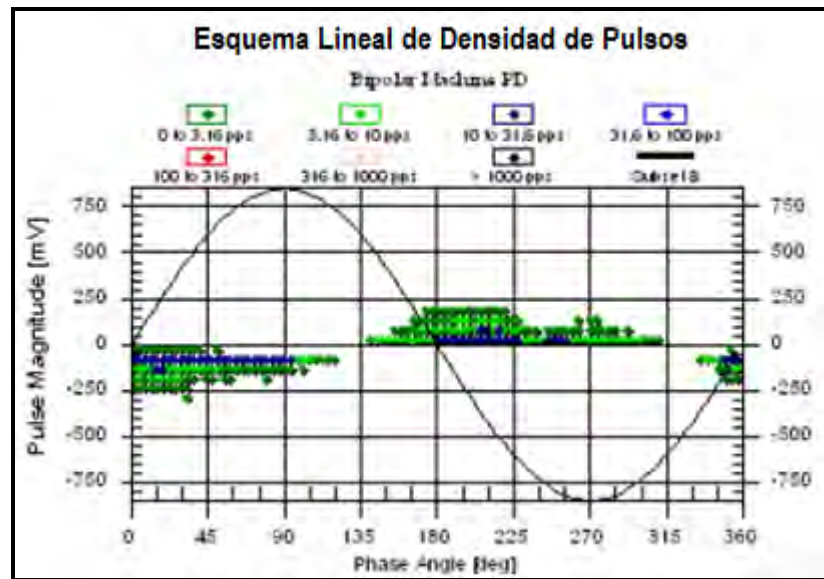
En el gráfico de "Análisis de pulsos elevados" se establece que no existe predominancia de polaridad, que se evidencia claramente por la existencia en la magnitud y cantidad de descargas parciales de ambas polaridades son similares. ( $Q_m (+) \sim Q_m (-)$ ).

Estas descargas parciales sin predominancia de polaridad positiva en un gráfico "Densidad de Pulso" se concentran alrededor de los  $45^\circ$  y  $225^\circ$  durante el semiciclo positivo y negativo respectivamente de la tensión fase a tierra, e indica que la descargas parciales se vienen originando en el aislamiento **principal por la presencia de huecos** y pueden ser debido a:

- ✓ Deterioro térmico (sobrecalentamiento) del sistema aislante en el cual se ha forzado el material orgánico del aglutinante hasta perderse la fuerza adhesiva.
- ✓ Existe alta probabilidad de que la cinta aislante no se halle en toda su longitud consolidada y posea separación entre capas.

c) Fase "T"

**Figura 6. 42:** Análisis de magnitud de pulsos Fase T – Grupo N° 1 – C.H. RON



**Figura 6. 43:** Esquema lineal densidad de pulsos Fase T – Grupo N° 1 – C.H. RON

En el gráfico de "Análisis de pulsos elevados" se establece que no existe predominancia de polaridad, que se evidencia claramente por la existencia en la magnitud y cantidad de descargas parciales de ambas polaridades son similares. ( $Q_m (+) \sim Q_m (-)$ ).

Estas descargas parciales sin predominancia de polaridad en un gráfico "Densidad de pulso" se concentra alrededor de los  $15^\circ$  y  $195^\circ$  durante el semiciclo positivo y negativo respectivamente de la tensión fase a tierra, e indica que las descargas parciales se vienen originando en los cabezales y pueden ser debido a **contaminación, espaciado inadecuado**. El no existir predominancia de polaridad indica que las descargas parciales se vienen también originando en el aislamiento **principal por la presencia de huecos** y pueden ser debido a:

- ✓ Deterioro térmico (sobrecalentamiento) del sistema aislante en el cual se ha forzado el material orgánico del aglutinante hasta perderse la fuerza adhesiva.

- ✓ Existe alta probabilidad de que la cinta aislante no se halle en toda su longitud consolidada y posea separación entre capas.

### **6.2.5 Aplicación de Falla de Descarga Parcial**

En la Figura 6.35, 6.36 y 6.37, se puede apreciar las curvas de tendencias de las descargas parciales ocurridas desde la fecha 2007 – 2010, donde se aprecia que los valores de las magnitudes **Qm+** y **Qm-** están en niveles moderados, a diferencia del grupo N° 7 de la C.H. de SAM que presentó un pico muy elevado llevando a un cortocircuito entre fases. En febrero del 2010 se programa un mantenimiento mayor que implicaba tanto el mantenimiento programado de la parte eléctrica como la parte mecánica del grupo generador, entre las actividades a realizar en el generador se tiene la limpieza e inspección del estator, encontrándose la presencia de polvo blanco alrededor del devanado del estator parte superior e inferior.

El polvo blanco es un indicio de las descargas parciales debido a que como el sistema de enfriamiento de los alternadores de ELECTROPERU S.A. es con aire forzado se filtran partículas contaminantes al estator y se depositan en los cabezales, esta acumulación propicia la ionización del aire y las bobinas se ven sometidas a la acción de las descargas parciales cancelando la graduación de campo eléctrico y deteriorando la superficie del aislamiento es decir se produce algunas cavidades externas acompañadas de este polvo blanco. A continuación se presenta la descripción del procedimiento del mantenimiento programado de la reparación de las zonas afectadas (cavidades) en las partes del devanado del estator como una aplicación directa de falla de descarga parcial, cabe resaltar que los tipos de fabricación de los bobinados, la carga a la que trabajan, temperatura y voltaje de operación influyen en el comportamiento de las descargas parciales.

a) Mantenimiento Mayor en el devanado del estator

**Objetivo:**

- ✓ Realizar el correcto mantenimiento mayor en el devanado del estator.
- ✓ Inspección general del estator de la máquina generadora.
- ✓ Limpieza general del devanado del estator, cabezales superiores e inferiores, paso de bobinas y barras de doble ramal.
- ✓ Ejecutar todo el mantenimiento mayor en la fecha prevista.

**Previsiones de seguridad:**

Disponer de los equipos de protección personal (EPP'S) y herramientas adecuadas:

- ✓ El personal debe estar provisto de su ropa de trabajo: mameluco, casco protector, zapatos de seguridad, protector auditivo, guantes, faja para proteger la columna y cuando sea necesario lentes de protección, correas de seguridad y respirador.
- ✓ El personal de Generación conjuntamente con el responsable de la orden trabajo (O/T), cumplirán con realizar las prevenciones necesarias (el grupo a intervenir se realizará estando fuera de servicio).
- ✓ Delimitar la zona de trabajo, iluminación de la zona de trabajo.
- ✓ Verificar la zona de trabajo, que no haya existencia de material u objeto que dificulte el trabajo del personal.
- ✓ Verificación de hoja de control de riegos de caídas y procedimiento de trabajo en alturas.
- ✓ Instalación de línea de vida en la zona de trabajo donde se requiera.
- ✓ Herramientas de trabajo en buen estado.

**Programa de Trabajo por días:****Domingo 14/02/2010:**

- ✓ El área de mantenimiento eléctrico realiza un diagrama de Gantt, programando la ejecución de las actividades a realizar (ver Figura 6.45).
- ✓ El personal de mantenimiento eléctrico es informado de las actividades a realizar en el Grupo N° 1 – C.H. RON, para luego dirigirse hacia el lugar de trabajo para proceder con la ejecución de las actividades.

**▪ Retiro de las planchas estrilladas:**

Para poder observar mejor las anomalías al contorno del estator y salidas de barras 13.8 kV, se procede al retiro de las planchas estrilladas observándose la presencia de polvo blanco en diferentes partes del estator las cuales son un indicio de descargas parciales.



**Figura 6. 44:** Retiro de las planchas estrilladas

Para iniciar las reparaciones de las cavitaciones producto de las descargas parciales en las diferentes partes que conforman el estator se necesita la obtención de recursos: Humanos, Materiales, Herramientas y Equipos.



