

01170



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
FACULTAD DE INGENIERÍA**

**“IDENTIFICACIÓN DEL DETERIORO DE  
SISTEMAS AISLANTES MEDIANTE EL  
ANÁLISIS DE MEDICIONES DE  
DESCARGAS PARCIALES”**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
**MAESTRO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**  
(SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA)

**P R E S E N T A :**

OSCAR JONY GARCÍA SANTIAGO



**DIRECTOR DE TESIS:**

Ing. Rafael Guerrero Cepeda

**CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO D.F. OCTUBRE DE 2004.**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

IDENTIFICACIÓN DEL  
**DETERIORO DE SISTEMAS AISLANTES**  
MEDIANTE  
**EL ANÁLISIS DE MEDICIONES**  
DE  
**DESCARGAS PARCIALES**

Presenta:

OSCAR JONY GARCÍA SANTIAGO

En la

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Para obtener el grado de

MAESTRO EN INGENIERÍA (POTENCIA)

En la División de Estudios de Posgrado, FI.

Octubre de 2004.



# Agradecimientos



## FAMILIARES

A mis padres; Bertha Santiago Osorio y Guillermo García García...

*... A ustedes siempre, por ser a quien les debo, todo lo que soy. Los quiero mucho!!*

A mis hermanos; Sonia Evelin y Erick Iván...

*... Por aguantarme, comprenderme, ayudarme, apoyarme... siempre!!.*

A todos mis familiares...

*... Gracias por su ayuda y sus buenos deseos!!.*

## INSTITUCIONALES

A la UNAM DEP-FI...

*... por permitirme cursar estudios de posgrado.*

Al CONACyT...

*... por otorgarme una beca para créditos de maestría.*

A la DGEP, UNAM...

*... por otorgarme beca adicional para el posgrado.*

## PERSONALES

Al Dr. V. Rodolfo García Colón...

*... Sin su valioso apoyo y colaboración, no hubiera sido posible este trabajo.*

Al Dr. Rafael Guerrero Cepeda...

*... Por ser mi profesor, asesor y director de tesis.*

Al Dr. Sergio Fuentes Maya...

*... Por permitirme entrar a su excelente grupo de trabajo y brindarme su apoyo.*

Al M.I. Rafael Cristerna Ocampo...

*... Por ser mi profesor, compañero y amigo.*

Al M.I. Felipe de Jesús González Moreno...

*... Por su gran ayuda al encausarme a este trabajo de tesis.*

A mis amig@s del Posgrado de Ingeniería, del Área de Sistemas de la DEP-FI y de INELAP...

*... Por su amistad y compañerismo.*

Al Honorable cuerpo del Jurado...

*A todos ustedes; por su amistad, apoyo, sugerencias y comentarios... Muchas Gracias!!.*



# Tabla de Contenido



<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>I</b>
<b>TABLA DE CONTENIDO.....</b>	<b>II</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>VI</b>
<b>LISTA DE TABLAS.....</b>	<b>IX</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS.....</b>	<b>X</b>
<b>LISTA DE NOMENCLATURAS.....</b>	<b>XII</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>XIII</b>

<b>1 CONSIDERACIONES TEÓRICAS.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Las Descargas Parciales (DP's).....</b>	<b>2</b>
1.1.1 Antecedentes.....	2
1.1.2 Descargas Parciales, ¿Qué Son?.....	3
<b>1.2 Tipos de Descargas Parciales.....</b>	<b>4</b>
1.2.1 Descargas Corona ( <i>Corona Discharges</i> ).....	5
1.2.2 Descargas de Superficie ( <i>Surface Discharges</i> ).....	5
1.2.3 Descargas Internas ( <i>Internal Discharges</i> ).....	6
1.2.4 Arborescencias Eléctricas ( <i>Electric Trees</i> ).....	6
<b>1.3 Formación de Burbujas y Arborescencias.....</b>	<b>7</b>
<b>1.4 Degradación Producida por DP's.....</b>	<b>9</b>
<b>1.5 Reconocimiento de Descargas.....</b>	<b>10</b>
1.5.1 Factores que Afectan su Reconocimiento.....	10
1.5.2 Diagnóstico del Origen de DP's.....	13

1.5.3	Otros Métodos de Reconocimiento.....	15
<b>1.6</b>	<b>Las DP's Como Método de Diagnóstico de Equipo Eléctrico en Línea.....</b>	<b>16</b>
<b>1.7</b>	<b>Métodos de Detección de DP's.....</b>	<b>17</b>
1.7.1	Métodos de Detección Química.....	18
1.7.2	Métodos de Detección Térmica.....	18
1.7.3	Métodos de Detección Acústica.....	19
1.7.4	Métodos de Detección Eléctrica.....	19
<b>1.8</b>	<b>Método Eléctrico de Medición de DP's.....</b>	<b>20</b>
1.8.1	Técnica de Prueba.....	20
1.8.2	Método Normalizado de Medición de DP's.....	21
1.8.3	Mediciones de DP's en Banda Ultra Ancha.....	22
<b>1.9</b>	<b>Bibliografía y Referencias.....</b>	<b>23</b>

## **2 DP's APLICADAS A CABLES..... 25**

<b>2.1</b>	<b>Resumen.....</b>	<b>26</b>
<b>2.2</b>	<b>Introducción.....</b>	<b>26</b>
<b>2.3</b>	<b>Señal Generada por una DP.....</b>	<b>26</b>
<b>2.4</b>	<b>Primeros Análisis de la Forma de Onda de la DP para Evaluación de la Degradación.....</b>	<b>28</b>
<b>2.5</b>	<b>Descargas Rápidas Asociadas a Condiciones de Sobretensión.....</b>	<b>28</b>
<b>2.6</b>	<b>DP's Lentas Asociadas a la Degradación.....</b>	<b>30</b>
<b>2.7</b>	<b>Sensores de Campo Cercano para Resolución de DP's en UWB.</b>	<b>31</b>
<b>2.8</b>	<b>Experimental.....</b>	<b>34</b>

2.8.1	Localización de Descargas en Cables.....	35
2.8.2	Mediciones en Línea a Cables de Potencia.....	36
2.8.3	Detección en Línea Utilizando un Sistema UWB Comercial...	37
<b>2.9</b>	<b>Referencias y Bibliografía.....</b>	<b>38</b>

### **3 DP's APLICADAS A MOTORES..... 40**

<b>3.1</b>	<b>Resumen.....</b>	<b>41</b>
<b>3.2</b>	<b>Introducción.....</b>	<b>41</b>
<b>3.3</b>	<b>Técnica de Detección de DP's por el Método de Banda Ultra Ancha (UWB).....</b>	<b>42</b>
<b>3.4</b>	<b>Metodología para la Medición en Planta de DP's Aplicando Técnicas de UWB.....</b>	<b>43</b>
<b>3.5</b>	<b>Evaluación de Motores Operando en Planta.....</b>	<b>46</b>
3.5.1	Motores Probados.....	46
3.5.2	Calibración de los Sensores.....	47
3.5.3	Ejecución de Pruebas en Planta.....	48
3.5.4	Resultados Obtenidos.....	48
<b>3.6</b>	<b>Análisis de Resultados.....</b>	<b>50</b>
3.6.1	Motores en Condiciones de Operación.....	51
3.6.2	Motores con Descargas a la Ranura.....	51
3.6.3	Motores con Distorsión de Graduación de Campo.....	52
3.6.4	Motores con Problemas Específicos.....	53
<b>3.7</b>	<b>Referencias y Bibliografía.....</b>	<b>54</b>

**4 DP's APLICADAS A TRANSFORMADORES..... 55**

**4.1 Resumen..... 56**

**4.2 Introducción..... 56**

**4.3 Física de la Descarga..... 57**

**4.4 Experimentación..... 58**

**4.5 Resultados..... 60**

**4.6 Ubicación de la Descarga..... 61**

**4.7 Mediciones Durante la Prueba de Inducido..... 61**

**4.8 Bibliografía y Referencias..... 64**

**CONCLUSIONES..... 65**



# Lista de Figuras



<b>Figura</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pág</b>
1-1	Descargas parciales, representación y daños en aislamientos.....	3
1-2	Descargas Corona.....	5
1-3	Descargas de Superficie.....	5
1-4	Descargas de Cavidad.....	6
1-5	Arborescencias Eléctricas.....	6
1-6	Defectos típicos en los aislamientos.....	7
1-7	Arborescencia presente en un aislamiento.....	8
1-8	Aislamiento dañado en cable de potencia.....	9
1-9	Circuito equivalente de un dieléctrico con una cavidad.....	10
1-10	Representación típica del voltaje de prueba en una base de tiempo de forma elíptica.....	11
1-11	Base de tiempo de forma senoidal típica.....	11
1-12	Patrón de DP's típico (Base de tiempo de forma elíptica).....	12
1-13	Patrón de DP's típico (Base de tiempo de forma sinusoidal).....	12
1-14	Patrón de DP's típico (Con amplificador de banda angosta).....	12
1-15	Analizador de DP's (Método Químico).....	18
1-16	Analizador de DP's (Método Térmico).....	18
1-17	Analizador de DP's (Método Acústico).....	19
1-18	Analizador de DP's (Método Eléctrico).....	19
1-19	Circuito de medición de DP's de acuerdo con IEC 60270.....	21

## *Lista de Figuras (Continuación)*

<b>Figura</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pág</b>
2-1	Avalancha de electrones (desarrollo).....	27
2-2	Forma de onda de la corriente inducida por una descarga parcial rápida asociada a condiciones de sobretensión.....	29
2-3	Áreas luminosas observadas en un microscopio electrónico.....	30
2-4	Forma de onda de la corriente inducida por una descarga parcial lenta asociada a fuerte degradación.....	31
2-5	Sensor UWB para colocarse dentro de un transformador de 10 MVA.....	34
2-6	Localización de descargas parciales en un cable evaluado en laboratorio...	36
2-7	Detección y localización de una terminal dañada en un circuito evaluado en línea.....	36
2-8	Forma de onda de una descarga parcial capturada por un sistema comercial de UWB de 20 MHz.....	37
2-9	Patrón de descargas típico de un cable de aceite papel durante operación normal 75pC/div.....	38
3-1	Circuito de medición de descargas parciales en motores de alta tensión....	44
3-2	Power Diagnostix System GMB; a) ICM System; b) ICM Compact; c) Software.....	45
3-3	Mapa de descargas $N-Q-\Phi$ , de la Fase 1 del motor M- 1, 10 nC/div.....	51
3-4	Mapa de descargas $N-Q-\Phi$ , de la Fase 3 del motor M-13, 150 nC/div.....	52
3-5	Mapa de descargas $N-Q-\Phi$ , de la Fase 2 del motor M-12, 60 nC/div.....	53

## *Lista de Figuras (Continuación)*

<b>Figura</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pág</b>
4-1	Inducción de campo electromagnético en sensores de campo cercano.....	57
4-2	Ubicación de los sensores en el yugo del transformador. Vista de planta del transformador.....	59
4-3	Ubicación de los sensores en el yugo del transformador. Ubicación del sensor 2 a través del registro hombre.....	59
4-4	Respuesta de los sensores de campo cercano 1, 2 y 3 a un pulso de calibración de 100 pC aplicado en H1.....	60
4-5	Detección de corona en las boquillas de H1.....	62
4-6	Registro de 93 pC del detector convencional de DP's durante el realce del voltaje. Medición realizada en H1, a 71 kV.....	62
4-7	Registro de 93 pC del detector UWB de DP's durante el realce del voltaje. Medición realizada en sensores 1, 2 y 3 a 71 kV.....	63



# *Lista de Tablas*



<b>Tabla</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pág</b>
1-1	Sistema de diagnóstico del origen de descargas y perturbaciones.....	14
1-2	Ejemplos y medios de control de interferencias.....	16
3-1	Nivel de DP's en los motores de 13.8 kV probados.....	49
3-2	Recomendaciones del IERE para evaluar un sistema aislante de acuerdo con su nivel de DP's.....	51

# *Lista de Símbolos*

Símbolo	Descripción
DP, DP's	Descarga(s) Parcial(es)
SF <sub>6</sub>	Hexafluoruro de azufre
Vc'	Voltaje en la cavidad
Vs'	Voltaje equivalente en Cs'
Vp'	Voltaje equivalente del dieléctrico libre de cavidades
Cv'	Capacitancia equivalente de la cavidad
Cs'	Capacitancia del dieléctrico en serie con la cavidad
Cp'	Capacitancia del dieléctrico sin cavidad
Ca	Capacitor de acoplamiento
Zm	Impedancia de medición
Cp	Objeto bajo estudio (representado por una capacitancia)
Q	Factor de calidad
$\lambda$	Longitud de onda
$\nu$	Velocidad de la onda
$\epsilon_0$	Permitividad del vacío
$\mu_0$	Permeabilidad del vacío
$c$	Velocidad de la luz en el vacío
$f$	Frecuencia

## *Lista de Símbolos (Continuación)*

<b>Símbolo</b>	<b>Descripción</b>
$\epsilon_r$	Permitividad relativa del aislamiento
$\mu_r$	Permeabilidad relativa del aislamiento
$\tau$	Frente de la descarga parcial
$D_{sensor}$	Diámetro del sensor
pC	Pico Coulombs
nC	Nano Coulombs
$N$	Tasa de repetición de pulsos
$Q$	Carga aparente
$\phi$	Ángulo de fase
$N-Q-\phi$	Diagramas de DP's con carga aparente, fase y repetición de éstas.
HP	Caballos de potencia
MHz	Mega hertz
GHz	Giga hertz
MVA	Mega volts-amperes
kV	Kilo volts
$\mu\text{m}$	Micro metros
m	metro
M-1	Motores bajo prueba
⋮	
M-16	

# *Listado de Nomenclaturas*

<b>Siglas</b>	<b>Descripción</b>
IEC	International Electrotechnical Commission
IERE	International Electrical Research Exchange
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IIE	Instituto de Investigaciones Eléctricas
CIGRÉ	Conseil International des Grands Réseaux Électriques
PEMEX	Petróleos Mexicanos
CPG	Centro Procesador de Gas (PEMEX)
MACQ	Software de adquisición para DP's
ICM Compaq	Unidad de adquisición y procesamiento de señales
ICM System	Unidad de adquisición y procesamiento de señales
CT100	Sensor de alta frecuencia
UWB	Banda Ultra Ancha
XLPE	Cross linked Polyethylene
TEM	Onda Electromagnética Transversal

# Introducción

## Contexto

**E**n la industria eléctrica y sobre todo en los grandes centros industriales, la operación confiable del equipo de potencia es fundamental para el buen funcionamiento del sistema. La falla en alguno de los equipos tiene altas repercusiones económicas por el tiempo que involucra la reparación o en el peor de los casos, el reemplazo total de la máquina dañada, aunado a los costos generados por la interrupción en el suministro de la energía eléctrica.

La vida útil de los aislamientos se ve afectada por las condiciones a las cuales los equipos se encuentran sometidos y depende de la magnitud de los esfuerzos térmicos, mecánicos, ambientales y eléctricos presentes. El deterioro en los aislamientos es el principal problema en el equipo de potencia.

Fallas en los aislamientos de los equipos, pueden causar suspensiones imprevistas, repercutiendo directamente en la confiabilidad del sistema eléctrico al cual se encuentran conectados. Además se origina un costo muy alto por concepto de mantenimiento, reparación o por las acciones correctivas a seguir para restablecer el sistema lo más pronto posible.

En casos extremos, fallas en el aislamiento pueden ser incluso un peligro para el equipo humano que esté laborando en la planta.

## Antecedentes

La degradación de los aislamientos siempre ha sido un problema presente en todo sistema eléctrico. El predecir cuando va a fallar, es casi imposible debido a que no se tiene forma de evaluarlo. A partir de la década de los 70's y más fuertemente en los 80's, se empezó a desarrollar investigación a nivel mundial, orientada al uso de las descargas parciales como elemento que permitiera el diagnóstico de los aislamientos.

Hoy en día, existen técnicas o métodos experimentales que intentan resolver el problema largamente planteado. Por lo que es fácil suponer que actualmente no existen normas, reglamentos o información suficiente al respecto, habiendo sólo algunas recomendaciones de organismos que en base a la experiencia de sus colaboradores, han emitido ciertos criterios de clasificación intentando estandarizar parámetros y características de las descargas parciales.

Actualmente se ha encontrado que la detección de descargas parciales es importante al aportar información valiosa para la evaluación y reconocimiento de defectos en la construcción de los aislamientos.

Es evidente la tendencia que apunta a la automatización en la detección y reconocimiento mediante cables, transformadores y otros dispositivos aislados. Una de las indudables ventajas de un sistema asistido por computadora es la habilidad de procesar un gran conjunto de información y transformarla en una salida entendible.

La ventaja que ofrecen estos métodos asistidos por computadora, es que la evaluación o el diagnóstico del equipo se puede realizar sin interrupción del proceso en el cual esté involucrado.

Actualmente, esta tecnología sigue aún en desarrollo a nivel mundial. De tal manera que el principal obstáculo que se presenta es la falta de información, normas, procedimientos y técnicas. Por consiguiente, todo lo que se hace al

respecto, es prácticamente experimental. Así, este trabajo, hace uso de los documentos y artículos más recientes, publicados y presentados en las ponencias nacionales y mundiales de las asociaciones más importantes referentes a Sistemas Eléctricos de Potencia y, en particular, del estudio de las descargas parciales.

## Formulación del Problema

La calidad de la energía (comúnmente llamada como *Power Quality*) en todo complejo o sistema eléctrico, es determinante para el desarrollo económico y tecnológico de una región o país. Hoy en día se realizan grandes inversiones en la búsqueda de nuevos desarrollos tecnológicos que contribuyan a la eficiencia del suministro de la energía eléctrica en beneficio del proveedor del servicio y principalmente del usuario final.

A pesar del gran progreso que se ha experimentado en este rubro, hasta nuestros días, los sistemas eléctricos de distribución siguen siendo susceptibles a interrupciones de servicio. En la mayoría de los casos, estos problemas tienen como origen la degradación progresiva de los sistemas aislantes de los equipos de potencia. Desafortunadamente a estos elementos no se les da la debida atención porque tienen un bajo costo en comparación con el equipo principal y a que las operaciones de diagnóstico y mantenimiento son muy costosas.

La importancia hoy en día del estudio de las Descargas Parciales como método para el diagnóstico de equipo de potencia, radica principalmente en la facilidad de realizar mediciones y monitoreo *en línea* (con el equipo operando), para de esta manera y con base en los resultados obtenidos, emitir un juicio del estado de los aislamientos de dicho equipo.

## Aportaciones

**E**n este trabajo de tesis se conjunta y sintetiza información actualmente disponible referente al uso de mediciones de descargas parciales como método de diagnóstico de los sistemas aislantes en cables, motores y transformadores.

Se presenta la técnica de banda ultra ancha para diagnosticar el estado de los aislamientos en tres de los principales componentes de un sistema de potencia: cables, motores y transformadores. Se presenta la teoría y su aplicación dando un ejemplo para cada uno de los casos abordados.

Dicha técnica, tiene como aportación principal, el que permite realizar el diagnóstico con el equipo *en línea*, esto es, con el equipo operando. No existe la necesidad de sacar de operación el equipo, toda vez que se efectúa el diagnóstico usando el cable de tierra de los equipos como medio para la inyección del pulso de descarga parcial. De esta manera, se evita estar en contacto con partes vivas evitando los riesgos que esto implica.

Este trabajo de investigación pretende dar a conocer las bases en el estudio de las descargas parciales (hasta ahora prácticamente desconocidas) como un método de diagnóstico del estado de los sistemas aislantes. Esto con el fin de que sirva como punto de partida para futuros trabajos que profundicen en el análisis y desarrollo de nuevas herramientas y métodos que busquen solucionar el problema del diagnóstico en línea de los sistemas aislantes en el equipo de potencia, cada vez de manera más eficiente.

## Organización de la Tesis

**E**n el primer capítulo se presenta la introducción al problema de investigación que aborda este trabajo de tesis, así como la justificación y el objetivo principal.

En el segundo capítulo se exponen algunos conceptos teóricos y definiciones básicas que ayudan a entender mejor los términos aquí empleados, así como una breve descripción sobre el origen y causas de las descargas parciales.

El tercer capítulo aborda la técnica de detección y localización de descargas parciales aplicada a cables de potencia. Además, se presenta una breve explicación sobre el papel de las descargas parciales en el proceso de falla en este tipo de cables, las dificultades para realizar la medición de descargas por métodos tradicionales y las ventajas del uso de técnicas de banda ultra ancha para cables diagnosticados durante su operación normal.

