

# INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION

DIAGNOSTICO EN LINEA DE MOTORES DE GRAN CAPACIDAD MEDIANTE LA DETECCION DE DESCARGAS PARCIALES UTILIZANDO TECNICAS DE BANDA ULTRA ANCHA (UWB)

# TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN INGENIERIA ELECTRICA

PRESENTA



FRANCISCO ANTONIO CARVAJAL MARTINEZ

MEXICO D. F.

2003





#### INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL COORDINACION GENERAL DE POSGRADO E INVESTIGACION

#### ACTA DE REVISION DE TESIS

 En la Ciudad de
 México, D. F.
 siendo las
 17:30
 horas del día
 10
 del mes de

 Octubre
 del
 2003
 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada

 por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de
 la
 E. S. I. M. E.

 para examinar la tesis de grado titulada:

#### "DIAGNOSTICO EN LINEA DE MOTORES DE GRAN CAPACIDAD MEDIANTE LA DETECCION DE DESCARGAS PARCIALES UTILIZANDO TECNICAS DE BANDA ULTRA ANCHA (UWB)"

Presentada por el alumno:		
CARVAJAL	MARTINEZ	FRANCISCO ANTONIO
Apellido paterno	materno	nombre(s)
		Con registro: 0 1 1 0 7 8
Aspirante al grado de:		
	MAESTR	O EN CIENCIAS
Después de intercambiar APROBACION DE LA TES disposiciones reglamentarias	opiniones los <b>SIS</b> , en virtud d s vigentes.	miembros de la Comisión manifestaron SU e que satisface los requisitos señalados por las
	LA COMIS	ION REVISORA
		0
Director de	tesis	T.V
1	2	AUNT
		- Kine
DR. VICENTE ROBOLFO GARCI	GOLON HERNANDEZ	DR. DANIEPOLGUIN SALINAS
Blint	<u></u>	Tought
MERCE TOMAS GNACIO	ASIAIN OLIVARES	DR. BADE VERAZQUEZ SANCHEZ
H. Dengy	Rivas	Marking & Hollow
DR. JAIME-JOSE RODR	IGUEZ RIVAS	MAEN C GILBERTO ENRIQUEZ HARPER
		E EXAMPLE
	EL PRESIDE	NTE DEL COLEGNO
		V. OUL P.N. THERE
a (****	DR. FLORENC	CHO SANGHER SILWA DE ESTUDIOS DE
	t	HISDERADIS E-IMMERIGACION

## RESUMEN

Actualmente en nuestro país, la medición de descargas parciales (DP) no se realiza como parte de los programas de mantenimiento de motores eléctricos de gran capacidad, debido a que no existe una forma práctica de realizar estas mediciones con el motor operando y las mediciones con el motor fuera de operación resultan costosas debido al tiempo durante el cual, el motor deja de realizar su función dentro del proceso en el que se encuentra instalado.

Este trabajo presenta los fundamentos teóricos, la implementación y aplicación de un método no normalizado, que permite el diagnóstico en línea de motores de gran capacidad (hasta 6000 C.P.), basado en la detección de las DP utilizando técnicas de banda ultra ancha (UWB por sus siglas en inglés).

Este método es no invasivo y consiste en la medición de las DP en el conductor y en la conexión a tierra de la pantalla del cable principal de suministro de energía al motor, utilizando un sensor de campo cercano (bobina Rogowski tipo gancho) cuyo ancho de banda de medición es de 2 a 40 MHz, superior al ancho de banda de medición normalizado de 30 kHz a 500 kHz, lo que permite realizar mediciones, sin que estas sean afectadas por la interferencia electromagnética presente en el sitio de instalación del motor. Para su lectura, las señales medidas por este sensor son procesadas para ampliar su duración, digitalizadas y enviadas a un detector digital de descargas parciales convencional.

Este detector, despliega la medición en un patrón o mapa de descargas tipo repeticióncarga-fase (N-Q- $\Phi$ ), este patrón es sincronizado con la corriente de la fase probada, mediante el uso de un sensor inductivo (Transformador de corriente tipo gancho), para facilitar la identificación de cada tipo de problema en el sistema aislante del motor.

Se presentan los resultados obtenidos de la evaluación en línea trece motores de 2500 C.P. a 13.8 kV, instalados y operando en una planta de bombeo de hidrocarburos, mediante la aplicación del método de diagnóstico implementado. Así también se incluyen el análisis y la comparación de estos resultados con valores y patrones de DP de referencia, para identificar el tipo de problema que presenta cada motor evaluado.

# ABSTRACT

At present time in Mexico, partial discharge (PD) measurement is not part of regular maintenance programs for high capacity induction motor, because there is not an established and easy way to perform these measurements while the motor is in normal operation. On the other hand, off–line measurements are expensive due to dead time of the motor during the outage.

In this work a non-standardized method for on-line evaluation of high capacity motors (up to 6000 H.P.) based on ultra wide band (UWB) PD measuring techniques is theoretically supported, implemented and applied.

The method implemented in this work is non invasive and consist in the measurement of PD in the main motor power supply cables and its ground shield connection using a near field sensor (Rogowski coil, clamp-on type) with a bandwidth of 2 to 40 MHz. This frequency is one order of magnitude higher than standardized bandwidth of 30 to 500 kHz. The use of this higher measuring frequency allows proper PD detection and electric interference cancellation.

The measured signals are stretched electronically, digitized and fed to a conventional partial discharge digital detector. The UWB PD detection system used, displays the output in a Pulse repetition frequency-Charge-Phase angle (N-Q- $\Phi$ ) PD pattern to facilitate motor insulation system problems identification. The PD pattern is synchronized to the tested phase current by using an inductive sensor (Current transformer clamp-on type).

The results obtained in thirteen 2500 H.P. motors performed during operating in an Oil Pumping facility are presented, including its analysis and comparison with values and PD patterns reported in literature, to identify the different problems in each evaluated motor.

# CONTENIDO

RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
CONTENIDO	iii
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABLAS	x
LISTA DE SÍMBOLOS	xi

## CAPÍTULO 1 Introducción

1.1	Introducción	1
1.2	Antecedentes	2
1.3	Descripción del problema	4
1.4	Objetivo	5
1.5	Justificación	5
1.6	Alcances del trabajo	6
1.7	Aportación de la Tesis	6
1.8	Organización de la tesis	7

## CAPÍTULO 2 Mecanismos de Falla en el Sistema Aislante del Motor

2.1	Introducción	8
2.2	El sistema aislante del motor de alta tensión y sus principales interfases	9
2.2.1	Interfases del sistema aislante	9
2.2.2	Subsistemas del aislamiento del devanado del estator	10
2.2.3	Interfases microscópicas	12
2.2.4	Interfases macroscópicas	13
2.3	Tipos de sistemas aislantes utilizados en motores	13
2.3.1	Sistemas aislantes termoplásticos	14
2.3.2	Sistemas aislantes termofijos	15
2.4	Causas eléctricas de falla en motores de gran potencia	15
2.5	Esfuerzos en los sistemas aislantes de devanados	17
2.6	Mecanismos de falla del sistema aislante	17
2.7	Los modelos del sistema aislante y de cavidades para el mecanismo de descargas parciales	20

# *CAPÍTULO 3* Detección de Descargas Parciales Mediante la Técnica de Banda Ultra Ancha

3.1	Introducción	23
3.2	Aspectos fundamentales de la detección de DP en Banda	
	Ultra Ancha (UWB)	24
3.3	La Teoría de las cargas inducidas de Pedersen	26
3.3.1	El concepto de cargas inducidas	27
3.3.2	Descripción Maxwelliana	27
3.3.3	Relación entre la carga inducida y los transitorios medidos	30
3.3.4	Pulsos de corriente en los conductores	33
3.3.5	Aplicación a descargas parciales en cavidades	36
3.3.6	Transitorios relacionados con la carga inducida	40
3.4	Implementación de la medición de los transitorios de las	
	descargas parciales	44
3.4.1	Requerimientos de circuitos de medición de DP en Banda	
	Ultra Ancha	44
3.4.2	Circuito de medición de descargas parciales utilizando	
	técnicas de banda ultra ancha	45

# CAPÍTULO 4 Desarrollo de Pruebas en Planta y Análisis de Resultados

4.1	Introducción	48
4.2	Motores probados	49
4.3	Implementación en planta del circuito de medición de descargas parciales utilizando técnicas de banda ultra ancha	
	(DP UWB)	51
4.3.1	Instrumentación utilizada en el circuito de medición DP	51
	U W D	
4.3.2	Circuito de medición de DP UWB implementado	53
4.3.3	Calibración del circuito de medición DP UWB	54
4.4	Diagnóstico de motores aplicando el circuito DP UWB	56
4.4.1	Resultados Obtenidos	58
4.5	Análisis de resultados	73
4.6	Conclusiones del análisis de resultados	77

### CAPÍTULO 5 Conclusiones y Recomendaciones

5.1	Conclusiones	79
5.2	Aportaciones	81

5.3	Recomendaciones	81
	Referencias y Bibliografía	82
APENDICE A	Teoría de las Descargas Parciales	
A.1	Introducción	A-1
A.2	Teoría de avalanchas (Teoría de Townsend)	A-3
A.3	Descargas canal	A-3
A.4	El Modelo ABC de Whitehead	A-4
A.5	El campo eléctrico en una cavidad esférica	A-6
A.6	Mecanismos de inicio de descargas	A-6
APENDICE B	Técnicas Normalizadas para la Detección	de
	Descargas Parciales en Motores	
B.1	Introducción	B-1
B.2	Frecuencias de medición de DP	<b>B-1</b>
B.3	Medición de DP en línea y fuera de línea	B-2
B.3.1	Medición de DP en línea	B-2
B.3.2	Medición de DP fuera de línea	<b>B-</b> 4
B.4	Métodos de detección de DP en motores	B-5
B.4.1	Detección de pulsos eléctricos	B-5
B.4.2	Detección de radiación de radio frecuencia (RF)	B-6
B.4.3	Detección de ozono	B-6
B.4.4	Detección acústica y ultrasónica	B-6
B.5	Sistemas de detección de DP	B-7
B.6	Sistemas de medición de pulsos eléctricos y radiación de radio frecuencia	B-8
B.6.1	Caso 1. TC de RF acoplado con capacitores de 10 nF	B-9

# APENDICE C Identificación de Descargas Parciales (Grupo 21.03 de CIGRE)

Introducción	C-1
Descargas parciales internas en una cavidad dentro del material aislante	C-1
Descargas parciales internas en múltiples cavidades dentro del material aislante	C-2
Descargas parciales externas superficiales	C-2
Descargas parciales internas en una cavidad entre el dieléctrico y el electrodo de tierra	C-2
Descargas parciales internas en cavidades entre el dieléctrico y el electrodo de tierra o entre superficies dieléctricas y metales externos	<b>C-</b> 4
	Introducción Descargas parciales internas en una cavidad dentro del material aislante Descargas parciales internas en múltiples cavidades dentro del material aislante Descargas parciales externas superficiales Descargas parciales internas en una cavidad entre el dieléctrico y el electrodo de tierra Descargas parciales internas en cavidades entre el dieléctrico y el electrodo de tierra o entre superficies dieléctricas y metales externos

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Arreglo típico del aislamiento de devanados para un motor de alta tensión.
Figura 2.2	Arreglo típico de conductores y sistema aislante en la ranura de un motor de alta tensión
Figura 2.3	Arreglo típico de pinturas en la zona del sobretiro recto de la bobina en un motor de alta tensión
Figura 2.4	Esquema de interfases microscópicas sólido-sólido y sólido-gas en el sistema aislante de un motor de alta tensión
Figura 2.5	Resumen de causa de fallas en motores eléctricos (EPRI)
Figura 2.6	Intensidad de la DP versus modo de falla del aislamiento
Figura 2.7	Modelo del sistema aislante para el análisis de descargas parciales
Figura 3.1	Modelo de Townsend para avalanchas iónicas
Figura 3.2	Cargas inducidas en un electrodo de prueba o sensor en la vecindad de una DP en el sistema aislante de un motor
Figura 3.3	Una Carga dq1 en el electrodo de medición 1, inducida por una carga dQ localizada en diferentes posiciones. Se muestran las condiciones de frontera de la función $\lambda$
Figura 3.4	Sistema con dos electrodos metálicos y una cavidad en un dieléctrico
Figura 3.5	Las cargas $dq_1$ y $dq_2$ , inducidas por una carga superficial <b>s</b> $dS$ en el electrodo 1 y 2 respectivamente
Figura 3.6	Circuito eléctrico para la medición de descargas parciales en UWB
Figura 3.7	Sensor de campo cercano en modalidad bobina de Rogowski
Figura 3.8	Diagrama N-Q- $\Phi$ o mapa de descargas parciales
Figura 4.1	Diagrama unifilar de instalación de motores evaluados en planta
Figura 4.2	Vista general de motores de 2500 C.P. evaluados en planta
Figura 4.3	Sensor de campo cercano tipo Rogowski tipo gancho (clamp-on), ancho de banda de 2 a 40 MHz utilizado como sensor en el circuito DP UWB
Figura 4.4	Panel frontal de la unidad de adquisición del detector de descargas parciales utilizados en las pruebas
Figura 4.5	Pre-amplificador utilizado en para acondicionar la señal medida de UWB a convencional en el circuito DP UWB
Figura 4.6	Circuito de medición de descargas parciales aplicando técnicas de banda ultra ancha en motores de alta tensión operando en sitio

Fi	gura	no.
	$\boldsymbol{\omega}$	

#### Página

Figura 4.7	Implementación del circuito de prueba DP UWB en planta	55
Figura 4.8	Implementación del circuito de prueba DP UWB en planta	55
Figura 4.9	Inyección del pulso de calibración de 10,000 pC, en las terminales principales del motor bajo prueba	57
Figura 4.10	Mapa de descargas N-Q- $\Phi$ del pulso de calibración de 10,000 pC	57
Figura 4.11	Realización de mediciones en planta, mediante el circuito DP UWB	58
Figura 4.12	Mapas de descargas obtenidos en el motor M-1	60
Figura 4.13	Mapas de descargas obtenidos en el motor M-2	61
Figura 4.14	Mapas de descargas obtenidos en el motor M-3	62
Figura 4.15	Mapas de descargas obtenidos en el motor M-4	63
Figura 4.16	Mapas de descargas obtenidos en el motor M-5	64
Figura 4.17	Mapas de descargas obtenidos en el motor M-7	65
Figura 4.18	Mapas de descargas obtenidos en el motor M-8	66
Figura 4.19	Mapas de descargas obtenidos en el motor M-9	67
Figura 4.20	Mapas de descargas obtenidos en el motor M-10	68
Figura 4.21	Mapas de descargas obtenidos en el motor M-11	69
Figura 4.22	Mapas de descargas obtenidos en el motor M-12	70
Figura 4.23	Mapas de descargas obtenidos en el motor M-13	71
Figura 4.24	Mapas de descargas obtenidos en el motor M-14	72
Figura 4.25	Comparación entre mapas de descargas, medido y de referencia para el motor M-14 con problemas de descargas a la ranura	76
Figura 4.26	Comparación entre mapas de descargas, medido y de referencia para el motor M-9 con problemas de graduación de campo	77
Figura A.1	Cavidades internas en el sistema aislante de un motor	A-2
Figura A.2	Trayectoria de la descarga parcial externa	A-2
Figura A.3	Modelo ABC. Configuración de electrodos y diagrama equivalente de capacitancias	A-4
Figura A.4	Secuencia de descargas en una cavidad simétrica sometida a un campo de corriente alterna	A-6
Figura B.1	Circuito de medición de descargas parciales con dispositivo de acoplamiento capacitivo de 10 nF y transformador de corriente RF	B-10

Figura B.2	Circuito de medición de descargas parciales con un transformador de corriente RF, colocado en el cable de tierra de los capacitores de protección de sobretensiones	B-10
Figura B.3	Circuito de medición de descargas parciales con un transformador de corriente RF tipo gancho, colocado la parte no aterrizada del cable, cerca de la terminal del motor	B-11
Figura B.4	Circuito normalizado de medición de descargas parciales con dispositivo de acoplamiento (CD), en serie con el capacitor de acoplamiento	B-12
Figura B.5	Circuito normalizado de medición de descargas parciales con dispositivo de acoplamiento (CD), en serie con el objeto bajo prueba	B-12
Figura B.6.	Conexiones para la calibración del circuito normalizado de medición de descargas parciales	B-13
Figura C.1	Diagrama del patrón de descargas parciales internas en una cavidad dentro del aislante	C-1
Figura C.2	Diagrama del patrón de descargas parciales internas en múltiples cavidades dentro del material aislante	C-2
Figura C.3	Diagrama del patrón de descargas parciales externas	C-3
Figura C.4	Diagrama del patrón de descargas internas en una cavidad entre el dieléctrico y el electrodo de tierra	C-3
Figura C.5	Diagrama del patrón de descargas parciales internas en cavidades entre el dieléctrico y el electrodo de tierra o entre superficies dieléctricas y metales externos	C-4