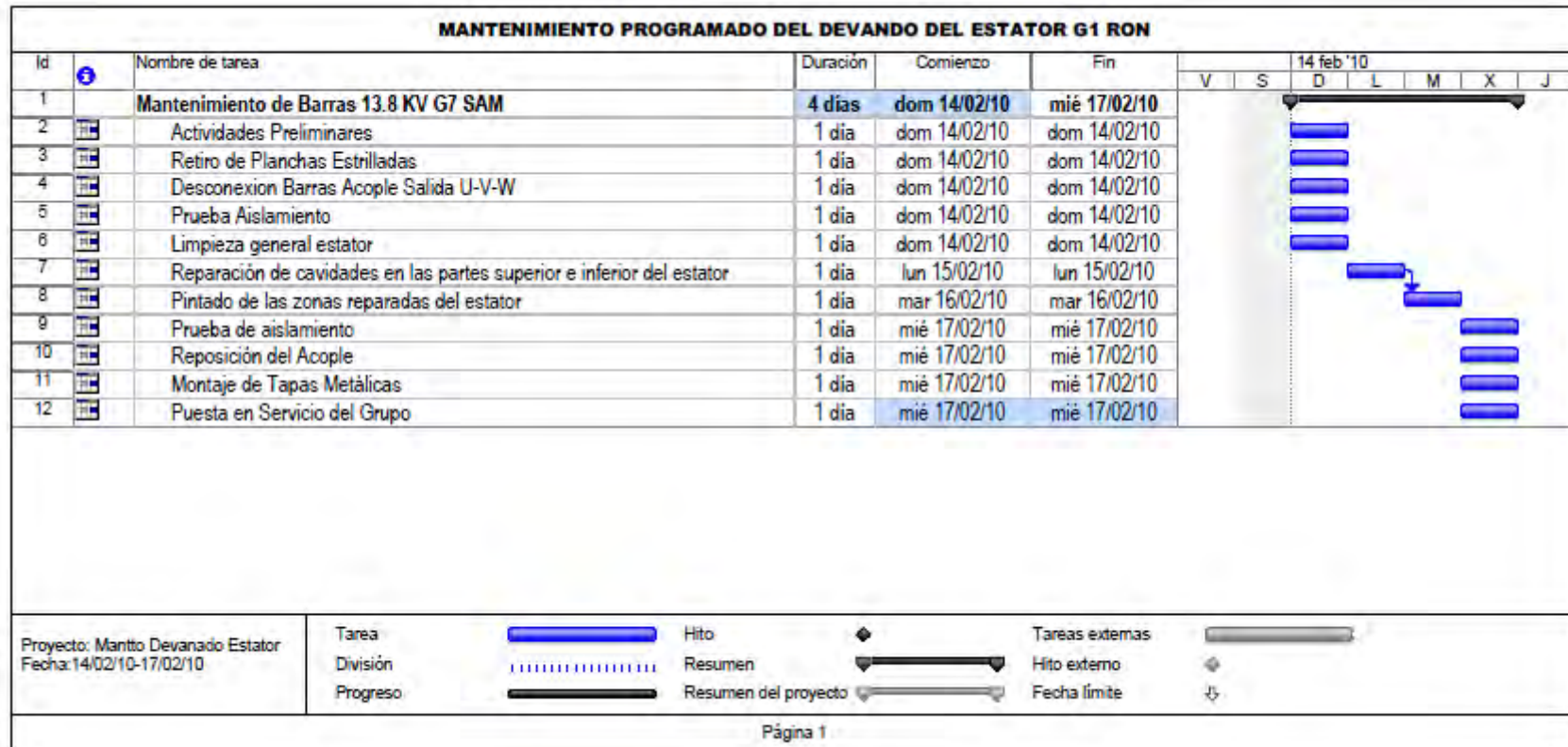


Figura 6. 45: Diagrama de Gantt

- ✓ **Humanos:** La cantidad de personal que participara en la ejecución de las actividades son 01 Técnico Supervisor, 02 Técnicos Electricistas y 03 Ayudantes Electricistas.
- ✓ **Materiales:**
  - 01 Rollos de Cinta de Mica Porosa de 0.15 mm
  - 01 Rollos de Cinta de Fibra de Vidrio de 0.14 mm
  - 03 Kg de Resina Colrepox D
  - 01 Kg de Endurecedor 1956
  - 02 Kg de Pintura Graduadora de Potencial F6542 + F6540
  - 200 g de Aerosil
  - 03 Kg de Barniz Aislante 182.264.01 SUMATE COMPONENTE B y 197.900.06A
- ✓ **Herramientas:**
  - 04 Unid. de Llaves N°19 - 17
  - 03 Unid. de Formones de ½", ¼"
  - 02 Unid. de Extensión de luz
  - 03 Unid. de Martillos de baquelita o goma
  - 20 Kg de Trapo industrial
  - 03 Galones de Solvente Dieléctrico
  - 06 Unid. de Tacos de madera
  - 04 Unid. de Destornillador Plano, Estrella
  - 15 mts de Plástico Doble Transparente
  - 06 Unid. de Lija Fina o de Madera
  - 04 Unid. de Linternas
  - 02 Unid. de Tecles

- 04 Unid. de sogas de Nylon de 10 mts

✓ **Equipos:**

- 01 Meghometro Metriso
- 01 Compresora
- 01 Soplete

▪ **Desconexión barras acople de salidas U – V – W:**

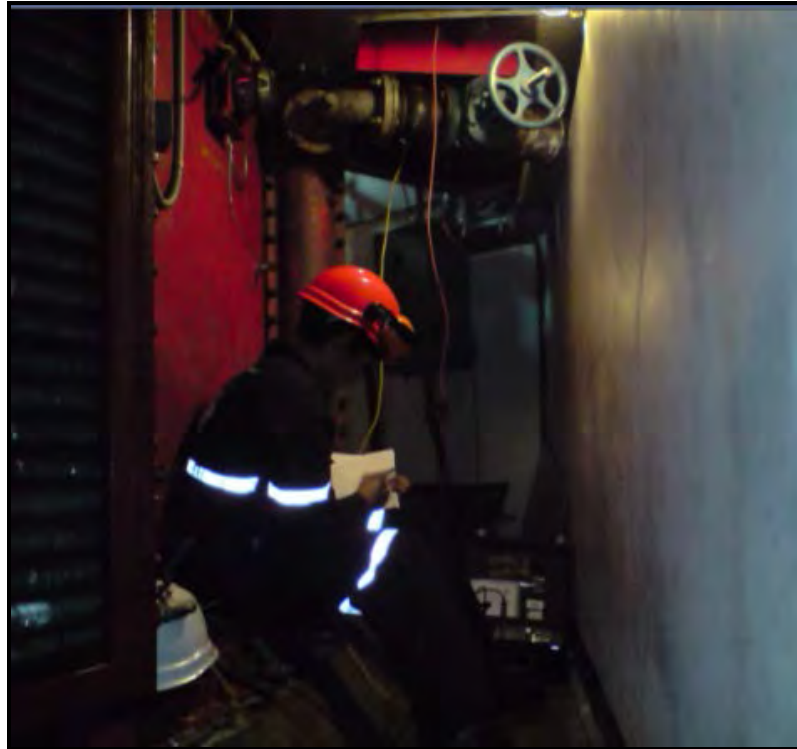
Se desconecta los terminales de salidas de 13.8 kV de las tres fases U, V y W. Observándose la presencia de polvo blanco indicio de las descargas parciales en casi todas las partes que conforman el estator.



**Figura 6. 46:** Indicio de descargas parciales (polvo blanco/ozono).

▪ **Medición de aislamiento entre fases antes de ejecutar las actividades en el estator:**

Se realiza la medición de aislamiento del estator, para tener una referencia del estado en que la que se encuentra. Se adjunta los valores obtenidos en la Tabla 6.7.



**Figura 6. 47:** Medición del nivel de aislamiento

**Tabla N° 6. 8:** Cuadro de medida de aislamiento

Condición	Fase	Temperatura bobinado C°	Resistencia de aislamiento	
			Después de 1' R1 (M ohm)	después de 10' R10 (M ohm)
Fase - Tierra	U	37	1900	7600
	V	45	1900	7000
	W	33	1800	7100
Entre fases	U	-	4800	
	V	-	4400	
	W	-	4400	

- **Limpieza general del estator:**

Se inicia los trabajos de limpieza del estator en sus diferentes partes que lo conforman, utilizando paños de tela con solvente dieléctrico.

Al hacer la limpieza en los cabezales superiores e inferiores, paso de bobinas y doble ramal se detecto pequeñas cavidades externas producto de las descargas parciales.



**Figura 6. 48:** Cabezales inferiores



**Figura 6. 49:** Paso de bobina



**Figura 6. 50:** Doble ramal

**Lunes 15/02/2010:**

- **Reparación de las cavitaciones en las diferentes partes que conforman el estator:**

Se ilumina el ambiente a trabajar para de este modo evitar algún inconveniente. Luego se realizan las reparaciones en las zonas afectadas por las descargas parciales, aplicando la resina en las zonas donde se encuentran las cavitaciones (zona superior e inferior del estator).



**Figura 6. 51:** Aplicación de la resina en las zonas afectadas

El porcentaje de aplicación de la mezcla es: Resina – 100% y Endurecedor – 30%, añadiendo aerosil hasta obtener una masa consistente.



**Figura 6. 52:** Aplicación de la resina en las partes afectadas de los cabezales superiores

También se usó las cintas de mica porosa y fibra de vidrio para la sujeción de los tacos de separación de las barras de doble ramal ya que varios de los tacos de encontraban flojos.

**Martes 16/02/2010:**

▪ **Pintado de las zonas reparadas del estator :**

Se inicia con el pintado del estator parte superior e inferior como se observa en la Figura 6.52 utilizando pintura semiconductora. Después del pintado se aplica el barniz protector en su totalidad del estator. Para finalizar esta tarea, se deja secar la pintura semiconductora aplicada y el barniz, hasta el día siguiente para iniciar con las medidas del aislamiento.



**Figura 6. 53:** Aplicación de la pintura semiconductora en los cabezales superiores



**Figura 6. 54:** Aplicación del barniz protector en las diferentes partes que conforman el estator





**Figura 6. 55:** Vista superior del estator – período de secado

**Miércoles 17/02/2010:**

▪ **Pruebas de aislamiento:**

Se realiza la medición de aislamiento después de las reparaciones realizadas en el estator del grupo generador N° 1 de la central Restitución. Los valores obtenidos se encuentran en el rango permitido de nivel de aislamiento del estator.

**Tabla N° 6. 9:** Cuadro de medida de aislamiento

Condición	Fase	Temperatura bobinado C°	Resistencia de aislamiento
			Después de 1' R1 (M ohm)
Fase - Tierra	U	27.3	2710
	V	27.1	2610
	W	27.4	2670
Entre fases	U	-	6400
	V	-	6800
	W	-	6600

- **Reposición del acople:**

Se reponen los acoples de las barras de 13.8 kV y de la conexión doble estrella.

- **Montaje de tapas metálicas:**

Se reponen las cubiertas metálicas (planchas estrilladas).

- **Puesta en servicio del grupo:**

Se informa a sala de control que el grupo generador se encuentra listo para su puesta en operación y su conexión con el sistema interconectado.

## **CAPÍTULO VII**

### **EVALUACIÓN TÉCNICO ECONÓMICA**

#### **7.1 GENERALIDADES**

En esta evaluación lo que se quiere demostrar son los beneficios económicos de usar el equipo IRIS POWER PDA-IV y justificar su compra e instalación.

**El primer análisis es justificar la compra e instalación del equipo de monitoreo de descargas parciales IRIS POWER PDA – IV**, para ello se mostrará los costos siguientes:

- ✓ El costo de inversión inicial requerido al comprar el equipo incluyendo los gastos de instalación para los 7 grupos de la C.H. SAM y los 3 grupos de la C.H. RON.
- ✓ El costo por contratar a una empresa de servicios para el monitoreo de las descargas parciales para todos los grupos.

Teniendo estos costos se hace el cálculo del retorno de inversión al adquirir el equipo de monitoreo demostrando que la inversión se recupera en un corto plazo. Por consiguiente ya no se contrataría a una empresa de servicios para el monitoreo de las descargas parciales después de la adquisición del equipo de monitoreo, trayendo esto ahorros significativos para la empresa.