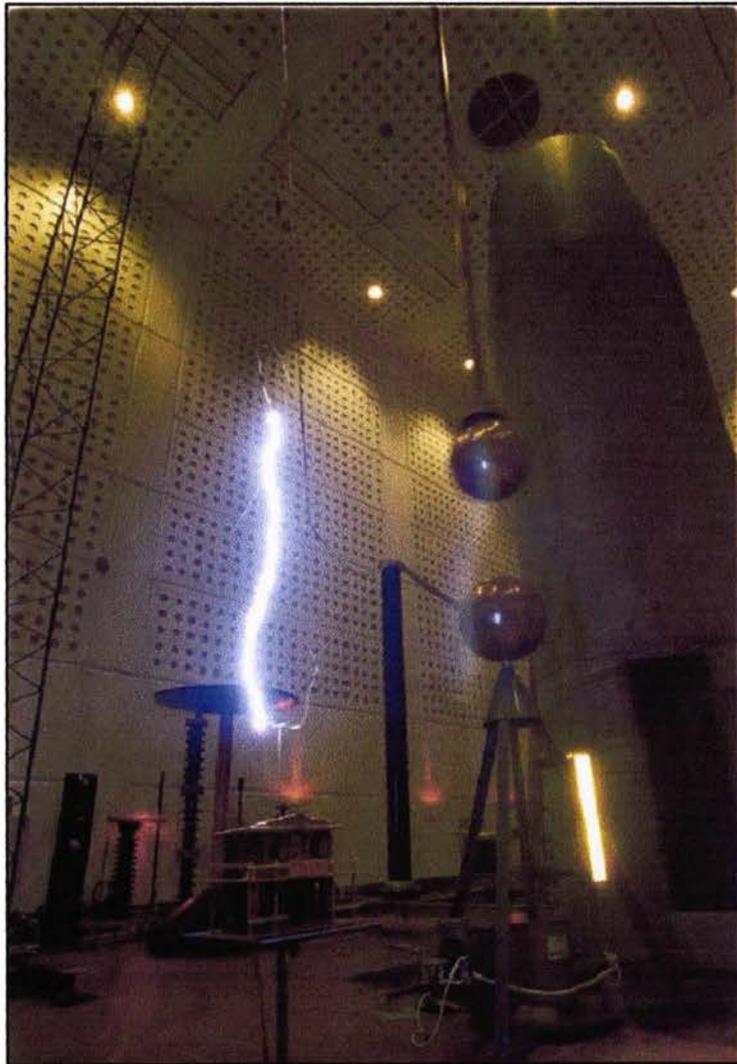
En el cuarto capítulo se presenta un método para efectuar el diagnóstico de motores de gran capacidad en operación mediante la medición de descargas parciales. Aquí se utiliza, de igual manera, la técnica de medición en banda ultra ancha con la finalidad de reducir al mínimo el problema de interferencia electromagnética durante las mediciones en planta.

El quinto capítulo presenta el desarrollo y utilización de un sistema de detección de descargas parciales que utiliza técnicas de medición de banda ultra ancha, y sensores de campo cercano instalados en el yugo del núcleo de un transformador de potencia para su diagnóstico.

Finalmente se presentan las conclusiones obtenidas de los resultados del diagnóstico a los equipos de potencia en cada uno de los casos estudiados.

# CAPÍTULO 1

## CONSIDERACIONES TEÓRICAS



## 1.1 LAS DESCARGAS PARCIALES (DP's)

### 1.1.1 Antecedentes

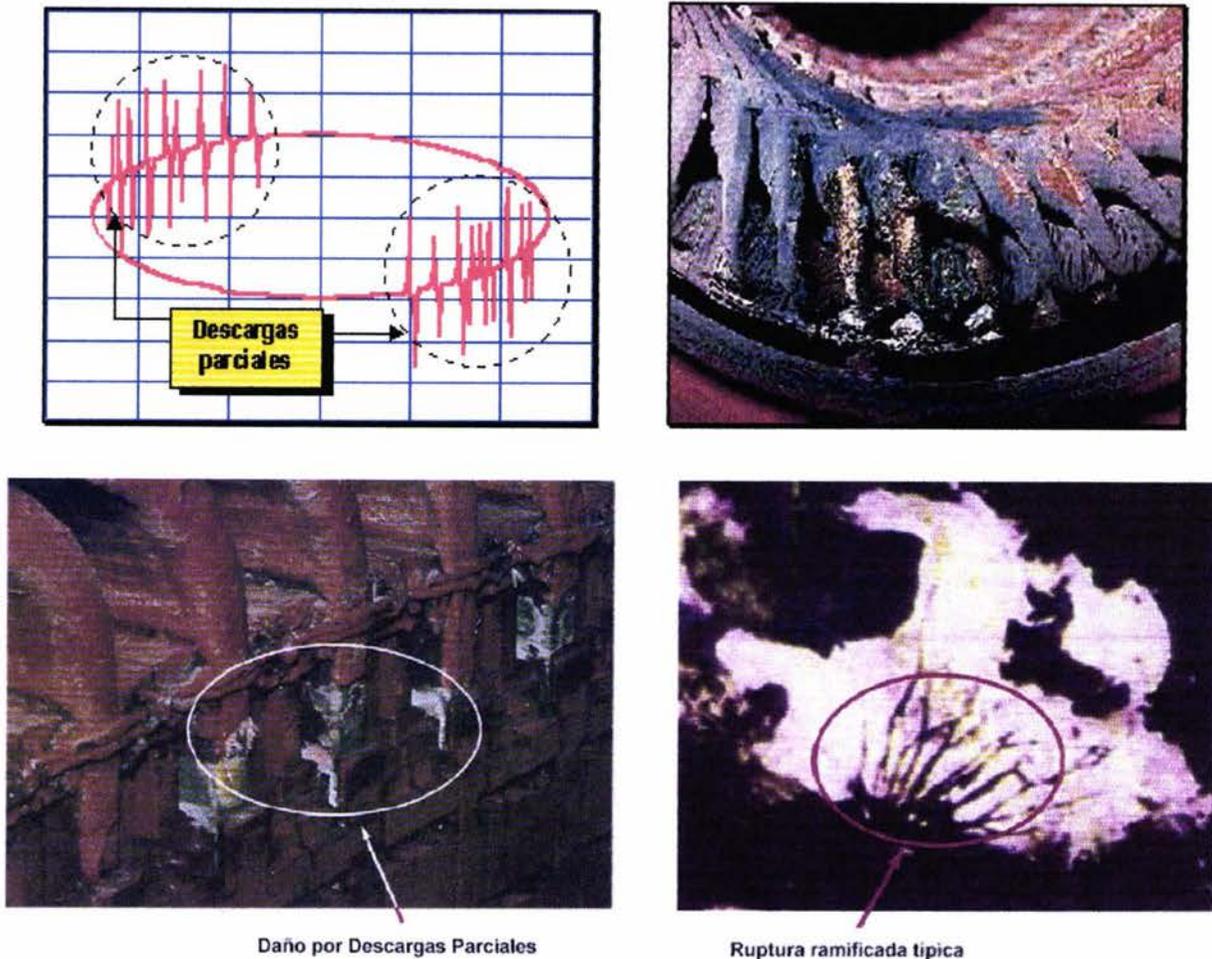
El deterioro en los sistemas aislantes ha estado presente desde siempre. Se tuvo noción de la seriedad del problema hasta el uso de los equipos de potencia masivamente. En los inicios de la explosión industrial, no se le dio la debida importancia debido a las limitantes de la época y porque no se consideraba crucial este hecho.

Al paso del tiempo y con la experiencia ganada, los investigadores de aquellas épocas preocupados por la seriedad y magnitud del problema, sentían la urgente necesidad del diagnóstico del deterioro de los aislamientos para conocer el estado en que se encontraban y así evitar problemas mayores.

El estudio de las descargas parciales (DP's) es realmente nuevo. Es hasta finales de los 60's, albores de los años 70's y principalmente en los 80's, en que se da un auge en cuanto a su aplicación. Organismos Internacionales como el IEEE, IERE, IEC, CIGRÉ, entre otros, y el IIE aquí en México se abocaron a su investigación, desarrollo y aplicación. Se intentó estandarizar, crear normas, métodos y reglas para su uso como método de reconocimiento del deterioro de sistemas aislantes. Sin embargo, debido al desconocimiento real del fenómeno y principalmente al limitado desarrollo tecnológico con que se contaba, rápidamente quedó obsoleto todo aquello establecido previamente. Esto como consecuencia de las nuevas generaciones de tecnología que permitían cada vez un estudio más detallado. Aún hoy en día, no se cuenta con normas, códigos o reglas para el reconocimiento de patrones de descargas parciales, de tal manera que solo existen algunas recomendaciones de organismos internacionales que ha emitido criterios de clasificación en base a la experiencia de sus asociados.

Actualmente, el crecimiento de los centros urbanos así como el incremento de la actividad industrial, ha derivado en un notable aumento de la demanda eléctrica, por lo cual ha obligado a las empresas generadoras a aumentar sus centros productores de electricidad. Sin embargo cada vez es más palpable la necesidad de un suministro cada vez más confiable. Los equipos hoy en día son muy sensibles a variaciones en el suministro de energía. Incluso una interrupción de unos cuantos ciclos en el suministro, puede ser de muy serias consecuencias para un sistema eléctrico. De aquí la importancia de contar con un sistema lo mas confiable posible con un suministro de la mejor calidad, llamado comúnmente como *calidad de la energía* ó *Power Quality*.

### 1.1.2 Descargas Parciales, ¿Qué Son?



**Fig. 1-1.** Descargas Parciales, representación y daños en aislamientos.

Las descargas parciales (DP's) se definen como aquellas descargas eléctricas que cortocircuitan parcialmente el material aislante entre conductores. El resto del material que no ha sufrido la extensión de la descarga, es capaz de desarrollar su función dieléctrica sin que se produzca la perforación del aislante.

Dicho de otra manera, las descargas parciales son *chisporroteos* debido al flujo de electrones cuando un volumen pequeño de gas se rompe dieléctricamente. Esto ocurre en espacios dentro del mismo aislamiento eléctrico. Se usa el término *parcial* ya que existe un aislamiento sólido (como mica epóxica) en serie con la parte con defecto, que evita una ruptura completa.

El tiempo transcurrido entre la aparición de las descargas parciales y la perforación del dieléctrico varía entre unos cuantos minutos hasta varios años, y depende de la severidad de la solidificación del sistema aislante y del material que lo constituye.

El proceso de formación de una descarga parcial es relativamente simple. Cuando la tensión aplicada en una zona defectuosa del aislante alcanza la tensión de ruptura ocurre la descarga. En ese instante la tensión cae en la zona de falla hasta que la descarga desaparece al alcanzar la tensión de extinción. Todo el proceso tiene lugar de forma muy rápida, por lo que la duración total de la descarga es del orden de microsegundos.

Una vez finalizada la descarga, la tensión inducida en la zona del defecto tiende de nuevo a crecer, siguiendo la evolución de la tensión de alimentación aplicada al sistema aislante. Así se puede volver a alcanzar la tensión de ruptura, con lo que tendrá lugar una nueva descarga.

Las DP's son el resultado de la ionización transitoria del gas en un sistema aislante cuando el voltaje aplicado excede un valor crítico. Este proceso de ionización se considera localizado en sólo una porción de la distancia entre los electrodos del sistema.

Las DP's pueden ocurrir en la interfase de dos dieléctricos donde existan huecos que originen la concentración del campo eléctrico al que se someten. También pueden ocurrir entre una punta y un plano a lo largo de una superficie aislante. Es necesario remarcar, que para la ocurrencia de descargas parciales, no se requiere que los electrodos entre las cuales éstas se presenten sean metálicos y tampoco que tengan una geometría definida<sup>1</sup>.

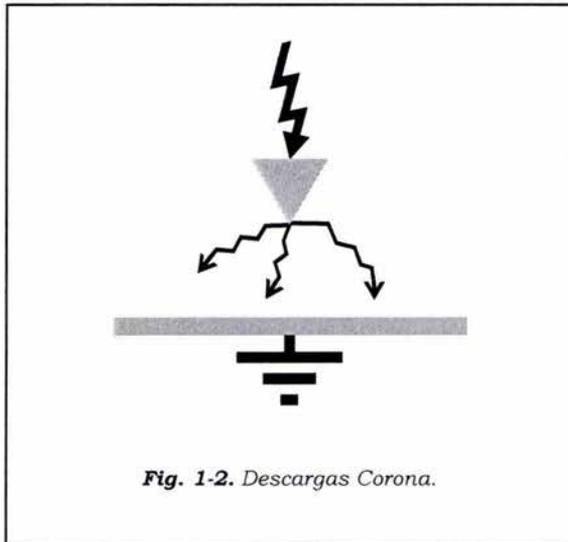
## 1.2 TIPOS DE DESCARGAS PARCIALES

Las DP's se pueden clasificar en cuatro tipos<sup>2</sup>:

- Descargas Corona.
- Descargas de Superficie.
- Descargas Internas.
- Arborescencias Eléctricas.

A continuación se describe brevemente cada una de ellas.

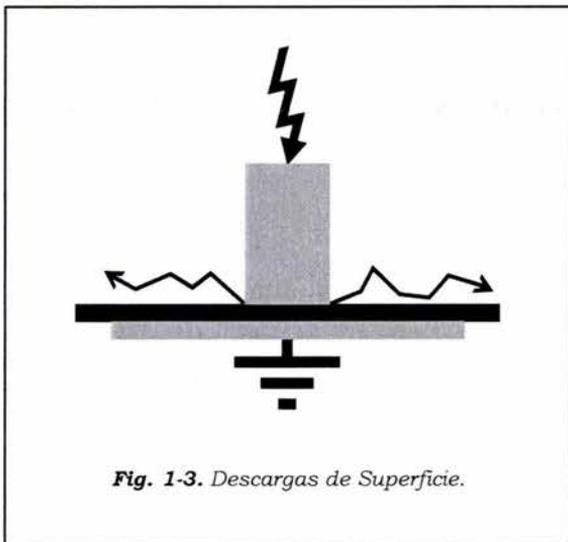
### 1.2.1 Descargas Corona (*Corona Discharges*)



Estas descargas dependen principalmente de las condiciones ambientales como temperatura, humedad, etc. Ocurren en un punto sobresaliente de los electrodos cuando éstos se encuentran inmersos en gases o líquidos. En aire, estas descargas no son peligrosas, a menos que la descomposición en productos como el Ozono o Nitritos, dañe la cubierta del dieléctrico.

Las descargas corona en gas hexafluoruro de azufre ( $\text{SF}_6$ ) son peligrosas debido a la agresividad y toxicidad en la descomposición de los productos del  $\text{SF}_6$ , siendo éstos muy dañinos para la superficie del dieléctrico.

### 1.2.2 Descargas de Superficie (*Surface Discharges*).



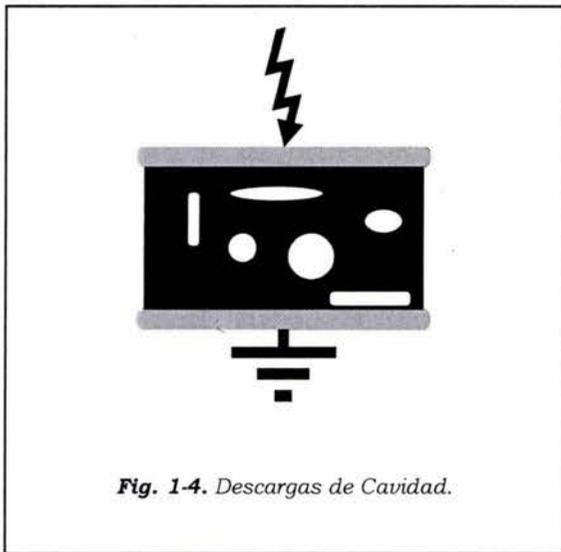
Estas descargas suceden por contacto entre dos materiales aislantes (aire-sólido). Pueden ocurrir en gases o aceite si existe un *estrés*\* muy fuerte paralelo a la superficie del dieléctrico.

Estas descargas son conocidas porque causan deterioro del aislamiento por calentamiento en la cubierta del dieléctrico, mediante cargas atrapadas en la superficie y a través de la formación de productos químicos como el ácido nítrico y el ozono.

Esto puede causar depolimeración, *estrés* de ruptura, volatización (*gassing*), etc. Dando como resultado la erosión de la superficie del dieléctrico.

\* Esfuerzo al que se somete el aislamiento.

### 1.2.3 Descargas Internas (*Internal Discharges*)



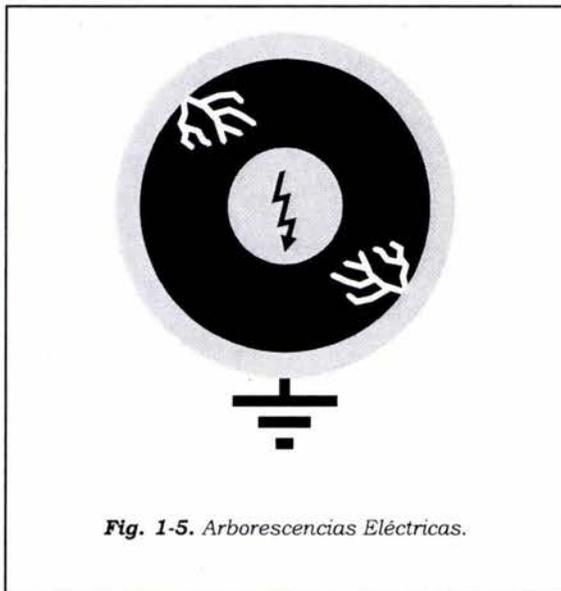
Estas descargas ocurren en cavidades o inclusiones de aire, u otros gases en el interior del aislamiento sólido, ocasionadas por el proceso de extrusión o vaciado.

Las descargas internas son capaces de degradar el aislamiento dependiendo de la *resistencia*<sup>†</sup> del campo, el tipo de material y la magnitud de la descarga.

La degradación inicia con la erosión del material en el interior de la cavidad. La formación de esta cavidad (o hueco), la

concentración del campo y la formación del árbol pueden conducir finalmente a la falla del dieléctrico.

### 1.2.4 Arborescencias Eléctricas (*Electric Trees*)



Este tipo de descargas pueden originarse de partículas conductoras o a partir de una cavidad en un aislamiento sólido.

La aparición y desarrollo de una arborescencia eléctrica es relativamente simple, pues una vez que se ha empezado a formar aparece un hueco (cavidad) y se generan varias ramificaciones. El tiempo que toma desde su inicio hasta la manifestación del árbol, depende del voltaje aplicado y puede tomar horas, semanas o incluso años.

<sup>†</sup> No se refiere a resistencia eléctrica, sino a la capacidad del aislamiento para soportar un esfuerzo (de cualquier índole).

### 1.3 FORMACIÓN DE BURBUJAS Y ARBORESCENCIAS

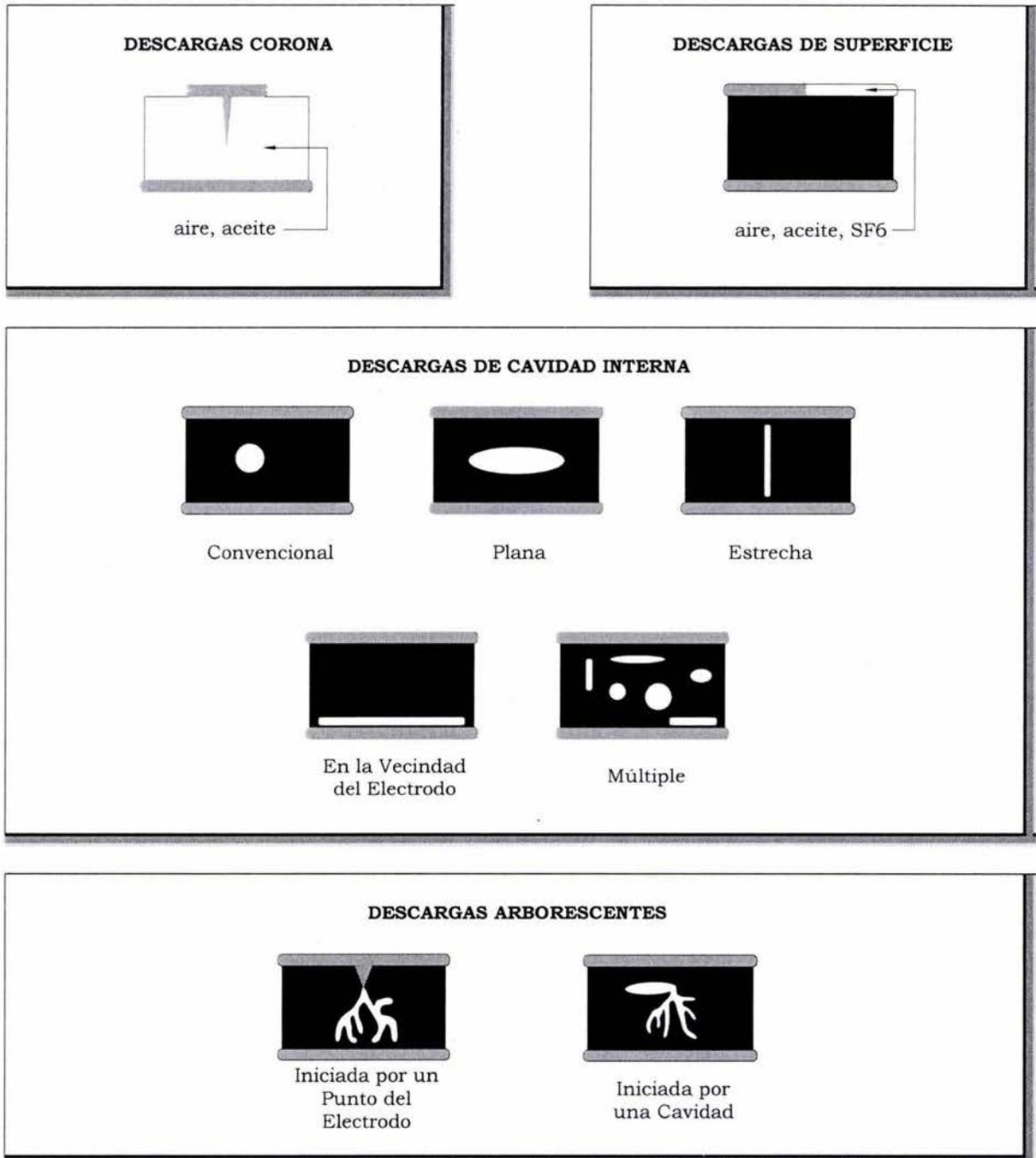


Fig. 1-6. Defectos típicos en los aislamientos.