## LISTA DE TABLAS

Página

Tabla 2.1	Causas de fallas eléctricas del motor	16
Tabla 4.1	Características técnicas de los motores evaluados	49
Tabla 4.2	Nivel de descargas parciales en los motores probados	59
Tabla 4.3	Criterios IERE para evaluar un sistema aislante de acuerdo a su nivel de DP	73
Tabla 4.4	Clasificación de motores probados de acuerdo al nivel de DP	74
Tabla 4.5	Clasificación del sistema aislante de motores similares con base en la medición de DP UWB	78

# LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descripción			
С	Capacitancia			
$C_a$	Capacitor formado por los dos electrodos y la parte restante del dieléctrico del sistema del modelo ABC			
$C_b$	Capacitancia entre la cavidad y los electrodos del modelo ABC			
$C_c$	Capacitancia de la cavidad del modelo ABC			
$C_{ij}$	Capacitancia parcial entre los electrodos i-ésimo y j-ésimo			
Ck	Capacitor de acoplamiento al arreglo de capacitores del modelo ABC			
d <b>W</b>	Diferencial de volumen para una densidad de carga volumétrica			
DP	Descargas Parciales			
dQ	Diferencial de carga eléctrica			
$dq_i$	Diferencial de carga inducida en el i-ésimo electrodo			
dS	Diferencial de superficie			
Ε	Campo eléctrico aplicado			
$E_h$	Fuerza del campo en la cavidad			
$E_i$	Tensión de inicio de las descargas parcia les			
h	Es un tensor (un tensor es la idealización matemática de una cantidad física o geométrica cuya descripción analítica relativa a un marco fijo de			
I <sub>ri</sub>	Corriente transitoria que fluye en el conductor cuando se encuentra activa una descarga parcial			
I <sub>i</sub>	Corriente que fluye en el conductor del i-ésimo electrodo cuando el sistema está libre de descargas			
$I_{ti}$	Corriente que fluye alejándose del i-ésimo electrodo en el dieléctrico			

J	Densidad de corriente en un punto dentro de una cavidad durante las actividades de la descarga		
Ν	Frecuencia de repetición de pulsos		
$n_0$	Número inicial de electrones acelerados dentro del campo eléctrico		
р	Presión del gas		
Р	Polarización en un punto del dieléctrico sólido		
Q	Carga eléctrica		
$q_{app}$	Carga aparente		
$q_{cav}$	Cambio de la carga en el capacitor de la cavidad del modelo ABC		
$q_i$	Carga inducida resultante en el i-ésimo electrodo		
$Q_i$	Carga en el i-ésimo electrodo en un sistema con el espacio libre de cargas		
$q_n$	Carga inducida en el electrodo n.		
$Q_s$	Carga neta desplegada en S por la descarga parcial		
ТС	Transformador de corriente		
TC-RF	Transformador de corriente de radio frecuencia		
U	Tensión eléctrica		
U <sub>ci</sub>	Potencial del i-ésimo electrodo		
$U_i, U_j$	Potenciales del i-ésimo y j-ésimo electrodo		
UWB	Ultra Wide Band, Banda Ultra ancha		
V <sub>ci</sub>	Potenciales escalares en $dW$ y $dS$		
V <sub>cvi</sub>	Potencial escalar en un punto del campo electrostático libre de cargas en el vacío		
а	Coeficiente de ionización de Townsend		
h	Coeficiente de acoplamiento del electrón		

- I Factor de proporcionalidad entre la carga libre en el volumen entre electrodos y la carga inducida en el electrodo de medición
- r Densidad de carga volumétrica en el elemento de volumen dW
- *s* Densidad de carga superficial en la superficie del elemento *dS*
- *e* Permitividad absoluta
- $\Phi$  Angulo de fase de un pulso individual de una DP
- $\lambda_0$  Valor que toma la función  $\lambda$  si suponemos que la totalidad del sistema aislante se encuentra totalmente libre de cavidades
- $f_i$  Factor de proporcionalidad entre la carga libre en el volumen entre electrodos y la carga inducida en el electrodo de medición en el vacío
- *e<sub>r</sub>* Permitividad relativa

# capítulo 1

# Introducción

#### 1.1 Introducción

El motor de inducción, en todos sus rangos de tensión eléctrica de operación, es uno de los equipos eléctricos de mayor aplicación en el ámbito industrial. Muchos de estos motores de gran capacidad y en tensiones eléctricas de 4,160 a 13,800 Volts, son utilizados en la industria, donde una falla repentina de estas máquinas puede resultar de 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 que se encuentra sometido durante su operación.

Análisis detallados de fallas de motores de gran capacidad, llevadas a cabo por el IEEE y EPRI, han determinado que aproximadamente un 35 % de las causas de falla, son causas eléctricas [1,2]. Un alto porcentaje de las causas de fallas eléctricas del motor, está asociado al sistema aislante. Las fallas de los aislamientos del motor tienen altas repercusiones económicas por el tiempo que involucra la reparación o reemplazo de la máquina y la pérdida o interrupción de los procesos en los que se encuentran instalados.

Por otra parte, las prácticas actuales de operación y mantenimiento de motores eléctricos de gran capacidad, requieren optimizar los recursos económicos destinados a garantizar la continuidad de la operación de estos equipos, por lo que los responsables, deben reducir al mínimo las inversiones y los gastos de mantenimiento y extender la vida útil de los equipos. Debido a ello, en la actualidad, los usuarios de motores están cambiando sus estrategias de mantenimiento basadas en períodos de tiempo transcurrido (mantenimiento preventivo), hacia el mantenimiento programado[3,4] en función de la condición real del equipo (mantenimiento predictivo). Para implementar un programa de mantenimiento predictivo se requiere conocer los principales mecanismos de deterioro, que afectan la confiabilidad de los motores de gran capacidad.

El fenómeno eléctrico denominado descargas parciales (DP), es un factor recurrente en las fallas de equipos eléctricos. La presencia de un alto nivel de éstas, en un motor de gran capacidad de mediana o alta tensión, es una indicación de la existencia de un problema en el sistema aislante, que puede evolucionar en una falla. Debido a ello, 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 prueban nuevos antes de dejar las fábricas bajo condiciones controladas. Sin embargo, el realizar las mediciones de descargas parciales con esa misma sensibilidad una vez que el equipo de potencia se encuentra instalado y operando dentro de un proceso, es un reto técnico que se intenta resolver.

En este trabajo de tesis, se presentan los fundamentos teóricos, se implementa y aplica un método para diagnosticar las condiciones dieléctricas del aislamiento de motores de inducción de gran capacidad de mediana y alta tensión (4,16 a 13,8 kV), durante su operación normal, mediante la detección de descargas parciales aplicando técnicas de banda ultra ancha (UWB), utilizando sensores de campo cercano, cuyas frecuencias de medición se encuentran en el rango de 2 a 40 MHz. Así también se presenta el análisis de los patrones de DP obtenidos de la aplicación de esta técnica en el diagnóstico realizado a trece motores de inducción de 2500 C.P. a 13.8 kV y se comparan con patrones de referencia, esto con la finalidad de establecer una relación entre los diferentes patrones de descargas obtenidos con esta técnica y los diferentes mecanismos de deterioro que presenta el sistema aislante de los motores [5,6].

#### **1.2 Antecedentes**

En la actualidad la tendencia en el diseño y manufactura de equipos eléctricos de potencia es incrementar la capacidad y el tamaño de las unidades, lo que ha traído como requerimiento principal, un fuerte incremento en los niveles de confiabilidad [7,8]. La tecnología actual para los aislamientos de alta tensión requiere de modernos procedimientos de prueba. En este aspecto, se está dando mayor importancia al desarrollo de herramientas para el mantenimiento predictivo. Por lo que, no existe duda, que la detección de descargas parciales es de gran importancia debido a que este fenómeno puede considerarse como el predecesor al fenómeno del envejecimiento del sistema aislante de los equipos.

Para la detección de las descargas parciales, existen procedimientos eléctricos y no eléctricos, a continuación en este trabajo de tesis, se presentan los desarrollos más importantes para la detección de descargas parciales mediante métodos eléctricos, que fueron los de mayor importancia en las primeras décadas del siglo veinte. Estos propiciados por la aplicación práctica de la potencia eléctrica y los nuevos desarrollos de equipo de alta tensión para la generación y transmisión de energía eléctrica.

A pesar de los recientes progresos en el diagnóstico de las descargas parciales, se debe recordar que las bases para estos desarrollos han sido establecidas a lo largo de un proceso histórico. Debido a la gran cantidad de publicaciones existentes, parece imposible reportar en detalle el desarrollo histórico de la tecnología de descargas parciales (DP), sin embargo a continuación se presenta un panorama general de la evolución de esta técnica.

Los inicios del reconocimiento de las descargas parciales, se remontan al año de 1777, durante el cual LICHTEMBERG reportó resultados novedosos de estudios experimentales [9], durante una sesión de la Real Sociedad en Göttingen. Utilizando el "Elektrophor" de VOLTA, este instrumento mostraba fantásticas figuras de polvo, semejantes a estrellas y círculos. Transcurrieron más de 100 años hasta que se aclaró, que las figuras de polvo representaban descargas en superficies dieléctricas, apareciendo como canales de descargas eléctricas. En 1873 MAXWELL publicó su "Tratado de Electricidad y magnetismo" [10]. Este trabajo teórico es de relevancia fundamental tanto para el diseño de la instrumentación para la detección de descargas parciales, como para el desarrollo de los modelos físicos empleados para la explicación del complejo fenómeno de las descargas parciales.

En el año de 1896, HERTZ[11], demostró mediante un experimento la hipótesis de MAXWELL sobre la existencia de ondas electromagnéticas y su propagación en el espacio y tiempo. En principio, su experimento puede ser considerado cono la primera aplicación del modo de acoplamiento de campo inductivo, utilizado actualmente por algunos equipos comerciales para la detección de descargas parciales.

El primer instrumento de medición utilizado para la detección eléctrica de descargas parciales, fue el puente de factor de pérdidas aplicado por SCHERING[12], desarrollado en 1919 y aplicado para este propósito en 1924. Un año después en 1925 SCHWAIGER[13] reconoce las características de radio frecuencia de las descargas corona. Este descubrimiento puede ser considerado como la base para la introducción de los medidores de radio interferencia para la medición de los niveles de ruido de las descargas corona.

Un progreso muy importante en la detección de DP fue logrado cuando aparecieron los osciloscopios de rayos catódicos, en 1928 LLOYD y STARR[14] utilizaron dos pares de placa de deflexión perpendiculares dentro de un tubo de BRAUN para desplegar eventos de descargas parciales. Este método llamado el método del paralelogramo permitió una excelente medición de banda ancha de las descargas corona, en arreglos de conductor-plano, utilizado para la simulación de líneas de transmisión aéreas de alta tensión.

En las primeras etapas, un progreso esencial en el desarrollo de detectores sensibles de DP, se logró debido a la aplicación de amplificadores de banda angosta, basados en circuitos resonantes tal como lo reportó ARMAN y STARR en 1936[15]. En 1954 se tuvo comercialmente disponible el primer detector de DP portátil diseñado por MOLE [16,17].

En 1966 BAILEY[18] estimó la duración de pulsos originados en cavidades de dieléctricos sólidos, encontrando duraciones del orden de nanosegundos. Las mediciones de descargas parciales, pueden ser distorsionadas por la interferencia electromagnética, por lo que se han realizado varios trabajos con la finalidad de eliminar esas interferencias externas. En 1973 OKAMOTO[19] reportó la supresión del ruido en el caso de pruebas de DP en transformadores de 500 kV. Así también en 1975 BLACK[20]presentó un sistema para la discriminación de pulsos para la detección de descargas en ambientes ruidosos.

En el diagnóstico moderno de las descargas parciales, no solamente son de interés los pulsos individuales de estas DP, mucha información adicional se puede obtener mediante el llamado análisis de los patrones de las descargas parciales. Esto es, la ocurrencia de secuencias de pulsos de DP versus el ángulo de fase del voltaje de prueba de c.a. aplicado, así como la estadística de la distribución de la magnitud del pulso. El primer sistema sofisticado basado en computadora, en relación a este análisis, fue desarrollado por TANAKA y OKAMOTO en 1978 [21].

En los 80's, los detectores de descargas parciales, disponibles comercialmente, utilizaban solamente un ancho de banda de medición en frecuencias menores a 1 MHz. Uno de los primeros detectores de banda ancha disponible en el mercado fue desarrollado por LEMKE. El principio de medición aplicado, se basó en una integración activa (tipo electrónica) de los pulsos de las descargas parciales de banda ancha preamplificados. La frecuencia de corte del pre-amplificador de banda ancha fue de aproximadamente 10 MHz. Con esta condición los eventos de descargas parciales, no solo se podían detectar, sino también ubicar, como se reporta en [22].

Mediciones prácticas llevadas a cabo por FUJIMOTO y BOGGS en 1981[23] y por BOGGS y STONE en 1982[24], mediante la utilización de la técnica de osciloscopios de alta velocidad con un ancho de banda de hasta 1 GHz, confirmaron la duración de pulsos originados en cavidades de dieléctricos sólidos.

La aparición de las computadoras personales en los 80's y su uso intensivo en los 90's, rápidamente influenciaron el enfoque en el área de análisis de la distribución de pulsos de las descargas, principalmente en lo que respecta a los sistemas de medición, ya que estos cambiaron de sistemas con instrumentación basada en hardware a sistemas con técnicas basadas en software [24-29]. Esta área de estudio eventualmente llevó a investigaciones para el reconocimiento y clasificación de patrones de descargas, involucrando el uso de redes neuronales [30-33] y lógica difusa [34].

En los 90's se tuvo la introducción de circuitos digitales de respuesta rápida para aplicaciones de medición de descargas parciales [35,36]. Actualmente, el uso de técnicas digitales en la detección, medición y adquisición de DP, se han desarrollado considerablemente, sin embargo, los detectores de DP disponibles comercialmente, han mantenido separadas sus opciones analógica y digital.

En la ESIME, se han realizado trabajos relativos al estudio y medición de descargas parciales en equipos eléctricos, mismos que son los antecedentes de este trabajo de tesis. En 1974 ROBLES[37], realizó un trabajo sobre el deterioro de sistemas aislantes por defectos de las DP, asesorado por J. H. Mason. En 1981 ASIAIN[38], desarrolló un trabajo sobre pruebas de descargas parciales a transformadores de distribución, complementado posteriormente por MÉNDEZ[39] en 1987, con el trabajo sobre técnicas de medición y localización de descargas parciales en transformadores incluyendo la utilización de la computadora digital.

#### 1.3 Descripción del Problema

El fenómeno eléctrico de las descargas parciales, es un factor presente en las fallas de equipos eléctricos. La presencia de un alto nivel de éstas, en motores de gran capacidad de mediana o alta tensión, son una indicación de la existencia de un problema en el sistema aislante, que puede evolucionar en una falla, por lo que su detección resulta importante para determinar el estado de estos equipos eléctricos.

Actualmente el rango de frecuencias de medición normalizado para descargas parciales se encuentra entre 30 kHz y 500 kHz[40]. Sin embargo, mediciones en laboratorio bajo condiciones controladas de interferencia demostraron que las formas de onda de la corriente producida por las DP pueden alcanzar frentes de corta duración, en el rango de 0.7 ns. Esto equivale 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[41].

La interferencia electromagnética presente en el rango de frecuencias de medición normalizado para descargas parciales es particularmente alta en las plantas donde se encuentran instalados los motores de gran capacidad, debido a esto, es difícil realizar las mediciones de DP en motores instalados, utilizando el método normalizado. Por ello se buscó un método de diagnóstico, que permita realizar mediciones de descargas parciales con los motores instalados y operando en planta, mediante la captura de las señales de DP en un rango de frecuencias cercanas a las frecuencias reales en las cuales ocurren dentro de los devanados de los equipos.

El analizar las señales de DP en este rango de frecuencias, que excede por dos órdenes de magnitud al rango normalizado de banda ancha[40], ha sido definido como el método de medición de DP en Banda Ultra Ancha (UWB, por sus siglas del inglés Ultra Wide Band), y es el que se utiliza como base para el método de diagnóstico propuesto en este trabajo de tesis.

#### 1.4 Objetivo

El objetivo de este trabajo de tesis es fundamentar teóricamente, implementar y aplicar en planta un método de diagnóstico nuevo, no invasivo y con una sensibilidad que permita determinar de una manera práctica y segura las condiciones dieléctricas del aislamiento de motores de inducción de gran capacidad durante su operación normal, mediante la detección de descargas parciales de una manera no normalizada, aplicando técnicas de banda ultra ancha (UWB) y sensores de campo cercano con un ancho de banda de 2 a 40 MHz.

#### 1.5 Justificación

En los grandes centros industriales, la operación confiable de los motores es indispensable para mantener sin interrupciones los procesos de transformación y producción. La falla de los aislamientos de los motores tiene altas repercusiones. La vida esperada de las máquinas es de 30 años en promedio, suponiendo una buena calidad de manufactura y en condiciones normales de operación. La vida útil de los aislamientos se ve afectada por las condiciones y requerimientos a los que se somete el motor.

Una forma exitosa de evitar incurrir en grandes inversiones para mantener operando motores de gran potencia es utilizar un esquema de mantenimiento predictivo, que permita detectar las fallas de lenta evolución antes de que éstas representen un serio peligro para la operación del equipo. Para implantar un mantenimiento predictivo se requiere conocer los principales factores que afectan la operación normal de los motores y como se comenta a continuación, las descargas parciales es uno de los factores importantes a detectar durante la operación normal del equipo.