**El segundo análisis es demostrar los beneficios económicos de diagnosticar correctamente los monitoreos de descargas parciales con el equipo IRIS POWER PDA - IV**, es decir al hacer un buen mantenimiento predictivo se programaría un **mantenimiento preventivo (programado)**. En consecuencia si uno hace un mal diagnóstico del monitoreo de las descargas parciales esto llevaría a una falla por descarga parcial, para lo cual se programaría un **mantenimiento correctivo (no programado)**, cabe recalcar que un mantenimiento no programado generalmente dura más días que un mantenimiento programado.

Entonces para demostrar los beneficios económicos de diagnosticar correctamente con el equipo de monitoreo se mostrará los siguientes costos:

- ✓ Costo por mantenimiento programado
- ✓ Costo por mantenimiento no programado

Teniendo estos costos se hace una comparación demostrando que al hacer un buen diagnóstico usando el equipo de monitoreo se pueden evitar gastos económicos para la empresa en mantenimientos no programados.

## **7.2 PRIMER ANÁLISIS: ADQUISICIÓN DEL EQUIPO DE MONITOREO DE DESCARGAS PARCIALES IRIS POWER PDA – IV**

### **7.2.1 Costo de inversión inicial al comprar el equipo IRIS POWER PDA – IV y accesorios**

Para este análisis se considera la instalación y/o montaje a nivel de todos los grupos de las centrales hidroeléctricas Santiago Antúnez de Mayolo (07 grupos - C.H. SAM) y Restitución (03 grupos - C.H. RON).

**Tabla N° 7. 1:** Detalle de suministro de equipos de medición de descargas parciales

Descripción	C. H. SAM	C.H. RON
Cantidad de generadores Potencia (MVA) Tensión (V) Frecuencia (Hz)	7 120 MVA 13.800 60 Hz	3 85 MVA 13.800 60 Hz
Acoplador capacitivo Iris Power y paquete de instalación	Paquete de acopladores PDA (máquinas hasta 7 - 16kV), incluye por cada generador 6 capacitores de epoxi-mica (80pF, 16kV) caja terminal de poliéster y fibra de vidrio y kit de instalación. <b>Cantidad : 7 paquetes</b>	Paquete de acopladores PDA (máquinas hasta 7 - 16kV), incluye por cada generador 6 capacitores de epoxi-mica (80pF, 16kV) caja terminal de poliéster y fibra de vidrio y kit de instalación. <b>Cantidad: 3 paquetes</b>
Instrumento de pruebas	<b>PDA-IV</b> Instrumento portátil para pruebas de descargas parciales con acopladores PDA, incluye probador, manual, cables de señal, caja de transporte, Software PD View y PD Lite Pro. <b>Cantidad: 1 unidad</b>	
Multiplexor	PDA Multiplexor (permite al instrumento hacer pruebas secuenciales de hasta 6 pares de acopladores PDA). <b>Cantidad: 1 unidad</b>	
Computador Portátil	HP Pavilion. <b>Cantidad: 1 unidad</b>	
Impresora Color	Lexmark Z515. <b>Cantidad: 1 unidad</b>	

Tabla N° 7. 2: Costos de equipos estándar

Item	Descripción	Cantidad	Unidad	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)
1	<b>Paquete de acopladores capacitivos PDA</b> (máquinas hasta 7 - 16 kV), incluye por cada generador 6 capacitores de epoxi-mica (80 pF, 16 kV) caja terminal de poliéster y fibra de vidrio de instalación.	10	Paquete	6,222.00	62,220.00
2	<b>PDA-IV Instrumento portátil para pruebas de descargas parciales con acopladores PDA</b> , incluye probador, manual, cables de señal, caja de transporte, Software PD View y PD Lite Pro.	01	Unidad	72,326.50	72,326.50
3	<b>PDA multiplexor</b> (permite al instrumento hacer pruebas secuenciales de hasta 6 pares de acopladores PDA).	01	Unidad	4,543.25	4,543.25
4	<b>Computador portátil – HP pavilion</b>	01	Unidad	730.00	730.00
5	<b>Impresora color – LexmarkZ515</b>	01	Unidad	165.00	165.00
6	<b>Embalaje para la exportación y manipulación</b>	01	Unidad	255.00	255.00
<b>TOTAL (\$)</b>					<b>141,239.75</b>
<b>TOTAL (S/.) (Tipo de cambio \$1=S/.2.75)</b>					<b>388,409.31</b>

Tabla N° 7. 3: Costo de servicios incluidos

Item	Descripción	Cantidad	Unidad	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)
1	El experto en asesorar en sitio para la instalación y verificación de PDA incluyendo el montaje de acopladores e informe. La instalación de estos acopladores puede requerir de días adicionales los cuales serán facturados como horas extras.	10 días	8-hr /días	1,249.50 (\$/8-hr)	12,495.00
2	Tiempo de viaje al sitio. (incluyendo traslado de equipos y accesorios)	04 días	8-hr /días	952.00 (\$/8-hr)	3,808.00
3	Recopilación en Línea PD de datos para acopladores PDA – Análisis de los Datos.	01	Lote	2450.00	2,450.00
4	Informe de análisis de datos en una máquina equipada con 3 a 6 acopladores.	10	Unidad	1,041.25	10,412.5
5	Horas extras.	60	hrs	246.50	14,790.00
<b>TOTAL (\$)</b>					<b>43,955.50</b>
<b>TOTAL (S/.) (Tipo de cambio \$1=S/.2.75)</b>					<b>120,877.63</b>

Por lo tanto el costo de inversión total al comprar los equipos IRIS POWER PDA – IV y accesorios es:

**Tabla N° 7. 4:** Costo total de inversión

Equipos estándar	S/. 388,409.31
Servicios incluidos estimados	S/. 120,877.63
<b>TOTAL COSTO DE INVERSIÓN</b>	<b>S/. 509,286.94</b>

### 7.2.2 Costo de monitoreo de descargas parciales realizado por una empresa de servicios

El resumen de costos de servicios por 01 monitoreo realizado por una empresa de servicios es:

**Tabla N° 7. 5:** Costos por 01 monitoreo realizado por una empresa de servicios

<b>SERVICIOS IRIS POWER</b>			
<b>Item</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Precio unitario (\$)</b>
1	El experto para realizar el monitoreo de PDA incluyendo el informe de análisis y su propio equipo IRIS POWER PDA-IV.	8-hr /días	1050.00 (\$/8-hr)
2	Tiempo de viaje al sitio (incluye el traslado del equipo y accesorios para el monitoreo de los DP).	8-hr /días	750.00 (\$/8-hr)
3	Horas extras.	hr	100.00 (\$/hr)

Ahora para calcular el costo de monitoreo anual por los 10 grupos generadores consideraremos lo siguiente:

- ✓ **En 01 año habrá 12 monitoreos (01 monitoreo por mes para los 10 grupos generadores).**

Según recomendaciones de los proveedores del equipo IRIS POWER el monitoreo promedio es mensual.



Este monitoreo promedio mensual se hace teniendo en cuenta las condiciones aceptables de las descargas parciales que no excedan la magnitud de carga establecidas ( $Q_{m+}$  y  $Q_{m-}$ ) para los grupos de la C.H. SAM y C.H. RON. Se entiende que 01 monitoreo abarca todos los 10 grupos generadores, entonces se tiene lo siguiente:

**Tabla N° 7. 6:** Costo mensual de 01 monitoreo para los 10 grupos generadores por una empresa de servicios

<b>SERVICIOS IRIS POWER</b>					
<b>Item</b>	<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Precio Unitario (\$)</b>	<b>Precio Total (\$)</b>
1	El experto para realizar el monitoreo de PDA incluyendo el informe de análisis y su propio equipo IRIS POWER PDA-IV	7.5 días	8-hr /días	1050.00 (\$/8-hr)	7875.00
2	Tiempo de viaje al Sitio (incluye el traslado del equipo y accesorios para el monitoreo de los DP)	4 días	8-hr /días	750.00 (\$/8-hr)	3000.00
3	Horas extras.	6 hrs	hr	100.00 (\$/hr)	600.00
<b>TOTAL (\$)</b>					<b>11,475.00</b>
<b>TOTAL (S/.) (Tipo de cambio \$1=S/.2.75)</b>					<b>31,556.25</b>

Por lo tanto el costo de monitoreo anual total es:

**Tabla N° 7. 7:** Costo anual total – 12 monitoreos

Costo mensual – 01 monitoreo (10 grupos generadores)	S/. 31,556.25
Costo anual total – 12 monitoreos (10 grupos generadores)	<b>S/. 378,675.00</b>

### 7.2.3 Retorno de inversión al adquirir el equipo IRIS POWER PDA- IV y accesorios

Al tener los costos siguientes:

- ✓ El costo de inversión inicial requerido al comprar el equipo incluyendo los gastos de instalación para los 7 grupos de la C.H. SAM y los 3 grupos de la C.H. RON.
- ✓ El costo por contratar a una empresa de servicios para el monitoreo de las descargas parciales para todos los grupos.

Se evalúa el Retorno por Inversión teniendo en cuenta que lo siguiente:

El costo de inversión inicial es adquiriendo el equipo IRIS POWER PDA – IV, para que luego el personal propio de la empresa haga el monitoreo en línea de las descargas parciales de los grupos generadores. El costo de monitoreo por una empresa de servicios incluye que ellos traigan sus propios equipos para realizar el monitoreo en línea de las descargas parciales.

Por lo tanto el retorno de inversión es:

<b>S/. 509,286.94/ S/. 378,675.00 = 1.35 años</b>
---

Entonces el retorno de inversión es 01 año y 4 meses aproximadamente:

<b>Retorno de Inversión = 1.4 años</b>
--

#### **7.2.4 Financiamiento**

Considerando la difícil situación financiera de la Empresa ELECTROPERU S.A. Fue posible el logro de esta inversión en equipos de monitoreo de descargas parciales Iris Power PDA-IV y accesorios, a través de un análisis por parte del área mantenimiento eléctrico del Complejo Hidroeléctrico Mantaro – ELECTROPERU S.A. lanzando al mercado una licitación de adquisición por un costo de inversión de **S/. 509,286.94 nuevos soles** de los equipos y ganando una empresa competente para el servicio, quien se encargo del montaje e instalación de los equipos de monitoreo de descargas parciales en línea IRIS POWER PDA – IV.