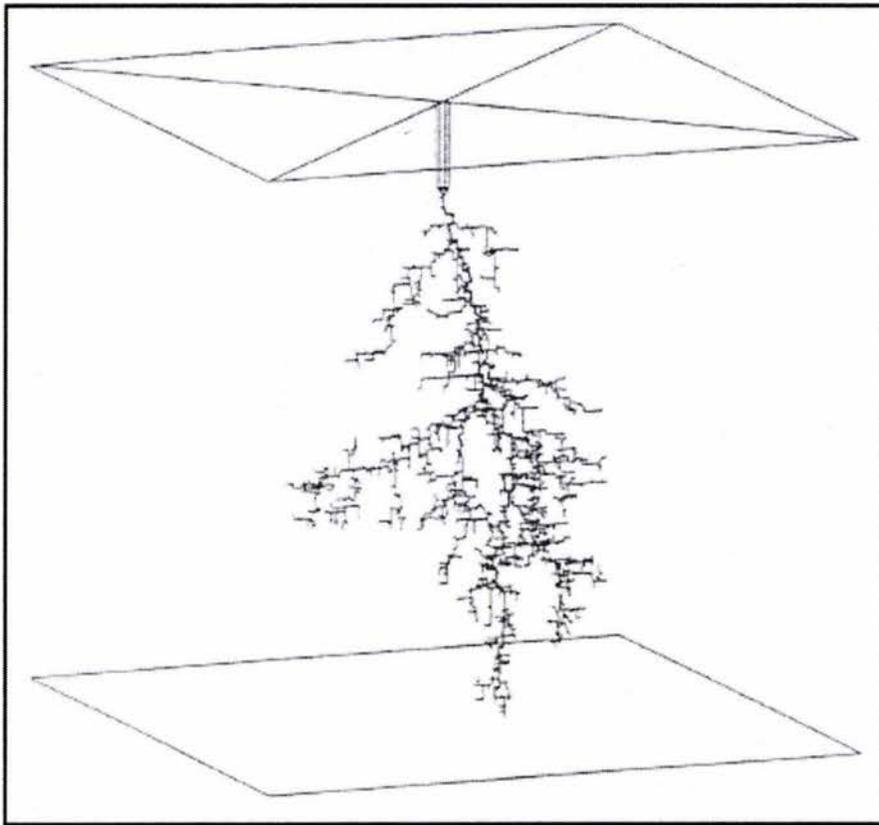
En el proceso de extrusión o moldeo de los polímeros utilizados como aislamientos en los sistemas eléctricos, no siempre es posible evitar la presencia de burbujas (cavidades) o discontinuidades causadas por diversos factores que son difícilmente controlables. Estos defectos pueden provocar la concentración del

campo eléctrico y con ello la aparición de descargas parciales que causen la degradación del aislamiento.

En la Fig. 1-6 se muestran los defectos típicos en los aislamientos de un dieléctrico. En la Fig. 1-7 se muestra una arborescencia típica en un aislamiento.

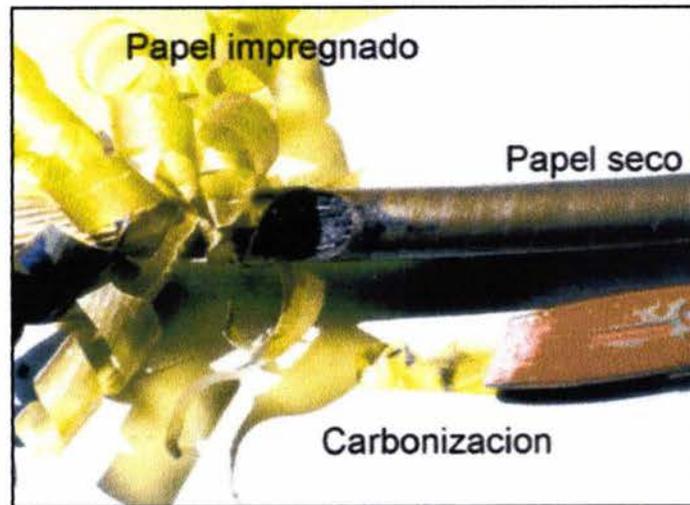
Entre los principales causantes de la formación de cavidades o imperfecciones que causan distorsión del campo, se encuentra invariablemente la presencia de los siguientes factores:

- a) Contaminación en la materia prima.
- b) Un fundido insuficiente del polímero al momento de la extrusión como en el caso del polietileno.
- c) Inclusión de gas en el momento de vaciado de resinas y otros aislamientos.
- d) Absorción de humedad o vapor durante el enfriamiento.
- e) Inclusión de contaminantes provenientes de las máquinas involucradas en el proceso de elaboración, como partículas de metal erosionado.
- f) Polvos del medio industrial donde se elaboran los aislamientos, etc.



**Fig. 1-7.** Arborescencia presente en un aislamiento.

Además, las cavidades pueden ser originadas debido a esfuerzos de flexión, como los que resultan del transporte e instalación. Un ejemplo claro son los cables de polietileno, en los cuales la formación de cavidades es factible, si existe una pobre adherencia entre el aislamiento y la pantalla semiconductora o cuando la deformación sufrida por el aislante sobrepasa su límite elástico. También existe la inclusión de gas o la formación de burbujas cuando el equipo se encuentra sometido a ciclos térmicos y los diferentes componentes no tienen los mismos coeficientes de expansión térmica.

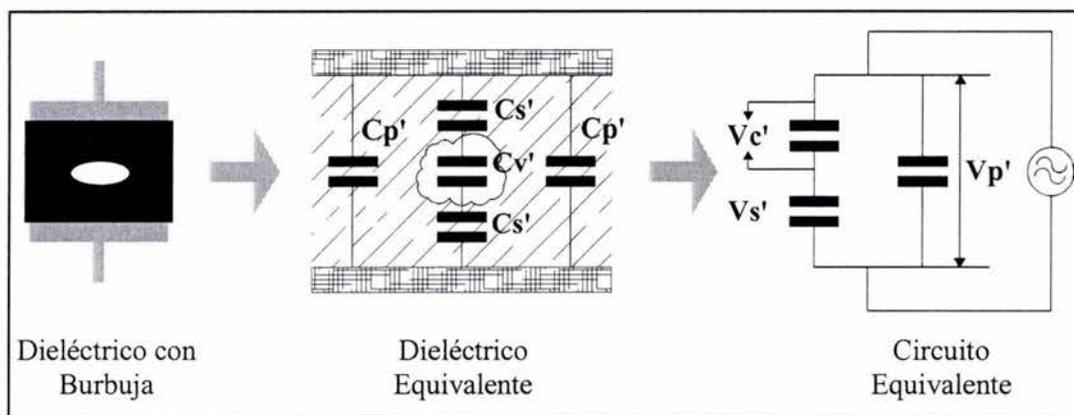


**Fig. 1-8.** Aislamiento dañado en cable de potencia.

#### 1.4 DEGRADACIÓN PRODUCIDA POR DP's

Tanto las descargas internas como las externas son responsables directas de la degradación progresiva de los materiales dieléctricos empleados como aislantes en componentes de equipos de alta tensión. Estos procesos conducen a una degradación progresiva del material. Si la actividad de descargas perdura en el tiempo, la evolución más o menos rápida del deterioro depende de la naturaleza del material, geometría, localización y tipo de defecto, así como de la intensidad, tasa de repetición y clase de descarga.

Para el análisis del comportamiento de las DP's, el circuito equivalente generalmente adoptado de una cavidad dentro de un aislamiento es el que se muestra en la Fig. 1.9.



**Fig. 1-9.** Circuito equivalente de un dieléctrico con una cavidad.

Donde:

$V_c'$  = Voltaje en la cavidad.

$V_s'$  = Voltaje equivalente en  $C_s'$ .

$V_p'$  = Voltaje equivalente del dieléctrico libre de cavidades.

$C_v'$  = Capacitancia equivalente de la cavidad.

$C_s'$  = Capacitancia del dieléctrico en serie con la cavidad.

$C_p'$  = Capacitancia del dieléctrico sin cavidad.

Y debe notarse que en cavidades reales  $C_p' \gg C_v' \gg C_s'$ .

## 1.5 RECONOCIMIENTO DE DESCARGAS

### 1.5.1 Factores que Afectan su Reconocimiento

A continuación se presentan algunos mapas característicos de DP's y su posible causa u origen<sup>3</sup>. Los mapas mostrados son válidos únicamente para pruebas con corriente alterna.

Al realizar pruebas para detectar el nivel de DP's es conveniente usar un instrumento con tubo de rayos catódicos, con el cual la respuesta de DP's se puede observar individualmente.

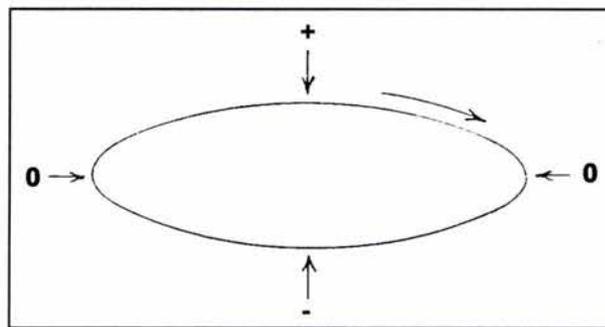
Si tenemos los resultados de esta forma se facilita la recolección de información valiosa referente a la naturaleza de la DP bajo observación, y hace posible la discriminación entre respuestas de descargas reales y respuestas a disturbios. Cabe

mencionar que la interpretación correcta de DP's depende de la experiencia del observador.

### **Patrones de DP's:**

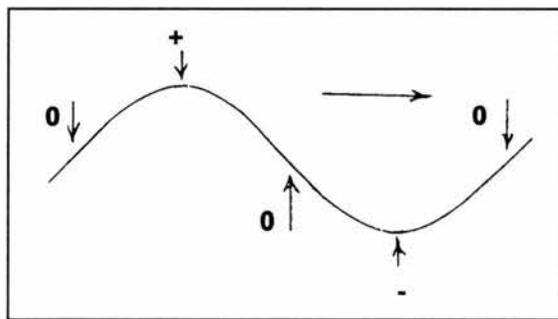
La forma tradicional de representar los patrones de DP's es mediante un diagrama en forma elíptica<sup>4</sup>. El tiempo se toma como base y a partir de éste se traza en sentido horario el comportamiento del voltaje de prueba de la DP.

La posición de los picos de voltaje, ceros y rotación del tiempo base son indicados en la Fig. 1-10.



**Fig. 1-10.** Representación típica del voltaje de prueba en una base de tiempo de forma elíptica.

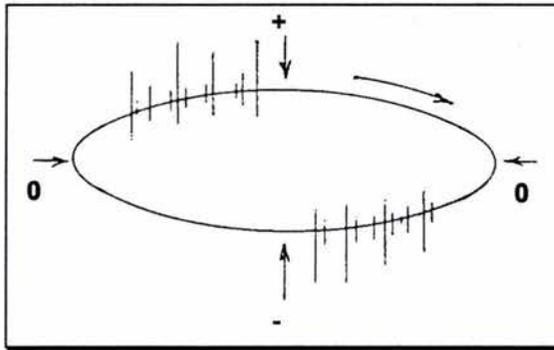
Si los patrones de DP's son superpuestos en una base de tiempo de forma senoidal, la posición de los picos de voltaje, ceros y dirección de trazado será como el que indica la Fig. 1-11.



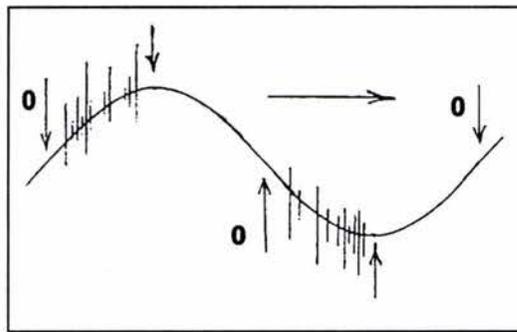
**Fig. 1-11.** Base de tiempo de forma senoidal típica.

A continuación se muestra la respuesta obtenida (para un patrón de descarga típico) de un detector de DP's de banda ancha (*tema 1.8.2*) el cual despliega los

resultados en una base de tiempo de forma elíptica (Fig. 1-12) y de forma senoidal (Fig. 1-13).

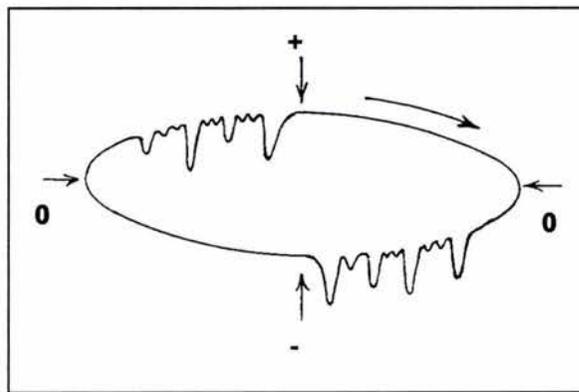


**Fig. 1-12.** Patrón de DP's típico (Base de tiempo de forma elíptica).



**Fig. 1-13.** Patrón de DP's típico (Base de tiempo de forma sinusoidal)

Si se utiliza un amplificador de banda angosta (tema 1.8.2), la respuesta obtenida puede ser diferente en apariencia, como lo muestra la Fig. 1-14.



**Fig. 1-14.** Patrón de DP's típico (Con amplificador de banda angosta).

### **Efectos del Voltaje y Tiempo:**

La magnitud de la respuesta de DP's puede variar con el voltaje de prueba y con el tiempo. Esto afecta a todos los tipos de descargas y disturbios, corroborándose con los diagramas formalizados y por los resultados de experimentos típicos, por lo cual debe ponerse especial cuidado con esta particularidad.

#### **1.5.2 Diagnóstico del Origen de DP's**

Generalmente al hacer el análisis de una DP y al obtener su resultado, no es posible reconocer la causa que la originó por simple observación de la pantalla mostrada en un osciloscopio. La probabilidad de llegar a un diagnóstico correcto se incrementa significativamente cuando se toman en cuenta todas las características de las descargas, como puede ser su duración, magnitud, frente de onda, etc.

Durante el diagnóstico debemos considerar primero el patrón de la descarga, esto para ver si se comporta de alguna manera similar a otro caso ya estudiado anteriormente, con el propósito de obtener la mayor información posible. Posteriormente, se recomienda que se ponga atención a los efectos del voltaje de prueba y tiempo, por último se deben considerar otras características perceptibles.

Un sistema de diagnóstico basado en estos planteamientos se muestra en la Tabla 1-1<sup>3</sup>.

Descargas

Patrón de descargas			Variación de la magnitud de descarga de acuerdo a:		Caso
Localización de la descarga en la forma de onda	Variación de la respuesta	Magnitud relativa de la descarga en el medio ciclo + ó -	Voltaje de prueba	Tiempo de aplicación	
Más pulsos en adelante a los picos de voltaje	Movimiento aleatorio	Magnitud similar en ambos medios ciclos	Constante con el voltaje de prueba	Constante con el tiempo	A
				Caidas lentas con el tiempo	B
		Incremento con el voltaje de prueba	Constante con el tiempo	C	
			Caidas lentas con el tiempo	D	
	Incrementos lentos con el tiempo	Incrementos rápidos con el tiempo	E		
		F			
Movimiento constante ó repetido.	Magnitud diferente en dos medios ciclos.	Constante con el voltaje de prueba	Constante con el tiempo	G	
		Incremento con el voltaje de prueba	Constante con el tiempo	H	
En ambos lados de los picos de voltaje.	Estacionario	Sólo en uno de los medios ciclos.	Constante con el voltaje de prueba	Constante con el tiempo	K
	Constante.	Magnitud diferente en dos medios ciclos.	Constante con el voltaje de prueba en uno de los medios ciclos. Incrementos en el otro.	Constante con el tiempo	M
En ambos lados de los cruces por cero.	Movimiento aleatorio	Magnitud similar en los cruces por cero.	Incremento con el voltaje de prueba	Constante con el tiempo	N

Perturbaciones

Grupos de oscilación.	Incremento con el voltaje de prueba	Constante con el tiempo	Q
Interferencia..	Sin relación con el voltaje de prueba		R
Oscilación continua.	Sin relación con el voltaje de prueba		S

Tabla 1-1. Sistema de diagnóstico del origen de descargas y perturbaciones.

### 1.5.3 Otros Métodos de Reconocimiento

En general, el origen de una descarga puede ser identificado por su patrón y las variaciones de voltaje y tiempo. Sin embargo, las propiedades de muchas descargas dependen de la temperatura y presión; de aquí que la observación de los efectos de la temperatura y presión se pueden usar como un medio de diagnóstico (*tema 1.7*). Un incremento en la temperatura aumenta los voltajes de inicio y extinción de DP's y puede eliminar las descargas por completo. Lo anterior puede no tener efecto en cavidades encerradas, y puede ser usado para distinguir entre descargas internas o superficiales.

Algunas veces, las propiedades de las DP's en los aislamientos cambian sustancialmente inmediatamente después del período de fabricación del material.

Las descargas en cavidades de aislamientos poliméricos, fabricados bajo presión, pueden incrementarse con severidad en un período de varios días, después de perder presión en las cavidades.

Cuando el aislamiento contiene humedad se observa un comportamiento más complejo en el período posterior a la fabricación, y subsecuentemente en cualquier ciclo de prueba de temperatura, dado el movimiento de la humedad entre el dieléctrico sólido y la cavidad. También es posible observarlo por otros medios, tales como fotografía o ultrasonido. Se pueden usar cambios de conexión del circuito de prueba ó transferencia de electrodos de prueba para localizar el sitio de la descarga.

En la siguiente tabla, se muestran ejemplos y medios de control de interferencias, que pueden ayudar a entender y depurar el reconocimiento de las DP's.

	Perturbación	Control
Recolección.	Interferencia de la fuente	Filtros en los cables de la fuente y/o en la línea de alta tensión. Detector con arreglo balanceado.
	Otras pruebas de alta tensión.	Apantallamiento. Eliminación de causa.
	Ondas electromagnéticas. Señales de radio.	Apantallamiento. Para señales de radio, un detector con frecuencia abajo de 100 kHz puede ser elegido. Compensación. Filtros en el detector.
	Descargas inducidas.	Eliminación de causa. Apantallamiento.
Descargas en el circuito de prueba	Fuente de alta tensión.	Transformador de alta tensión libre de DP. Filtro en la línea de alta tensión. Detector con arreglo balanceado.
	Línea de alta tensión.	Línea de alta tensión libre de DP. Filtro al final de la línea de alta tensión. Detector con arreglo balanceado.
	Capacitor de acoplamiento.	El capacitor de acoplamiento debe estar libre de DP, o dos muestras pueden ser medidas al mismo tiempo.
	Terminales. Descargas en terminales de cables, boquillas, etc.	Terminales, boquillas, etc., deben estar libres de DP. Detector con arreglo balanceado.
Ruido por contacto	Ruido por contacto en el circuito de prueba.	Buenas conexiones y aterrizamiento, también en los componentes del circuito de entrada.
	Contacto entre foils y terminales de capacitores.	Aplicar un impulso de corriente directa para cargar y después descargar.
	Ruido por contacto en boquillas, cambiador de derivaciones, o aterrizamiento del núcleo.	Checar contactos antes de la prueba.
	Contacto entre capas semiconductoras y funda metálica de cables.	Elegir constantes de tiempo cortas (iguales a la mayor resolución) del circuito de entrada.

**Tabla 1-2.** Ejemplos y medios de control de interferencias.

## 1.6 LAS DP's COMO MÉTODO DE DIAGNÓSTICO DE EQUIPO ELÉCTRICO EN LÍNEA

Las técnicas de detección de DP's permiten identificar la existencia de fallas en estado inicial dentro de los equipos de potencia. Los resultados son exitosos cuando se realizan bajo condiciones de interferencia controlada como en un laboratorio. Técnicas novedosas de banda ultra ancha (*tema 1.8.3 y capítulo 2*) permiten ahora realizar estas pruebas con los equipos en operación normal sin importar las condiciones de interferencia presentes durante la prueba<sup>5</sup>.

La medición de DP's se ha utilizado para evaluar el aislamiento del equipo de alta tensión desde principios de la década de los cincuentas, pero su aplicación se limitaba a laboratorios especializados y debidamente acondicionados.

En México y en particular en el IIE, se tomaron y readecuaron tales estudios. Con ello, lo que antes era exclusivo del ámbito del laboratorio, se logró aplicar en el

campo, obteniendo resultados satisfactorios en cables, generadores y transformadores para diversas aplicaciones (de instrumento, potencia, medición, etc).

Se adecuaron técnicas ya conocidas y se aprovechó la corriente que se dio en otros países, igual que en México, de utilizar las técnicas de medición de DP's en el campo, para lo cual se implementó una serie de accesorios como el transformador resonante que permitió excitar el generador bajo prueba y efectuar la evaluación.

En dicho instituto se utilizan dos técnicas que determinan el estado de los aislamientos:

- La medición de descargas en línea, midiendo de manera continua el nivel de descargas parciales, instalando sensores especiales (*tema 2.7*).
- La medición de descargas fuera de línea.