Las descargas parciales son un factor recurrente en las fallas de equipos eléctricos. En equipos con aislamientos basados en compuestos inorgánicos, como motores y generadores, el incremento de los niveles de descargas parciales es una indicación de un problema que puede evolucionar en una falla. El efecto dañino de las descargas parciales se conoce desde hace varios años, por lo que muchos de los motores de gran capacidad, se evalúan nuevos antes de dejar las fábricas bajo condiciones controladas de interferencia. Sin embargo, el realizar las mediciones de descargas parciales con esa misma sensibilidad una vez que el equipo se encuentra instalado y operando, es un problema técnico a resolver, desde el punto de vista de interferencia y capacidad del equipo requerido, para proporcionar h potencia eléctrica de prueba.

#### 1.6 Alcances del Trabajo

Realizar una revisión de los principales mecanismos de deterioro que afectan la confiabilidad de los sistemas aislantes utilizados en los motores de gran capacidad en mediana y alta tensión, haciendo énfasis en el fenómeno de las descargas parciales.

Plantear los fundamentos teóricos de la detección de descargas parciales aplicando técnicas de banda ultra ancha (UWB) e implementar un método de diagnóstico, basado en la detección de descargas parciales aplicando estas técnica, para realizar mediciones en motores de mediana y alta tensión operando en planta. La aplicación de este método de diagnóstico incluye la implementación del circuito de prueba, determinando la ubicación de los sensores de campo cercano y la obtención de patrones y valores máximos y mínimos de descargas parciales de referencia, para comparar resultados obtenidos.

Realizar mediciones en planta a motores de gran capacidad operando en condiciones normales, mediante la aplicación del método de diagnóstico implementado, obtener patrones de DP y analizar resultados con la finalidad de identificar el tipo de problema presenta el sistema aislante evaluado, así como verificar la validez de los resultados obtenidos comparando con valores reportados internacionalmente, obtenidos en equipos similares.

#### 1.7 Aportación de la Tesis

La aportación de este trabajo de tesis es un método de diagnóstico nuevo no normalizado, basado en la detección de descargas parciales aplicando técnicas de medición en banda ultra ancha (UWB), con una sensibilidad desde 10 nC hasta 600 nC, alta confiabilidad y de aplicación sencilla y segura, que permite evaluar las condiciones dieléctricas del aislamiento de motores de inducción de gran capacidad y tensión eléctrica de 13,8 kV. Esto

sin interrupción del proceso en el que se encuentren instalados estos equipos. Así como resultados obtenidos de su aplicación en el diagnóstico de equipos operando en planta.

#### 1.8 Organización de la Tesis

Esta tesis consta de cinco capítulos, los cuales se describen a continuación.

En el capítulo uno se presenta la introducción al problema de investigación que se aborda en esta tesis. Se hace una breve exposición de los antecedentes, se plantea la justificación, objetivo, alcance y organización de esta tesis.

En el capítulo dos se presentan los aspectos constructivos de los sistemas aislantes utilizados en los motores de gran capacidad en mediana y alta tensión, así como los principales mecanismos de deterioro que afectan su confiabilidad. Se presenta de manera introductoria el fenómeno de las descargas parciales considerado como uno de los principales mecanismos de deterioro en los sistemas aislantes.

En el capítulo tres se presenta el método de detección de descargas parciales mediante la técnica de banda ultra ancha, se discuten los conceptos teóricos que sustentan este método de medición, los requerimientos para la implementación de los circuitos de prueba, los criterios utilizados para el análisis de los resultados obtenidos, así como las ventajas de su aplicación en el diagnóstico de motores de gran capacidad en mediana y alta tensión.

En el capítulo cuatro se presentan y analizan los resultados obtenidos de la aplicación del método de detección de descargas parciales mediante la técnica de banda ultra ancha para evaluar el estado de los aislamientos de 13 motores de 2500 C.P. y 13.8 kV, operando en una planta de bombeo de hidrocarburo. Los patrones de DP obtenidos se comparan con patrones de referencia, obtenidos mediante métodos normalizados de detección de descargas con motores fuera de operación, esto con la finalidad de relacionar los diferentes patrones de descargas obtenidos con los mecanismos de deterioro que presenta el sistema aislante de los motores.

En el capítulo cinco se incluyen las conclusiones a las que se llega con el desarrollo de esta tesis y se presentan los argumentos que sustentan el cumplimiento del objetivo planteado en ésta. Se describen las aportaciones y se establecen las recomendaciones para trabajos futuros.

Adicionalmente a los capítulos anteriores, se incluyen tres apéndices complementarios:

En el apéndice A, se presentan las diferentes teorías que se han desarrollado, para el estudio y análisis de las descargas parciales y en el apéndice B, se incluye la descripción de las técnicas normalizadas que actualmente se emplean, para la detección de descargas parciales con base en la norma IEC 60270 [40] y a la guía IEEE std. 1434-2000 [42]. En el apéndice C, se presentan los principales patrones de DP, establecidos por el grupo 21.03 de CIGRE.

# CAPÍTULOMecanismos de Falla en el2Sistema Aislante del Motor

#### 2.1 Introducción

Análisis detallados de fallas en motores de gran capacidad, llevadas a cabo por el IEEE y EPRI, han determinado que aproximadamente un 35 % de las causas de falla, son causas eléctricas[1]. En el artículo del IEEE titulado "Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations, Part I"[2], se incluyen los resultados de las investigaciones del IEEE y del EPRI, las que concluyen que un alto porcentaje de las causas de fallas eléctricas del motor, están asociadas al sistema aislante.

Una falla de este tipo, tiene altas repercusiones económicas debido al tiempo que involucra la reparación o el reemplazo de la máquina y por lo tanto, la pérdida o interrupción de los procesos en los que se encuentran instalados. De acuerdo a estos resultados, se puede concluir que la disponibilidad y confiabilidad de un motor eléctrico de gran capacidad, depende en gran medida de la confiabilidad de su sistema aislante.

El sistema aislante del devanado del estator de un motor de gran capacidad a 13.8 kV, tiene como función el aislamiento permanente entre los diferentes conductores (barras y bobinas) y entre estos y el núcleo magnético. Este sistema aislante, generalmente consiste de combinaciones de materiales conductores, semiconductores y aislantes, los cuales se encuentran colocados unos junto a otros.

Durante la operación del motor, el sistema aislante se encuentra expuesto a una combinación de esfuerzos térmicos, eléctricos, mecánicos y condiciones ambientales. La magnitud de estos esfuerzos puede variar, dependiendo del tamaño, capacidad y condiciones de operación de la máquina. Asociados a estos diferentes esfuerzos, existen procesos de degradación del aislamiento, la combinación de éstos, producen debilitamientos generales o localizados de la estructura aislante, que pueden hacer fallar al motor.

Uno de estos procesos de degradación es el fenómeno eléctrico denominado descarga parcial que es un factor recurrente en las fallas de los motores de gran capacidad en mediana o alta tensión. La presencia de un alto nivel de descargas parciales en un motor, es una indicación de la existencia de un problema en el sistema aislante, mismo que puede evolucionar en una falla. A continuación, se presentan, los aspectos constructivos del sistema aislante utilizados en los motores de gran capacidad en mediana y alta tensión, así como los principales mecanismos de falla que pueden afectar la confiabilidad de éstos.

#### 2.2 El sistema aislante del motor de alta tensión y sus principales interfases

El sistema aislante del devanado del estator de un motor de alta tensión, tiene como función el aislamiento permanente entre bs diferentes conductores (barras y bobinas) y entre estos y el núcleo magnético. Así también, los procesos relacionados a los diferentes esfuerzos y fenómenos en las interfases internas y externas del aislamiento, son determinantes de la vida útil del sistema aislante.

#### 2.2.1 Interfases del sistema aislante

Las interfases o componentes de un sistema aislante, generalmente consisten de combinaciones de materiales conductores, semiconductores o aislantes, los cuales se encuentran colocados unos junto a otros. Dependiendo de sus dimensiones, algunos autores clasifican a las interfases de la siguiente manera[43].

- Microscópicas, por ejemplo las interfases mica-resina dentro del aislamiento principal a tierra.
- Macroscópicas, por ejemplo la superficie de las cintas colocadas en el sobretiro recto de las bobinas.

Las interfases internas se encuentran inmersas dentro del sistema aislante y no tienen contacto directo con el medio ambiente, por ejemplo las interfases dentro del aislamiento de ranura. Otras interfases en contacto directo con el aire del medio u otro gas, son denominadas interfases externas (por ejemplo las superficies de los aislamientos en cabezales).

Las líneas de campo eléctrico cruzan las interfases en diferentes ángulos y son referidas como[43]:

- Longitudinales: Son las líneas de campo eléctrico paralelas a la interfase, por ejemplo, en un separador en cabezales y parcialmente la graduadora de campo en el sobretiro recto de la bobina (ver **Figura 2.1**).
- Transversales: Son las líneas de campo eléctrico perpendiculares a la interfase, por ejemplo, el aislamiento de ranura (ver **Figura 2.1**).
- Angulares: Son las líneas de campo eléctrico inclinadas respecto a la superficie, por ejemplo al final de la pintura conductora en la bobina, esto en motores sin graduación de campo en el sobretiro recto de la bobina.

El fabricante del motor, generalmente diseña estas interfases, para cumplir con los esfuerzos que se presentan en el motor y lograr una operación confiable del sistema aislante.

#### 2.2.2 Subsistemas del aislamiento del devanado del estator

El sistema aislante del devanado del estator para motores de alta tensión, generalmente consiste de los siguientes subsistemas aislantes con sus respectivas interfases:

- Aislamiento de espiras o subconductores con interfases internas sólido-sólido y sólido-gas, ver **Figuras 2.1**, **2.2** y **2.4**, sometidas a esfuerzos por el voltaje de operación entre espiras y sobretensiones, por ejemplo las producidas debido a maniobras de conexión y desconexión.
- Aislamiento principal o aislamiento a tierra, con interfases internas sólido-sólido y sólido-gas, ver **Figuras 2.1** y **2.2**, sometidas a esfuerzo por la tensión de línea a tierra y sobretensiones.
- Aislamiento entre fases en cabezales de los devanados, con interfases internas sólido-sólido y superficiales sólido-gas, ver **Figuras 2.1** y **2.2**, sometidas a esfuerzo por la tensión de línea a línea y sobretensiones.
- Pintura conductora en la superficie de la bobina tanto en la zona de ranura como en el sobretiro recto y pintura graduadora en sobretiro recto de bobinas y zona inicial de cabezales, ver **Figuras 2.1** y **2.3**, sometidas a esfuerzos por la tensión de línea a tierra para motores con tensiones mayores o iguales a 4.16 kV y sobretensiones.



Figura 2.1 Arreglo típico del aislamiento de devanados para un motor de alta tensión.



**Figura 2.2** Arreglo típico de conductores y sistema aislante en la ranura de un motor de alta tensión.



**Figura 2.3** Arreglo típico de pinturas en la zona del sobretiro recto de la bobina en un motor de alta tensión.

Mecanismos de Falla en el Sistema Aislante del Motor

#### 2.2.3 Interfases microscópicas

La combinación de materiales inorgánicos (por ejemplo mica, vidrio) con materiales orgánicos (por ejemplo combinaciones de películas de papel-aramidas) impregnados con resinas sintéticas[44], forman interfases microscópicas sólido-sólido, como se muestra en la **Figura 2.4**, cuya estabilidad en contra de las descargas parciales (DP), y esfuerzos térmicos, está determinada por las características del material orgánico.

Cavidades diminutas en el aislamiento dan por resultado interfases internas sólido-gas, lo cual debilita la capacidad dieléctrica del aislamiento, así también reduce la capacidad de transferencia de calor. Los fabricantes tratan de reducir al máximo estas cavidades, mediante un cuidadoso proceso de impregnación, el cual puede ser una impregnación al vacío (VPI por sus siglas en inglés Vacuum Pressure Impregnation) o tipo ricas en resina [44].



**Figura 2.4** Esquema de interfases microscópicas sólido-sólido y sólido-gas en el sistema aislante de un motor de alta tensión.

Mecanismos de Falla en el Sistema Aislante del Motor

#### 2.2.4 Interfases macroscópicas

Las interfases macroscópicas internas y externas a la ranura del sistema aislante de un motor de alta tensión (tensiones mayores a 4 kV) ver **Figura 2.1**, son las que requieren una mayor atención en su diseño de parte del fabricante o reparador. Al ensamblar las bobinas en el estator del motor de alta tensión, comúnmente quedan pequeñas cavidades entre la superficie aislada de la bobina y las paredes de la ranura. Durante la operación del motor, estas cavidades pueden ionizarse generando descargas parciales, conocidas como descargas a la ranura, las cuales provocan un deterioro considerable al aislamiento.

Este tipo de descargas, tienen como electrodos la superficie de la bobina y el núcleo magnético del motor, para prevenir estas descargas, la superficie del aislamiento de la bobina, se cubre con un material conductor en forma de pintura (pintura conductora). De esta manera, con partes de la superficie de la bobina que hagan contacto eléctrico con el núcleo, toda la superficie cubierta con la pintura conductora quedará a un potencial cero, quedando el campo eléctrico limitado a la zona ocupada por el aislamiento y no en el aire de las cavidades evitando con esto la ionización.

En la sección final de la ranura, al final de la pintura conductora en la bobina, la superficie de ésta pierde su referencia con respecto al potencial de tierra, por lo que existe un cambio abrupto del potencial en la superficie de las bobinas. Al incrementarse el potencial existe una concentración de esfuerzos eléctricos, por lo que tiende a existir ionización y a producirse descargas parciales. Esta distribución no homogénea del campo eléctrico, puede ser controlada, graduando de una manera lineal el potencial en la superficie de las bobinas en esta zona del devanado, esto se logra aplicando pinturas graduadoras de potencial, de tal manera que la distribución de campo se vuelva más uniforme, ver **Figura 2.3**.

El área de cabezales del devanado del estator consiste de elementos de las bobinas aislados entre sí y de los componentes metálicos aterrizados del motor (carcaza, rotor, ventiladores, etc.). El campo eléctrico se concentra principalmente en los espacios en aire, eléctricamente más débiles. Los elementos del devanado se encuentran mecánicamente enlazados entre sí, y con el núcleo laminado mediante elementos estructurales aislantes rígidos, para garantizar la capacidad mecánica de los devanados aún en condiciones de esfuerzos máximos. Estos arreglos resultan en la creación de interfases longitudinales. Los efectos de contaminación por humedad, aceite u otros contaminantes químicos en estas interfases, pueden afectar considerablemente la vida del sistema aislante, al distorsionar la distribución del campo eléctrico.

#### 2.3 Tipos de sistemas aislantes utilizados en motores

El desarrollo, diseño, manufactura y prueba de sistemas aislantes de máquinas eléctricas rotatorias representa un reto técnico complejo. Actualmente se están desarrollando y aplicando sistemas aislantes con capacidad para soportar mayores esfuerzos eléctricos, esto con la finalidad de lograr una utilización electromagnética óptima de la máquina.

El principal material dieléctrico utilizado en el sistema aislante de las máquinas eléctricas rotatorias de gran capacidad en alta tensión, es la mica, sus características eléctricas, térmicas y químicas no han podido ser superadas por otro material en igualdad de condiciones.

En los últimos 30 años los sistemas aislantes han sufrido cambios significativos, sin embargo, desde el punto de vista de sistemas aislantes, tanto los que se encuentran en máquinas en operación, como los nuevos desarrollos, es posible realizar una clasificación de acuerdo a los materiales que utilizan en su estructura. Esta clasificación incluye dos tipos de sistemas aislantes, que a consideración del autor, permite incluir la totalidad de sistemas aislantes de aplicación práctica[45], estos son:

- Sistemas aislantes termoplásticos.
- Sistemas aislantes termofijos.

La mayoría de los motores que actualmente se encuentran en operación, poseen devanados aislados con mica-resina. Los devanados de motores aislados con mica-resina han sido utilizados por más de 20 años. El continuo incremento en los niveles de calidad que se requieren en las máquinas eléctricas rotatorias con relación a los esfuerzos térmicos y eléctricos a los que se someten, requieren sistemas aislantes de mucho mayor calidad.

#### 2.3.1 Sistemas aislantes termoplásticos

Estos sistemas aislantes, fueron empleados ampliamente en el pasado y se basan en la utilización de hojuelas de mica aplicadas en cintas de algodón, papel o fibra de vidrio y como aglomerante utilizan materiales termoplásticos tales como el barniz cambriano, la goma laca o el asfalto. Los sistemas aislantes termoplásticos brindan cierta flexibilidad a las bobinas para su ensamble, pero su temperatura de operación está limitada a 130  $^{0}$ C y operan con un gradiente eléctrico de 1.37 a 1.5 kV/mm [46,47], lo que no permite cubrir las especificaciones de diseño y requerimientos operativos de las máquinas actuales.

Los sistemas aislantes con goma laca como material aglomerante, tienen la desventaja de contener cavidades internas debido a la evaporación de partículas volátiles en la laca. Por otro lado, el asfalto a cierta temperatura disminuye su fuerza de unión permitiendo que el aislamiento cambie su volumen y se incremente el número de cavidades. Con la separación de las cintas y el aflojamiento del aislamiento, las hojuelas de la mica se salen del sistema aislante. Esta reducción del aislamiento puede llevar al motor finalmente a la falla.