#### **7.2.5 Justificación**

El área de mantenimiento eléctrico evaluó los instrumentos IRIS POWER según los criterios siguientes para su adquisición:

- ✓ Equipos modernos de diagnóstico del aislamiento para el devanado estático de los generadores.
- ✓ Marca de los equipos de monitoreo de descargas parciales.

Es decir, de los equipos modernos que analizan el aislamiento de los devanados de los estatores de los generadores **¿Cuál escoger?** y de las tantas marcas de los equipos de monitoreo de descargas parciales **¿Cuál elegir?**, esto se puede apreciar mejor en las Tablas 7.8 – 7.9.

**Tabla N° 7. 8:** Comparación de equipos de diagnóstico del aislamiento

<b>Pruebas eléctricas</b>	<b>Prueba fuera de línea</b>	<b>Prueba en línea</b>	<b>Evaluación del aislamiento</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>Descargas parciales</b>	✓	✓	Mide la magnitud y el patrón de distribución de las DP's, respecto a una onda senoidal de referencia con lo cual se trata de determinar el grado de la degradación.	Su monitoreo es en línea. Se puede localizar la probable ubicación en el sistema de aislamiento con su correcta interpretación.	Los resultados dependen de la persona que interprete la tendencia de las descargas parciales.
<b>Tangente Delta</b>	✓	x	Es una medida de las pérdidas dieléctricas del aislamiento.	Mide el aislamiento promedio de todo el devanado del estator.	Sólo determina la condición promedio del aislamiento, es decir, no detecta el punto de peor condición.
<b>Aislamiento</b>	✓	x	Condición del aislamiento en cuanto a suciedad y humedad.	Medir el nivel absoluto de aislamiento.	Sólo es una prueba de rigor para determinar si existe falla a tierra o entre fases.

**Tabla N° 7. 9:** Ventajas y desventajas de las marcas existentes de equipos de monitoreo de descargas parciales

MARCA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<b>IRIS POWER</b>	Uso de acoplador direccional para discriminación del ruido. Equipo exclusivo solo para monitoreo de descargas parciales. Acceso público a base datos.	Los resultados dependen de la persona que interprete la tendencia de las descargas parciales.
<b>ADWEL</b>	Monitoreo en línea de las descargas parciales.	No cuenta con acoplador direccional. No es exclusivo para monitoreo de descargas parciales.
<b>BC HYDRO</b>	Monitoreo en línea de las descargas parciales.	No cuenta con acoplador capacitivo. No es exclusivo para monitoreo de descargas parciales.

De esta manera se observa las ventajas del equipo IRIS POWER, principalmente que su uso es en línea (prueba eléctrica) y su discriminación del ruido para adquirir los datos (equipo) sobre los otros equipos de monitoreos de las descargas parciales. Es necesario mencionar también que al momento de adquirir el equipo IRIS POWER los indicadores económicos como el Valor Actual Neto (VAN), Tasa de Interés de Retorno

(TIR) y el tiempo de retorno de inversión (corto plazo) son favorables como se demostrará a continuación.

**Tabla N° 7. 10:** Flujo de Caja para evaluar los indicadores económicos

Año	0	1.5	3	4.5	6	7.5	9	10.5
Ci	-509286.94							
Vs								100,000.00
Ingresos		568,012.50	568,012.50	568,012.50	568,012.50	568,012.50	568,012.50	568,012.50
Egresos		-50,000.00	-50,000.00	-50,000.00	-50,000.00	-50,000.00	-50,000.00	-50,000.00
Flujo caja	-509,286.94	518,012.50	518,012.50	518,012.50	518,012.50	518,012.50	518,012.50	618,012.50

\*Asumiendo un período de tiempo de 10.5 años vida útil de la máquina.

Donde:

**Ci:** Costo Inicial (costo a invertir en la adquisición del equipo IRIS POWER).

**Vs:** Valor de Salvamento (es el valor estimado del equipo en el final de su vida útil).

**Ingresos:** Son las ganancias que se obtiene al adquirir el equipo IRIS POWER, ya que no se gastaría en contratar a una empresa tercera en efectuar los monitoreos de DP's.

**Egresos:** Son los gastos en mantenimiento y/o calibración del equipo de monitoreo de DP's, asumiendo que se realiza cada 1.5 años.

Entonces calculando el **VAN**:

\*La tasa de descuento que maneja la empresa Electroperu S.A. es del 14%.

TD = 14%

$$VAN = -509286.94 + \frac{518012.5}{(1+0.14)} + \frac{518012.5}{(1+0.14)^2} + \frac{518012.5}{(1+0.14)^3} + \frac{518012.5}{(1+0.14)^4} + \frac{518012.5}{(1+0.14)^5} + \frac{518012.5}{(1+0.14)^6} + \frac{518012.5}{(1+0.14)^7}$$

$$VAN = S/. 1 603 383.01$$

Luego calculando el **TIR**:

$$\begin{aligned} \text{TIR} = i = ? \\ 0 = -509286.94 + \frac{518012.5}{(1+i)^1} + \frac{518012.5}{(1+i)^2} + \frac{518012.5}{(1+i)^3} + \frac{518012.5}{(1+i)^4} + \frac{518012.5}{(1+i)^5} + \frac{518012.5}{(1+i)^6} + \frac{518012.5}{(1+i)^7} \\ i = \text{TIR} = 0.8258 = 82.58\% \end{aligned}$$

Como se podrá apreciar:

- **VAN>0**; por lo que la inversión deberá llevarse a cabo.
- **TIR>14%**; como al inicio tiene flujo de fondo negativo (inversión) y positivos en los períodos siguientes se puede invertir en la adquisición del equipo.
- **Retorno de Inversión= 1.4 años** (*calculado anteriormente en el ítem 7.2.3*).

Por consiguiente ya que el Complejo Hidroeléctrico del Mantaro, es la fuente de abastecimiento eléctrico más importante del país, la participación de los **generadores eléctricos** con más de 32 años de servicio, es fundamental para atender los alcances del sistema eléctrico interconectado.

El mercado eléctrico requiere que las condiciones de operación, presente y futuras de los generadores eléctricos, sean las máximas y eficientes; entonces es muy importante esta inversión en el monitoreo de descargas parciales en línea con equipo y personal propio para el correcto funcionamiento de los generadores para de este modo evitar gastos sustanciales en salidas no programadas por fallas y en contrataciones de empresas de servicios para este análisis de monitoreo.

### **7.3 SEGUNDO ANÁLISIS: CORRECTO DIAGNÓSTICO DE LOS MONITOREOS DE DESCARGAS PARCIALES CON EL EQUIPO IRIS POWER PDA - IV**

#### **7.3.1 Costo de Mantenimiento Programado**

a) Planeamiento:

En la Figura 7.1, se muestra el listado de actividades por día que se realiza en un mantenimiento programado en la reparación de barras 13.8 kV. Este mantenimiento programado es consecuencia de un buen diagnóstico (mantenimiento predictivo) de los esquemas de las descargas parciales. Se presenta como ejemplo el mantenimiento programado del grupo N° 7 – C.H. SAM realizado en el mes de Febrero 2010.