### **1.7 MÉTODOS DE DETECCIÓN DE DP's**

Los efectos producidos por la acción de las descargas parciales se utilizan para identificar su presencia, localización, tipo de daño y materiales involucrados en la zona de falla incipiente. Recientemente, el análisis del movimiento de cargas inducidas permite determinar el grado de avance en el daño o degradación causada por las descargas parciales<sup>6,7,8</sup>. De esta manera las DP's pueden identificarse desde cuatro aspectos: por sus efectos químicos, térmicos, acústicos y eléctricos.

Sin embargo, debido a la magnitud y complejidad que representa estudiar cada uno de estos cuatro casos, sólo se mencionan brevemente los tres primeros. El Método Eléctrico es el usado y presentado en este trabajo de investigación, esto por ser el mundialmente aceptado y normalizado<sup>9</sup>.

### 1.7.1 Métodos de Detección Química

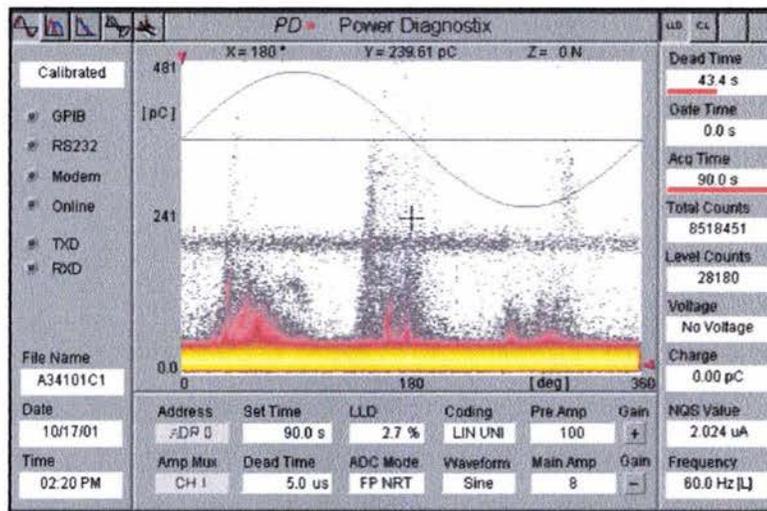


Fig. 1-15. Analizador de DP's (Método Químico).

Son usados ampliamente en transformadores y subestaciones aisladas en gas ( $\text{SF}_6$ , por ejemplo), donde la pureza del sistema aislante original se evalúa contra la presencia de gases combustibles relacionados a la actividad de ionización.

### 1.7.2 Métodos de Detección Térmica

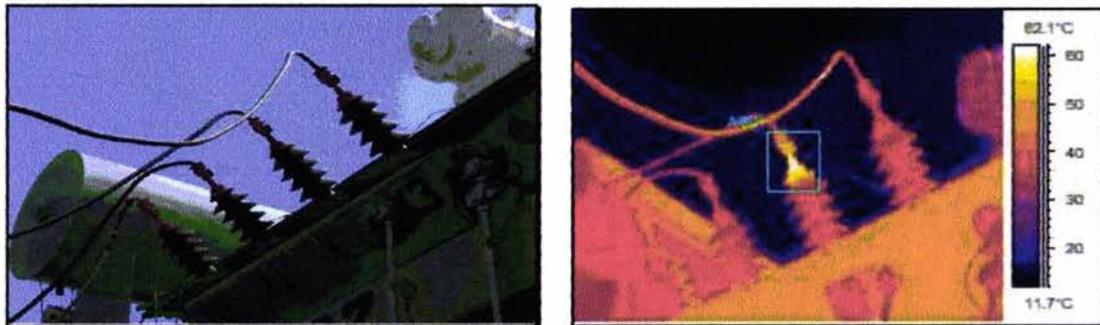
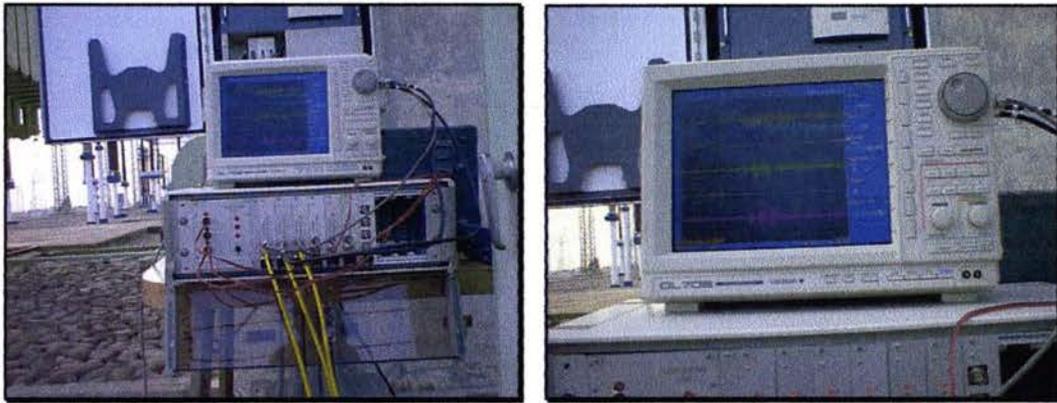


Fig. 1-16. Analizador de DP's (Método Térmico).

Los Métodos Térmicos de Detección de DP's utilizan termografía en la zona de terminales de cables o en la trayectoria del núcleo de transformadores en los que se sospecha multi-aterización.

### 1.7.3 Métodos de Detección Acústica.



**Fig. 1-17.** Analizador de DP's (Método Acústico).

La determinación y localización de actividad de DP's por métodos acústicos utiliza sensores ultrasónicos en equipos como transformadores aislados con aceite o en subestaciones aisladas en gas, donde la presencia de DP's produce ondas de presión en el rango de 150 a 350 kHz.

El análisis de estas ondas mediante triangulación de la fuente del disturbio ofrece la localización de la zona de DP's, ayudando enormemente en la resolución del problema, aunque no cuantifica correctamente su gravedad<sup>10</sup>.

### 1.7.4 Métodos de Detección Eléctrica



**Fig. 1-18.** Analizador de DP's (Método Eléctrico).

El método mundialmente aceptado y normalizado para realizar mediciones comparativas en condiciones controladas, es el método eléctrico según el estándar

IEC 60270<sup>9</sup>. Este método perfeccionado en los años 60's tiene muchas limitantes en cuanto a su aplicación en equipo que ya se encuentra en operación.

Desde 1990 las técnicas de banda ultra ancha iniciaron la expansión del método eléctrico de detección de DP's para correlacionar las señales producidas por una descarga parcial y el daño causado al interactuar con el aislamiento. Para identificar estas señales se utilizaron frecuencias de medición cada vez mayores y se encontró que el fenómeno abarcaba rangos de frecuencia cercanos a 1GHz<sup>11</sup>.

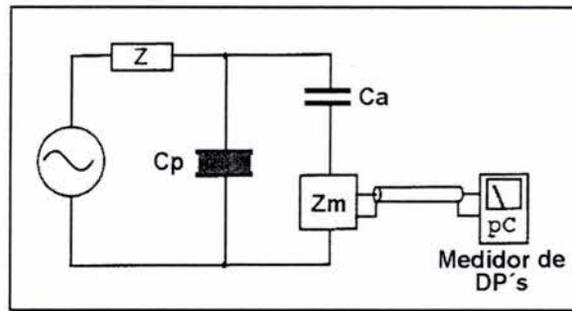
Actualmente, las técnicas de medición de DP's que utilizan equipos de banda ultra ancha (*tema 1.8.3 y capítulo 2*) se empiezan a usar en el diagnóstico predictivo de equipos en operación como generadores y cables subterráneos<sup>12</sup>.

## **1.8 MÉTODO ELÉCTRICO DE MEDICIÓN DE DP'S**

### **1.8.1 Técnica de Prueba**

Técnica de Prueba tomada de "Medición en línea de Descargas Parciales (DP's) por el Método Eléctrico de una Subestación Aislada en SF6"<sup>13</sup>.

La medición del nivel de descargas parciales es una prueba de alta sensibilidad que permite identificar imperfecciones en el aislamiento de equipo eléctrico. Dichas imperfecciones pueden evolucionar y causar el rompimiento del dieléctrico durante su operación. De acuerdo con el estándar IEC 60270<sup>9</sup>, la medición de DP's se efectúa utilizando un capacitor de acoplamiento ( $C_a$ ) y una impedancia de medición ( $Z_m$ ) conectada a un detector de DP's. En la Fig. 1-19 se muestra el circuito típico utilizado para la medición de DP's y en la cual el objeto bajo prueba está representado por el capacitor  $C_p$ . Al presentarse una descarga parcial se genera un impulso que viaja a través del capacitor  $C_a$  y que es medido en la impedancia  $Z_m$ . La integración de la corriente medida a través de  $Z_m$  es conocida como la carga aparente del objeto bajo prueba generada por una DP.



**Fig. 1-19.** Circuito de medición de DP's de acuerdo con IEC 60270.

Previo a la medición de DP's, el circuito de medición es calibrado aplicando un pulso de carga aparente conocido, el cual es medido en el detector de DP's. Esta calibración se conoce como calibración directa y se efectúa con el objeto bajo prueba y el circuito de medición desenergizado, como lo recomienda la norma IEC 60270. Cuando la medición de DP's se efectúa en línea, la calibración del circuito de medición se realiza de manera indirecta. Durante mediciones en línea, no es posible efectuar la calibración directa debido a que el equipo bajo prueba no puede salir de operación. La calibración indirecta tiene el inconveniente de atenuar el pulso de calibración aplicado.

### 1.8.2 Método Normalizado de Medición de DP's

El principal obstáculo para la medición de DP's en sitio es la interferencia electromagnética presente en el rango de frecuencias de medición. Esta interferencia es alta en las subestaciones y plantas donde se encuentra instalado el equipo de potencia, debido a que se ve afectado por señales comerciales de radio, efecto corona y ruido eléctrico<sup>5</sup>.

Las frecuencias de medición de DP's por el método convencional, se seleccionan mediante la utilización de amplificadores electrónicos sintonizados cuyas frecuencias de corte se encuentran entre 30 y 500 kHz.

Debido al tipo de amplificador empleado, y por lo tanto a los anchos de banda utilizados, las mediciones se subdividen en dos tipos: el primero identificado como de banda ancha, por tener un ancho de banda que se encuentra entre 100 y 300 kHz; el segundo tipo de medición, debido al empleo de un amplificador normalizado de alta calidad (Q), es llamado de banda angosta, cuyo ancho puede ajustarse entre 5 y 30 kHz y la frecuencia central de medición puede moverse dentro de los límites

de la banda ancha. Estos valores de frecuencia no están relacionados en forma alguna con el fenómeno de la descarga y son más bien de índole históricos, ya que la tendencia en la época de su adopción era estandarizar las mediciones y comparar resultados de evaluación en fábrica de equipos nuevos entre laboratorios distribuidos en diferentes partes del mundo.

Con el afán de establecer niveles aceptables en equipos nuevos, pero tomando en cuenta las limitaciones tecnológicas de la época de estandarización (1970), se aceptó de manera unánime el rango de frecuencias descrito. Este rango se definió en las zonas del espectro donde los efectos de las fuentes de interferencia cercanas a los laboratorios participantes en la estandarización tenían menor intensidad, por lo tanto, actualmente ya no tiene justificación.

### **1.8.3 Mediciones de DP's en Banda Ultra Ancha**

Se ha demostrado mediante numerosas mediciones en laboratorio bajo condiciones controladas de interferencia, que las formas de onda de la corriente producida por las DP's son de tipo impulso, que pueden alcanzar frentes con un tiempo muy corto de subida (0.7 ns) y que se deforman en función de la distancia. Esto equivale a decir que para reconstruir con precisión la forma de onda de estos impulsos, se requieren equipos analógicos con un ancho de banda coherente; o bien, equipos digitales capaces de muestrear a frecuencias cercanas a 1 GHz, tiempo en que el fenómeno de ionización transitoria puede ocurrir dentro de los defectos del aislamiento que originan las descargas parciales. En la época actual, debido a los avances de la electrónica, es posible digitalizar con buena precisión la forma de onda de las descargas parciales, o más bien, la forma de su efecto electromagnético en la vecindad del defecto que provoca la descarga. El análisis electromagnético de Pedersen<sup>14</sup> permite analizar la señal producida por una DP como el efecto de la inducción de cargas en movimiento. Al analizar las señales de DP's en este amplio espectro de frecuencia, que excede al rango normalizado de banda ancha, se buscó una nueva nomenclatura que permitiera su designación. Fue así como se definió el término de mediciones de DP's en Banda Ultra Ancha<sup>9</sup>.

## 1.9 BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

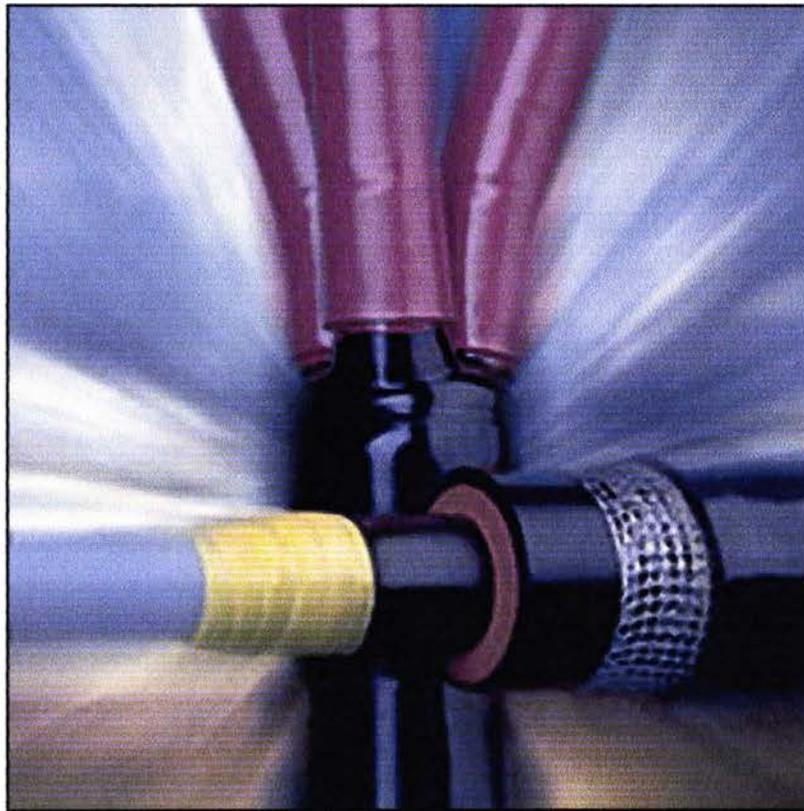
- Harry E. Orton, "Diagnostic Testing of In-Situ Power Cables – An Overview", XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering. Delft, Netherlands, 25-29th August 2003.
- Mashikian, M.S., "Partial Discharge Location as a Diagnostic Tool for Power Cables", Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE, Volume: 1, 15-18 Oct. 2000. Page(s): 1604-1608 vol. 3.
- Steiner, J.P.; Reynolds, P.H.; Weeks, W.L.; "Estimating The Location Of Partial Discharges In Cables", Electrical Insulation, IEEE Transactions On [See Also Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions On], Volume: 27. Issue: 1, Feb. 1992 Page(s): 44 –59.
- Niemeyer, L., "The Physics Of Partial Discharges", Partial Discharge, 1993. International Conference On, 28-30 Sep 1993. Page(s): 1–4.
- Carminati, E.; Lazzaroni, M.; "A Contribution In Partial Discharge Detection", Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1997. IMTC/97. Proceedings. Sensing, Processing, Networking. IEEE, Volume: 1, 19-21 May 1997. Page(s): 501-506.

- 
- <sup>1</sup> García Colón, Vicente R., *Estudio de la Degradación por Descargas Parciales de un Polietileno de Cadena Cruzada*, Tesis de Licenciatura, U.V. México 1988.
  - <sup>2</sup> Gulski, Edward, *Computer-Aided Recognition Of Partial Discharges Using Statistical Tools*. PhD Thesis, Delft University Press. Netherlands 1991. 211 pp.
  - <sup>3</sup> "Fundamentos de Descargas Parciales", Instituto de Investigaciones Eléctricas, Curso IIE. IEEE Sección Morelos. Temixco Morelos. 3 al 5 de Junio de 2002.
  - <sup>4</sup> Natrass, David A., Partial Discharge Measurement and Interpretation. CIGRE Recognition of Discharges, February 1992.
  - <sup>5</sup> García Colón V.R; Vega G. S; Jiménez N. A., Identificación de Fallas Incipientes en Equipo de Potencia Mediante Pruebas de Descargas Parciales. Reporte preparado por el IIE. Resultados obtenidos en el LIMAT-ICE, Costa Rica. Julio de 2003.
  - <sup>6</sup> García Colón, V.R. "Distributed PD Measurements on Power Underground Cables". Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Boston, Mass, USA, April 7-10, 2002.
  - <sup>7</sup> Cavallini, A.; Montanari, G.C.; Contin, A.; Pulletti, F.; "A New Approach to the Diagnosis of Solid Insulation Systems Based on PD Signal Inference". Electrical Insulation Magazine, IEEE, Volume: 19 Issue: 2 , March-April 2003 Page(s): 23 -301.
  - <sup>8</sup> Cavallini, A.; Conti, M.; Contin, A.; Montanari, G.C., "Advanced PD Inference in On-Field Measurements. Part 2: Identification of Defects in Solid Insulation Systems". Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on [see also Electrical Insulation, IEEE Transactions on], Volume: 10 Issue: 3, June 2003 Page(s): 528–538.
  - <sup>9</sup> Standard IEC60270, High Voltage Testing - Partial Discharge Measurements, International Electrotechnical Commission, Third Edition, Switzerland, 2000.

- <sup>10</sup> V.R. García-Colón, "Distributed PD Measuring Techniques (D-PDM) for Installed Power Equipment Diagnosis". 2002 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Quintana Roo, Mexico, October 20-24, 2002.
- <sup>11</sup> Pedersen, "On the Electrodynamics of Partial Discharges in Voids in Solid Dielectrics". 3rd Int. Conf. On Conduction and Breakdown, Torndheim, Norway, 1989, pp. 107-116.
- <sup>12</sup> García-Colón, V.R., "Power Cable On Line Diagnosis Using Partial Discharges Ultra Wide Band Techniques". 2001 Large Engineering Systems Conference, LEESCOPE'01, Halifax, Nova Scotia, Canada, July 11-13, 2001.
- <sup>13</sup> Nava Guzmán J.A.; V.R. García-Colón. Diagnóstico de Subestaciones Aisladas en Gas Mediante Técnicas Avanzadas de Descargas Parciales. RVP-AI/02-TPM-03 Ponencia Recomendada por el Comité de Técnicas de Prueba y Medición del Capítulo de Potencia del IEEE Sección México y Presentada en la Reunión de Verano, RVP-A1/02 Acapulco, Gro., 7-13 de Julio de 2003.
- <sup>14</sup> Pedersen, On The Electrodynamics of Partial Discharges in Voids in Solid Dielectrics, 3<sup>rd</sup> International. Conference on Conduction and Breakdown, Torndheim, Norway, 1989, pp. 107-116.

# CAPÍTULO 2

DP's APLICADAS A CABLES



## 2.1 RESUMEN

Se presenta la técnica de detección y localización de DP's; "*Diagnóstico de Cables Subterráneos con Técnicas de Banda Ultra Ancha (UWB)*"<sup>1</sup> basada en mediciones de banda ultra ancha y aplicada a cables de potencia. Se explica sobre el papel de las DP's en el proceso de falla en cables de potencia, las dificultades para realizar la medición de descargas por métodos tradicionales y las ventajas del uso de técnicas de banda ultra ancha (UWB) para el diagnóstico de cables durante su operación normal, en otras palabras, con el equipo energizado y operando.