La vida útil de un sistema aislante termoplástico, se da por terminada cuando el aislamiento se vuelve suficientemente frágil, tal que se agrieta bajo los esfuerzos mecánicos a los que se encuentra expuesto. Una causa directa de la fragilización de este sistema aislante, es la operación a altas temperaturas. La rigidez dieléctrica del aislamiento no es reducida significativamente por la fragilización en sí misma. Sin embargo, el rompimiento eléctrico

puede presentarse rápidamente, especialmente cuando la humedad y contaminantes llegan a las grietas del sistema aislante.

Actualmente este tipo de sistema aislante ha caído prácticamente en desuso, a excepción de máquinas con muchos años de operación que conservan su diseño original. La demanda creciente de motores de mayor capacidad obligó a los fabricantes a buscar sistemas aislantes que soportaran las nuevas condiciones de operación tales como mayores tensiones de suministro y mayores niveles de temperatura de operación, esto dio origen a los sistemas termofijos.

#### 2.3.2 Sistemas aislantes termofijos

Este tipo de sistemas aislantes utilizan principalmente cinta de mica fabricada en diferentes combinaciones, como fibra de vidrio y papel de mica, película de poliéster y papel de mica, fibra de vidrio, papel de mica y película poliéster, etc., las cuales se impregnaron con resinas poliéster hasta hace unos 25 años, actualmente se emplea resina epóxica como aglomerante.

El proceso de curado de estas resinas epóxicas es en caliente, tienen una gran adherencia, casi sin componentes volátiles, poco absorbente de la humedad y de muy bajas pérdidas dieléctricas. Este tipo de resinas permitieron fabricar un aislamiento con un contenido mínimo cavidades, con mayores temperaturas de operación y con gradientes de operación superiores a 2.5 kV/mm [48].

En la actualidad los sistemas aislantes termofijos son ampliamente utilizados, reemplazando a los sistemas aislantes termoplásticos. Las principales causas de falla de sistemas aislantes termofijos, se relacionan con vibraciones, debido a aflojamientos en las ranuras. Se detectó que este tipo de sistemas aislantes, son propensos a desarrollar aflojamientos de cuñas y descargas a la ranura debido a su naturaleza "rígida", ya que esto no permite que la bobina se amolde a la forma de la ranura, tal como sucede en los sistemas aislantes termoplásticos. De acuerdo al método de impregnación de la resina, los sistemas termofijos se clasifican en dos grupos.

- Sistemas termofijos "ricos en resina"
- Sistemas termofijos con impregnación a presión y al vacío (VPI)

#### 2.4 Causas eléctricas de falla en motores de gran potencia

Investigaciones realizadas por el IEEE y EPRI, identificaron que aproximadamente el 35% de causa de fallas en motores son fallas eléctricas[2], ver **Figura 2.5**. De estas investigaciones, se obtuvieron resultados muy útiles. La investigación del IEEE identifica a "La condición que provoca la falla", y la del EPRI identifica el "Porcentaje de falla por componente".



Figura 2.5 Resumen de causas de fallas en motores eléctricos (EPRI [2]).

La investigación del IEEE, incluye una opinión objetiva, mientras que el EPRI incluye componentes reales fallados. El resumen de las causas relacionadas al aspecto eléctrico del motor, se muestra en la **Tabla 2.1**.Así también de la esta tabla se concluye que un alto porcentaje de las causas de fallas eléctricas del motor, están asociadas al sistema aislante. La publicación "IEEE 432-1992 IEEE Guide for Insulation Maintenance for Rotating Electric Machinery" [49], identifica causa de fallas similares para los sistemas aislantes de motores. Entre estas fallas se incluyen los esfuerzos eléctricos, mecánicos, térmicos y condiciones ambientales, a los que se encuentra sometido el motor durante su operación.

Estudio IEEE		Estudio EPRI	
Causa de Falla	%	Componente Fallado	%
Sobrecarga Continua	4.2	Aislamiento principal del estator	23.0
Deterioro Normal	26.4	Aislamiento entre espiras	4.0
		Sujeción en cabezales	3.0
		Núcleo	1.0
		Jaula	5.0
Total	30.6	Total	36.0

 Tabla 2.1 Causas de fallas eléctricas del motor[2]

#### 2.5 Esfuerzos en los sistemas aislantes de devanados

El devanado del estator de un motor de gran capacidad a 13.8 kV, está expuesto a una combinación de esfuerzos térmicos, eléctricos y mecánicos durante su operación. La magnitud relativa de estos esfuerzos, puede variar substancialmente dependiendo del tamaño, capacidad y condiciones de operación de la máquina. Por ejemplo, los niveles típicos de esfuerzos eléctricos, pueden variar en un rango de 2 a 2.5 kV/mm, las fuerzas perpendiculares que actúan sobre las bobinas del devanado, pueden llegar hasta 19 kg/cm y los movimientos diferenciales entre el cobre y el aislamiento en una barra del motor pueden llegar hasta 10 mm, dependiendo de la longitud de las barras y de la temperatura máxima de operación del equipo.

De manera adicional a los esfuerzos anteriores, existen los relacionados con las condiciones de operación transitorias del motor. Estos esfuerzos picos, pueden llegar a ser cinco veces mayores que uno bajo condiciones normales, dependiendo del tipo de servicio del motor [50]. Debido a esto, un devanado largo en un núcleo largo, que es sometido a arranques y paros continuos, experimentará esfuerzos térmicos cíclicos, mismos que no experimentará un motor que trabaja de manera continua.

De manera similar un motor de menor capacidad, operando a carga plena de manera continua con pequeñas sobrecargas periódicas, experimentará una combinación de esfuerzos, predominando el esfuerzo térmico. Por otro lado, un motor de gran capacidad arrancado a tensión plena y que maneje por ejemplo un compresor o una bomba, tendrá como característica una combinación de esfuerzos, prevaleciendo los esfuerzos mecánicos, como es la vibración en devanados, así también los sobreesfuerzos debidos a transitorios, por ejemplo un corto circuito o una sobretensión en el sistema, puede traer como consecuencia una falla en el motor. Tales fallas no pueden predecirse por mediciones periódicas del estado del aislamiento, por evolucionar en tiempos muy cortos comparados con los tiempos entre estas mediciones.

#### 2. 6 Mecanismos de falla del sistema aislante

El deterioro del sistema aislante es el resultado de la acción de un esfuerzo en particular o de varios de ellos. A continuación, se realiza un análisis de manera separada de cada uno de estos esfuerzos, así como de los procesos de degradación asociados a cada uno.

#### • Esfuerzos eléctricos

Un sistema aislante se encuentra sujeto a esfuerzos eléctricos debido a la distribución espacial y dependencia del tiempo del campo eléctrico. El gradiente promedio que el sistema aislante tiene que soportar es de aproximadamente 2 kV/mm, en la región uniforme de la bobina. Sin embargo este gradiente se incrementa de 4 a 4.5 kV/mm en las aristas de la bobina, dependiendo del radio de curvatura de la arista del conductor que forma la bobina[51].

Cuando existen cavidades internas en el aislamiento, el campo eléctrico en el interior de las cavidades se incrementa de 3 a 4 veces el gradiente promedio, dependiendo de la permitividad del aislante que la rodea. Cuando el gradiente eléctrico excede la tensión de rompimiento del gas contenido en la cavidad, se originan descargas parciales[46]. Este es un criterio importante para evaluar los esfuerzos eléctricos en los aislamientos de una motor, esto es, cuando, donde y que tipos de descargas parciales ocurren en las interfases del sistema aislante [43].

Los efectos electroquímicos acumulativos ocasionados por las descargas parciales producen la degradación química de las sustancias que forman las paredes de la cavidad en el aislamiento. Esta degradación evoluciona con el tiempo, dando lugar finalmente a una perforación del aislamiento en la zona afectada. Las descargas parciales externas (descargas a la ranura y descargas en cabezales del devanado), dan lugar a la formación de ozono y ácido nítrico, que atacan químicamente al aislamiento.

En lo que se refiere a esfuerzos eléctricos en el sistema aislante del motor, se tiene que diferenciar entre los esfuerzos eléctricos senoidales (originados por el suministro de potencia normal) y los esfuerzos eléctricos tipo pulso. Estos ocurren de forma aleatoria (sobrevoltajes atmosféricos o de maniobra) o de manera continua, debida a variadores de frecuencia, utilizados en la operación del motor. Los tiempos de disparo de los componentes electrónicos de estos equipos, que van desde algunos microsegundos (GTO) a algunos menores a 100 ns (IGBT), producen distribuciones de voltajes no lineales y conducen mayores esfuerzos eléctricos en el aislamiento entre espiras de las bobinas próximas a la conexión principal. Como una consecuencia de esto, los esfuerzos eléctricos del aislamiento entre espiras puede incrementar hasta diez veces del esfuerzo eléctrico normal[52,53].

#### • Esfuerzos térmicos

Es práctica común en la industria, utilizar los sistemas aislantes significativamente por debajo de su límite de capacidad térmica (por ejemplo un motor clase F, se emplea como un motor clase B). En estos casos los esfuerzos térmicos y el envejecimiento resultante pasan a segundo término. Sin embargo para los sistemas aislantes de motores en plantas con una carga alta, es de suma importancia este aspecto.

La corriente que circula en el devanado del motor, es la causa principal de los esfuerzos térmicos en el sistema aislante, por lo que la temperatura aumentará con los incrementos de carga en la máquina. Por otro lado, la corriente de fuga a través del aislamiento cuando está sometido a una tensión alterna, produce pérdidas que se manifiestan también en forma de calor en el interior del aislamiento.

Normalmente se establece un equilibrio entre el calor producido y el calor disipado a través de las diversas capas aislantes. Si este equilibrio se rompe por un aumento de las pérdidas dieléctricas (crecientes con la temperatura) o una disminución de la resistividad del material, se produce un aumento constante de la temperatura en ciertas zonas del

aislamiento. Lo que puede conducir a una perforación dieléctrica del mismo. La degradación térmica acumulativa, se encuentra asociada con varios mecanismos de degradación del sistema aislante, tales como delaminación, agrietamiento, fragilización o depolimerización.

#### • Esfuerzos mecánicos

Los esfuerzos mecánicos en los sistemas aislantes son provocados por la expansión térmica o la contracción de materiales. Estos esfuerzos pueden o no provocar un cambio en las propiedades de éstos. Los esfuerzos mecánicos pueden ser debido a diferencias de temperaturas en espacios libres o variaciones de la temperatura con el tiempo. Los coeficientes de expansión térmica en el núcleo (acero), cobre y materiales aislantes pueden diferir por un factor de 10 o más.

Las fuerzas causadas por las corrientes que circulan por el devanado, originan esfuerzos pulsantes de compresión y esfuerzos de cantiliver en las bobinas, en la parte final del núcleo y en cabezales. Los esfuerzos mecánicos tienden a aflojar las cuñas y demás elementos de sujeción, este aflojamiento produce fricción entre la barra y el núcleo ocasionando daños a la pintura conductora de la bobina. Después de varios años de operación del equipo, la pintura tiende a desgastarse, por lo que al perderse la referencia de tierra, ocurren descargas a la ranura, fenómeno que en un corto plazo puede hacer fallar el aislamiento.

Durante las condiciones de cortocircuito en la máquina, se presentan severos esfuerzos mecánicos en todo el devanado y su sistema aislante, por lo que pueden producirse fracturas en el aislamiento, principalmente en la zona de cabezales a unos cuantos milímetros del núcleo.

Los esfuerzos mecánicos causan cambios especialmente en las interfases macroscópicas internas del sistema aislante, y están asociados a mecanismos de deterioro como las expansiones y contracciones diferenciales de los diferentes materiales, vibración de los devanados produciendo rozamiento entre el cobre, el aislamiento y el núcleo.

#### • Condiciones ambientales

La influencia ambiental, varía desde condiciones ocasionales de condensación y pequeñas variaciones de temperatura, hasta climas extremos (humedad, calor, frío), así como elementos químicos o mecánicos agresivos, tales como soluciones alcalinas, ácidos o elementos abrasivos como arena y polvo. Los esfuerzos ambientales afectan las interfases externas del sistema aislante, provocando un cambio en sus características, por ejemplo su resistencia a las corrientes de fuga.

La contaminación depositada en el sistema aislante lo deteriora, al conducir corrientes de fuga sobre las superficies aisladas o atacando al material reduciendo su calidad de

aislamiento eléctrico, su resistencia física o forzándolo a operar a temperaturas por arriba de la normal, esto al funcionar la contaminación como un aislante térmico. La humedad puede ser especialmente problemática, en el caso de sistemas aislantes termoplásticos y algunos sistemas basado en poliéster, los cuales son propensos a grietas y fisuras en la zona del final de ranura. El aceite disuelve el asfalto y puede propiciar el desarrollo de grietas. La combinación de aceite y polvo, comúnmente bloquean ductos de ventilación en motores con ventilación tipo abierta, causando con esto sobrecalentamientos severos.

Como consecuencia de los esfuerzos y mecanismos de degradación anteriores, las fallas resultantes, son generalmente asociadas con una combinación de varios procesos de deterioro. Para el sistema aislante del motor, la combinación de los procesos de degradación térmicos, mecánicos, eléctricos y ambientales, producen debilitamientos generales o localizados de la estructura. Por lo que, si el debilitamiento estructural puede ser evaluado, la vida futura del aislamiento puede estimarse.

# 2.7 Los modelos del sistema aislante y de cavidades para el mecanismo de descargas parciales

En esta sección de la tesis, se realiza una revisión general de los modelos del sistema aislante del motor de alta tensión, y la aplicación de éstos para establecer los conceptos básicos del mecanismo de deterioro denominado descargas parciales. La explicación de la teoría de las DP se presenta de manera detallada en el apéndice A de esta tesis.

Un modelo simplificado del sistema aislante puede representarse por una capacitancia y una resistencia en paralelo (R-C)[54]. Este es un concepto utilizado en la prueba de factor de potencia de sistemas aislantes. La corriente de fuga, se divide entre las trayectorias resistiva y capacitiva. El factor de potencia es el coseno de el ángulo de fase entre la corriente de fuga total y su componente resistiva[55].

El modelo R-C, es similar a los circuitos atenuadores utilizados en electrónica[56]. La atenuación de una señal, consiste en reducir su amplitud. Esto sustenta el problema de la detección de las descargas parciales. El medio aislante, el cual es expuesto a las descargas parciales, atenúa la señal; debilitando esta señal dañina la cual se trata de identificar mediante sensores. Adicionalmente, la señal de la descarga parcial atenuada, puede ser ocultada por fuentes de ruido electromagnético.

Se han descrito modelos simplificados del área de las cavidades, mediante capacitores[57]. Una revisión del modo de falla progresiva de esas cavidades, indica un componente resistivo adicional en paralelo con el componente capacitivo. Un manual de diseño de equipo eléctrico[58] establece que: "La descarga una vez iniciada, generalmente se incrementa en magnitud con periodos de tiempo muy cortos, pero las descargas se pueden cortocircuitar por películas semiconductoras, dentro de la cavidad y la descarga se termina". La mencionada película semiconductora, puede consistir de carbonización del material aislante orgánico dentro de la cavidad debido al daño producido por el arco. Por lo cual, el modelo de la cavidad es similar al del medio aislante.

Los modos de fallas reales, muestran una caída en la intensidad de la descarga parcial, poco antes de la falla total del aislante. Esto ocurre cuando la actividad de las descargas ha carbonizado hasta el punto donde el componente resistivo del modelo es lo suficientemente bajo para prevenir un incremento de la tensión a través de la cavidad. Este nuevo componente resistivo de bajo valor, también permitiría mayores flujos de corriente y calentamiento adicional, dando como resultado un daño al aislamiento. El modelo R-C incluyendo el componente resistivo correlaciona al modo de falla real de una cavidad de descarga parcial, con el componente resistivo pasando más corriente de fuga cuando la descarga parcial se incrementa con el tiempo.

Una forma del componente resistivo, es la erosión visible en la superficie del aislamiento. Una explicación de esta erosión, y como se encuentra relacionado su desarrollo con las descargas parciales superficiales, es el siguiente[55]. La erosión es producida por el intenso calor local provocado por las corrientes de fuga. Esas corrientes de fuga, fluyen a través de cualquier capa de humedad contaminada en la superficie aislante. Tan larga como ancha y continua sea esta película aislante, el calor asociado con la corriente de fuga es radiado sobre una amplia área y es disipado. Sin embargo, el calentamiento provoca la evaporación de esta capa. Esto causa que la capa de humedad, se separe en pequeñas albercas o islas. Cada ruptura en la capa de humedad tiende a interrumpir un segmento de la corriente de fuga, provocando con esto un pequeñísimo arco. Aún cuando el arco es pequeño, éste trae como resultado un calentamiento local intenso. Este calentamiento químico y molecular de la capa aislante que se encuentra bajo la capa de humedad contaminada.

En materiales orgánicos, un producto frecuente del arqueo es el carbón. El arco pequeño que se menciona a lo largo de la superficie aislante, puede ser representado por la actividad de descargas parciales. La **Figura 2.6** muestra el modo de falla de un aislamiento deteriorado con respecto a la intensidad de las descargas parciales medidas.