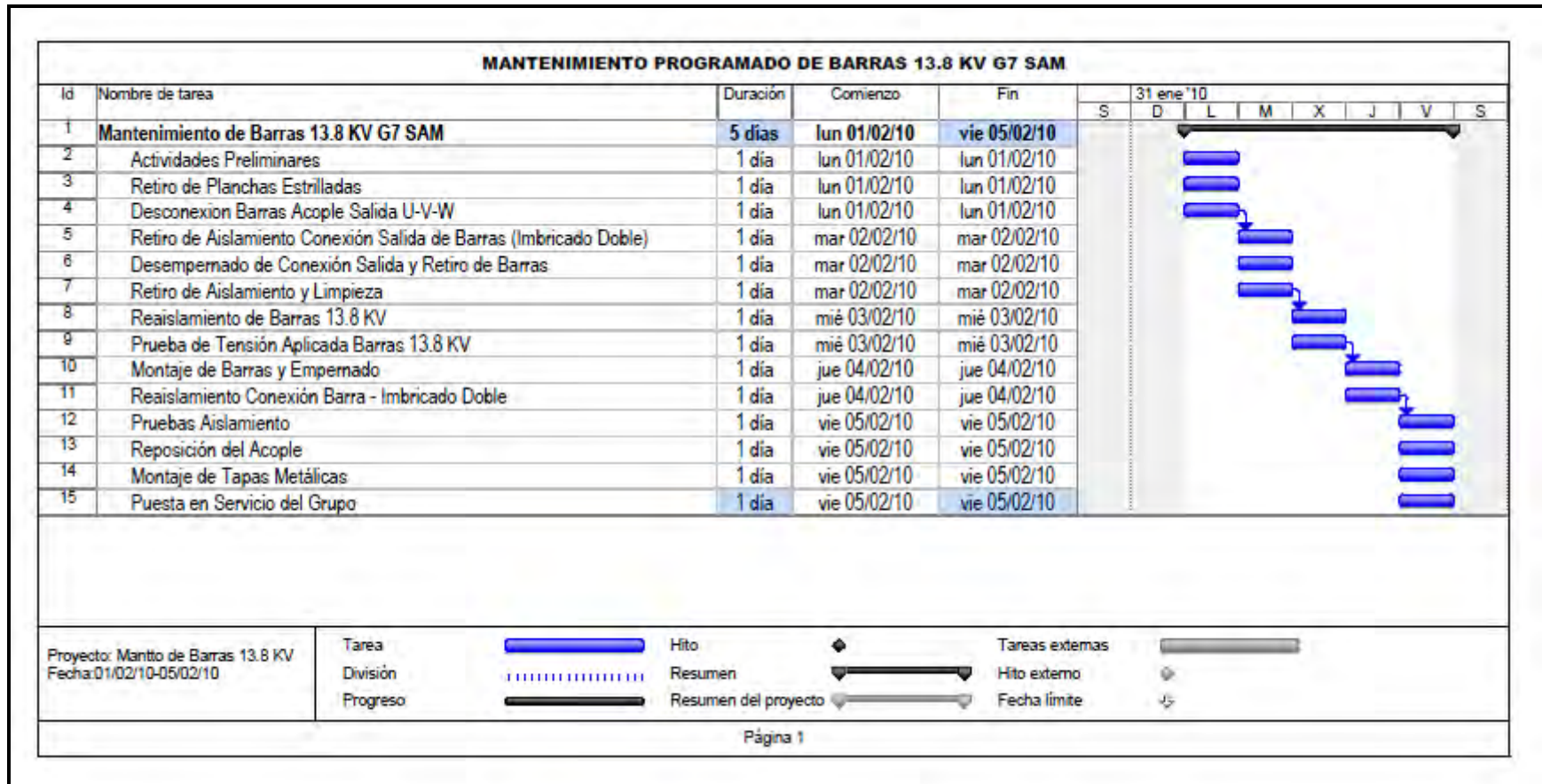


Figura 7. 1: Diagrama Gantt – Listado de Actividades

- **Recursos:**

- **Personal**

**Tabla N° 7. 11:** Personal trabajado por día

PERSONAL									
12/10/2010		13/10/2010		14/10/2010		15/10/2010		16/10/2010	
MARTES		MIÉRCOLES		JUEVES		VIERNES		SÁBADO	
N° Personas		N° Personas		N° Personas		N° Personas		N° Personas	
Propio	Tercero	Propio	Tercero	Propio	Tercero	Propio	Tercero	Propio	Tercero
02	03	03	03	03	01	03	03	03	03

\*Personal Propio = Personal Electroperu S.A.

\*Personal Tercero = Personal Empresa Contratista

- **Materiales, Herramientas y Equipos**

**Tabla N° 7. 12:** Materiales, herramientas y equipos utilizados en el mantenimiento programado – grupo N°7 - C.H. SAM

	ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD
<b>MATERIALES</b>	1	Cinta de mica porosa de 0.15 mm	06	Rollos
	2	Cinta de fibra de vidrio de 0.14 mm	02	Rollos
	3	Resina Colrepox D	03	Kilogramo
	4	Endurecedor 1956	01	Kilogramo
	5	Cinta platinada autoadhesiva	01	Rollo
	6	Pintura graduadora de potencial F6542 + F6540	02	Kilogramo
	7	Barniz aislante 182.264.01 SUMATE COMPONENTE B y 197.900.06A	03	Kilos
	8	Papel Nomex	01	Kilogramo
	9	Papel de aluminio	01	Rollo
	10	Cinta de algodón	01	Rollo
<b>HERRAMIENTAS</b>	11	Llaves N°19 -17	04	Unidad
	12	Formones de 1/2",1/4"	03	Unidad
	13	Extensión de luz	02	Unidad
	14	Martillos de baquelita o goma	03	Unidad
	15	Trapo industrial	20	Kilogramo
	16	Solvente dieléctrico	02	Galones
	17	Tacos de madera	06	Unidad
	18	Destornillador plano: mediano/Largo (C/U)	02	Unidad
	19	Destornillador Estrella: mediano/Largo(C/U)	02	Unidad
	20	Linternas	03	Unidad
	21	Tocullo	05	Metros
	22	Plástico	15	Metros

**Tabla N° 7. 13:** Materiales, herramientas y equipos utilizados en el mantenimiento programado – grupo N°7 - C.H. SAM (continuación)

	ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD
<b>HERRAMIENTAS</b>	23	Sogas (10 metros de Nylon)	04	Unidad
	24	Mesa	03	Unidad
	25	Lija fina o de madera	06	Unidad
	26	Caballetes de metal	02	Unidad
	27	Paños de fibra de vidrio (50 cm x 50 cm)	04	Unidad
	28	Tecele	02	Unidad
<b>EQUIPOS</b>	29	Pértiga escopeta (5541-4, 1 ½" x 4')	01	Unidad
	30	Epp's (guantes, lentes, casco, mameluco, tapones auditivos, zapatos de seguridad)	06	Unidad
	31	Meghometro metrisso	01	Unidad
	32	Cables de prueba	10	Unidad
	33	Puente grúa	01	Unidad
	34	Equipo de tensión aplicada phenix - modelo 475 20	01	Unidad

b) Resumen de costos:

**Tabla N° 7. 14:** Resumen de costos de reparación de barras 13.8 kV - grupo N° 7 – C.H. SAM

DESCRIPCIÓN	COSTOS	PORCENTAJE
MANO DE OBRA	S/. 14,583.24	58.2%
SUMINISTROS	S/. 1,609.11	6.4%
EQUIPOS Y HERRAMIENTAS	S/. 8,881.81	35.4%
<b>TOTAL</b>	<b>S/. 25,074.16</b>	<b>100%</b>

c) Cálculo de costos:

– **Mano de obra:**

 **Personal de ELECTROPERU S.A.**

El cálculo de la mano de obra lo haremos partiendo de tres premisas:

Participación del personal en los diferentes trabajos.

El personal laboró 12 horas diarias; incluso sábados, domingos y feriados.

Se entiende que N°.H. (número de hombres), N°H/H (número de horas/hombre), C.H/H. (costo hora/hombre) fueron por los 5 días de mantenimiento programado.

**Tabla N° 7. 15:** Cálculo de costo por personal de ELECTROPERU S.A.

	N°.H.	N°H/H	C.H/H.	COSTO TOTAL (S/.)
<b>Reparación de barras 13.8 kV</b>				
- Actividades preliminares	02	12	37.76	906.24
- Desmontaje de barras 13.8 kV	03	12	37.76	1359.36
- Reparación de barras 13.8 kV	03	24	41.08	2957.76
- Montaje de barras 13.8 kV	03	12	41.08	1478.88
<b>Conductor vehículo</b>	01	60	31.96	1917.60
<b>Bodeguero</b>	01	60	31.28	1876.80
<b>Supervisor</b>	01	60	41.86	2511.60
<b>TOTAL (S/.)</b>				<b>13008.24</b>

 **Servicios no personales (terceros):**

Consideramos que el personal laboró 10 horas diarias, incluso sábados, domingos y feriados. El cálculo lo hacemos en base a un costo promedio de S/. 10.50 por cada hora/hombre.

**Tabla N° 7. 16:** Cálculo de costo por servicios no personales (terceros)

	N°.H.	N°H/H	C.H/H.	COSTO TOTAL (S/.)
<b>Reparación de barras 13.8 KV</b>				
- Actividades preliminares	03	10	10.5	315.00
- Desmontaje de barras 13.8 KV	03	10	10.5	315.00
- Reparación de barras 13.8 KV	03	20	10.5	630.00
- Montaje de barras 13.8 KV	03	10	10.5	315.00
<b>TOTAL (S/.)</b>				<b>1575.00</b>

**Tabla N° 7. 17:** Costo total de mano de obra

Por Electroperu	S/. 13008.24
Servicios no personales	S/. 1575.00
<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>	<b>S/. 14583.24</b>

– **Suministros:****Tabla N° 7. 18:** Cálculo de costo de suministros

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO UNITARIO (S/.)	COSTO TOTAL (S/.)
1	Cinta de mica porosa de 0.15 mm	06	Rollo	35.75	214.50
2	Cinta de fibra de vidrio de 0.14 mm	02	Rollo	154.00	308.00
3	Resina Colrepox D	03	Kilogramo	54.53	163.59
4	Endurecedor 1956	01	Kilogramo	80.84	80.84
5	Cinta platinada autoadhesiva	01	Rollo	29.93	29.93
6	Pintura graduadora de potencial F6542 + F6540	02	Kilogramo	184.25	368.50
7	Barniz aislante 182.264.01 SUMATE COMPONENTE B y 197.900.06A	03	Kilogramo	74.25	222.75
8	Papel Nomex	01	Kilogramo	192.50	192.50
9	Papel de aluminio	01	Rollo	25.00	25.00
10	Cinta de algodón	01	Rollo	3.50	3.50
<b>TOTAL SUMINISTROS</b>					<b>S/. 1609.11</b>

– Equipos y herramientas:

**Tabla N° 7. 19:** Cálculo de costo de equipos y herramientas

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO UNITARIO (S/.)	COSTO TOTAL (S/.)
1	Llaves N°19 -17	04	Unidad	30.00	120.00
2	Formones de 1/2", 1/4"	03	Unidad	15.00	45.00
3	Extensión de luz	02	Unidad	40.00	80.00
4	Martillos de baquelita o goma	03	Unidad	25.00	75.00
5	Trapo industrial	20	Kilogramo	3.61	72.20
6	Solvente dieléctrico	02	Galones	57.02	114.04
7	Tacos de madera	06	Unidad	20.00	120.00
8	Destornillador llano: mediano/largo (C/U)	02	Unidad	20.00	40.00
9	Destornillador estrella: mediano/largo(C/U)	02	Unidad	20.00	40.00
10	Linternas	03	Unidad	50.00	150.00
11	Tocullo	05	Metros	4.06	20.30
12	Plástico doble ancho transparente 1m	15	Metros	2.77	41.55
13	Sogas (10 metros de nylon)	04	Unidad	28.50	114.00
14	Mesa	03	Unidad	50.00	150.00
15	Lija fina o de madera	06	Unidad	1.09	6.54
16	Caballetes de metal	02	Unidad	60.00	120.00
17	Paños de fibra de vidrio (50 cm x 50 cm)	04	Unidad	75.00	300.00
18	Tecele	02	Unidad	700.00	1400.00
19	Pértiga escopeta (5541-4, 1 ½" x 4')	01	Unidad	2200.00	2200.00
20	EPP'S (guantes, lentes, casco, mameluco, tapones auditivos, zapatos de seguridad)	06	Unidad	146.78	880.68

**Tabla N° 7. 20:** Cálculo de costo de equipos y herramientas (continuación)

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO UNITARIO (S/.)	COSTO TOTAL (S/.)
21	Meghometro metrisso (alquiler por 5 días)	01	Unidad	400.00	400.00
22	Equipo de tensión aplicada phenix – Modelo 475 20 (alquiler por 5 días)	01	Unidad	2392.50	2392.50
<b>TOTAL EQUIPOS Y HERRAMIENTAS</b>					<b>S/.8881.81</b>

### 7.3.2 Costo de Mantenimiento No Programado

#### a) Planeamiento:

En la Figura 7.2, se muestra el listado de actividades por día que se realiza en un mantenimiento no programado en la reparación de barras 13.8 kV. Este mantenimiento no programado es consecuencia de un mal diagnóstico (mantenimiento predictivo) de los esquemas de las descargas parciales. Se presenta como ejemplo el mantenimiento no programado del grupo N° 7 – C.H. SAM realizado en el mes de Junio 2010.