## 2.2 INTRODUCCIÓN

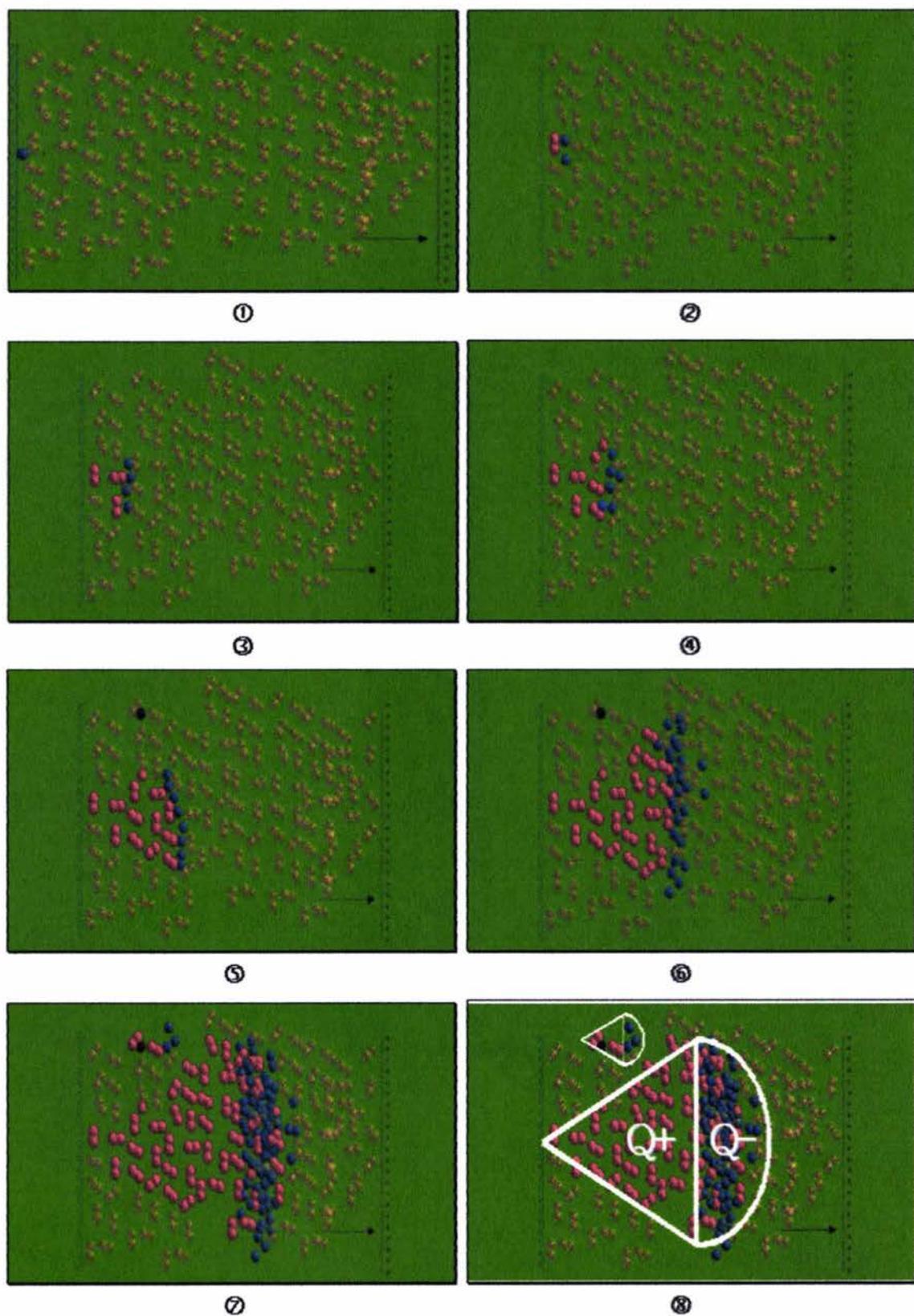
Los cables subterráneos tienen la finalidad de conducir energía eléctrica de manera segura y confiable, en áreas donde no se acepta el uso de líneas aéreas. Estos cables están propensos a sufrir descargas parciales una vez instalados y estando en operación. Las DP's son a menudo el resultado del daño causado por otras fuerzas térmicas, mecánicas y químicas, actuando en el aislamiento. El desarrollo progresivo de las DP's es el mayor síntoma de deterioro del aislamiento. Estas descargas también contribuyen al envejecimiento del sistema aislante.

En los siguientes puntos se describe brevemente la física de la descarga parcial y los principios de medición en UWB.

## 2.3 SEÑAL GENERADA POR UNA DP

Una descarga parcial se presenta en un aislamiento, como el de los cables, cuando una cavidad presente en él, es sometida a un esfuerzo eléctrico superior al de ruptura del gas contenido en la cavidad. En ese momento, existen las condiciones para que, de existir un electrón libre, se inicie una avalancha en el gas contenido en la cavidad, de acuerdo con la secuencia mostrada en la Fig. 2-1.

En dicha figura se observa el desarrollo y crecimiento de la avalancha de electrones que se dirige al extremo opuesto de la cavidad, atravesándola a una velocidad definida por las condiciones de presión y temperatura del gas en la cavidad<sup>2</sup>. La señal de descarga originada, contiene información sobre el tipo de compuestos que se presentan en la descarga y del campo eléctrico que originó la avalancha.



**Fig. 2-1.** Avalancha de electrones (desarrollo).

## 2.4 PRIMEROS ANÁLISIS DE LA FORMA DE ONDA DE LA DP PARA EVALUACIÓN DE LA DEGRADACIÓN

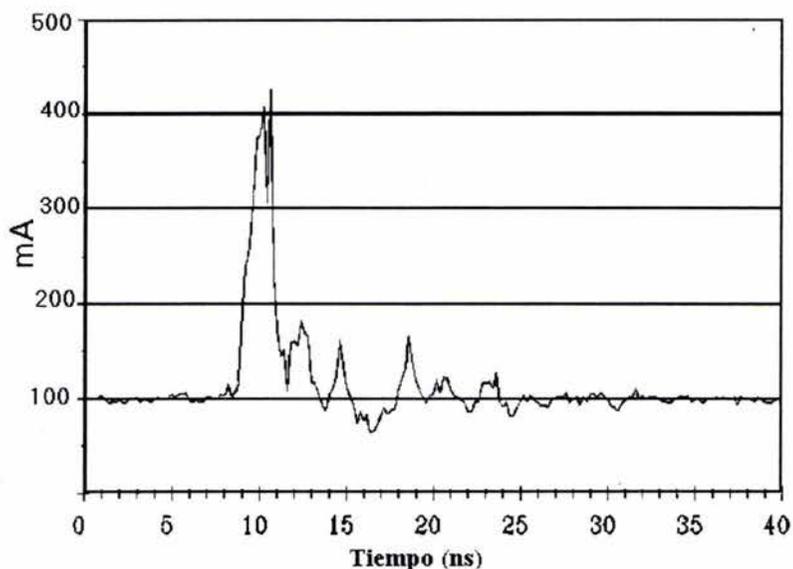
Los primeros intentos por resolver en tiempo la forma de onda de una descarga parcial iniciaron al final de la década de los 60's<sup>3</sup>. Sin embargo, estos intentos no se extendieron masivamente hasta los 80's cuando aparecieron digitalizadores de 1 GHz a bajo costo.

Los primeros estudios revelaron un frente electrónico de muy altas frecuencias en la forma de onda de una descarga parcial, por lo que los circuitos de detección se basaron en arreglos coaxiales con impedancias lineales de hasta 1 GHz<sup>4</sup>. La mecánica de evaluación de la degradación producida por las descargas parciales, utilizó un arreglo de este tipo y se circunscribió al análisis de la corriente inducida por una descarga parcial que ocurre en una cavidad única sellada al momento de vaciado de la resina epóxica<sup>5</sup>.

Las condiciones controladas de manufactura y medición permitieron resultados repetitivos para diferentes muestras, obteniendo con esto una idea general sobre el proceso de degradación que se presentaba<sup>5</sup>.

## 2.5 DESCARGAS RÁPIDAS ASOCIADAS A CONDICIONES DE SOBRETENSIÓN

Las formas de onda de la corriente inducida por una descarga parcial pueden clasificarse en dos tipos: descargas **rápidas y lentas**<sup>1</sup>. La descarga *rápida* mostrada en la Fig. 2-2 tiene un frente del orden de 2 ns, pero puede alcanzar tiempos menores de 700 ps. En esos tiempos, la corriente puede alcanzar niveles en el orden de amperes, por lo que se genera una onda electromagnética transversal (TEM) que se difunde en el espacio circundante a la zona de descarga.



**Fig. 2-2.** Forma de onda de la corriente inducida por una descarga parcial rápida asociada a condiciones de sobretensión

El origen de la forma de onda de la descarga se encuentra asociado con las condiciones de sobretensión dentro de la cavidad donde se presenta la descarga<sup>4,5,6</sup>. Estas condiciones se originan cuando el voltaje presente en la cavidad para provocar la descarga excede los valores de ruptura del gas, sin que exista un electrón libre para iniciar la avalancha de acuerdo al proceso descrito en el punto 2.3.

La forma de onda de una descarga *rápida* contiene información sobre el tiempo transcurrido entre el momento en que se alcanzó el gradiente de ruptura en el gas dentro de la cavidad, y el momento en que apareció el primer electrón libre. Esta información es relevante para definir la energía con que se bombardea la superficie y es, sin lugar a dudas, el tipo de descarga que mayor daño puede ocasionar en el aislamiento. También sirve para su localización, pues la gran cantidad de energía liberada en corto tiempo es mucho mayor que la existente en el medio ambiente como interferencias.

Un dato importante obtenido del estudio de microfotografías de una superficie de resina epóxica, observada en microscopio electrónico de barrido, indica que este tipo de descargas se presenta tanto en cavidades vírgenes como en cavidades con severa degradación, por lo que desde el punto de vista de evaluación de la degradación este tipo de descargas no es importante, ya que la magnitud no se altera con la degradación<sup>1</sup>.

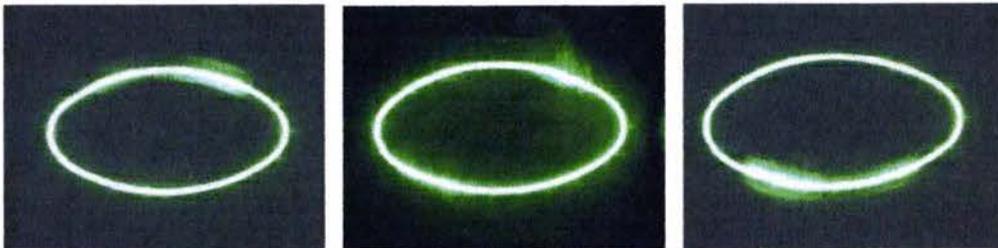
## 2.6 DP's LENTAS ASOCIADAS A LA DEGRADACIÓN

Al analizar las formas de onda inducidas por las descargas parciales en muestras que presentan degradación severa por inspección al microscopio, se observan formas de onda del tipo *lento*, cuya duración se prolonga dos órdenes de magnitud más que las ondas rápidas.

En la Fig. 2-4 se presenta una forma de onda lenta típica. Es necesario resaltar que la escala de tiempo es 10 veces mayor que la correspondiente a una descarga de tipo *rápida*.

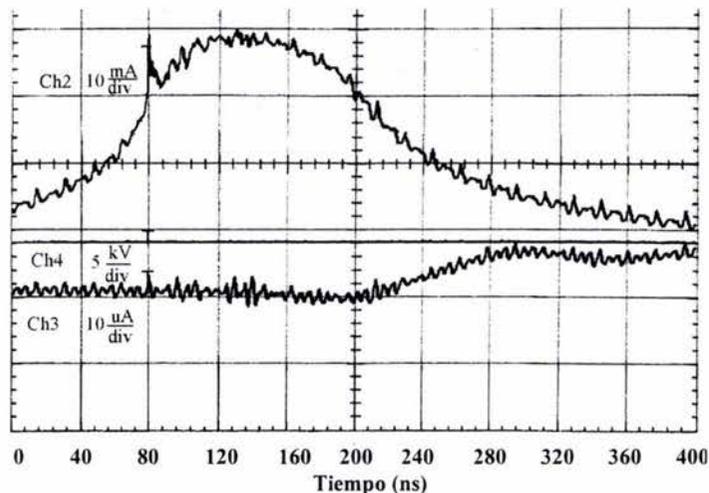
Esta descarga lenta está relacionada con la formación de avalanchas sucesivas, generadas por una abundante cantidad de electrones libres provenientes de carga atrapada en la superficie degradada del aislamiento.

Bajo estas condiciones, no se alcanzan niveles significativos de sobretensión entre cada descarga, y la duración de la misma se extiende mientras la conducción de la superficie degradada permita la difusión de cada descarga anterior. Esta aseveración se confirma al detectar zonas de inyección de carga en la superficie, representadas como áreas luminosas al barrido de un microscopio electrónico (Fig. 2-3).



**Fig. 2-3.** Áreas luminosas observadas en un microscopio electrónico.

Los electrones necesarios para observar la imagen, promueven la inyección de más carga que se manifiesta como zonas luminosas. Esto hace suponer que la zona de mayor degradación tiene menor resistividad superficial y volumétrica, promoviendo la difusión de carga dentro del volumen del aislamiento y con ello, la degradación no sólo es superficial sino que avanza hacia los electrodos hasta provocar la falla.



**Fig. 2-4.** Forma de onda de la corriente inducida por una descarga parcial lenta asociada a fuerte degradación.

## 2.7 SENSORES DE CAMPO CERCANO PARA RESOLUCIÓN DE DP'S EN UWB

Partiendo del hecho que existen dos tipos de onda de descarga:

- Las **rápidas**, que contienen información de la sobretensión existente al momento de la descarga y son útiles en la localización de la zona de descarga.
- Las **lentas**, que contienen información de la severidad de la degradación.

Por lo tanto es suficiente contar con un equipo que pueda resolver únicamente las descargas de tipo lento para el estudio de la degradación, mientras que no es tan importante resolver las descargas más rápidas.

Esta condición permite usar sensores que no requieren resolver el espectro completo de las descargas, el cual puede extenderse a la región de los GHz, sino que los sensores pueden sintonizarse a frecuencias hasta de 1 GHz y aún poder obtener la información de la severidad de degradación ocasionada por cada descarga<sup>7</sup>.

Sensores con dimensiones físicas comparables a un cuarto de longitud de onda de la señal a detectarse tienen una excelente relación señal a ruido, al localizarse a una distancia cercana a una longitud de onda.

Esta condición de proximidad está dada por la intensidad del campo electromagnético, cuya magnitud en esta proximidad disminuye con el cubo de la distancia<sup>8</sup> y se le denomina **campo cercano**. Los sensores de campo cercano se

deben colocar dentro de esta zona de influencia del campo electromagnético cercano.

La longitud de onda  $\lambda$  de una descarga parcial viajando a través del aislamiento, está dada por:

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

Donde  $v$  es la velocidad de la onda en el aislamiento donde ocurre la descarga, calculada como:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r \mu_0 \mu_r}}$$

Y además:

$$\begin{aligned} \epsilon_0 &= \frac{10^7}{(4\pi c^2)} \text{ F/m} && \text{Permitividad del vacío} \\ \mu_0 &= 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m} && \text{Permeabilidad del vacío} \\ c &= 3 \times 10^8 \text{ m/s} && \text{Velocidad de la luz en el vacío} \\ f &= \frac{1}{4\tau} && \text{Frecuencia} \\ \epsilon_r &= \mathbf{2 \text{ a } 5} \text{ (típicamente)} && \text{Permitividad relativa del aislamiento} \\ \mu_r &= \mathbf{1} \text{ (normalmente)} && \text{Permeabilidad relativa del aislamiento} \\ \tau &= \text{Frente de la descarga parcial} \end{aligned}$$

Por ejemplo, para una DP con frente de 2 nseg, tenemos;

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{1}{\frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r \mu_0 \mu_r}}} = \frac{4\tau}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r \mu_0 \mu_r}}$$

Si sabemos que;

$$\epsilon_0 = \frac{1 \times 10^{-7}}{4\pi(3 \times 10^8)^2} = \frac{1 \times 10^{-7}}{4\pi(9 \times 10^{16})}$$

$$\epsilon_r = 2$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$$

$$\mu_r = 1$$

Entonces para una DP con frente de 2 nseg ( $\tau = 2 \text{ nseg} = 2 \times 10^{-9} \text{ seg}$ ), tenemos:

$$\lambda_{2\text{nseg}} = \frac{4\tau}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r \mu_0 \mu_r}} = \frac{4(2 \times 10^{-9})}{\sqrt{\left(\frac{1 \times 10^{-7}}{4\pi(9 \times 10^{16})}\right) (4\pi \times 10^{-7}) (2)(1)}}$$

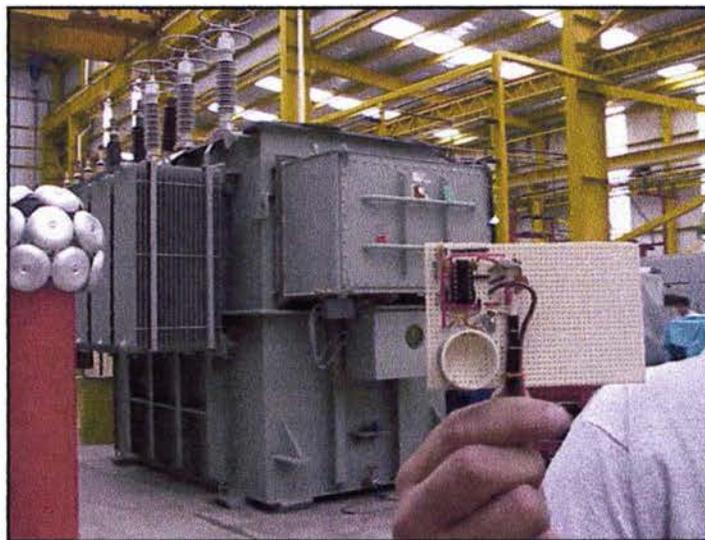
$$\lambda_{2\text{nseg}} = \frac{4(2 \times 10^{-9})}{\sqrt{\frac{2}{9 \times 10^{16}}}} = \frac{6\sqrt{2}}{5} = 1.697 \text{ m}$$

De esta manera, para el sensor con dimensión física de un cuarto de longitud de onda tenemos:

$$D_{\text{sensor}} = \frac{1.697 \text{ m}}{4} = 0.4242 \Rightarrow 42 \text{ cm}$$

Así, el sensor (ver Fig. 2-5) deberá estar colocado a una distancia menor de 40 cm del lugar donde se origina la descarga, para ser influenciado directamente por el campo electromagnético producido por la descarga parcial.

Cuando el sensor puede ser expuesto al campo eléctrico de la descarga, se prefiere de tipo capacitivo. Sin embargo, cuando la única señal disponible es la corriente o el campo magnético generado por la descarga, el sensor más recomendable es de tipo inductivo<sup>1</sup>.



*Fig. 2-5. Sensor UWB para colocarse dentro de un transformador de 10 MVA.*

## 2.8 EXPERIMENTAL

Los sensores de banda ultra ancha se utilizaron en una práctica experimental para la evaluación de cables subterráneos de potencia clase 5, 15 y 25 kV, con aislamientos de polietileno o de cinta de papel impregnado en aceite. Estos sensores fueron de tipo capacitivo e inductivo, acoplados a los sistemas UWB.

Las mediciones se realizaron utilizando dos tipos de sistemas UWB digitales. El primer sistema fue desarrollado en el IIE, con sensores de campo cercano que responden hasta 100 MHz. La señal obtenida en estos sensores se digitaliza mediante un osciloscopio digital de 1 GS/s y después es transferida vía RS232 a una computadora, donde se despliega y almacena.

El software de adquisición, denominado MACQ, fue desarrollado también en el IIE para permitir operaciones con las ondas capturadas como la integración, resta, análisis de tiempo de llegada, etc.

El segundo sistema UWB utilizado es un sistema comercial que utiliza un preamplificador hasta 20 MHz y, en combinación con un amplificador, ofrece ganancias de hasta X80,000.

La señal se despliega en una pantalla de cristal líquido y puede almacenarse en formato de imagen, mediante una computadora personal conectada vía puerto serie. Además de resolver la forma de onda de la descarga, este equipo comercial permite

graficar la magnitud y fase de aparición de una descarga, relativo al voltaje de prueba aplicado. Este tipo de gráfica se denomina *mapa de descarga*.

En los próximos puntos, se presentan las formas de onda y los mapas de descargas parciales obtenidos durante evaluaciones efectuadas, tanto en el laboratorio como en cables ya instalados.

### **2.8.1 Localización de Descargas en Cables**

La prueba representativa de la capacidad de localización de una fuente de descargas parciales mediante técnicas de UWB se realizó en el laboratorio del IIE.

Esta prueba consistió en evaluar un cable clase 15 kV, de aislamiento XLPE, con 10 m de longitud, en el cual una de las terminales tenía un defecto de fabricación que generaba niveles de descargas parciales de hasta 500 pC a tensión nominal.

Para la localización de la fuente de descargas, se colocaron dos sensores UWB en diferente posición del cable, detectando los niveles y formas de onda producidas por las descargas.

Comparando las dos señales, se procedió a mover ambos sensores en la dirección del sensor que capturaba la descarga de mayor magnitud. Este proceso se repitió hasta que un sensor se encontraba colocado en el lado de tierra de la terminal con problemas de descargas parciales.

La señal obtenida en ese punto se presenta en la Fig. 2-6. En esta misma figura es posible observar el retraso de tiempo en el arribo de las señales de descarga, que permite definir la localización del sitio exacto de descargas.



Fig. 2-6. Localización de descargas parciales en un cable evaluado en laboratorio.

### 2.8.2 Mediciones en Línea a Cables de Potencia

Este mismo procedimiento de localización se realizó en un circuito de cables de potencia de 23 kV, instalados en una subestación de distribución.

La Fig. 2-7, presenta la señal de descargas parciales cercanas a la terminal del cable. La señal registrada fue capturada con el sistema UWB desarrollado por el IIE, comprobándose que la lectura se originaba por una fuga en el compuesto de impregnación de la terminal evaluada.