En el punto cercano a la eventual falla, la erosión y el componente resistivo del aislamiento, se han incrementado al punto donde las descargas parciales se han reducido, dado que los micro arqueos, han causado la carbonización y el desgaste por erosión, proporcionando una trayectoria directa para el flujo de corriente. En este punto, las evidencias del deterioro del aislamiento, son generalmente detectadas por los métodos tradicionales de medición de resistencia de aislamiento.

Con el desarrollo de los modelos anteriores, podemos ilustrar un modelo completo de las diferentes descargas en el sistema aislante, representada en la **Figura 2.7**.


Figura 2.6 Intensidad de la DP versus modo de falla del aislamiento.



Figura 2.7 Modelo del sistema aislante para el análisis de descargas parciales.

# CAPÍTULODetección de Descargas Parciales3Mediante la Técnica de BandaUltra Ancha (UWB)

## 3.1 Introducción

Las descargas parciales en un motor pueden ser evaluadas en fábrica con cierta facilidad, de acuerdo a procedimientos normalizados. Esta medición se realiza utilizando un detector de banda ancha. El rango de frecuencias de medición normalizado para DP, se encuentra entre 30 kHz y 500 kHz, este ancho de banda, fue definido y estandarizado a principios de los años 70's, antes de la era digital y sin ninguna relación física con el fenómeno de la DP (ver apéndice A). Sin embargo, h interferencia electromagnética presente en el rango de frecuencias de medición normalizado para descargas parciales es particularmente alta en las plantas donde se encuentran instalados los motores de gran capacidad. Esto debido a que existen más de un motor y sus señales se acoplan al bus difundiéndose en todo el tablero. Adicionalmente a lo anterior, para la medición normalizada de DP en línea, se requiere colocar capacitores de acoplamiento en terminales del motor (ver apéndice B), por lo que es difícil realizar actualmente las mediciones de DP en motores instalados utilizando este método.

Mediciones realizadas en laboratorio y bajo condiciones controladas de interferencia han demostrado que las formas de onda de la corriente producida por las DP son formas de onda tipo impulso que alcanzan frentes de muy rápido tiempo de subida (0.7ns) y que se deforman en función de la distancia. Esto equivale a frecuencias cercanas a 1GHz, tiempo en que el fenómeno de ionización transitoria puede ocurrir dentro de los defectos del aislamiento que originan las descargas parciales. El análisis de las señales de DP en este rango de frecuencia, que excede por dos órdenes de magnitud al rango normalizado de banda ancha, ha sido definido como el método de medición de DP en Banda Ultra Ancha (UWB, por sus siglas del inglés Ultra Wide Band) [40].

Lo anterior implica, que para reconstruir con precisión la forma de onda de estos impulsos, se requiere un método de medición que utilice sensores con un ancho de banda capaces de hacer mediciones a frecuencias lo más próximas posible a 1 GHz. Actualmente, debido a los avances de la electrónica, es posible digitalizar con una precisión adecuada la forma de onda de las descargas parciales, o más bien, la forma de su efecto electromagnético en la vecindad del defecto que la ocasiona.

Adicionalmente, a la implementación física del método de medición, un problema general en la detección de las descargas parciales, es determinar la relación entre las cantidades que pueden ser medidas y el desplazamiento real de cargas en la cavidad<sup>1</sup> o defecto de un aislamiento. En los motores de gran capacidad, estas cantidades medidas son principalmente transitorios de voltaje, detectados por acoplamiento inductivo o capacitivo entre el sensor de medición y uno de los electrodos del sistema bajo prueba.

En este capítulo, se presentan los fundamentos de la detección y análisis de las descargas parciales mediante la aplicación de la técnica de banda ultra ancha, incluyendo los fundamentos teóricos para establecer la relación entre las cantidades medidas y el desplazamiento de cargas en la cavidad o defecto del aislamiento del motor, mediante el empleo de sensores de campo cercano.

Estos fundamentos teóricos, dan soporte al método de diagnóstico de motores de gran capacidad operando en planta, tema central de este trabajo de tesis y permiten establecer los requerimientos de implementación e interpretación de los resultados obtenidos de su aplicación.

#### 3.2 Aspectos fundamentales de la detección de DP en Banda Ultra Ancha (UWB)

Para establecer los conceptos fundamentales de la detección de las descargas parciales en banda ultra ancha, es necesario recordar de manera breve el modelo de la descarga parcial basado en la teoría de avalanchas propuesta por Townsend[59] (ver apéndice A). Este modelo permite determinar la carga producida por una descarga parcial, considerándola como el resultado de una avalancha, como se explica brevemente a continuación.

Considérese un defecto de forma esférica (por facilidad de análisis), el cual contiene en su interior un gas, alojado dentro del volumen del aislamiento del motor, el cual se encuentra sometido a un campo eléctrico. Se supone también que el gas presenta un solo ión libre, posicionado en el polo de la cavidad más cercano al electrodo negativo.

El ión libre será acelerado por el campo eléctrico hacia el electrodo positivo, presentando una probabilidad de "colisión" dependiente de la cantidad de moléculas de gas presentes en la cavidad y que se manifiesta como una presión interna. La posible colisión, de acuerdo al modelo presentado, generará un ión negativo adicional siempre y cuando el ión negativo libre inicial llamado ahora ión de inicio de avalancha, tenga la energía suficiente para arrancar un electrón a un átomo estable ionizándolo. Una vez liberado un segundo ión negativo, éste y el ión de inicio de avalancha serán nuevamente acelerados por el campo eléctrico, colisionando y ionizando progresivamente más átomos estables. Una vez que se ha completado la avalancha, ésta tendrá la forma que se muestra en la **Figura 3.1**.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> En esta tesis, el desplazamiento de cargas, es el movimiento de cargas (electrones / iones) en la cavidad. Esto incluye la separación de electrones de un átomo / molécula, lo cual podría ser llamado también creación de desbalance de carga.



Figura 3.1 Modelo de Townsend para avalanchas iónicas

Los fundamentos del análisis de descargas parciales en banda ultra ancha, se basan en el concepto anterior. Analizando la **Figura 3.2**, que es la figura anterior, pero ahora representando el arreglo del sistema aislante del motor e incluyendo un sensor, al que denominaremos de campo cercano. De acuerdo con la teoría de Pedersen[60], la parte inferior de la figura cónica mostrada en la **Figura 3.2**, presentará a su vez, un campo eléctrico dependiente de la cantidad de iones acumulados. Este campo, polarizará por alineación de dipolos, al aislamiento situado entre el hemisferio del cono y el electrodo inferior.



Figura 3.2 Cargas inducidas en un electrodo de prueba o sensor en la vecindad de una DP en el sistema aislante de un motor

Los dipolos "imagen" situados en el electrodo, se alinearán entonces, produciendo movimiento de carga, el cual puede expresarse como dq/dt. Esta es la definición de una corriente de conducción, solo que debido al dieléctrico solo será una corriente de desplazamiento. La corriente así obtenida es posteriormente sometida a un amplificador oscilador con la finalidad de amortiguarla y acondicionarla al ancho de banda de los detectores convencionales. Una vez acondicionada es integrada para conocer la cantidad de carga que representa y esta magnitud es promediada con la de otras avalanchas y desplegada en magnitud y fase.

En la **Figura 3.2**, se observa como los reacomodos iónicos de una cavidad bajo estudio forman imágenes de carga. Estas imágenes de carga se dan tanto en los electrodos de prueba como en el sensor de campo cercano. Debido a estos movimientos de carga, se genera una onda electromagnética transversal que se radia en todas direcciones e induce un potencial en las superficies conductoras que se ven afectadas por el campo transitorio de la descarga.

#### 3.3 La Teoría de las cargas inducidas de Pedersen

Convencionalmente, Las descargas parciales en cavidades de un dieléctrico sólido, son discutidas en términos de un circuito capacitivo equivalente conocido como el modelo ABC (ver apéndice A), donde la cavidad es representada por una capacitancia y las descargas se simulan por la descarga de esa capacitancia [61,62,63,64].

Recordemos que un circuito equivalente es cualquier circuito que pueda generar, tan fielmente como sea posible, las señales que se manifiestan en las terminales del sistema real. En este aspecto, el modelo ABC ha sido muy exitoso en promover el desarrollo de métodos normalizados para la detección de descargas parciales[65]. Es importante notar que la operación de un circuito equivalente no corresponde de ninguna manera al proceso físico que ocurre en el sistema real. Esto resulta evidente en el caso del modelo ABC, dado que este representa un fenómeno físico, el cual es inherentemente un problema de campos, en términos de parámetros concentrados de circuitos.

Pedersen[60], discute que visualizar una cavidad como un capacitor es una interpretación errónea del concepto de capacitancia. Este concepto esta intrínsecamente relacionado a electrodos conductores, entre los cuales se puede establecer un campo electroestático libre de cargas espaciales. Esto significa que el campo debe ser Laplaciano. Consecuentemente debe existir una estricta proporcionalidad entre las cargas Q y -Q en los electrodos y la tensión eléctrica U, aplicada entre esos electrodos, esto es:

$$Q = CU \tag{3.1}$$

Donde *C* es la capacitancia. Una aplicación de (3.1) al campo dentro de la cavidad no es posible, dado que la pared de la cavidad no es una superficie equipotencial[66], y una vez que las cargas espaciales están presentes, el campo no es más un campo Laplaciano, lo cual otra vez anula el uso de (3.1)[67].

Los transitorios que se manifiestan en los electrodos de un sistema durante la actividad de descargas parciales, están relacionados con las cargas que son electrostáticamente inducidas por las cargas libres o iones. Las fuentes primarias para esas cargas inducidas son las cargas que se encuentran distribuidas dentro de las cavidades del medio aislante debido a la actividad de la descarga parcial.

Considerando las limitaciones del modelo ABC, Pedersen desarrolló su teoría, con la intención de cuantificar la relación entre los transitorios que produce la descarga parcial y la creación o cambio de una distribución de carga en el espacio entre los electrodos del sistema, producida por una descarga eléctrica.

#### **3.3.1 El concepto de cargas inducidas**

La carga inducida puede expresarse como la diferencia entre la carga en un electrodo después de una actividad de descarga parcial y la carga en el mismo electrodo previa a esta actividad [68]. La implementación directa de un método basado en esta consideración puede ser bastante complicada, ya que requiere la solución de la ecuación de Poisson. Una aproximación más directa, es posible mediante el principio de superposición.

Basados en el concepto de carga inducida, se pueden derivar expresiones analíticas para las cargas inducidas en el electrodo de medición de un sistema, dependiendo de la base del análisis, éste puede realizarse de dos diferentes maneras, ya sea en el campo  $\vec{D}$  [69,70], o en el campo  $\vec{P}$  [71]. En el primer caso, es la descripción Maxwelliana en la cual el campo dentro del dieléctrico esta relacionada al campo  $\vec{D}$  y es conveniente para aplicaciones prácticas, mientras que el segundo caso, es la descripción cuasi-molecular en la cual la polarización  $\vec{P}$  juega un rol dominante y es adecuada para estudios fundamentales de la física molecular del fenómeno.

Una implementación directa del segundo método a un sistema real sería muy difícil, en caso de que fuera posible. La razón de esto es que, en el enfoque del campo  $\vec{P}$ , los parámetros relacionados con el ambiente del dieléctrico sólido, aparecen explícitamente en las expresiones analíticas para los transitorios de la descarga parcial y sus magnitudes dependen de fuentes de campo desconocidas. En el enfoque del campo  $\vec{D}$ , esos efectos son englobados en la función  $\lambda$  y esta función puede ser determinada por procedimientos estándares conocidos.

El método de diagnóstico basado en la detección de las DP, mediante técnicas de banda ultra ancha, que se presenta en este trabajo de tesis, se basa en la descripción Maxwelliana en la cual el campo dentro del dieléctrico esta relacionada al campo  $\vec{D}$ , ésta se presenta a continuación.

#### 3.3.2 Descripción Maxwelliana

La carga inducida depende de manera única de la localización y magnitud de la carga en el espacio. Esta carga inducida es independiente de los potenciales del electrodo, si las

permitividades son independientes del campo eléctrico. Una carga infinitesimal dQ, localizada en algún lugar de la región entre los electrodos, inducirá cargas en todos los electrodos. La carga inducida  $dq_i$  en el iésimo electrodo será, de acuerdo al principio de superposición, proporcional a dQ,

$$dq_i = -\mathbf{I}_i \, dQ \tag{3.2}$$

El parámetro  $I_i$  representa el factor de proporcionalidad entre la carga libre en el volumen entre electrodos y la carga inducida en el electrodo de medición y es una función escalar positiva adimensional la cual depende solamente de la localización de dQ. Algunas características de la función I se ilustran en la **Figura 3.3**, donde se muestra un sistema con dos electrodos, donde el electrodo 1 es de medición.

La carga inducida total en el i-ésimo electrodo por una distribución de cargas en el espacio, puede expresarse entonces de la forma siguiente:

$$q_i = -\iiint \boldsymbol{l}_i \, \boldsymbol{r} \, d\, \Omega - \iint \boldsymbol{l}_i \, \boldsymbol{s} \, dS \tag{3.3}$$

En la ecuación anterior r es la densidad de carga volumétrica en el elemento de volumen dW y s es la densidad de carga superficial en el área del elemento dS de una interfase entre dos dieléctricos. La integral de volumen es extendida sobre todo el espacio y la integral de superficie sobre todas interfaces dieléctricas.

En el estudio de descargas parciales que se presentan en cavidades de dieléctricos sólidos, las cargas en el espacio se localizan dentro de las cavidades y en las paredes de éstas, por lo que se deben utilizar ambos términos en (3.3). En contraste, el uso de un dispositivo para medir las cargas superficiales del aislante [72], se relaciona solamente con la segunda integral en (3.3).

La función de respuesta  $l_i$ , puede ser determinada de acuerdo a Maxwell en [10], mediante la aplicación al sistema del Teorema recíproco de Green, de la siguiente manera: Si todos los electrodos son mantenidos a potencial de tierra, todas las cargas relacionadas a la capacitancia parcial serán cero. Las únicas cargas que quedan en los electrodos serán entonces, las cargas inducidas asociadas con las cargas en el espacio, depositadas en el espacio subtendido por esos electrodos. Comparamos esto con la situación cuando  $\mathbf{r} = 0$  y  $\mathbf{s} = 0$  en cualquier parte, el potencial del iésimo electrodo es  $U_{ci}$  y todos los demás electrodos se encuentran a potencial cero. Aplicando el teorema recíproco de Green [73] a esas dos situaciones nos llevan a:

$$U_{ci} q_i + \iiint V_{ci} \mathbf{r} d \Omega + \oiint V_{ci} \mathbf{s} dS = 0$$
(3.4)

$$q_{i} = -\iiint \frac{V_{ci}}{U_{ci}} \mathbf{r} d \,\Omega - \iint \frac{V_{ci}}{U_{ci}} \mathbf{s} \, dS \tag{3.5}$$

 $V_{ci}$  denota los potenciales escalares en  $d\mathbf{W}$  y dS cuando el i-ésimo electrodo se encuentra al potencial  $U_{ci}$ , todos los otros electrodos se encuentran a cero potencial y el sistema es espacio libre de cargas. Comparando (3.3) y (3.5) se muestra que:

$$\boldsymbol{I}_{i} = \frac{V_{ci}}{U_{ci}} \tag{3.6}$$

Ya que  $V_{ci}$  es la solución para la ecuación de Laplace es:

$$\overrightarrow{\nabla} \bullet (\mathbf{e} \ \overrightarrow{\nabla} V_{ci}) = 0 \tag{3.7}$$

 $\boldsymbol{l}_i$  puede ser determinada por:

$$\overrightarrow{\nabla} \bullet (\mathbf{e} \, \overrightarrow{\nabla} \, \mathbf{I}_{ci}) = 0 \tag{3.8}$$

En la cual *e* denota la Permitividad absoluta. Las condiciones de frontera son  $I_i = I$  en la superficie del iésimo electrodo y  $I_i = 0$  en las superficies de los electrodos restantes. Como se puede ver en la **Figura 3.3**, para el electrodo 1,  $I_I = I$  cuando dQ se encuentra muy cerca del electrodo de medición 1 y  $I_I = 0$  cuando dQ se encuentra cercano a alguno de los otros electrodos.

Adicionalmente, la siguiente condición debe ser satisfecha en todas las interfases dieléctricas, tal como en las paredes de la cavidad, esto es:

$$\boldsymbol{e} + \left[\frac{\partial \boldsymbol{I}_i}{\partial n}\right]_{+} = \boldsymbol{e} - \left[\frac{\partial \boldsymbol{I}_i}{\partial n}\right]_{-}$$
(3.9)

Donde  $\lambda_i$  es diferenciada en la dirección perpendicular a la interfase y los signos + y – se refieren a cada lado de la interfase respectivamente. Una deducción alternativa de (3.8) basada directamente en las ecuaciones de Maxwell es dada en la referencia [72].