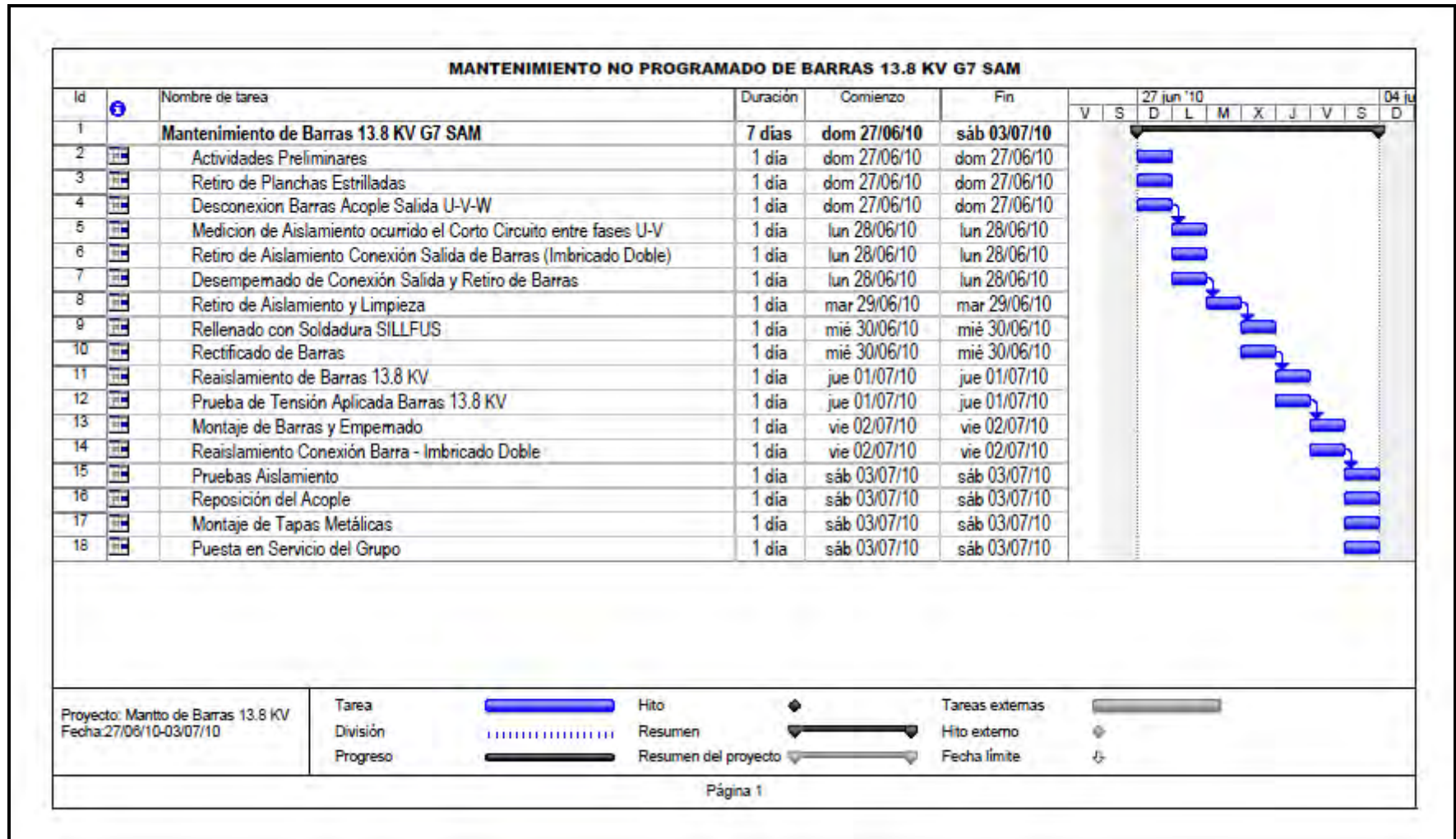


Figura 7. 2: Diagrama Gantt – Listado de Actividades



- **Recursos:**

- **Personal**

**Tabla N° 7. 21:** Personal trabajado por día

CARGA DE PERSONAL													
27/06/2010		28/06/2010		29/06/2010		30/06/2010		01/07/2010		02/07/2010		03/07/2010	
DOMINGO		LUNES		MARTES		MIERCOLES		JUEVES		VIERNES		SABADO	
N° Personas		N° Personas		N° Personas		N° Personas		N° Personas		N° Personas		N° Personas	
Propio	Tercero	Propio	Tercero	Propio	Tercero	Propio	Tercero	Propio	Tercero	Propio	Tercero	Propio	Tercero
3	0	5	2	5	2	5	2	5	2	5	2	5	2

\*Personal Propio = Personal Electroperu S.A.

\*Personal Tercero = Personal Empresa Contratista.

– **Materiales, Herramientas y Equipos**

**Tabla N° 7. 22:** Materiales, herramientas y equipos utilizados en el mantenimiento no programado – grupo N° 7 – C.H. SAM

	ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD
<b>MATERIALES</b>	1	Cinta de mica porosa de 0.15 mm	08	Rollos
	2	Cinta de fibra de vidrio de 0.14 mm	03	Rollos
	3	Resina Colrepox D	03	Kilogramo
	4	Endurecedor 1956	01	Kilogramo
	5	Cinta platinada autoadhesiva	01	Rollo
	6	Pintura graduadora de potencial F6542 + F6540	02	Kilogramo
	7	Barniz Aislante 182.264.01 SUMATE COMPONENTE B y 197.900.06A	03	Kilogramo
	8	Papel Nomex	01	Kilogramo
	9	Varillas de silfos	25	Varillas
	10	Papel de aluminio	01	Rollo
<b>HERRAMIENTAS</b>	11	Cinta de algodón	01	Rollo
	12	Llaves N°19 -17	04	Unidad
	13	Formones de 1/2",1/4"	03	Unidad
	14	Extensión de luz	02	Unidad
	15	Martillos de baquelita o goma	03	Unidad
	16	Trapo industrial	30	Kilogramo
	17	Solvente dieléctrico	03	Galones
	18	Tacos de madera	06	Unidad
	19	Destornillador plano	02	Unidad
	20	Destornillador estrella	02	Unidad
	21	Linternas	04	Unidad
	22	Tocullo	05	Metros
	23	Plástico	15	Metros
	24	Sogas	04	Unidad
	25	Mesa	03	Unidad
	26	Lija fina de madera	06	Unidad
	27	Caballetes de metal	02	Unidad
	28	Paños de fibra de vidrio	04	Unidad
	29	Tecele	02	Unidad
	30	Aguja nivelador	01	Unidad
	31	Pértiga escopeta (5541-4, 1 ½" x 4')	01	Unidad
	32	EPP'S (guantes, lentes, casco, mameluco, tapones auditivos, zapatos de seguridad)	07	Unidad
<b>EQUIPOS</b>	33	Meghometro metrisso	01	Unidad
	34	Máquina de soldar de bobinas	01	Unidad
	35	Máquina oxicorte	01	Unidad
	36	Torno	01	Unidad
	37	Equipo de tensión aplicada Phenix - Modelo 475 20	01	Unidad

b) Resumen de costos:**Tabla N° 7. 23:** Resumen de costos de reparación de barras 13.8 kV - grupo N° 7 –

C.H. SAM

DESCRIPCIÓN	COSTOS	PORCENTAJE
MANO DE OBRA	S/. 26,037.00	66.6%
SUMINISTROS	S/. 2,259.61	5.8%
EQUIPOS Y HERRAMIENTAS	S/. 10,806.71	24.6%
<b>TOTAL</b>	<b>S/. 39,103.32</b>	<b>100%</b>

c) Cálculo de costos:– **Mano de obra:**✚ **Personal de ELECTROPERU S.A.**

El cálculo de la mano de obra lo haremos partiendo de las mismas premisas mencionadas en el mantenimiento programado. En este caso fueron 7 días de mantenimiento no programado.

**Tabla N° 7. 24:** Cálculo de costo por personal de ELECTROPERU S.A.

	N°.H.	N°H/H	C.H/H.	COSTO TOTAL (S/.)
<b>Reparación de barras 13.8 kV</b>				
- Actividades preliminares	03	12	37.76	1359.36
- Desmontaje de barras 13.8 kV	05	12	37.76	2265.60
- Reparación de barras 13.8 kV *Rellenado con soldadura SILFOS *Rectificado de barras	05	48	41.08	9859.20
- Montaje de barras 13.8 kV	05	12	41.08	2464.80
<b>Conductor vehículo</b>	01	84	31.96	2684.64
<b>Bodeguero</b>	01	84	31.28	2627.52
<b>Supervisor</b>	01	84	41.86	3516.24
<b>TOTAL (S/.)</b>				<b>24777.36</b>

**✚ Servicios no personales (terceros):**

Consideramos que el personal laboró 10 horas diarias, incluso sábados, domingos y feriados. El cálculo lo hacemos en base a un costo promedio de S/. 3.00 por cada hora/hombre.