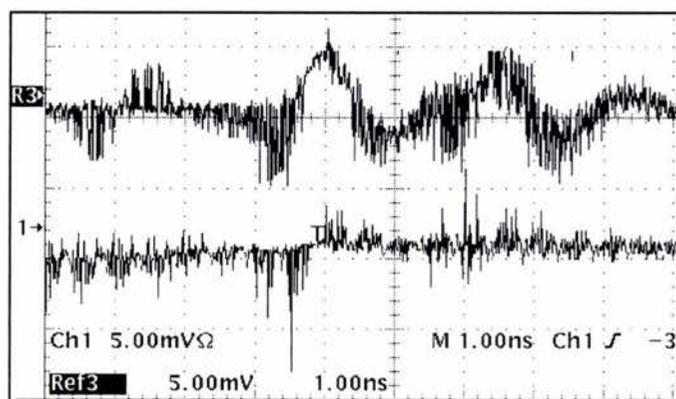


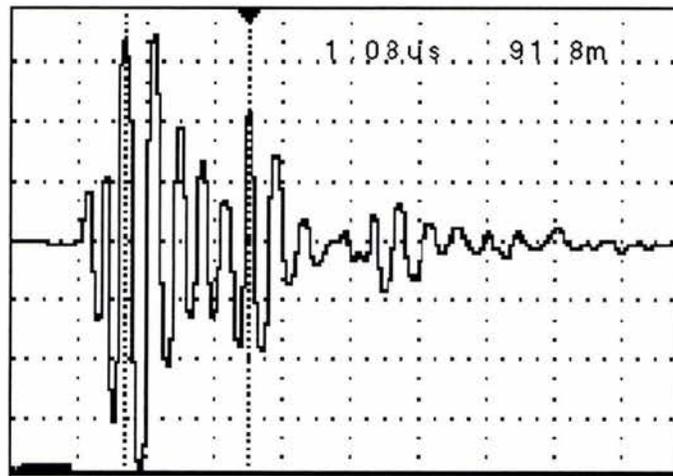
Fig. 2-7. Detección y localización de una terminal dañada en un circuito evaluado en línea.

### 2.8.3 Detección en Línea Utilizando un Sistema UWB Comercial

Utilizando sensores de tipo inductivo, con respuesta hasta 80 MHz, se realizaron mediciones en cables que se encontraban en operación normal.

Estos cables tienen un aislamiento basado en papel y aceite, por lo que es común encontrar niveles de descargas parciales de alrededor de 500 pC.

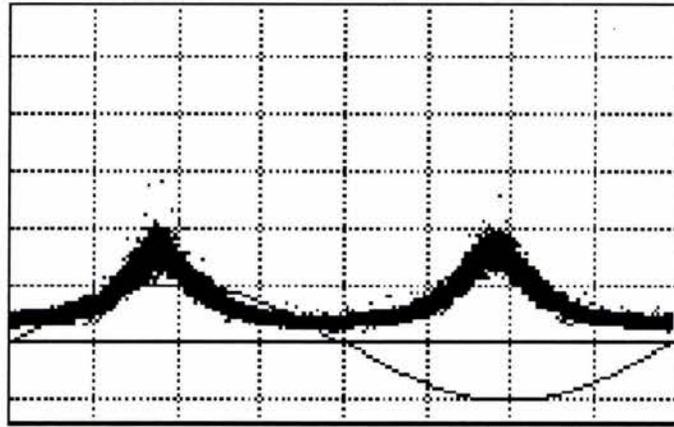
Estas descargas tienen la forma que se presenta en la Fig. 2-8.



**Fig. 2-8.** Forma de onda de una descarga parcial capturada por un sistema comercial de UWB de 20 MHz.

Cuando el sistema UWB se utilizó para valorar este mismo tipo de cables durante su operación normal, se obtuvo un patrón de descargas similar al que se presenta en la Fig. 2-9.

El patrón obtenido en esta figura se compone de la representación en forma de puntos de la magnitud de la descarga, colocados de acuerdo con la fase de ocurrencia, tomando como referencia la corriente de 60 Hz que circula en el cable y que se presenta en la misma figura.



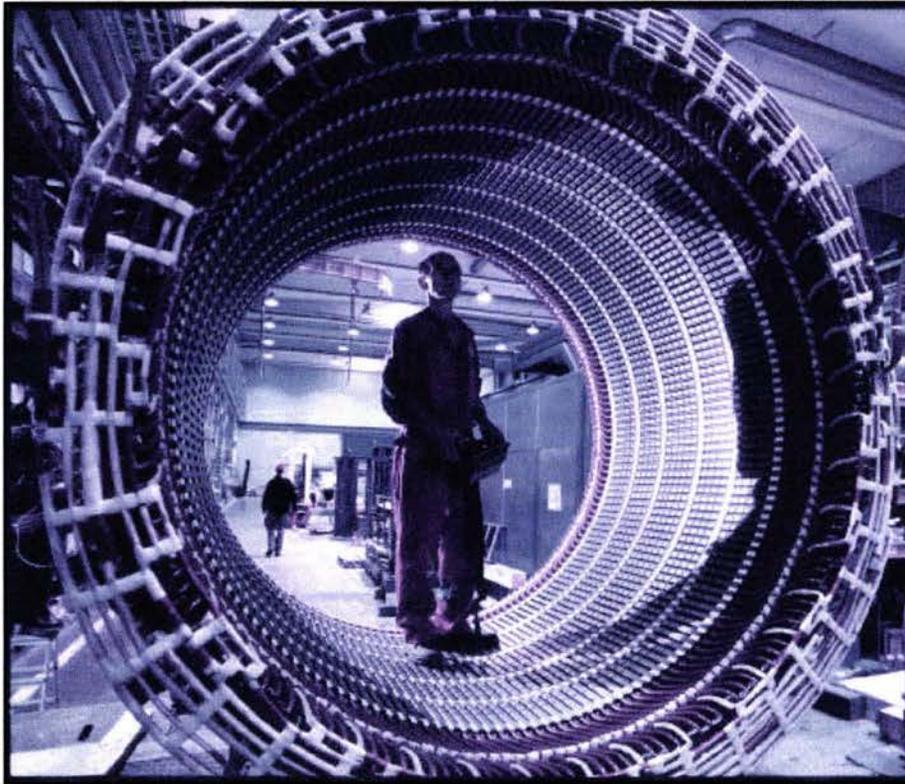
**Fig. 2-9.** Patrón de descargas típico de un cable de aceite papel durante operación normal. 75pC/div.

## 2.9 REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- Harry E. Orton, "Diagnostic Testing of In-Situ Power Cables – An Overview", XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering. Delft, Netherlands, 25-29th August 2003.
  - G. Schmidt, G. Hoff and H.-G. Kranz, "Ageing and Deterioration Diagnosis of Polymer Cables: Major Differences and Interactions", XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering. Delft, Netherlands, 25-29th August 2003.
  - Shields, A.J.; Kemp, I.J. "Degradation and Breakdown of Mica Under Partial Discharge Stressing", Science, Measurement and Technology, IEEE Proceedings, Volume: 147 Issue: 3, May 2000.
  - Yonghong Cheng; Hengkun Xie; Wei Li; "Study on Characteristics of Ultra-Wideband Partial Discharge of Typical Insulation Samples", Electrical Insulating Materials, 1998. Proceedings of 1998 International Symposium on, 27-30 Sept. 1998 Page(s): 697 -700.
  - Mashikian, M.S. "Partial Discharge Location as a Diagnostic Tool for Power Cables". Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE, Volume: 3, 23-27 Jan. 2000 Page(s): 1604 - 1608 vol.3.
  - Shim, I.; Soraghan, J.J.; Siew, W.H.; McPherson, F.; Gale, P.F. "Partial Discharge Location on High Voltage Cables". High Voltage Engineering, 1999. Eleventh International Symposium on (Conf. Publ. No. 467), Volume: 5, 23-27 Aug. 1999 Page(s): 248 -251 vol.5.
- 
- <sup>1</sup> V. R. Colón, J. A. Nava Guzmán, J. M. Ramírez Cruz, "Diagnóstico de Cables Subterráneos con Técnicas de Banda Ultra Ancha (UWB)". X Congreso de Energía Eléctrica y Máquinas Eléctricas Rotatorias CEEMER, Veracruz 2000.
- <sup>2</sup> Pedersen, On the Electrodynamics of Partial Discharges in Voids in Solid Dielectrics, 3rd Int. Conf. on Conduction and Breakdown, Trondheim, Norway, 1989, pp. 107-116.
- <sup>3</sup> G.S. Eager, Jr G. Bader, "Discharge Detection in Extruded Polyethylene Insulated Power Cables", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-86, No.1, January 1967, pp. 10-21.
- <sup>4</sup> J.T. Holbøll, *The Resistance of Composite Materials Against Electrical Discharges*, PhD Thesis, Electrical Power Engineering Department Pub. No. 9204, Technical University of Denmark, Dk 2800, Lyngby, April 1992.
- <sup>5</sup> V.R. García Colón, *Evolution of Partial Discharges Wave shapes in Spherical Voids Using Ultra Wide Band Techniques*, PhD Thesis, University of Manchester Institute of Science and Technology, UMIST, August 1994.
- <sup>6</sup> P.H.F. Morshuis, *Partial Discharge Mechanisms*, PhD Thesis, Delf University Press, 1993.
- <sup>7</sup> V. R. García-Colón, A. Nava-Guzman, L.A. Salgado-Salgado, R. Canales-Ruiz, "Location and assessment of partial discharge on substation equipment using ultra wide band techniques", EPRI Substation Equipment Diagnostics Conference VIII, New Orleans, February 2000.
- <sup>8</sup> M. A. Plonus. Applied Electromagnetics. McGraw-Hill Kogakusha, Ltd., Japan, 1978.

# CAPÍTULO 3

DP's APLICADAS A MOTORES



### 3.1 RESUMEN

Se presenta un método para efectuar el diagnóstico de motores *en línea* de gran capacidad en operación mediante la medición de descargas parciales (DP's). Se utiliza la técnica de medición en banda ultra ancha (UWB), con la finalidad de reducir al mínimo el problema de interferencia electromagnética durante las mediciones en planta.

El método que se presenta permite obtener los tradicionales mapas de descargas  $N-Q-\Phi$  ( $N$ : Tasa de repetición de pulsos;  $Q$ : Carga aparente;  $\Phi$ : Ángulo de fase), lo que facilita la identificación de problemas en el aislamiento de los motores. Se presentan y discuten los resultados obtenidos de la aplicación de esta técnica en la evaluación de 16 motores de 13.8 kV.

### 3.2 INTRODUCCIÓN

El motor de inducción de gran capacidad (hasta 6000 HP) y en tensiones de 13.8 kV es un equipo de gran aplicación en la industria, donde una falla repentina de estas máquinas puede resultar en graves consecuencias. Debido a esto, resulta necesario asegurar su continuidad operativa mediante la detección oportuna de fallas incipientes originadas por los esfuerzos eléctricos, mecánicos y térmicos, a los que se encuentra sometido durante su operación.

Como ya se ha mencionado anteriormente, la presencia de un alto nivel de descargas parciales en un motor de gran capacidad de media o alta tensión, es un claro indicativo de la existencia de un problema en el sistema aislante, que puede evolucionar hacia una falla, por lo que su detección resulta importante para determinar el estado del motor.

El efecto dañino de las descargas parciales se conoce desde hace varios años, por lo que algunos equipos se evalúan en fábrica siendo aún nuevos, bajo condiciones controladas. Sin embargo, al realizar las mediciones de descargas parciales con esa misma sensibilidad, una vez que los motores se encuentran instalados y operando dentro de un proceso, no se obtienen los mismos resultados.

Debido a que las nuevas estrategias de mantenimiento se basan en la condición real del equipo (mantenimiento predictivo), se requiere de nuevas técnicas de

*evaluación en línea*, que permitan determinar el estado operativo de los motores operando en condiciones nominales

En este capítulo se presenta una técnica de evaluación *en línea* de motores de gran capacidad, basada en la medición de descargas parciales (DP's) utilizando la técnica de medición en banda ultra ancha (UWB), misma que permite reducir el problema de interferencia electromagnética durante las mediciones que se realizan en planta.

Se dice que el diagnóstico es *en línea* porque dicha técnica, permite diagnosticar los equipos, aunque éstos se encuentren energizados y operando normalmente.

Posteriormente se presentan y analizan los resultados obtenidos de la aplicación de esta técnica al evaluar el estado de los aislamientos de 16 motores de 13.8 kV, operando en una planta de bombeo de hidrocarburos y en un centro procesador de gas.

### **3.3 TÉCNICA DE DETECCIÓN DE DP's POR EL MÉTODO DE BANDA ULTRA ANCHA (UWB)**

En las plantas donde se encuentran instalados motores de gran capacidad, la interferencia electromagnética es alta dentro del rango normalizado de frecuencias de medición para descargas parciales (DP's). Esta interferencia electromagnética es el principal obstáculo para el diagnóstico.

Las frecuencias normalizadas para medición de DP's se encuentran entre 30 y 500 kHz, y se definen dos tipos de anchos de banda: el primero identificado como de banda ancha tiene un ancho similar al de la frecuencia central de medición y se encuentra entre 100 y 300 kHz; y el segundo denominado como de banda angosta, donde el ancho de banda puede ajustarse entre 5 y 30 kHz.

Sin embargo como ya se mencionó, estos valores de frecuencia no están relacionados en lo absoluto por el fenómeno físico de las descargas parciales o con su evolución en el tiempo. Más bien, estos límites se definieron con la finalidad de estandarizar las mediciones y poder comparar resultados de evaluación en fábrica de equipos nuevos entre unos cinco laboratorios distribuidos en diferentes partes del mundo, al final de la década de los sesentas.

Mediante mediciones en laboratorio bajo condiciones controladas de interferencia<sup>1</sup>, se demuestra que las formas de onda de la corriente producida por las DP's pueden alcanzar frentes de corta duración, con valor aproximado a 0.7 nseg. Si partimos de este hecho, tenemos:

$$\tau = 0.7 \text{ nseg} = 0.7 \times 10^{-9} \text{ seg}$$

Además, considerando que:

$$\tau = \frac{1}{f} \therefore f = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{0.7 \times 10^{-9}} = 1.428 \text{ GHz}$$

Para estos valores de frente de onda se tienen frecuencias del orden de los GHz, que corresponden al tiempo en que el fenómeno de ionización puede ocurrir dentro de los defectos del aislamiento que originan las descargas parciales<sup>2,3</sup>. Al analizar las señales de DP's en este amplio espectro de frecuencia que excede al rango normalizado de banda ancha, se buscó una nueva nomenclatura que permitiera su designación. Fue así como se definió el término de mediciones de DP's en Banda Ultra Ancha<sup>4</sup>.

La técnica de detección de DP's por el método UWB basa su efectividad en la adquisición de señales de frecuencias centradas en el rango de 20 a 1000 MHz, obtenidas mediante sensores selectivos de alta frecuencia.

### **3.4 METODOLOGÍA PARA LA MEDICIÓN EN PLANTA DE DP's APLICANDO TÉCNICAS DE UWB**

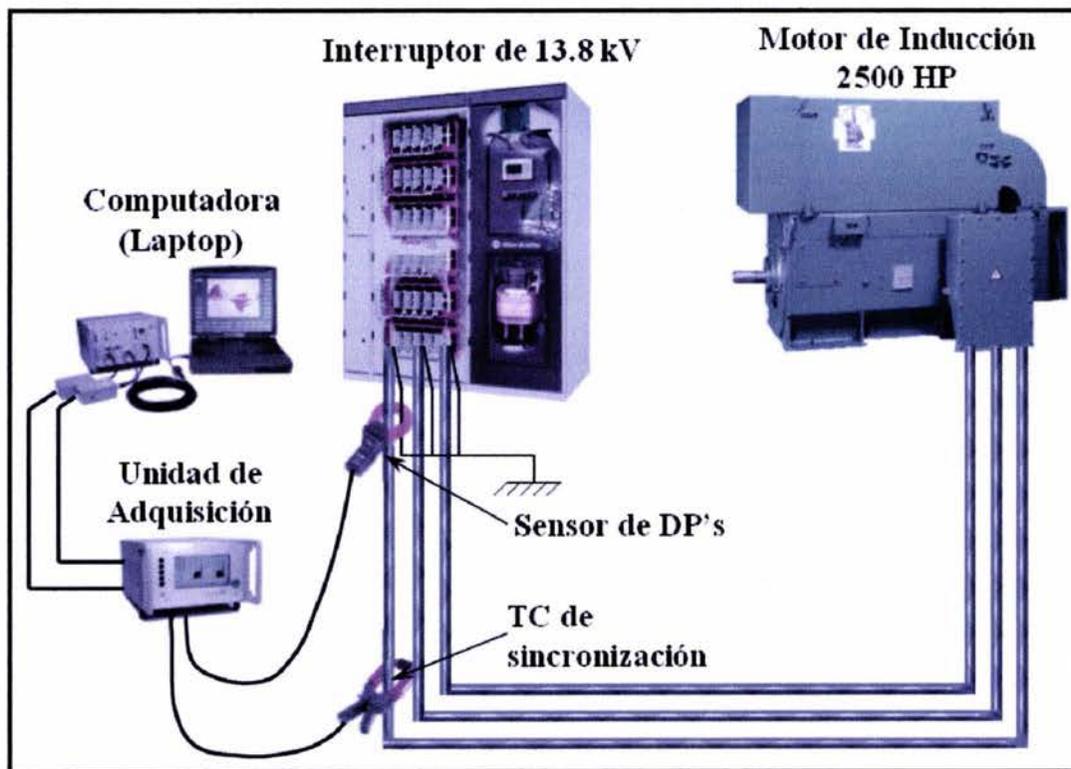
En las terminales de almacenamiento y bombeo de hidrocarburos, así como en los centros procesadores de gas del país, generalmente se cuenta con generación propia, que mediante un circuito alimentador principal, energiza el bus de la planta de bombeo. Es una práctica común el efectuar el control de procesos desde un cuarto donde se encuentran instalados los tableros de control, a los que son conectados grupos de motores de gran capacidad. La conexión entre los tableros de control y los motores se realiza mediante cables de energía subterráneos a tensiones de 4.16 y 13.8 kV. Este arreglo resulta muy útil para el empleo de la técnica de detección en línea de descargas parciales.

La técnica de medición en línea utilizada en este trabajo, consiste en usar la conexión de tierra de los cables aislados de los alimentadores del motor para realizar la medición de las características de DP's.

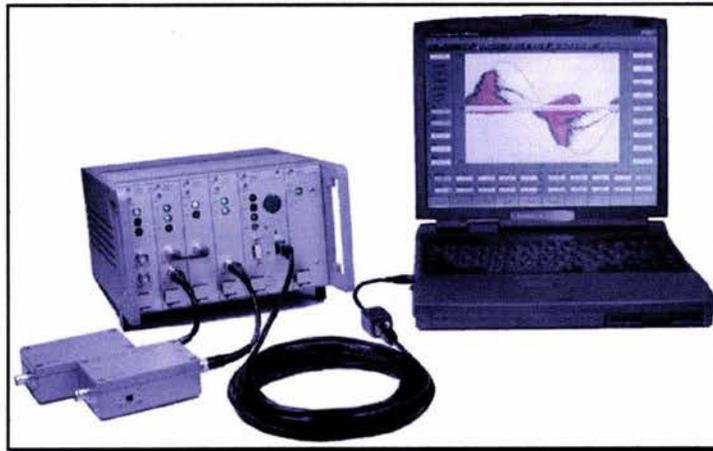
El circuito de prueba utilizado para la medición se muestra en la Fig. 3-1.

Se usa un sistema de medición de DP's desarrollado por la compañía Power Diagnostix Systems GMBH. Este equipo, mostrado en la figura 3.2, está formado por una unidad de adquisición y procesamiento de señales denominado ICM Compact (Fig. 3.2 a) e ICM System (Fig. 3.2 b).

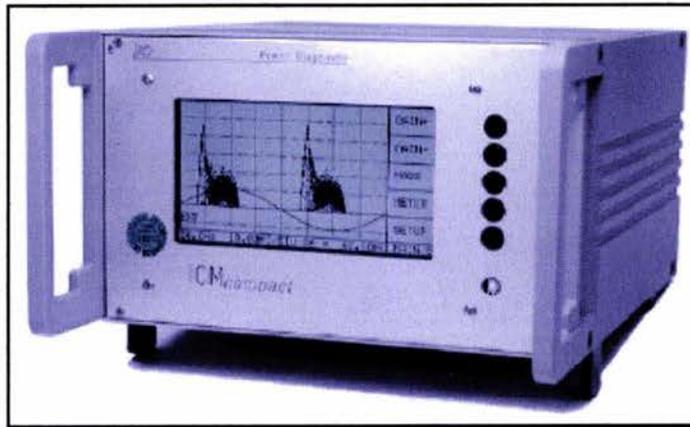
Durante la medición se usa un transformador de corriente tipo gancho para sincronizar la señal de referencia, el cual se instala antes de la cinta metálica que conecta a tierra la terminal del cable de energía donde se tiene el potencial de tierra. Esta terminal constituye uno de los caminos principales para el flujo de las señales de descargas parciales hacia tierra. Una de las grandes ventajas que proporciona este método, es que debido a lo anterior, no hay riesgo de hacer contacto con zonas de alta tensión.



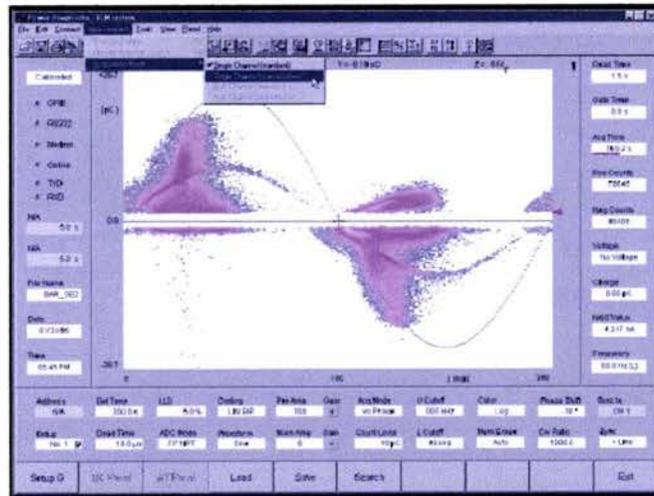
**Fig. 3-1.** Circuito de medición de descargas parciales en motores de alta tensión.



a) ICM System.



b) ICM Compact.



b) Software.