Dado que (3.9) es la ecuación de Laplace, cualquier método estándar para el cálculo de campos electrostáticos en espacios libres de carga, puede ser utilizado para evaluar  $I_i$ . Sin embargo, se debe hacer énfasis, que  $U_{ci}$  y  $V_{ci}$  son introducidas solamente para efecto de cálculo.  $U_{ci}$  puede tomar cualquier valor arbitrario seleccionado,  $U_{ci}$  no es de ninguna manera sinónimo con el potencial del i-ésimo electrodo durante las actividad de las descargas parciales, para el cual pueden existir condiciones de frontera totalmente diferentes.

30



**Figura 3.3.** Una Carga  $dq_1$  en el electrodo de medición 1, inducida por una carga dQ localizada en diferentes posiciones. Se muestran las condiciones de frontera de la función  $\lambda$ .

#### 3.3.3 Relación entre la carga inducida y los transitorios medidos

Los transitorios que se manifiestan en los electrodos de un sistema durante la actividad de descargas parciales, están relacionadas con las cargas que son electromagnéticamente inducidas en éstos. Las fuentes primarias para esas cargas inducidas son aquellas que, como un resultado de la actividad de las descargas parciales, son distribuidas dentro de las cavidades del medio aislante. Estas relaciones son derivadas a continuación y su aplicación a la medición de los transitorios de las descargas parciales, son discutidos.

En la **Figura 3.4**, se muestra un sistema con dos electrodos 1 y 2. Un sistema como este es de hecho un sistema de tres electrodos, el tercer electrodo 0, lo forma la tierra, en los siguientes análisis se denominará como N solamente al número total de electrodos metálicos en el sistema.

Bajo la suposición, que el espacio entre los electrodos se encuentra libre de cargas, y de acuerdo a la definición del concepto de la capacitancia, la carga en un electrodo dependerá de la diferencia de potencial entre este electrodo y los otros dos y la capacitancia parcial entre ellos. Por lo que la carga  $Q_1$  en el electrodo 1 y  $Q_2$  en el electrodo 2 estarán dadas por:

$$Q_1 = C_{10} \cdot (U_1 - U_0) + C_{12} \cdot (U_1 - U_2)$$
(3.10)

$$Q_2 = C_{20} \cdot (U_2 - U_0) + C_{21} \cdot (U_2 - U_1)$$
(3.11)

En las cuales  $C_{10}$ ,  $C_{20}$  y  $C_{12}$ =  $C_{21}$  son las capacitancias parciales entre los electrodos,  $U_1$  y  $U_2$  son los potenciales de los electrodos 1 y 2.  $U_0$  es normalmente cero.



Figura 3.4 Sistema con dos electrodos metálicos y una cavidad en un dieléctrico.

Las expresiones 3.10 y 3.11, pueden generalizarse para un sistema con N electrodos. La carga  $Q_i$  en el iésimo electrodo en un sistema con el espacio libre de cargas consistente de N electrodos está dada por:

$$Q_i = \sum_{j=0}^{N} C_{ij} (u_i - u_j)$$
(3.12)

Con:

$$\sum_{j=0}^{N} Q_{i} = 0 \tag{3.13}$$

En la cual j=0 se refiere a tierra.  $U_i$  y  $U_j$  son los potenciales del i-ésimo y j-ésimo electrodo, y  $C_{ij}$  es la capacitancia parcial entre esos electrodos.

Consideremos el caso de algún evento en el espacio externo a los electrodos, el cual crea una distribución de carga espacial en un punto específico entre los electrodos. Este cambio puede ser causado por una descarga parcial en una cavidad. En este caso, la carga total en el espacio será cero. Pero esta distribución de cargas en el espacio interelectrodos causará un cambio en la distribución de carga en los electrodos, la cual está relacionada a la carga inducida electrostáticamente q (Figura 3.4).

Al estar presentes estas cargas espaciales en el volumen interelectrodo, una carga  $q_i$  será inducida en el electrodo i ésimo. Adicionalmente, la carga original en el electrodo puede cambiar de  $Q_i$  a  $Q_{ri}$  y el potencial puede caer de Ui a Ui-DUi, ver detalles en [74]. La carga total de en el i ésimo electrodo en la presencia de carga espacial es la suma de la carga inducida y la carga que esta relacionada con las capacitancias parciales y los nuevos potenciales en los electrodos, esto es:

$$Q_{ri} = q_i + \sum_{j=0}^{N} C_{ij} [(u_i - \Delta u_i) - (u_j - \Delta u_j)]$$
(3.14)

0

$$Q_{ri} = q_i + Q_i - \sum_{j=0}^{N} C_{ij} [(\Delta u_i - \Delta u_j)]$$
(3.15)

Si  $Q_{ri}$  difiere de  $Q_i$  una carga  $DQ_i$ , dada por:

$$\Delta Q_i = Q_{ri} - Q_i \tag{3.16}$$

Tendrá que ser adicionada a la carga en el i-ésimo electrodo. Por lo que la carga inducida  $q_i$ , en un electrodo i, en un sistema de N electrodos, es entonces dada por:

$$q_i = \Delta Q_i + \sum_{j=0}^{N} C_{ij} [(\Delta u_i - \Delta u_j)]$$
(3.17)

En principio la carga adicional  $DQ_i$  puede consistir de dos componentes, uno entregado desde la fuente externa a través del cable al electrodo y la otra resultante de un intercambio directo entre la superficie del electrodo y el dieléctrico adyacente. Mientras que la primer componente es directamente accesible para medición, el segundo generalmente queda como desconocido.

Una medición directa de  $DQ_i$  es posible, solamente en la ausencia de cualquier intercambio de carga entre el electrodo y el dieléctrico. Esta condición es alcanzada normalmente, cuando la carga inducida esta relacionada a las descargas en una cavidad, la cual esta completamente embebida en un dieléctrico sólido, como lo indica la ecuación 3.13. En tales casos (3.17), relaciona la carga inducida con cantidades que son manifestadas en los electrodos y las cuales pueden ser medidas.

Esta relación es por consiguiente, la base fundamental para el equipo de detección de las descargas parciales. Sin embargo, no contiene ninguna cantidad la cual relacione directamente la carga inducida con su fuente primaria, llámese la carga espacial o la descarga parcial. Más aún, no contiene información sobre la localización y el tamaño de la cavidad en la cual las descargas parciales estén activas. La manera en la cual se establece esta relación, se presenta a continuación.

#### **3.3.4** Pulsos de corriente en los conductores

Durante el periodo de tiempo en el que las descargas parciales se desarrollan, pueden circular corrientes transitorias en los conductores de los electrodos y pueden observarse transitorios de voltaje. Así también, puede ocurrir una transferencia de carga del electrodo al espacio entre los electrodos. La corriente  $I_i$  que fluye en el conductor del i-ésimo electrodo cuando el sistema está libre de descargas esta dada por:

$$I_i = \frac{dQ_i}{dt} \tag{3.18}$$

Cuando las descargas parciales se encuentran activas, una corriente transitoria  $I_{ri}$  se superimpone a  $I_i$ . Adicionalmente puede ocurrir una transferencia de carga de los electrodos al espacio interelectrodos; esto es posible que ocurra si una cavidad está localizada en una interfase entre un electrodo y el dieléctrico sólido. Esta transferencia de carga puede cuantificarse por una corriente  $I_{ti}$  que fluye alejándose del i-ésimo electrodo en dieléctrico.

Por el principio de conservación de carga tenemos que:

$$I_{i} + I_{ri} = I_{ti} + \frac{dQ_{i}}{dt}$$
(3.19)

Si realizamos una combinación de esta ecuación con (3.15) y (3.18) nos lleva a:

$$I_{ri} = I_{ii} + \frac{dq_i}{dt} - \sum_{j=0}^{N} C_{ij} \left[ \left( \frac{d\Delta u_i}{dt} - \frac{d\Delta u_j}{dt} \right) \right]$$
(3.20)

Diferenciando con respecto al tiempo, la siguiente ecuación:

$$q_i = -\iiint \boldsymbol{l}_i \ \boldsymbol{r} \, d\, \Omega - \iint \boldsymbol{l}_i \, \boldsymbol{s} \, dS \tag{3.21}$$

da por resultado:

$$\frac{dq_i}{dt} = -\iiint \mathbf{I}_i \ \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial t} d\Omega - \iint \mathbf{I}_i \ \frac{d\mathbf{s}}{dt} \mathbf{s} \ dS \tag{3.22}$$

Esta ecuación, mediante las ecuaciones de continuidad siguientes:

$$\nabla \cdot \vec{J} + \frac{\partial r}{\partial t} = 0 \qquad \vec{n} \cdot \Delta \vec{J} + \frac{\partial s}{\partial t} = 0$$
 (3.23)

Se puede escribir de la forma:

$$\frac{dq_i}{dt} = \iiint \mathbf{I}_i \ \nabla \cdot \mathbf{J} \, d \, \Omega - \iint \mathbf{I}_i \ \vec{n} \cdot \Delta \mathbf{Js} \ dS \tag{3.24}$$

 $\vec{J}$  es la densidad de corriente en un punto dentro de una cavidad durante las actividades de la descarga.  $\vec{n} \cdot \Delta \vec{J}$  es la divergencia de la interfase definida de la siguiente manera [75]:

$$\vec{n} \cdot \Delta \vec{J} = \vec{n} \cdot (\vec{J}_{+} - \vec{J}_{-}) \tag{3.25}$$

Donde los signos + y – se refieren a cada lado de la interfase respectivamente, y  $\vec{n}$  es un vector unitario normal a la interfase con su dirección alejándose del lado positivo. Se supone en este análisis que el efecto de la conductividad de las interfases, por ejemplo, un posible flujo de carga transitoria a lo largo de las paredes de la cavidad, puede ser despreciado, como ocurre en las etapas iniciales de la DP, donde no existe degradación superficial apreciable[76]. Introduciendo las identidades siguientes:

$$\vec{\nabla} \cdot (\boldsymbol{l}_i \ \vec{J}) = \boldsymbol{l}_i \vec{\nabla} \cdot \vec{J} + \vec{J} \ \vec{\nabla} \cdot \boldsymbol{l}_i$$
(3.26)

у

$$\boldsymbol{I}_{i} \ \vec{n} \cdot \Delta \vec{J} = \vec{n} \cdot (\boldsymbol{I}_{i} \ \vec{J}) \tag{3.27}$$

34

Esto nos lleva a:

$$\frac{dq_i}{dt} = \iiint \quad \nabla \cdot (\mathbf{1}_i \mathbf{J}) d\Omega + \iint \mathbf{n} \cdot \Delta (\mathbf{1}_i \mathbf{J}) dS - \iiint \mathbf{J} \cdot \nabla \cdot \mathbf{1}_i d\Omega \tag{3.28}$$

Aplicando Teorema de la divergencia extendida de Gauss[77] al campo vectorial  $\mathbf{l}_i \mathbf{J}$ , obtenemos que:

$$I_{ti} + \iiint \nabla \cdot (\mathbf{I}_i \mathbf{J}) d\Omega + \iint \mathbf{n} \cdot \Delta (\mathbf{I}_i \mathbf{J}) dS = 0$$
(3.29)

Esto significa que:

$$\frac{dq_i}{dt} = -I_{ii} - \iiint J \cdot \nabla I_i \, d\,\Omega \tag{3.30}$$

Insertando (3.30) en (3.20) se muestra que la corriente transitoria adicional fluyendo en el conductor hacia el i-ésimo electrodo, debido a las actividades de descarga esta dada por:

$$I_{ri} = -\iiint \vec{J} \cdot \vec{\nabla} \boldsymbol{I}_i d\,\Omega - \sum_{j=0}^N C_{ij} \left[ \left( \frac{d\Delta u_i}{dt} - \frac{d\Delta u_j}{dt} \right) \right]$$
(3.31)

Debe notarse que si  $\vec{J}$  y  $\nabla I_i$ , son ortogonales, el valor de la integral de volumen en (3.29) es cero, y por lo tanto una  $\vec{J}$  no contribuye inherentemente a la corriente del conductor.

Dado que la función  $\lambda_i$ , es determinada por la ecuación de Laplace, ver[10], el gradiente de  $\lambda_i$ , puede encontrarse de:

$$\nabla \boldsymbol{I}_{i} = -\frac{\vec{E}_{ci}}{U_{ci}} \tag{3.32}$$

En la cual  $\vec{E}_{ci}$  es la fuerza del campo en el campo electrostático Laplaciano entre los electrodos del sistema cuando el potencial del iésimo electrodo es  $U_{ci}$  y todos los otros electrodos están a cero potencial.

Se debe enfatizar nuevamente que  $\vec{E}_{ci}$  y  $U_{ci}$  se introducen solamente para propósitos de cálculo. Por esta razón  $\vec{E}_{ci}$  y  $U_{ci}$  no deben ser insertadas en la expresión para la corriente.

La ecuación (3.32) debe ser evaluada independientemente de (3.31) para evitar cualquier confusión con los términos de campo aplicados dado que las condiciones de frontera pueden ser muy diferentes.

La densidad de corriente  $\vec{J}$ , ver (3.31), esta relacionada con el movimiento de electrones e iones dentro de las cavidades durante las actividades de las descargas, esto es:

$$\vec{J} = \sum_{k=0}^{m} \boldsymbol{r}_k \, \vec{u}_k \tag{3.33}$$

Donde  $\rho$  es la densidad de carga y  $\vec{u}$ , la velocidad de arrastre, k = 0 se refiere a los electrones y *m* es el número de posibles especies de iones positivos y negativos los cuales participan en el proceso de la descarga.

Si bien el análisis planteado anteriormente se discute con referencia a descargas parciales en cavidades, el conjunto de fórmulas es de validez general. Por lo tanto éstas pueden ser aplicadas a sistemas de electrodos en los cuales las corrientes en los conductores externos dependen de las cargas en movimiento en el espacio interelectrodos.

#### 3.3.5 Aplicación a descargas parciales en cavidades

Con la finalidad de determinar la carga inducida en un electrodo por un cambio de distribución de carga en una cavidad de geometría arbitraria, localizada en el aislamiento del motor, se considera una configuración como la mostrada en la **Figura 3.5**.

Una descarga en una cavidad da por resultado un despliegue de cargas en la superficie S de la cavidad. La densidad de carga superficial  $\sigma$  alcanzará valores tales, que el campo eléctrico dentro de la cavidad se reducirá hasta que la descarga es extinguida. Dado que la detección de las descargas parciales se refiere a señales las cuales se manifiestan en un electrodo específico, en esta sección se omitirán los subíndices.

El valor final resultante de la carga inducida q en este electrodo de medición en vista de:

$$q_i = -\iiint \boldsymbol{l}_i \, \boldsymbol{r} \, d\, \Omega - \iint \boldsymbol{l}_i \, \boldsymbol{s} \, dS \tag{3.34}$$

está dado por:

$$q = -\iint_{S} \boldsymbol{l} \, \boldsymbol{s} \, dS \tag{3.35}$$

Donde  $\sigma$  es el valor final de la densidad de carga superficial en *S*.



# **Figura 3.5** Las cargas $dq_1$ y $dq_2$ , inducidas por una carga superficial *sdS* en el electrodo 1 y 2 respectivamente.