**Tabla N° 7. 25:** Cálculo de costo por servicios no personales (terceros)

	N°.H.	N°H/H	C.H/H.	COSTO TOTAL (S/.)
<b>Reparación de barras 13.8 KV</b>				
- Actividades preliminares	00	10	10.5	0.00
- Desmontaje de barras 13.8 KV	02	10	10.5	210.00
- Reparación de barras 13.8 KV *Rellenado con soldadura SILFOS *Rectificado de barras	02	40	10.5	840.00
- Montaje de barras 13.8 KV	02	10	10.5	210.00
<b>TOTAL (S/.)</b>				<b>1260.00</b>

**Tabla N° 7. 26:** Costo total de mano de obra

Por Electroperu	S/. 24777.36
Servicios no personales	S/. 1260.00
<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>	<b>S/. 26037.36</b>

– **Suministros:****Tabla N° 7. 27:** Cálculo de costos de suministro

<b>ITEM</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>COSTO UNITARIO (S/.)</b>	<b>COSTO TOTAL (S/.)</b>
1	Cinta de mica porosa de 0.15 mm	08	Rollos	35.75	286.00
2	Cinta de fibra de vidrio de 0.14 mm	03	Rollos	154.00	462.00
3	Resina Colrepox D	03	Kilos	54.53	163.59
4	Endurecedor 1956	01	Kilos	80.84	80.84
5	Cinta platinada autoadhesiva	01	Rollo	29.93	29.93
6	Pintura graduadora de potencial F6542 + F6540	02	Kilos	184.25	368.5
7	Barniz aislante 182.264.01 SUMATE COMPONENTE B y 197.900.06A	03	Kilos	74.25	222.75
8	Papel Nonex	01	Kilogramo	192.50	192.50
9	Varillas de Sillfos	25	Varillas	17.00	425.00
10	Papel de aluminio	01	Rollo	25.00	25.00
11	Cinta de algodón	01	Rollo	3.50	3.50
<b>TOTAL SUMINISTROS</b>					<b>S/. 2259.61</b>

– Equipos y herramientas:

**Tabla N° 7. 28:** Cálculo de costo de equipos y herramientas

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO UNITARIO (S/.)	COSTO TOTAL (S/.)
1	Llaves N°19 -17 (C/U)	04	Unidad	30.00	120.00
2	Formones de 1/2", 1/4" (C/U)	03	Unidad	15.00	45.00
3	Extensión de Luz	03	Unidad	40.00	120.00
4	Martillos de baquelita o goma	03	Unidad	25.00	75.00
5	Trapo Industrial	30	Kilos	3.61	108.3
6	Solvente dieléctrico	03	Galones	57.02	171.06
7	Tacos de madera	06	Unidad	20.00	120.00
8	Destornillador plano: Largo/corto (C/U)	02	Unidad	20.00	40.00
9	Destornillador estrella: Largo/corto (C/U)	02	Unidad	20.00	40.00
10	Linternas	04	Unidad	50.00	200.00
11	Tocullo	05	Metros	4.06	20.30
12	Plástico transparente	15	Metros	2.77	41.55
13	Sogas (10 metros Nylon)	04	Unidad	28.50	114.00
14	Mesa	03	Unidad	50.00	150.00
15	Lija fina o de madera	06	Unidad	1.09	6.54
16	Caballetes de metal	02	Unidad	60.00	120.00
17	Paños de fibra de vidrio (50 cm x 50 cm)	04	Unidad	75.00	300.00
18	Tecele	02	Unidad	700.00	1400.00
19	Aguja nivelador	01	Unidad	65.00	65.00
20	Pértiga escopeta (5541-4, 1 1/2" x 4')	01	Unidad	2200.00	2200.00

**Tabla N° 7. 29:** Cálculo de costo de equipos y herramientas (continuación)

<b>ITEM</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>COSTO UNITARIO (S/.)</b>	<b>COSTO TOTAL (S/.)</b>
21	EPP'S (guantes, lentes, casco, mameluco, tapones auditivos, zapatos de seguridad)	07	Unidad	146.78	1027.46
22	Meghometro metrisso (alquiler por 7 días)	01	Unidad	560.00	560.00
25	Máquina de soldar de bobinas (alquiler por 1 día)	01	Unidad	1200.00	1200.00
26	Máquina oxicorte (alquiler por 1 día)	01	Unidad	70.00	70.00
27	Torno (alquiler por 1 día)	01	Unidad	100.00	100.00
28	Equipo de tensión aplicada Phenix – Modelo 475 20	01	Unidad	2392.50	2392.50
<b>TOTAL EQUIPOS Y HERRAMIENTAS</b>					<b>S/.10806.71</b>

### 7.3.3 Comparación de costos

**Tabla N° 7. 30:** Comparación de costos de MP y MNP

DESCRIPCIÓN DEL MANTENIMIENTO	COSTO DE MANTENIMIENTO (S/.)	TIEMPO DE REPARACIÓN
Mantenimiento Programado (MP) - Mantenimiento Preventivo	25,074.16	5 días
Mantenimiento No Programado (MNP) - Mantenimiento Correctivo	39,103.32	7 días

Comparando los mantenimientos se tiene una diferencia de **S/. 14,029.16**, es decir que un mantenimiento no programado es **S/. 14,029.16** más costoso que un mantenimiento programado. Esta comparación se hace para tener referencias de costos de mantenimientos.

Pero al hacer un buen diagnóstico de los monitoreos de las descargas parciales con el equipo IRIS POWER PDA – IV y haciendo el trabajo con una planificación adecuada nos representa un ahorro significativo de **S/.39,103.32**.

El trabajo planificado rinde altos dividendos a mediano y largo plazo, ya que si no es efectuado en la fecha prevista irrogaría ingentes gastos como pérdidas de lucro cesante. Si nos basamos en el tiempo promedio de reparación se puede hacer la siguiente comparación:



**Tabla N° 7. 31:** Costo por el tiempo de indisponibilidad del grupo N° 7 – C.H. SAM

TIPO DE MANTENIMIENTO	TIEMPO DE REPARACIÓN	COSTO PROMEDIO POR ENERGÍA HIDRÁULICA GENERADA	PRODUCCIÓN DIARIA PROMEDIO	COSTO POR LUCRO CESANTE (\$)
Mantenimiento Programado (MP)	5 días	\$ 0.05/ KW-h	1,455,200 KW-h	\$ 363,800.00
Mantenimiento No programado (MNP)	7 días	\$ 0.05 /KW-h	1,682,500 KW-h	\$ 588,875.00

\*Tasa de Cambio \$1=S/2.75

\*Los valores de producción diaria promedio se obtuvieron de la base de datos del área de generación - SITEC

- ✓ El costo de indisponibilidad de la máquina por MP (5 días): **S/. 1,000,450.00**
- ✓ El costo de indisponibilidad de la máquina por MNP (7 días): **S/.1,619,406.25**

**Hay que entender que el costo de indisponibilidad de la máquina generadora por un mantenimiento programado** lo asume la empresa porque como su propio nombre lo dice es un mantenimiento “programado”, es decir la empresa está de acuerdo con esta indisponibilidad con la finalidad de hacer mantenimientos preventivos para evitar fallas imprevistas. **Es muy diferente al costo de indisponibilidad de la máquina generadora por un mantenimiento no programado** ya que este mantenimiento es producto de una falla imprevista, la máquina generadora no produciría energía hasta su reparación llevando a multas elevadas que tendría que pagar la empresa por no generar energía.

Por lo que al hacer un buen diagnóstico de los monitoreos de las descargas parciales con el equipo IRIS POWER PDA – IV y haciendo el trabajo con una planificación adecuada nos representa un ahorro del costo de tiempo por indisponibilidad muy significativo de **S/1,619,406.25**.

Haciendo una proyección anual para el año 2010 se tiene lo siguiente:

**Tenemos que saber cuántos mantenimientos programados se hicieron en el año 2010 relacionados con el aislamiento degradado producto de las descargas parciales,** según el planeamiento anual consolidado de mantenimiento:

**Tabla N° 7. 32:** Planeamiento anual de mantenimiento - 2010

G7 SAM	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO
<b>Mp-Cs</b>	16/01/2010	27/02/2010		10/04/2010	22/05/2010	
<b>Mm</b>		01-05/02/2010				
<b>C. Rodete</b>		03/02/2010	26/03/2010			
G7 SAM	JULIO	AGOSTO	SETIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
<b>Mp-Cs</b>	03/07/2010	14/08/2010	30/09/2010		06/11/2010	23/12/2010
<b>Mm</b>						
<b>C. Rodete</b>						

\***Mp – Cs:** Mantenimiento preventivo – Controles sistemáticos

\***Mm:** Mantenimiento mayor

\***C. Rodete:** Cambio rodete

El cuadro sombreado de amarillo es un mantenimiento programado relacionado con las descargas parciales (reaislamiento parcial Fase R de las barras 13.8 kV – grupo N° 7 – C.H. SAM).

Eso quiere decir que solo hubo **01 mantenimiento programado** de reparación parcial de barras grupo N° 7 – C.H. SAM en el año 2010.

**Ahora tenemos que saber cuántos mantenimientos no programados se hicieron en el año 2010 relacionados con el aislamiento degradado producto de las descargas parciales**, según la Tabla 7.28 se puede apreciar la cantidad de desconexiones forzadas.