**Fig. 3-2.** Power Diagnostix System GMB; a) ICM System; b) ICM Compact; c) Software.

Como se observa en la Fig. 3-1, el equipo de medición registra las señales de descargas que ocurren en el motor, en los cables alimentadores y en el bus al que están conectados. Sin embargo, el nivel típico de descargas, tanto en los cables como en el bus es de menor magnitud al nivel típico de descargas que ocurren en los devanados del motor<sup>1</sup>. Esta diferencia natural, debida a la construcción del sistema de aislamiento de cada equipo, es una ventaja que contribuye a la identificación de la actividad de descargas parciales en el motor bajo prueba.

### **3.5 EVALUACIÓN DE MOTORES OPERANDO EN PLANTA**

#### **3.5.1 Motores Probados**

La técnica de medición de descargas parciales en línea por el método de banda ultra ancha se aplicó en la evaluación de 16 motores de gran capacidad. De estos motores evaluados, trece motores se encuentran instalados y operando en una terminal de almacenamiento y bombeo de hidrocarburos y tres se encuentran operando en un centro procesador de gas.

Todos los motores evaluados cuentan con al menos 20 años de operación, y durante este tiempo, han sido sometidos a paros y arranques constantes a tensión plena, ocasionando muy probablemente sobretensiones transitorias que inciden directamente sobre los devanados del estator, y sobrecorrientes transitorias que pueden ocasionar daños en los rotores.

#### **Planta 1. Terminal de Almacenamiento y Bombeo de Hidrocarburos**

Los trece motores probados son de inducción, tipo jaula de ardilla horizontales, trifásicos de 2,500 HP, 13.8 kV y para uso continuo dentro de una casa de bombas. En esta planta, los circuitos de control y medición de los motores de 13.8 kV se encuentran instalados en tableros tipo Metal Clad. Para efecto de su identificación, los motores se denominaron M-1 a M-13.

## **Planta 2. Centro Procesador de Gas**

Este complejo tiene cinco motores de inducción con rotor de jaula de ardilla, que operan en las instalaciones de la Planta Criogénica y son fundamentales para el proceso de producción del CPG. De los tres motores probados, dos tienen una potencia de 3,500 HP y uno de 6,800 HP, el voltaje nominal de los tres motores es de 13.8 kV. Para efecto de su identificación, se denominaron M-14 a M-16.

### **3.5.2 Calibración de los Sensores**

Si consideramos que los motores probados, por lo general, se encuentran instalados muy próximos al cuarto de control y de tal forma que la longitud de los cables alimentadores desde los motores hasta el cuarto de control es similar, se consideró que realizando la calibración en dos circuitos representativos, éstas serían válidas para el total de las mediciones, siendo que el porcentaje de error es casi imperceptible.

Para el caso de los motores de la terminal de almacenamiento y bombeo de hidrocarburos, se inyectó un pulso conocido de 10,000 pC en el circuito del motor M-9 y en el circuito motor M-1. La calibración del equipo de medición se realizó con este pulso registrado en el otro extremo del cable, en el cuarto de control de la casa de bombas.

Para el caso del CPG, se realizó el mismo procedimiento utilizando el circuito del motor M-16 y de acuerdo con los resultados obtenidos en la calibración, se consideró que la longitud de los cables de alimentación de los motores no atenúan las señales de DP's.

Con base en estos resultados, obtenidos durante el proceso de calibración, se consideró que los sensores pueden instalarse en los cables de energía a la llegada en el interruptor, en el cuarto de control de los motores. Este es un hecho importante, dado que se evita el abrir la caja de conexiones de los motores que se encuentran en operación.

### 3.5.3 Ejecución de Pruebas en Planta

La evaluación de los motores se efectuó, de acuerdo con el procedimiento indicado en el punto anterior, mediante la colocación del sensor de alta frecuencia CT100 en los cables de alimentación del motor, en el lado del cuarto de control. Adicionalmente se instaló un transformador de corriente de la marca Tektronix, en la fase evaluada para registrar la forma de onda de la corriente de alimentación de 60 Hz y sincronizar la base senoidal del osciloscopio del equipo de medición de descargas parciales.

La medición y el registro digital del nivel de descargas parciales se llevaron a cabo en cada uno de los cables alimentadores de las fases de todos los motores. El circuito de prueba utilizado para la medición se muestra en la Fig. 3-1.

### 3.5.4 Resultados Obtenidos

En la Tabla 3-1 se presentan los resultados obtenidos de la medición de las descargas parciales en los dieciséis motores, evaluados en sitio durante operación normal. En esta tabla se incluyen los niveles de descargas obtenidos por fase en nC, así como las observaciones respecto del historial de los devanados del estator.

MOTOR	FASE	DESCARGAS nC	OBSERVACIONES
M-1	A	10	Reparado
	B	24	
	C	14	
M-2	A	120	Original
	B	70	
	C	70	
M-3	A	18	Reparado
	B	36	
	C	16	
M-4	A	36	Nuevo
	B	23	
	C	25	
M-5	A	100	Reparado
	B	22	
	C	28	
M-6	A	28	Nuevo
	B	15	
	C	20	
M-7	A	36	Reparado
	B	36	
	C	48	
M-8	A	75	Original
	B	75	
	C	112	
M-9	A	36	Reparado
	B	48	
	C	48	
M-10	A	30	Reparado
	B	30	
	C	48	
M-11	A	27	Reparado
	B	30	
	C	36	
M-12	A	60	Nuevo
	B	120	
	C	60	
M-13	A	180	Reparado
	B	180	
	C	570	
M-14	A	86	Reparado
	B	15	
	C	63	
M-15	A	38	Reparado
	B	31	
	C	21	
M-16	A	165	Reparado
	B	84	
	C	21	

**Tabla 3-1.** Nivel de DP's en los motores de 13.8 kV probados.

### 3.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

*Entre mayor sea la magnitud de las DP's, mayor es el grado de deterioro del aislamiento. El aislamiento ideal es aquel que no presenta DP's.* De esta premisa, es posible efectuar una comparación y crear una clasificación inmediata del estado dieléctrico de los motores.

El motor identificado como M-13 registró el mayor nivel de descargas, mientras que M-1 registró los valores más bajos. De la información obtenida por el usuario, se sabe que ambos motores fueron reparados y sus devanado sustituidos, sin embargo, se deduce que la calidad de la reparación del devanado del motor M-13 fue de menor calidad que la del motor M-1, o que durante la operación normal del motor M-13 se han iniciado uno o más mecanismos de deterioro que se están manifestando con un alto nivel de DP's.

Con el registro y clasificación de los motores de acuerdo con el nivel de DP's en sus devanados, se cumple un objetivo de la técnica de medición.

Otro de los objetivos de la técnica, es identificar los mecanismos de deterioro que se están presentando en los motores. Esta información se obtiene de los patrones de descargas desplegados en los mapas  $N-Q-\Phi$ , obtenidos de la medición.

Actualmente no existen muchos trabajos sobre la medición en línea de descargas parciales en motores, mucho menos una norma nacional o internacional que establezca criterios de aceptación o rechazo en cuanto al nivel de descargas parciales que se registra mediante la aplicación de este método. Sin embargo, existen algunas recomendaciones de grupos como el IERE (International Electrical Research Exchange)<sup>5</sup>, donde basándose en la experiencia de varios grupos de trabajo, han emitido algunos criterios sobre la interpretación de los patrones de DP's para la identificación del origen de las descargas parciales presentes en los sistemas aislantes de equipos eléctricos. Estos criterios se muestran en la Tabla 3-2.

Como una primera etapa en la aplicación de esta técnica, el análisis de los resultados obtenidos en este trabajo se hace con referencia a estos criterios.

Q máx (nC) (1.25 Vn)	Estado del Sistema Aislante
$Q \leq 10$	En buenas condiciones
$10 < Q \leq 30$	En condiciones de continuar su operación
$Q > 30$	Es necesario llevar a cabo una inspección y determinar el origen de las descargas

Tabla 3-2. Recomendaciones del IERE para evaluar un sistema aislante de acuerdo con su nivel de DP's.

### 3.6.1 Motores en Condiciones de Operación

La Figura 3-3 muestra el mapa de descargas obtenido en la fase 1 del motor M-1. En esta fase se registraron 10 nC que fue el menor nivel de descargas parciales del grupo de motores de la Planta. Los motores que se encontraron en buenas condiciones fueron los motores M-1, M-6, M-4, M-9 y M-10, aunque estos últimos dos registraron un nivel de 48 nC, 18 nC por arriba de lo recomendado por IERE, sin embargo comparado con el nivel de DP's que se registró en los otros motores se estima que el aislamiento esta en condiciones aceptables para continuar en operación.

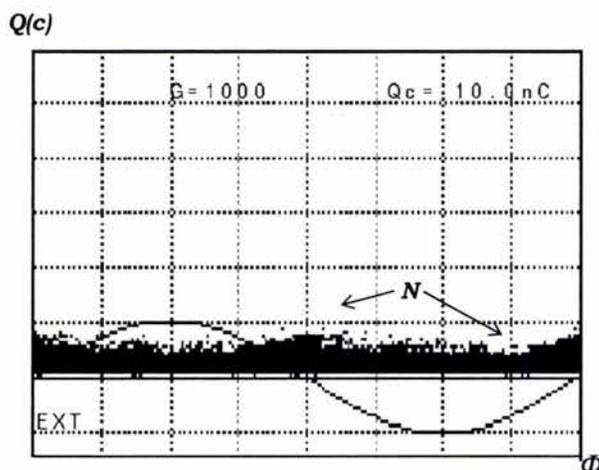


Fig. 3-3. Mapa de descargas N-Q-Φ, de la Fase 1 del motor M-1, 10 nC/div.

### 3.6.2 Motores con Descargas a la Ranura

En la Figura 3-4, se muestra el mapa de DP's de la fase 3 del motor M-13. Se distingue que las descargas en el ciclo negativo son mayores que las del ciclo

positivo en relación de 5:1. Este patrón y el alto nivel de DP's (570 nC) son típicos de la actividad de descargas a la ranura (descargas entre la superficie de las bobinas y las laminaciones del núcleo de estator).

Las fases 1 y 2 también presentaron este comportamiento, aunque con un nivel inferior de 180 nC. Este mecanismo de deterioro es el más severo desde el punto de vista eléctrico para el aislamiento. El nivel de DP's que se registró en este motor es extremadamente alto.

Dado que las descargas a la ranura pueden llevar a la falla del aislamiento, se recomendó su paro inmediato para revisar el devanado y evitar una falla prematura.

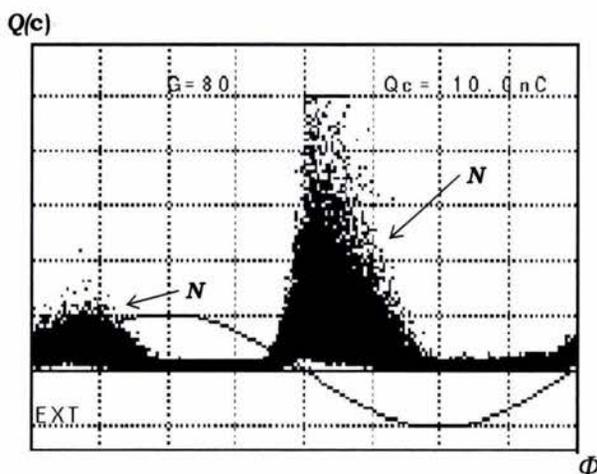


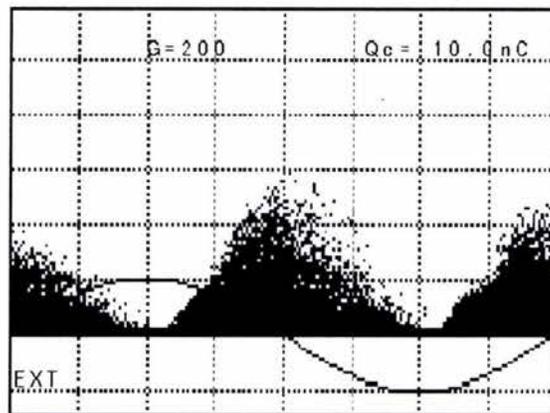
Fig. 3-4. Mapa de descargas N-Q- $\Phi$ , de la fase 3 del motor M-13, 150 nC/div.

### 3.6.3 Motores con Distorsión de Graduación de Campo

La Figura 3-5, muestra el patrón de las DP's de la fase 2 del motor M-12. Este patrón de DP's es distinto al que se obtuvo en el motor M-13. Las DP's tienen magnitudes similares en ambos ciclos, por lo que se deduce que se trata de un mecanismo de deterioro diferente. Este patrón de descargas se presentó en los motores M-8 y M-12, con magnitudes similares de 120 nC, en una de las fases de cada motor. Aun cuando estos motores presentaron valores de DP's similares, su historial es diferente, el motor M-8 conserva su devanado original que data de hace 25 años, mientras que el motor M-1 tiene un devanado nuevo.

En ambos motores puede tratarse de contaminación depositada en los cabezales, que impide la correcta graduación de campo eléctrico. Otra causa puede ser el

deterioro o mala aplicación (en el caso del motor nuevo) de la pintura graduadora. En el caso del motor original, el alto nivel de descargas puede tener como origen la delaminación del aislamiento, causada por la separación de cintas aislantes, solo cuando se trata de hojuela de mica aglutinada con asbesto o resina poliéster.



**Fig. 3-5.** Mapa de descargas N-Q-Φ, de la Fase 2 del motor M-12, 60 nC/div.

Durante la aplicación del pulso de calibración en la caja de conexiones del motor M-8, se identificó polvo blanco entre los conductores de las fases del motor y la micarta que los sostiene. Este polvo es evidencia de que en esta zona se presenta ionización, la cual podría estar contribuyendo con los altos valores de DP's que se registran en este motor.

#### 3.6.4 Motores con Problemas Específicos

En las fases B y C del motor M-5 se midió un nivel de DP's de 22 y 28 nC respectivamente, este resultado indica que el aislamiento de estas fases se encuentra en buenas condiciones. En la fase A se registró un nivel de 100 nC que indica una condición anormal del aislamiento. Se considera que resulta difícil que una fase se deteriore más que las otras dos, si todo el devanado está sometido a los mismos esfuerzos de operación. La alta actividad de DP's en la fase A debe tener como origen un defecto puntual, que es necesario revisar.

### 3.7 BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- Shengyou Gao, Fuqi Li, Wensheng Gao, Kexiong Tan, Deheng Zhu. "On-Line Partial Discharge Monitoring System for Generators and Power Transformers Arranged in a Power Plant". XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering. Delft, Netherlands, 25-29th August 2003.
  - R. Heinrich, S. Schaper, W. Kalkner. R. Plath. A. Bethge. "Synchronous Three Phase Partial Discharge Detection on Rotating Machines". XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering. Delft, Netherlands, 25-29th August 2003.
  - Stone, G.C.; Sedding, H.G.; Costello, M.J. "Application of Partial Discharge Testing to Motor and Generator Stator Winding Maintenance". Industry Applications, IEEE Transactions on, Volume: 32 Issue: 2, March-April 1996 Page(s): 459 -464.
  - Kouadria, D.; Watt, G. "Partial Discharge Patterns and the Identification of Defects in High Voltage Stator Windings Insulation". Dielectric Materials, Measurements and Applications, 2000. Eighth International Conference on (IEEE Conf. Publ. No. 473), 17-21 Sept. 2000 Page(s): 236 -240.
  - Mackinlay, R.R. "Discharge Measurements on High Voltage Distribution Plant". Developments Towards Complete Monitoring and In-Service Testing of Transmission and Distribution Plant, IEEE Colloquium on, 31 Oct 1990 Page(s): 9/1.
  - MC I. R. Campuzano, Ing. A. Carvajal, Dr. V. R. García Colón, "Técnica de Medición de Descargas Parciales en Línea para la Programación del Mantenimiento de Motores de Alta Tensión". Instituto de Investigaciones Eléctricas. Gerencia de Equipos Eléctricos, Temixco, Morelos.
- 
- <sup>1</sup> F. A. Carvajal Martínez, L. Fernando Arcos Zamora. "Diagnóstico en Línea de Motores de Inducción Mediante el Análisis del Espectro en Frecuencia de las Corrientes de Fase". Duodécima Reunión de Verano de Potencia, RVP-AI/99. IEEE Sección México, 1999.
- <sup>2</sup> Brosche, T. Hiller, W., Fauser, E., Pfeiffer, W., "Novel Characterization of PD Signals by Real-Time Measurement of Pulse Parameters", IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, Vo. 6 No. 1, Feb. 1999, pp. 51-59.
- <sup>3</sup> V.R. García Colón H., *Evolution of Partial Discharges Waveshapes in Spherical Voids Using Ultra Wide Band Techniques*, PhD Thesis, University of Manchester Institute of Science and Technology, UMIST, August 1994.
- <sup>4</sup> Kawada, M., Kawasaki Z., Matsuura K., "Time-Frequency Analysis of E-M Signals Emitted from a Partial Discharge Occurring in GIS using Wavelet Transform", Conf. Record of the 1998 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Arlington, Virginia, USA, June 7-10, 1998, pp. 57-60.
- <sup>5</sup> Central Research Institute of Electric Power Industry, "An Insulation Deterioration Diagnostic Method for Generator Windings", Aki, Shuichi, Special Document for IERE members (R9019), Japan, 1991.

# CAPÍTULO 4

## DP's APLICADAS A TRANSFORMADORES



## 4.1 RESUMEN

Se presenta el uso de un sistema de detección de descargas parciales que utiliza técnicas de medición de banda ultra ancha (UWB), y sensores de campo cercano, instalados en el yugo del núcleo de un transformador de potencia<sup>1</sup>. Este sistema permite la detección, medición y diagnóstico de la actividad de descargas parciales en el rango de frecuencia de 100 MHz, que corresponde al mismo rango en que ocurre el fenómeno de descargas parciales.

La aplicación del sistema UWB se demuestra en un transformador de potencia de 20 MVA, 115/13.8 kV, durante las pruebas de recepción en fábrica. Los resultados obtenidos permiten una sensibilidad de 5 pC, hasta con distancias de 90 cm y es posible diferenciar entre señales generadas en electrodos metálicos o dieléctricos, aún en condiciones de interferencia electromagnética típica de una fábrica de transformadores.

## 4.2 INTRODUCCIÓN

El fenómeno de degradación por la acción de descargas parciales se reconoce como uno de los principales factores en la falla prematura de equipos de potencia<sup>2</sup>.

Para reducir su impacto, los equipos nuevos como los transformadores de potencia se evalúan antes de salir de fábrica, mediante pruebas de voltaje inducido con medición de DP's<sup>3</sup>.

Sin embargo, al trasladarlos a su lugar de instalación, los transformadores viajan sin aceite ni boquillas, por lo que al ponerse en servicio, se ven expuestos a factores de riesgo como humedad, contaminación, aflojamiento de devanados durante el transporte, ingreso de personal para instalación de boquillas y conexiones, etc. Todos estos factores pueden alterar las condiciones originales de diseño y propiciar un punto donde se presenten descargas parciales, que evolucionen en una falla prematura del transformador.

Debido a los altos requerimientos de potencia de energización y la dificultad de controlar el voltaje aplicado, la prueba de voltaje inducido con medición de descargas parciales en transformadores de potencia rara vez se realiza en campo<sup>4</sup>.

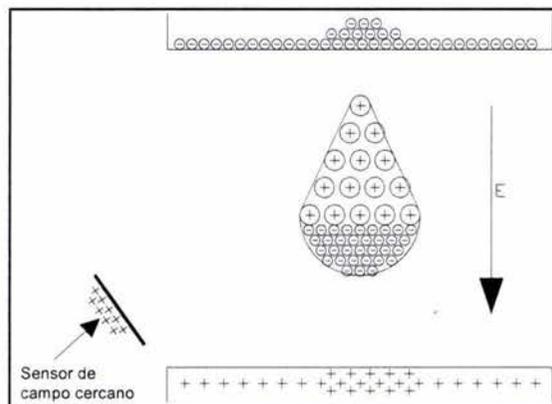
Para mantener la confiabilidad de los transformadores de potencia, tradicionalmente se utilizan métodos acústicos<sup>5</sup> o químicos<sup>6</sup>, debido a la dificultad que representa utilizar los métodos eléctricos en un ambiente de alta interferencia electromagnética, como el encontrado en los sitios de instalación de transformadores. Sin embargo, siendo las descargas parciales un fenómeno eléctrico, resulta ventajoso efectuar su detección midiendo el campo electromagnético que éstas generan, pues de esta manera, puede obtenerse información valiosa relacionada con la ubicación de la descarga, así como el tipo de material en donde ésta tiene lugar.

### 4.3 FÍSICA DE LA DESCARGA

En transformadores, las descargas parciales generalmente tienen lugar en las cavidades gaseosas que se forman al elevarse localmente la temperatura del aceite aislante, debido al incremento de pérdidas dieléctricas causadas por concentraciones de campo eléctrico<sup>7</sup>.