El siguiente punto es determinar la distribución de carga, o para ser más exacto, los cambios de esta distribución de carga, a partir de la medición de la carga inducida. Las dimensiones de cualquier cavidad son muy pequeñas en comparación con la totalidad del sistema. En (3.35)  $\lambda$  puede por lo tanto, dentro de la cavidad, ser reemplazada por su expansión de Taylor. Sea  $\vec{r}$  el vector posición para un punto fijo dentro de la cavidad y  $\vec{s}$  un vector variable que enlaza el final de  $\vec{r}$  con dS (ver **Figura 3.5**). El valor de  $\lambda$  en dS, puede ahora escribirse en la forma de la expansión de Taylor:

$$\boldsymbol{l}(\vec{r}+\vec{s}) = \boldsymbol{l}(\vec{r}) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{s^n}{n!} \frac{\partial^n \boldsymbol{l}(\vec{r})}{\partial s^n}$$
(3.36)

En la cual  $\partial^n \mathbf{l}(\vec{r})/\partial s^n$ , es el valor de la derivada direccional de orden enésimo de  $\lambda$  para el punto fijo dado por  $\vec{r}$  [78]. Combinando (3.35) y (3.36), significa que la carga inducida q puede ser escrita como una serie infinita:

$$q = \sum_{n=0}^{\infty} q_n \tag{3.37}$$

Detección de Descargas Parciales Mediante la Técnica de Banda Ultra Ancha (UWB)

37

En la cual cada término esta relacionado a la expansión multipolar de las cargas desplegadas en las paredes de la cavidad como resultado de la descarga parcial. El término de orden cero  $q_0$  es el término monopolar:

$$q_0 = -\mathbf{l}(\vec{r}) \iint_{S} \mathbf{s} \, dS \tag{3.38}$$

0

$$q_0 = - \mathbf{I}(\mathbf{r})Q_s \tag{3.39}$$

Donde  $Q_s$  es la carga neta desplegada en S por la descarga parcial. El término de primer orden  $q_1$  es el término dipolar dado por:

$$q_{1} = -\boldsymbol{m}_{x} \frac{\partial \boldsymbol{l}(\vec{r})}{\partial x} - \boldsymbol{m}_{y} \frac{\partial \boldsymbol{l}(\vec{r})}{\partial y} - \boldsymbol{m}_{z} \frac{\partial \boldsymbol{l}(\vec{r})}{\partial z}$$
(3.40)

En la cual  $m_{x}$ ,  $m_{y}$  y  $m_{z}$  son los componentes cartesianos del momento dipolar de la distribución de carga, por ejemplo:

$$\bar{\boldsymbol{m}} = \iint\limits_{S} \bar{\boldsymbol{s}} \,\boldsymbol{s} \,\,dS \tag{3.41}$$

El término de segundo orden  $q_2$  esta relacionado momento cuadripolar y está dado por:

$$q_{2} = -\frac{1}{2} \mathbf{m}_{xx} \frac{\partial^{2} \mathbf{l}(\vec{r})}{\partial x^{2}} - \frac{1}{2} \mathbf{m}_{yy} \frac{\partial^{2} \mathbf{l}(\vec{r})}{\partial y^{2}} - \frac{1}{2} \mathbf{m}_{zz} \frac{\partial^{2} \mathbf{l}(\vec{r})}{\partial z^{2}}$$

$$-\frac{1}{2} \mathbf{m}_{yy} \frac{\partial^{2} \mathbf{l}(\vec{r})}{\partial x \partial y} - \frac{1}{2} \mathbf{m}_{yz} \frac{\partial^{2} \mathbf{l}(\vec{r})}{\partial y \partial z} - \frac{1}{2} \mathbf{m}_{xz} \frac{\partial^{2} \mathbf{l}(\vec{r})}{\partial z \partial x}$$

$$(3.42)$$

En la cual los seis componentes del tensor del momento cuadripolar [79] están dados por:

$$\mathbf{m}_{xx} = \iint_{S} s_{x}^{2} \mathbf{s} \, dS \qquad \mathbf{m}_{xy} = \iint_{S} s_{x} \, s_{y} \, \mathbf{s} \, dS$$

$$\mathbf{m}_{yy} = \iint_{S} s_{y}^{2} \mathbf{s} \, dS \qquad \mathbf{m}_{yz} = \iint_{S} s_{y} \, s_{z} \, \mathbf{s} \, dS \qquad (3.43)$$
$$\mathbf{m}_{zz} = \iint_{S} s_{z}^{2} \mathbf{s} \, dS \qquad \mathbf{m}_{zx} = \iint_{S} s_{z} \, s_{x} \, \mathbf{s} \, dS$$

 $s_x$ ,  $s_y$  y  $s_z$ , denotan los componentes cartesianos de  $\vec{s}$ .

El término de tercer orden  $q_3$  está relacionado al momento octapolar, y así progresivamente  $q_n$  al multipolo de orden enésimo. Sin embargo, dado que las dimensiones de la cavidad son muy pequeñas, el término de segundo orden y mayores, normalmente pueden ser despreciados. Más aún, dado que en la mayoría de los casos la carga neta  $Q_s$  será cero, esto es  $q_0 = 0$ , nos quedamos con el término dipolar. En la mayoría de los casos, la carga inducida q estará dada por (3.40). Esta expresión puede ser escrita de manera vectorial como:

$$q = -\mathbf{m} \cdot \nabla \mathbf{I}(\vec{r}) \tag{3.44}$$

Donde el momento dipolar  $\mathbf{n}$  está dado por (3.41). En general, el gradiente de  $\lambda$  puede ser determinado solamente en tales casos donde la localización y la forma geométrica de la cavidad se conocen. Esta dificultad puede ser evitada hasta cierto punto, reemplazando  $\lambda$  con el valor al cual la función  $\lambda$  llegaría, si suponemos que la totalidad del sistema aislante se encuentra totalmente libre de cavidades, esto simplifica grandemente el cálculo de la carga inducida. Sea  $\lambda_0$  esta función idealizada.

La variación en la carga inducida con la localización de la cavidad es dada entonces por el gradiente de  $\lambda_0$ . Si, por ejemplo, el electrodo de alta tensión completo, es utilizado para propósitos de medición, entonces para un simple espaciador tipo disco en un sistema coaxial la carga inducida es proporcional a la inversa de la distancia desde el eje de este electrodo al centro de la cavidad [70].

Para sistemas prácticos, los cuales están siempre asociados con campos no uniformes, el cálculo de  $\lambda_0$  (libre de cavidades), es esencialmente un problema trivial en comparación a la evaluación de  $\lambda$  (con cavidades). Los gradientes de  $\lambda$  y  $\lambda_0$  están relacionados por:

$$\vec{\nabla} \boldsymbol{I} = h \, \vec{\nabla} \, \boldsymbol{I}_0 \tag{3.45}$$

39

Una discusión más completa de la relación  $\vec{\nabla} \mathbf{l}$  / $\vec{\nabla} \mathbf{l}_0$  se puede encontrar en [70].

Si la aplicación está restringida a geometrías simples, tales como esferoides y a dieléctricos isotrópicos, podemos considerar al parámetro h como un escalar. Generalmente sin embargo, h es un tensor. Con base en las analogías matemáticas entre la función  $\lambda$  y un campo electrostático, puede deducirse que:

$$1 < h < \boldsymbol{e}_r \tag{3.46}$$

Donde  $\varepsilon r$  es la permitividad relativa del volumen dieléctrico. El límite inferior aplica a cavidades que son muy alargada con respecto a la dirección de  $\nabla I_0$ . El límite superior es aproximado para una cavidad muy aplanada.

La introducción de  $I_0$  nos lleva a la siguiente expresión para la carga total inducida en el electrodo de medición:

$$q = -h\,\mathbf{\bar{m}}\cdot\vec{\nabla}\,\mathbf{I}_0\tag{3.47}$$

Una evaluación del momento dipolar requiere de un conocimiento de la forma y localización de la cavidad. Debe conocerse también la naturaleza del gas dentro de la cavidad. Todos esos datos particulares no están disponibles cuando se realizan pruebas de descargas parciales de equipo comercial de alta tensión. Sin embargo, el momento dipolar y el parámetro *h*, permanecerán constantes si consideramos descargas en un número de cavidades de volumen y forma fijos, conteniendo el mismo gas, pero colocadas en diferentes lugares del sistema aislante. La carga inducida variará en tales casos con la posición de la cavidad, de la misma manera que el gradiente de  $\lambda_0$ . Esto en vista de la analogía con el campo electrostático, como se indicó por la variación de la fuerza del campo eléctrico para el sistema idealizado libre de cavidades. Debe enfatizarse que, con referencia al electrodo de medición, el campo eléctrico equivalente asociado, no es el mismo que el campo eléctrico aplicado. Aunque ambos campos son solución de la ecuación de Laplace, son soluciones muy diferentes, porque cada una satisface condiciones de frontera muy diferentes. Con base en la teoría anterior un análisis cuantitativo relacionado a cavidades elipsoidales y esféricas ha sido realizado por Crichton[70].

#### 3.3.6 Transitorios relacionados con la carga inducida

Las cantidades mediante las cuales la carga inducida puede ser detectada, son transitorios en el potencial y pulsos de corriente en el conductor del electrodo de medición. Este electrodo podría ser una sonda compatible, insertada en el sistema, un segmento de uno de los electrodos terminales o simplemente una de las terminales. La relación entre esos transitorios y la carga inducida esta dada por:

$$q_i = \Delta Q_i + \sum_{j=0}^{N} C_{ij} [(\Delta u_i - \Delta u_j)]$$
(3.48)

40

Para enfatizar la naturaleza transitoria del fenómeno, rescribimos esta expresión en la forma siguiente:

$$q_{i}(t) = \Delta Q_{i}(t) - \sum_{j=0}^{N} C_{ij}[(\Delta u_{i}(t) - \Delta u_{j}(t)]$$
(3.49)

Donde t es el tiempo. Dado que  $\Delta Q_i$  es accesible para mediciones, solamente en la ausencia de cualquier intercambio de carga entre el electrodo mismo y el dieléctrico adyacente esta condición se considera satisfecha en la siguiente discusión.

Los valores de  $\Delta u_i$  y  $\Delta u_j$  son cero antes y después del transitorio. El valor final de la carga inducida, por lo tanto, siempre será igual al valor final de la carga la cual es entregada al electrodo de medición desde la fuente externa, esto es:

$$\lim_{t \to \infty} q_i(t) = \lim_{t \to \infty} \Delta Q_i(t)$$
(3.50)

La carga entregada  $\Delta Q_i$  en la práctica se encuentra integrando la corriente transitoria I<sub>pi</sub> que fluye en el conductor cuando se encuentra activa una descarga parcial, ver (3.31). Esas expresiones contienen la densidad de corriente  $\vec{J}$ , la cual se encuentra elacionada al movimiento de iones y electrones dentro de una cavidad, ver (3.33).

Esta densidad de corriente es sin embargo, desconocida. Una relación entre  $I_{ri}$  y los transitorios en el electrodo puede obtenerse de (3.49) notando que, en la ausencia de una transferencia de carga entre el electrodo y el dieléctrico, la corriente transitoria esta dada por:

$$I_{ri} = \frac{d\,\Delta Q_i}{dt} \tag{3.51}$$

0

$$I_{ri} = \frac{dq_i}{dt} - \sum_{j=0}^{N} C_{ij} \left[ \left( \frac{d\Delta u_i}{dt} - \frac{d\Delta u_j}{dt} \right) \right]$$
(3.52)

El primer término, el cual se relaciona con la carga inducida, es normalmente de muy corta duración dado que es coincidente con la creación de la descarga parcial. El segundo término depende fuertemente de la impedancia del circuito externo, por lo tanto en la mayoría de los casos dominará el transitorio registrado.

Aplicación a un sistema de tres electrodos

Consideremos un sistema de tres electrodos, esto es N=3. El electrodo 1 es la terminal a la cual se le aplica la alta tensión, el electrodo 2 está a potencial de tierra. El tercer electrodo es el electrodo en el cual se registran los transitorios. Este electrodo de medición puede ser un segmento de uno delos otros electrodos o también puede ser un electrodo separado utilizado como una sonda de prueba. La carga inducida  $q_3$  en este electrodo de medición esta de acuerdo a (3.49) dado por:

$$q_{3} = \Delta Q_{3} + C_{30} \Delta U_{3} + C_{31} (\Delta u_{3} - \Delta u_{1}) + C_{32} \Delta U_{3}$$
(3.53)

0

$$q_3 = \Delta Q_3 + C_3 \Delta U_3 - C_{31} \Delta u_1 \tag{3.54}$$

En la cual  $C_3 = C_{30} + C_{31} + C_{32}$  es la capacitancia total del electrodo 3. La corriente transitoria relacionada, como la dada por (3.52) se convierte en:

$$I_{r_{3}} = \frac{dq_{3}}{dt} - C_{3} \frac{d\Delta u_{3}}{dt} + C_{31} \frac{d\Delta u_{1}}{dt}$$
(3.55)

Para estudiar la relación entre la carga inducida  $q_3$  y las cargas en el espacio dentro de una cavidad, se debe encontrar  $\lambda_3$  o  $\lambda_{03}$ . La primera puede ser calculada solamente si se conocen la forma y la localización de la cavidad, mientras que la segunda  $\lambda_{03}$  puede ser determinada sin esta información, dado que se refiere a un sistema libre de cavidades. Las condiciones de frontera para  $\lambda_{03}$  son  $\lambda_{03} = 1$  en la superficie del electrodo 3 y  $\lambda_{03} = 0$  en los otros dos electrodos. Adicionalmente la condición dada por:

$$\boldsymbol{e} + \left[\frac{\partial \boldsymbol{I}_i}{\partial n}\right]_{+} = \boldsymbol{e} - \left[\frac{\partial \boldsymbol{I}_i}{\partial n}\right]_{-}$$
(3.56)

Debe cumplirse en todas las interfases entre los diferentes dieléctricos en el sistema, pero excluyendo las interfases de la cavidad.

Si se utiliza un método o programa el cálculo de campos electrostáticos, las condiciones de frontera a utilizarse en el procedimiento de cálculo para los potenciales del electrodo se transforman en  $U_{c1}=0$ ,  $U_{c2}=0$  y  $U_{c3} \neq 0$ . Es evidente por lo tanto, que el campo calculado en este caso es completamente diferente que el obtenido con el voltaje aplicado al electrodo 1.

Aplicación a un sistema de dos electrodos

El objeto bajo prueba es comúnmente un sistema de dos electrodos, N = 2, con una terminal conectada directamente al potencial de tierra. Cuando se utiliza equipo de detección convencional, los transitorios relacionados a la carga inducida son referidos a la terminal de alto voltaje. Sea i = 1 este electrodo y sea el electrodo 2 directamente aterrizado. La carga inducida  $q_1$  se convierte entonces en:

$$q_1 = \Delta Q_1 + C_{10} \Delta U_1 + C_{12} \Delta U_1$$
(3.57)

0

$$q_1 = \Delta Q_1 + C_1 \Delta U_1 \tag{3.58}$$

En la cual  $C_1 = C_{10} + C_{12}$  es la capacitancia total del electrodo 2. La corriente transitoria se convierte en:

$$I_{r1} = \frac{dq_1}{dt} - C_3 \frac{d\Delta u_1}{dt}$$
(3.59)

Sería deseable medir los transitorios en el electrodo aterrizado, por ejemplo, en el electrodo 2, una impedancia debe insertarse entre este electrodo y tierra, por lo que ahora un voltaje transitorio  $\Delta U_2$  se manifiesta en este electrodo. La carga inducida  $q_2$  es igual a:

$$q_2 = \Delta Q_2 + C_{20} \Delta U_2 + C_{21} (\Delta u_2 - \Delta u_1)$$
(3.60)

0

$$q_2 = \Delta Q_2 + C_2 \Delta U_2 - C_{21} \Delta u_1 \tag{3.61}$$

En la cual  $C_2 = C_{20} + C_{21}$  es la capacitancia total del electrodo 2.

Debe notarse que todos los valores de  $\Delta U$  son definidos en esta teoría como caídas de potencial. Esto significa que  $\Delta U_2$  es negativo si un voltaje transitorio de polaridad positiva es registrado en el electrodo 2.

Similarmente obtenemos para la corriente transitoria a través del electrodo 2 la expresión:

$$I_{r2} = \frac{dq_2}{dt} - C_2 \frac{d\Delta u_2}{dt} + C_{21} \frac{d\Delta u_1}{dt}$$
(3.62)

En comparación con  $q_1$  y  $I_{r1}$ , se ve que  $q_2$  y  $I_{r2}$  dependen de un voltaje transitorio el cual ocurre en la otra terminal. En este caso la terminal de alta tensión. Si este transitorio adicional no se registra, no se podrá lograr una evaluación precisa de la variación temporal. Sin embargo, el valor final de la carga inducida aún puede ser correctamente evaluada, ver (3.49) y (3.50).

#### 3.4 Implementación de la medición de los transitorios de las descargas parciales

Como se observa en las secciones anteriores, la teoría de cargas inducidas de Pedersen, establece un método analítico para la evaluación cuantitativa de la carga inducida en un electrodo en la vecindad de un dieléctrico. El desarrollo de una descarga dentro de una cavidad gaseosa incluida en un dieléctrico, conduce a la separación de cargas iónicas dentro de la cavidad. Esta carga espacial ocasiona inducción electromagnética en todos los conductores del sistema.

Basados en este concepto de carga inducida, se derivan expresiones analíticas para las cargas inducidas en el electrodo de medición de un sistema, mediante un enfoque de Maxwell, según cual el campo dentro del dieléctrico esta relacionada al campo  $\overline{D}$ . Este enfoque es conveniente para aplicaciones prácticas, ya que en él los parámetros relacionados con el ambiente del dieléctrico sólido, son englobados en la función  $\lambda$  y esta función puede ser determinada por procedimientos estándares conocidos.

La función  $\lambda$  es escalar adimensional, trata inherentemente con la presencia de materiales polarizables y está relacionada por lo tanto con el desplazamiento eléctrico. Como se mencionó anteriormente, esta función representa el factor de proporcionalidad entre la carga libre en el volumen interelectrodo y la carga inducida en el electrodo de medición.

#### 3.4.1 Requerimientos de circuitos de medición de DP en Banda Ultra Ancha

Las mediciones de las descargas parciales son realizadas para obtener información acerca de las condiciones del aislamiento. En este trabajo de tesis, como un primer paso se requiere un conocimiento de la carga inducida. Sin embargo, este parámetro se encuentra relacionado efectivamente a dos componentes, ver (3.13). El primero de ellos es  $\Delta Q_i(t)$ , mismo que esta asociado con la corriente transitoria y por lo tanto será fuertemente dependiente de las impedancias del circuito.

El segundo componente está relacionado a los potenciales transitorios de los restantes (N-1) electrodos. Esta situación se origina debido a que la carga en el espacio interelectrodos, induce cargas en todos los N electrodos en el sistema, tal que tenemos:

$$\iiint \mathbf{r} d \,\Omega - \iint \mathbf{s} \, dS + \sum_{j=0}^{N} q_j = 0 \tag{3.63}$$

Dependiendo del electrodo del que se trate, esas cargas inducidas pueden producir cambios en los potenciales del electrodo. A través de las capacitancias parciales, esos cambios son registrados en el electrodo de medición. Consecuentemente, debido a que el componente "potencial" esta cercanamente relacionado a la creación de la carga espacial, i.e. a la duración de la descarga parcial, este componente tendrá un muy corto tiempo de subida. La caída asociada será otra vez controlada por la impedancia del circuito.