**Tabla N° 7. 33:** Cuadro de cantidad desconexiones forzadas grupo N° 7 – C.H. SAM (parada de grupos no programados)

CENTRAL	GRUPO	2010	DESCONEXIONES POR MES - AÑO 2010											
			ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
SAM	G-7	2					1	1						

De estas desconexiones forzadas sólo 01 está relacionado con las descargas parciales, tomando como referencia la data del sistema integral técnico (SITEC) se puede apreciar en la siguiente Tabla 7.29:

**Tabla N° 7. 34:** Descripción de las desconexiones forzadas grupo N° 7 – C.H. SAM

Item	Fecha	Hora	Grupo	Condición Pre Falla	Alarma y señalización	Origen/Causa	Tiempo Reposición (hr)
1	30/05/10	12:25	G7 SAM	Grupo descargó 72.01 MW, +2.81 Mvar.	TEMP 2 ACEITE TRFO FASE S - ALARMA	Actuación de la protección "Temperatura aceite Transformador Principal - Fase S"	02:20
2	26/06/10	19:40	G7 SAM	Grupo descargó 82.47 MW, +18.53 Mvar	PROT. DIFERENCIAL GENERADOR - BLOQUEO BLOQUEO DE GRUPO 86E2	Cortocircuito bifásico (U, V) producido en correspondencia de las abrazaderas de soporte de los terminales del generador.	138:41

\*Datos al 31/11/2010

En conclusión al año 2010:

<b>01 Mantenimiento programado:</b>	<b>S/. 1,000,450.00</b>
-------------------------------------	-------------------------

<b>01 Mantenimiento no programado:</b>	<b>S/. 1,619,406.25</b>
--	-------------------------

Los cálculos del costo de tiempo de indisponibilidad anual son para tenerlos como referencia. Entonces al hacer un buen diagnóstico de los monitoreos de las descargas parciales con el equipo IRIS POWER PDA – IV y haciendo el trabajo con una planificación adecuada nos representa un ahorro del **costo de tiempo por indisponibilidad anual** muy significativo de **S/1,619,406.25**.

## CONCLUSIONES

1. La prueba mediante descargas parciales (**DP's**) constituye una herramienta muy importante de diagnóstico del devanado del estator dado que permite obtener los datos de las magnitudes de los pulsos de las DP's generalmente en milivoltios (**mV**) con la ventaja de que el generador eléctrico está en condiciones operativas (**C.H. SAM: 114 MW, 13.8 kV, 450 RPM y C.H. RON: 72 MW, 13.8 kV, 200 RPM**) bajo los esfuerzos eléctricos, mecánicos y térmicos propios de esa condición; evitando así parar los grupos generadores para la toma de medidas de las DP's y pérdidas económicas de generación.

2. La detección a tiempo y el seguimiento de las descargas parciales (**DP's**) en el aislamiento teniendo en cuenta las tablas de criterios de evaluación de los límites permisibles de las magnitudes de los pulsos de las DP's (**C.H. SAM condición "Alto": 719 mV y C.H. RON condición "Alto": 733 mV – Anexo 5**), permiten programar mantenimientos preventivos; para ello es necesario la obtención de datos de las descargas parciales de manera periódica y con mayor frecuencia tomando como referencia las **Tablas N° 6.2 y N° 6.7**, para de este modo poder maximizar la confiabilidad de las máquinas generadoras de ELECTROPERU S.A.

3. Se ha demostrado que al evaluar el retorno de inversión al adquirir el equipo IRIS POWER PDA – IV y accesorios para el monitoreo de las descargas parciales de

las máquinas generadoras de ELECTROPERU S.A. por un costo total de **S/. 509,286.94 (Tabla N° 7.4)** respecto al contratar a una empresa de servicios para el monitoreo de las descargas parciales para todos los grupos generadores por un costo total de **S/. 378,675.00 (Tabla N° 7.7)**; se obtiene un retorno de inversión aproximadamente de **01 año y 4 meses** recuperando en poco tiempo la inversión siendo factible la adquisición del equipo.

4. Se ha demostrado que diagnosticando correctamente los monitoreos de descargas parciales con el equipo IRIS POWER PDA – IV nos representa un ahorro significativo de **S/. 39,103.32** por un mantenimiento no programado (**tiempo de reparación: 7 días – Tabla N° 7.30**), ya que se reducirían los costos por mantenimientos correctivos provocados por fallas de descargas parciales.

5. La interpretación de datos de las descargas parciales se mejora a través de la experiencia de las mismas es decir que cada vez que se monitoreé constantemente las tendencias se mejorará en la interpretación, llegando a la conclusión que al aplicar esta tecnología de IRIS POWER PDA – IV; se convierte en una herramienta de uso para mejorar el mantenimiento predictivo del estator de los generadores eléctricos.

## RECOMENDACIONES

1. Se recomienda realizar un mayor control en el monitoreo de las descargas parciales de los grupos generadores de la empresa ELECTROPERU S.A., ya que mediante el podemos determinar en qué estado se encuentra el aislamiento del estator.
2. Planificar las actividades de trabajos relacionados con las descargas parciales de acuerdo al programa de indisponibilidad de la máquina, para de este modo evitar prolongar la inoperación de la máquina e incurrir en gastos extras por tiempo de indisponibilidad.
3. El Área de Logística y Planificación, debería realizar un mayor control sobre los materiales con que cuentan las áreas de almacén general, es decir que se disponga de los repuestos y materiales críticos para fallas que se puedan producir por descargas parciales u otros motivos.
4. Se sugiere realizar una prueba de extracción de rotor del **grupo N° 7 de la C.H. SAM** y del **grupo N° 1 de la C.H. RON**, para poder observar el interior del devanado del estator en su totalidad, con la finalidad de confirmar el degradamiento del aislamiento según los resultados del monitoreo en línea de las descargas parciales hasta la actualidad.



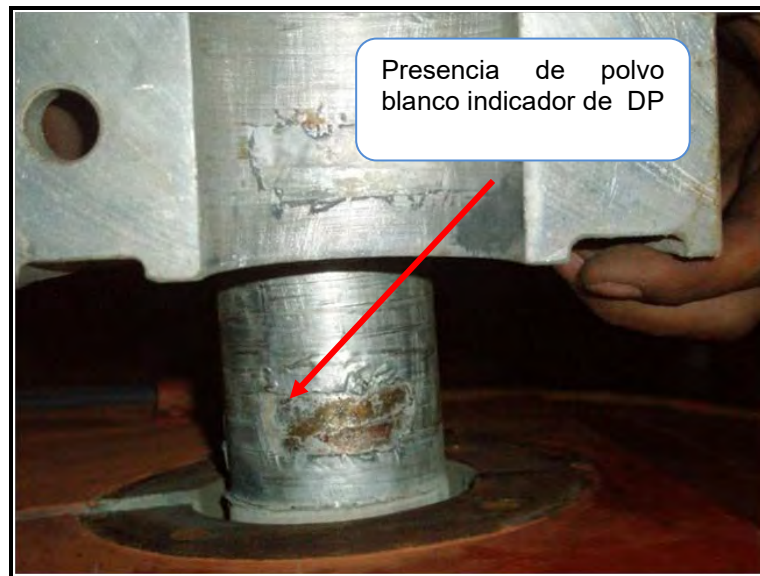
5. Para lograr mejorar los mantenimientos preventivos y/o correctivos es necesario tener como referencia los procedimientos mencionados en los **ítems 6.1.5 y 6.2.5** de manera que podamos usarlos y así poder desarrollarlos, generar planes de acción, evaluar resultados y repetir el ciclo para mejorar continuamente.

## BIBLIOGRAFÍA

- [Iris06] IRIS Power Engineering. "PD Seminar", 2006.
- [Iris04] IRIS Power Engineering. "Interpretation of PD results on line testing", 2004.
- [Iris09] IRIS Power Engineering. "Rotating Machine Conference", 2009.
- [Iris06] IRIS Power Engineering. "Installation Guide for PDA Couplers", 2006
- [Greg04] STONE, Greg C. - BOULTER, Edward A. - CULBERT, Ian - DHIRANI, Hussein. (IEEE – Power Engineering), "Electrical Insulation for Rotating Machines", 2004.
- [Cigr06] CIGRE. "Experience with Continuous On-Line Partial Discharge Monitoring of Hydro generator Stator Winding Insulation", Mexico, 2006.
- [Ieee00] IEEE 1434-2000. IEEE Use Guide to the measurement of partial discharges in rotating machinery.
- [Pere--] PEREZ, Avelino. "Curso de Generadores Hidráulicos", Perú.
- [Andr08] TABERNERO, Andrés y ROJAS, Pablo (UNITRONICS S.A.U.), "Seminario Técnico de descargas parciales en Maquinas Rotativas", 2008.
- [Tabe--] TABERNERO G, Andrés (UNITRONICS S.A.U.). "Mantenimiento Predictivo de Maquinas Rotativas de Potencia, ensayos en Campo".
- [Toro07] TORO, Juan. (FERCHALE & ASSOCIATES S.A.), "Seminario de Análisis de descargas parciales en Aislamientos Sólidos", 2007.

## ANEXOS

### ANEXOS 1: PRESENCIA DE DP EN LA BARRA 13.8 kV DE SALIDA DEL GRUPO N° 7 – C.H. SAM



**ANEXO 2: REAISLAMIENTO DE BARRAS 13.8 kV – SALIDA DEL GRUPO N° 7**

**C.H. SAM**



**ANEXO 3: PRESENCIA DE DP EN CABEZALES Y DEVANADO ESTATÓRICO  
DEL GRUPO N° 1 – C.H. RON**



**ANEXO 4: INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DE DEVANADO ESTATÓRICO DEL  
GRUPO N° 1 – C.H. RON**



## ANEXO 5: TABLAS DE CRITERIOS DE EVALUACIÓN SEGÚN BASE DE DATOS

### DP – IRIS POWER

Límites de Magnitud de Cargas (+Qm) permisibles de los grupos de la C.H. SAM

Condición	% Pruebas de los resultados	13-15 kV
Depreciable	< 25%	39
Bajo	< 50%	98
Típico	< 75%	226
Moderado	< 90%	461
Alto	< 95%	719
Promedio		312
Máximo		3680

- Carga Nominal de los grupos de la C.H. SAM: 114 MW

Límites de Magnitud de Cargas (+Qm) permisibles de los grupos de la C.H. RON

Condición	% Pruebas de los resultados	13-15 kV
Despreciable	< 25%	42
Bajo	< 50%	100
Típico	< 75%	231
Moderado	< 90%	462
Alto	< 95%	733
Promedio		320
Máximo		3710

- Carga Nominal de los grupos de la C.H. RON: 72 MW