Considerando que los tiempos de viaje electrónicos para desencadenar una descarga parcial tienen una duración de unos cuantos nanosegundos, entonces el campo electromagnético que genera el reacomodo de carga que forma dicha descarga parcial se encuentra en el rango de 20 a 1000MHz<sup>8,9,10</sup>.

Este campo electromagnético inducido por el movimiento de las cargas, se puede entender como una onda electromagnética transversal a la propagación(TEM) que se propaga en todas direcciones y que induce un potencial en las superficies conductoras que se ven afectadas por el campo transitorio de la descarga, como se muestra en la Fig. 4-1.



**Fig. 4-1.** Inducción de campo electromagnético en sensores de campo cercano.

La técnica de detección de DP's por el método de banda ultra ancha (**UWB**), considera que la inducción de cargas en el sensor de campo cercano se realiza en tiempos del orden de la ocurrencia de la descarga parcial, considerando que la capacitancia del circuito asociado al sensor de campo cercano es muy pequeña.

De esta manera, la técnica requiere electrónica asociada de alta velocidad, resolviendo las señales en un rango de 20 a 1000 MHz.

Como se vio en el capítulo 1, el rango cercano a 1000 MHz es considerado como de banda ultra ancha, siguiendo la recomendación de la normatividad internacional<sup>11</sup>, donde la **banda ancha** de medición de descargas parciales está definida en el rango de 30 a 600 kHz.

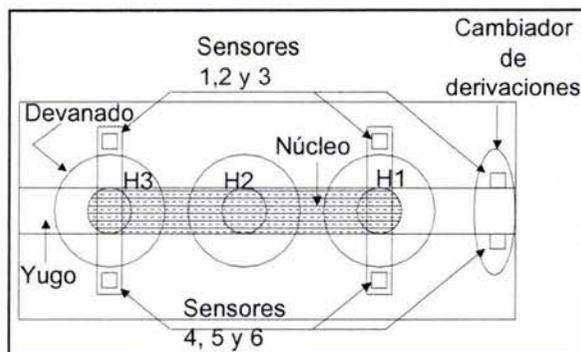
#### 4.4 EXPERIMENTACIÓN

Para realizar la comparación de la técnica de detección de descargas parciales normalizada de banda ancha con la de UWB, se acondicionó un transformador de potencia de 20 MVA, 115/13.8 kV, durante las pruebas de recepción en fábrica.

Se instrumentó también el método convencional en las boquillas de alta y baja tensión, conectando impedancias de detección en los taps capacitivos de cada una de ellas.

La señal de estas impedancias se conectó a un detector de descargas parciales con registro digital mediante un multiplexor que permite la medición secuencial de cada impedancia. Este sistema se calibró obteniéndose sensibilidades de 20 a 40 pC.

El sistema UWB utilizó 6 sensores activos, colocados en la estructura del yugo del núcleo, como se muestra en la Fig. 4-2 y 4-3.



**Fig. 4-2.** Ubicación de los sensores en el yugo del transformador.  
Vista de planta del transformador.

Los sensores de campo cercano utilizados fueron desarrollados y construidos en el IIE, probando su respuesta en frecuencia y resolución espacial de señales simuladas de descargas parciales bajo condiciones de laboratorio<sup>12</sup>. Posteriormente se adecuaron para su operación en ambientes típicos del interior de un transformador, con electrónica de tipo militar para soportar temperaturas de hasta 125°C y presiones de 15µm de mercurio, así como su inmersión en aceite.

Uno de los prototipos instalados en este transformador, se aprecia en la Fig. 2-5 del capítulo 2.



**Fig. 4-3.** Ubicación de los sensores en el yugo del transformador.  
Ubicación del sensor 2 a través del registro hombre.

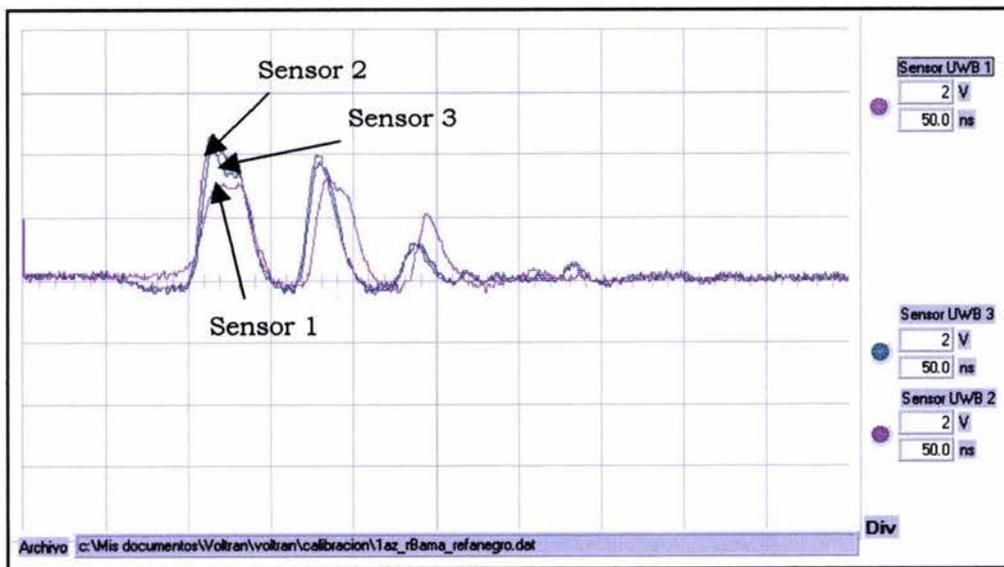
ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA

Las señales provenientes de los sensores son acondicionadas y digitalizadas por un osciloscopio digital de 1GS/s, para posteriormente procesar la señal, desplegarla y almacenarla en una computadora personal convencional.

Las pantallas mostradas en la siguiente sección, se obtuvieron de este sistema de digitalización y registro.

#### 4.5 RESULTADOS

Inicialmente, se realizó la calibración del sistema aplicando un pulso en la terminal de alta tensión H1. El pulso aplicado fue de 100 pC, siendo el de menor magnitud disponible en ese calibrador con trazabilidad a patrones internacionales. Esta señal fue registrada por los sensores 1, 2 y 3, como se aprecia en la Fig. 4-4.



**Fig. 4-4.** Respuesta de los sensores de campo cercano 1, 2 y 3 a un pulso de calibración de 100 pC aplicado en H1.

La señal obtenida para 100 pC tiene una magnitud pico de 4 V y considerando que el sistema tiene sensibilidad de 2 mV, teóricamente es posible captar señales de hasta 0.05 pC. En la misma Fig. 4-4, se aprecia el retraso de tiempo entre los diferentes sensores, debido a los tiempos de arribo de señal, considerando que todos los sensores tenían exactamente la misma línea de transmisión entre su salida y el sistema de digitalización y registro. Este retraso permite conocer la ubicación de la fuente de descarga, considerando que se encuentra cercana al

sensor 2, que corresponde a la fase H1 y la fase H3 donde se ubica el sensor 1 es la más alejada a la zona de descarga.

#### **4.6 UBICACIÓN DE LA DESCARGA**

Utilizando la señal de calibración, es posible calcular las zonas de descargas si se conocen los tiempos de arribo de las señales a los diferentes sensores. El retraso entre la señal de los sensores 2 y 1 corresponde a 10 ns, por lo que considerando una velocidad de propagación de campo electromagnético del 60% de la velocidad de la luz, esta distancia corresponde a 1.8 m. La separación entre las boquillas de alta tensión H1 y H3, donde se ubican los sensores, corresponde a esta distancia. El cambiador de derivaciones se encuentra a una distancia menor de H1, por lo que las señales de los sensores 1 y 2 está desfasada menos de 5 ns, correspondiendo a una distancia inferior a 90 cm.

#### **4.7 MEDICIONES DURANTE LA PRUEBA DE INDUCIDO**

La prueba de voltaje inducido al transformador evaluado se realizó según las normas nacionales<sup>13</sup>. En la etapa inicial se ubicaron señales de muy alto nivel (arriba de 2000 pC), que correspondieron a señales de corona, o descargas provocadas por una descarga originada en un electrodo metálico, como se aprecia en la Fig. 4-5. Estas señales saturaron los amplificadores por su magnitud, sin embargo, se puede apreciar por el tiempo de arribo que la señal proviene de las cercanías del sensor 2.

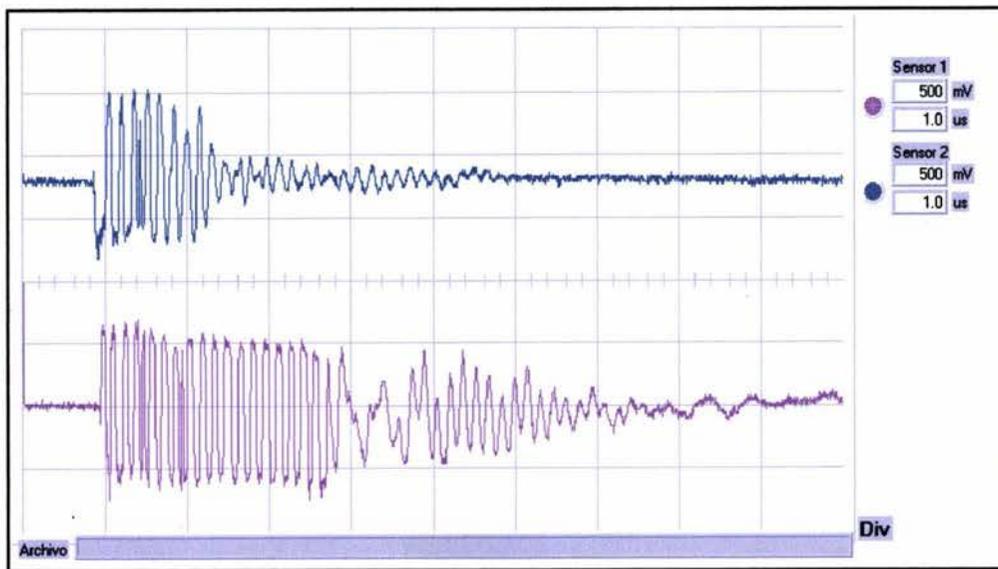


Fig. 4-5. Detección de corona en las boquillas de H1.

Una vez ubicada la señal de corona y corregida la causa, se realizó la prueba obteniendo niveles de descargas parciales del orden de 90 pC, como se presenta en las Fig. 4-6 y 4-7, correspondiente al registro de los detectores convencionales y de UWB respectivamente.

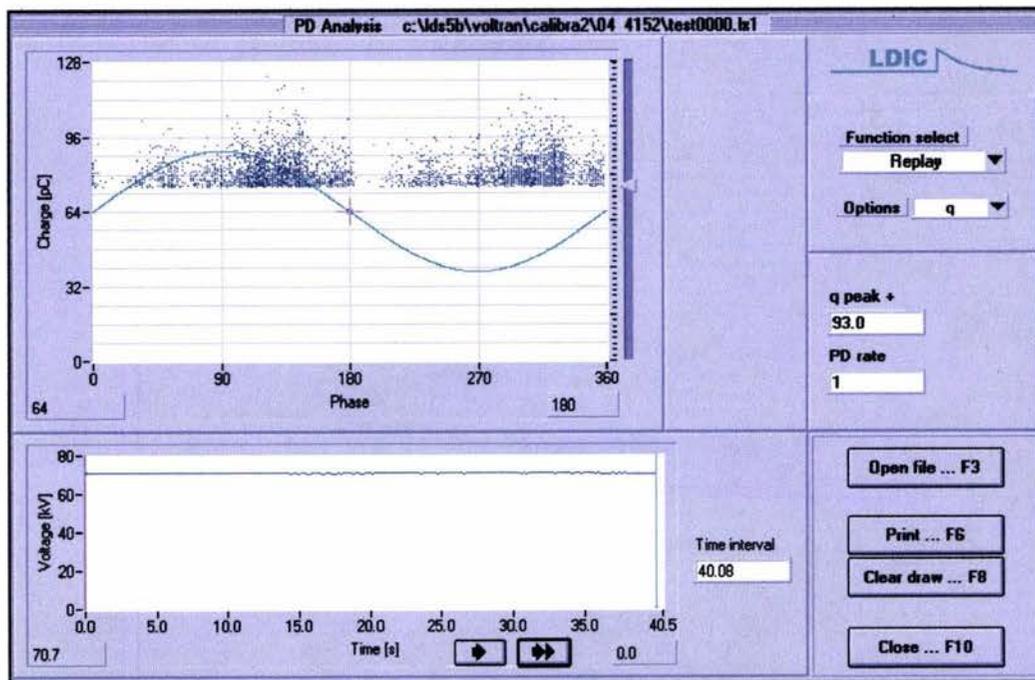
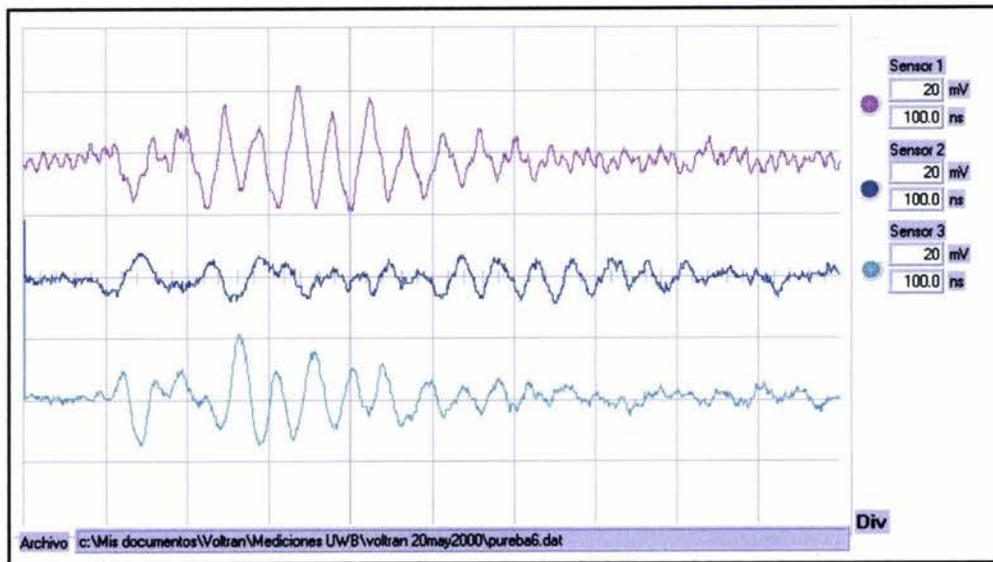


Fig. 4-6. Registro de 93 pC del detector convencional de DP's durante el realce del voltaje. Medición realizada en H1, a 71 kV.



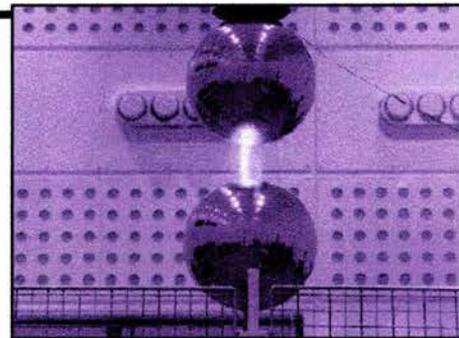
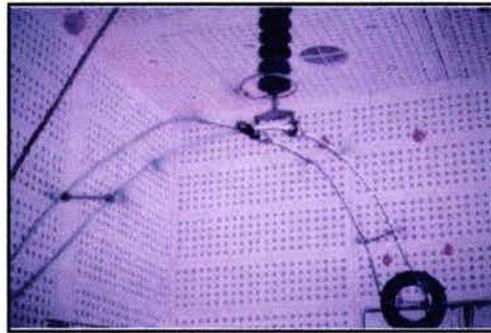
**Fig. 4-7.** Registro de 93 pC del detector UWB de DP's durante el realce del voltaje.  
Medición realizada en sensores 1, 2 y 3 a 71 kV.

En esta ocasión, se puede apreciar que las señales tienen una corta duración y que se encuentran cerca al sensor 1. El tipo de forma de onda y magnitud permite ubicarlas como una señal con las constantes de tiempo típicas de una descarga parcial.

## 4.8 BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- Chang R. Lee, Yong C. Choi, Nam H. Kim, Ja H. Yoon, and Keok C. Nam. "On-line condition assessment of transformers and switchgears". XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering. Delft, Netherlands, 25-29th August 2003.
  - A. Kraetge, W. Kalkner, R. Plath, K.-D. Plath. "The Transient Oil Pressure Measurement as a Diagnostic Tool of the Short Circuit Withstand Capability of Power Transformers". XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering. Delft, Netherlands, 25-29th August 2003.
- 
- <sup>1</sup> V.R. García Colón, J.T. Ramírez-Niño, L. Gómez H. "Monitoreo en Línea de Transformadores de Potencia Utilizando Sensores de Campo Cercano". XIV Reunión de Verano de Potencia. Aplicaciones Industriales y Exposición Industrial RVP-A1/2001. Acapulco Gro. 8 al 14 de Julio del 2001.
  - <sup>2</sup> R. Bartnikas and E.J. McMahon, Editors, "Corona Measurements and Interpretation", in Engineering Dielectrics, Vol. I. STP 669, ASTM Press, Philadelphia, 1979.
  - <sup>3</sup> IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers and IEEE Guide for Short-Circuit Testing of Distribution and Power Transformers, Norma IEEE C57.12.90. New York, USA, 1993.
  - <sup>4</sup> V.R. García-Colón, A. Nava G, et al. "Detección y Evaluación de las Deformaciones del Devanado de un Transformador de Potencia Mediante LVI y Pruebas en Sitio de Descargas Parciales", XIV Reunión de Verano del capítulo de Potencia y Aplicaciones Industriales del IEEE Sección México, RVP-AI 2001, Acapulco, Gro., Julio del 2001.
  - <sup>5</sup> IEEE PC57.127/D2. Trial Use Guide for the Detection of Acoustic Emission from Partial Discharges in Oil Immersed Transformers, 1989.
  - <sup>6</sup> M. Duval, P. Gervais, G. Bélanger. Update on Hydro-Quebec's Experience in the Interpretation of Dissolved-Gas Analysis in HV Transformers, CIGRE, Simposium Berlin 1993.
  - <sup>7</sup> A. Beroual, M. Zahn, et al. Propagation and Structure of Streamers in Liquid Dielectrics, IEEE Electrical Insulation Magazine, March/April 1998, Vol. 14, No2, pp. 6-17.
  - <sup>8</sup> G. C. Crichton, P.W. Karlsson, A. Pedersen, Partial Discharge in Ellipsoidal and Spheroidal Voids, IEEE Transaction on Electrical Insulation, Vol.24 No.2, April 1989, pp 335 539.
  - <sup>9</sup> P.H.F. Morshuis, *Partial Discharge Mechanisms*, PhD Thesis, Delf University Press, 1993.
  - <sup>10</sup> V.R. García-Colón, *Evolution of Partial Discharges Wave shapes in Spherical Voids Using Ultra Wide Band Techniques*, PhD Thesis, University of Manchester Institute of Science and Technology, UMIST, August 1994.
  - <sup>11</sup> Standard IEC60270. High Voltage Testing - Partial Discharge Measurements, International Electrotechnical Commission, Third Edition, Switzerland, 1996-06.
  - <sup>12</sup> V. R. García-Colón, A. Nava-Guzman, L.A. Salgado-Salgado, R. Canales-Ruiz, "Location and Assessment of Partial Discharge on Substation Equipment Using Ultra Wide Band Techniques", EPRI Substation Equipment Diagnostics Conference VIII, New Orleans, February 2000.
  - <sup>13</sup> Norma CFE K-00006, Transformadores de Potencia de 10MVA y Mayores, Comisión Federal de Electricidad, México, D.F. Agosto de 1995.

# CONCLUSIONES



## *Conclusiones*

- La medición del nivel de descargas parciales mostró ser una herramienta de alta sensibilidad que permite identificar imperfecciones en el aislamiento del equipo eléctrico.
- Con el uso de estas técnicas de UWB, se soluciona la problemática asociada a interferencia electromagnética para mediciones en línea a cables de potencia.
- Además de ofrecer una lectura similar a la obtenida en condiciones de laboratorio, las técnicas de UWB permiten la localización de una descarga y en caso de contar con suficiente ancho de banda, efectuar el diagnóstico sobre el origen de la descarga.
- La técnica en UWB aplicada a motores eléctricos, permite efectuar un programa de mantenimiento preventivo y correctivo en base a los resultados obtenidos.
- El éxito de esta técnica radica en que permite hacer el diagnóstico en línea, esto es, sin necesidad de sacar de servicio el equipo para su diagnóstico.
- La técnica de medición de descargas parciales en línea en los cables alimentadores de los motores de alta tensión, tiene la suficiente sensibilidad para permitir una

clasificación inmediata, de acuerdo con el estado dieléctrico del sistema aislante de sus devanados.

- La interferencia electromagnética presente en la medición en línea de los transformadores, se puede pasar por alto con el uso de los sensores de campo cercano.

★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★

*Este trabajo de investigación pretende dar a conocer las bases en el estudio de las descargas parciales (hasta ahora prácticamente desconocidas) como un método de diagnóstico del estado de los sistemas aislantes. Esto con el fin de que sirva como punto de partida para futuros trabajos que profundicen en el análisis y desarrollo de nuevas herramientas y métodos que busquen solucionar el problema del diagnóstico en línea de los sistemas aislantes en el equipo de potencia, cada vez de manera más eficiente.*

★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★