Tanto la función  $\lambda$  y la capacitancia parcial son fuertemente dependientes de la localización y la geometría del electrodo de medición. Consecuentemente, la selección del electrodo de medición tendrá una influencia dominante en el registro real de los transitorios.

La realización de mediciones arriba de 50 MHz en un equipo diseñado a 60 Hz es un problema técnico, debido a que la disposición del circuito de pruebas y cada dispositivo involucrado en la medición, deben diseñarse para evitar problemas de distorsión debidos a reflexión de los pulsos de DP. Una solución para mantener la linealidad del pulso es el uso de técnicas de campo cercano, donde el pulso electromagnético de DP es detectado cerca del espécimen, utilizando un dispositivo pasivo o activo denominado sensor de banda ultra ancha de campo cercano. La terminología de campo surge de las componentes del campo creado por cargas imágenes, donde existen dos términos, el primero relacionado directamente con  $\lambda$  y el segundo inverso al cubo de la distancia. Este término es el llamado campo cercano.

## 3.4.2 Circuito de Medición de descargas parciales utilizando técnicas de banda ultra ancha

Utilizando como base los conceptos de carga inducida, en este trabajo de tesis, se implementó un circuito de medición, completamente diferente a los circuitos normalizados de medición de DP, que permite la detección de descargas en motores de gran capacidad, utilizando rangos altos de frecuencia. En la **Figura 3.6** se presenta este circuito de medición, para la detección de las descargas parciales mediante técnicas de banda ultra ancha, que cubre los requerimientos establecidos en la teoría.

En frecuencias superiores a 100 MHz, el campo electromagnético encuentra menor impedancia cuando se propaga en aire (propagación capacitiva). Esto permite la detección de descargas parciales durante la operación normal del motor, si un sensor tipo Rogowski (ver **Figura 3.7**) con un ancho de banda de frecuencia de medición lo más alto posible, se coloca en la vecindad de la fuente de descargas o de su medio de propagación. En este trabajo de tesis se propone la utilización un sensor tipo Rogowski con un ancho de banda de 2 a 40 MHz colocado en la pantalla del cable alimentador principal del motor. Debido a las características de riesgo del área donde se encuentran operando los motores, se propone la



colocación de los sensores de banda ultra ancha en los conductores a la salida del interruptor del motor en el cuarto de control.

Figura 3.6 Circuito eléctrico para la medición de descargas parciales en UWB.



Figura 3.7 Sensor de campo cercano en modalidad bobina de Rogowski.

Los pulsos de las descargas medidos por los sensores de banda ultra ancha, se preamplifican y se digitalizan mediante un pre-amplificador, que amplifica y alarga el pulso medido, produciendo un pulso de frecuencia proporcional más baja para su lectura en un detector convencional. El detector de descargas despliega la medición en un patrón o mapa de descargas tipo repetición-carga-fase N-Q- $\Phi$ , ver **Figura 3.8**, este patrón debe ser sincronizado con la corriente de la fase probada, por lo que en el circuito se incluye un sensor inductivo (Transformador de corriente tipo gancho).



**Figura 3.8** Diagrama N-Q- $\Phi$  o mapa de descargas parciales.

CAPÍTULO

## Desarrollo de Pruebas en Planta y Análisis de Resultados

#### 4.1 Introducción

En este capítulo, se presenta la implementación y la aplicación de un nuevo circuito de prueba para el diagnóstico en línea de trece motores de 2500 C.P. a 13.8 kV, basado en la detección de DP utilizando técnicas de medición de banda ultra ancha, que cumple con los conceptos de carga inducida y requerimientos establecidos en el capítulo 3, de este trabajo de tesis.

El método de diagnóstico en línea de motores de 13.8 kV, basado en la detección de descargas parciales aplicando técnicas de banda ultra ancha (UWB), presentado en este capítulo, es nuevo y diferente a los métodos normalizados de medición en línea (ver apéndice B). Sus principales ventajas respecto a estos últimos, es su aplicación durante la operación normal de los motores, de una manera segura y no invasiva, además de la utilización de sensores que permiten la detección de las DP en un ancho de banda de hasta 40 MHz, por lo que se evitan los problemas de interferencia electromagnética durante las mediciones en las plantas donde se encuentran operando los motores a diagnosticarse.

Se presenta la implementación de este circuito de prueba n basado en la detección de DP utilizando técnicas de medición de banda ultra ancha, tomando en consideración los requerimientos teóricos y aspectos prácticos relativos a la seguridad de la instalación donde se realizan las pruebas, así como los aspectos operativos del equipo de prueba empleado. Se presentan los resultados obtenidos de la aplicación de este nuevo método de diagnóstico, así como su análisis desde el punto de vista de carga (Q) máxima medida e identificación de los patrones de DP obtenidos. Dado que estos resultados obtenidos son los primeros tanto en nuestro país, como en el ámbito internacional, para su discusión, se realiza una comparación con valores y patrones de referencia obtenidos mediante métodos normalizados de detección de DP[5,6].

Con base en el análisis de resultados, se presenta y discute una clasificación de los motores evaluados, así como los argumentos técnicos que dan soporte a las características que hacen de este método de diagnóstico, una herramienta novedosa, con una sensibilidad adecuada, alta confiabilidad, de aplicación sencilla y segura que permite detección de fallas incipientes de manera anticipada, permite planear la remoción del motor con fines de mantenimiento, reduciendo con esto las pérdidas de producción, debido a la falta de este equipo [3,80].

#### 4.2 Motores Probados

Para la aplicación del método de diagnóstico, se seleccionaron trece motores instalados y operando en una Terminal de Almacenamiento y Bombeo de Hidrocarburos. En esta instalación, se cuenta con generación propia, que mediante un circuito alimentador principal, energiza el bus de la planta de bombeo, donde se encuentran conectados grupos de motores de gran capacidad en 13.8 kV. El suministro de energía eléctrica a estos motores, se proporciona mediante cables de energía aislados, instalados en trincheras subterráneas. En la **Figura 4.1**, se muestra el diagrama unifilar de la casa de bombas, donde se encuentran instalados los motores probados y en la **Figura 4.2**, se muestra una vista general de la instalación.

Los motores probados, son motores de inducción tipo jaula de ardilla horizontales, trifásicos de 2500 C.P., 13.8 kV, para uso continuo dentro de una casa de bombas constituida por 14 motobombas en total. Estos motores tienen al menos 20 años de operación y durante este tiempo, han sido sometidos a paros y arranques constantes a tensión plena. De acuerdo con la literatura especializada, este tipo de operación, puede ocasionar sobretensiones transitorias que inciden directamente sobre los devanados del estator y sobrecorrientes transitorias que pueden ocasionar daños en los rotores. Algunos de estos motores han presentado falla en sus devanados, por lo que sido sometidos a reparaciones.

En la Tabla 4.1, se incluyen las características eléctricas de los motores utilizados para la aplicación del método de diagnóstico propuesto en esta tesis. Para efecto de su identificación, los motores probados se denominaron M-1 a M-14.

DATOS DE PLACA DE LOS MOTORES EVALUADOS	
IDENTIFICADOR	M-1 a M -14
POTENCIA	2500 HP
FASES	3
TENSIÓN	13,200 VOLTS
CORRIENTE	100 AMP
TIPO	TFLA
FRECUENCIA	60 Hz
POLOS	2
VELOCIDAD	3570 R.P.M.
AISLAMIENTO	В
TEMP. AMBIENTE	40 °C
FECHA DE FABRICACIÓN	1979
TIPO DE CONEXIÓN	ESTRELLA

Tabla 4.1 Características técnicas de los motores diagnosticados.

Desarrollo de Pruebas y Análisis de Resultados



Figura 4.1 Diagrama unifilar de la instalación de motores evaluados en planta.



Figura 4.2 Vista general de motores de 2500 C.P. evaluados en planta.

# 4.3 Implementación en planta del circuito de medición de descargas parciales utilizando técnicas de banda ultra ancha (DP UWB)

Como se vio en el capitulo anterior, la detección de DP aplicando técnicas de banda ultra ancha (UWB), es un método no normalizado, por lo que el circuito de medición a implementarse para la medición en planta, es nuevo y diferente a los circuitos de medición normalizados (ver apéndice B). Para la implementación en planta del circuito de detección de DP UWB, propuesto en esta tesis, adicionalmente a los requerimientos de la teoría, se tomaron en cuenta otras consideraciones, tales como:

- El circuito de medición no debe ser invasivo, esto es, debe interferir lo menos posible con la operación normal del motor.
- El circuito debe ser intrínsicamente seguro, dado que se utilizará en áreas consideradas de riesgo.
- El circuito debe implementarse con el circuito principal del motor energizado y en condiciones nominales de operación, para realizar mediciones en línea.
- La calibración del circuito debe realizarse de una manera sencilla y segura.
- Las lecturas de las mediciones de DP realizadas, deben estar de acuerdo a las prácticas estándar en este tipo de mediciones.

### 4.3.1 Instrumentación utilizada en el circuito de medición DP UWB

De acuerdo al teoría presentada en el capítulo 3, en frecuencias del orden de MHz, el campo electromagnético encuentra menor impedancia cuando se propaga en aire (propagación capacitiva). Esto permite la detección de descargas parciales durante la operación normal del motor, si un sensor con un ancho de banda de frecuencia de medición lo más alto posible, se coloca en la vecindad de la fuente de descargas o de su medio de propagación. En este trabajo de tesis se propone la utilización de un sensor tipo Rogowski con un ancho de banda de hasta 40 MHz, como sensor primario de las DP en el motor. Una característica adicional de este sensor, es su construcción tipo gancho (bobina Rogowski tipo "clamp-on") (ver **Figura 4.3**), lo que permite su colocación en el circuito principal del motor sin necesidad de desconexión de este, siendo ésta una detección de DP no invasiva.

Para cumplir con el requerimiento de que las lecturas de las mediciones de DP realizadas deben ser de acuerdo a las prácticas estándar en este tipo de mediciones, se utiliza un equipo convencional de detección de descargas parciales. Este equipo de medición esta formado por una unidad de adquisición y procesamiento de señales (ver **Figura 4.4**). Las señales obtenidas mediante el sensor de campo cercano, se acondicionan a través de una unidad pre-amplificadora (ver **Figura 4.5**), que cambia las características de la señal medida de UWB a convencional para su lectura en un detector convencional. Este detector

de descargas despliega la medición en un patrón o mapa de descargas tipo repetición-cargafase N-Q- $\Phi$ , ver **Figura 4.10**, este patrón debe ser sincronizado con la corriente de la fase probada, por lo que en el circuito se incluye un sensor inductivo (Transformador de corriente tipo gancho).



**Figura 4.3** Sensor de campo cercano tipo Rogowski tipo gancho (clamp-on), ancho de banda de 2 a 40 MHz utilizado como sensor en el circuito DP UWB.



**Figura 4.4** Panel Frontal de la unidad de adquisición del detector de descargas parciales utilizado en el circuito DP UWB.



**Figura 4.5** Pre-amplificador utilizado en para acondicionar la señal medida de UWB a convencional en el circuito DP UWB.

#### 4.3.2 Circuito de medición de DP UWB implementado

El lugar más adecuado para la colocación de los sensores de banda ultra ancha para la detección de DP, es en los conductores a su llegada a la caja de conexiones principales del motor. Sin embargo, debido a las características del área donde se encuentran operando los motores, por seguridad, no es posible colocarlos en este sitio.

Debido a lo anterior, la medición se decidió realizarla, colocando los sensores en los cables y la conexión a tierra de las pantallas de los cables alimentadores principales del motor, a su salida del interruptor, localizado en el cuarto de control de la planta de bombeo. La colocación de los sensores debe ser antes de la cinta metálica que conecta a tierra la terminal del cable de energía. En este punto se tiene el potencial de tierra y por lo tanto no hay riesgo de hacer contacto con zonas de alta tensión. Esta terminal constituye uno de los caminos principales para el flujo de las señales de descargas parciales hacia tierra.

La señal de sincronización, es decir la señal senoidal del voltaje de operación del motor que se utiliza para ubicar el nivel del mismo, donde se inicia el fenómeno de descargas parciales, se obtiene utilizando un transformador de corriente de gancho convencional, colocado sobre el cable de la fase del motor bajo prueba. El circuito implementado para la medición de DP UWB, propuesto en esta tesis se muestra en la **Figura 4.6**.



**Figura 4.6** Circuito de medición de descargas parciales aplicando técnicas de banda ultra ancha en motores de alta tensión operando en sitio.

Como se observa en el circuito de la **Figura 4.6**, el equipo de medición registra las señales de DP que ocurren en el motor, en los cables alimentadores y en el bus al que están conectados. Sin embargo, el nivel típico de DP tanto en los cables como en el bus, son al menos un orden de magnitud inferior al nivel típico de DP que ocurren en los devanados del motor (del orden de 10 a 30 picoCoulombs). 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. En las **Figuras 4.7** y **4.8** se muestra la implementación física en planta del circuito de prueba.

### 4.3.3 Calibración del circuito de medición DP UWB

La calibración del equipo de detección de DP se realizó de acuerdo al método normalizado, esto es, inyectando pulsos de corriente de corta duración y de una carga de magnitud conocida, en las terminales del objeto bajo prueba, tal como se muestra en el apéndice B, en este caso, los circuitos de dos motores solamente, debido a que los motores probados operan de manera continua y no fue posible efectuar la calibración en el circuito eléctrico de cada uno. Sin embargo, los motores se encuentran instalados muy próximos al cuarto de control (40 m máximos), de tal forma que la longitud de los cables alimentadores, desde los motores hasta el cuarto de control son similares, por lo que se consideró que la calibración realizada es válida para todas las mediciones en el resto de los motores.



Figura 4.7 Implementación del circuito de prueba DP UWB en planta.



Figura 4.8 Implementación del circuito de prueba DP UWB en planta.

Para realizar la calibración, se utilizó un calibrador con trazabilidad a patrones internacionales de carga, mediante el cual se inyectó un pulso conocido de 10,000 pC, en las terminales principales de los motores M-1 y M-9. Este pulso se midió en el otro extremo del cable que llega al interruptor, en el cuarto de control de la casa de bombas, con esta medición se realizó la calibración del equipo de detección de descargas parciales.

Con base en los resultados obtenidos durante el proceso de calibración, se concluyó que la longitud de los cables de alimentación de los motores de gran capacidad, instalados en plantas similares, no atenúa significativamente las señales de los pulsos de las descargas parciales. Debido a ello los sensores para la detección de DP, instalados en los cables de energía a la llegada en el interruptor en el cuarto de control, miden señales de DP con poca atenuación (del orden de 500 a 1000 pC). Este es un hecho importante, dado que podemos evitar el abrir la caja de conexiones principales de los motores para realizar esta calibración, lo que agrega ventajas a esta técnica. En la **Figura 4.9**, se muestra la colocación del calibrador normalizado, para la inyección de un pulso conocido de 10,000 pC, en las terminales principales del motor bajo prueba.

En la **Figura 4.10**, se presenta el mapa de descargas obtenido mediante el detector de descargas, colocado en el lado del interruptor del motor, con la inyección del pulso de calibración de 10,000 pC en las terminales principales del motor. Este mapa o patrón de descargas obtenido y el cual es utilizado en este trabajo de tesis, para efecto del análisis de resultados, es el denominado N-Q- $\Phi$ , de acuerdo a la norma [40], N se define como la frecuencia de repetición de pulsos, Q la magnitud de la carga aparente y es comúnmente expresada en picoCoulombs y  $\Phi$  es el ángulo de fase respecto del cruce positivo del voltaje de un pulso individual de una DP, este se expresa en grados.

### 4.4 Diagnóstico de motores aplicando el circuito DP UWB

El circuito de medición de descargas parciales utilizando técnicas de banda ultra ancha implementado, se aplicó para evaluar el sistema aislante de trece motores de inducción tipo jaula de ardilla horizontales, trifásicos de 2500 C.P., 13.8 kV, de operación continua dentro de una casa de bombas, denominados en este trabajo como M-1 a M-14.

La detección de DP, se realizó utilizando el circuito implementado en esta tesis mostrado en la **Figura 4.6**, colocando el sensor de banda ultra ancha en cada una de las fases de cada motor, en el lado del interruptor, localizado en el cuarto de control. En la **Figura 4.11**, se muestra la realización de estas mediciones.



**Figura 4.9** Inyección del pulso de calibración de 10,000 pC, en las terminales principales del motor bajo prueba.



**Figura 4.10** Mapa de descargas N-Q- $\Phi$  del pulso de calibración de 10,000 pC.


Figura 4.11 Realización de mediciones en planta, mediante el circuito DP UWB.

#### 4.4.1 Resultados Obtenidos

En la **Tabla 4.2**, se presentan los resultados obtenidos de la aplicación del método de diagnóstico basado en la medición de las descargas parciales aplicando técnicas de banda ultra ancha. La medición de DP, se realizó en cada una de las fases de los trece motores probados en planta durante su operación normal. En esta tabla se incluyen los niveles de descargas en nC obtenidos en cada fase de cada uno de los motores, así como la condición de los devanados del motor al momento de la evaluación.

La clasificación de la condición de los devanados se estableció con base en sus historiales, de la siguiente manera:

- Original: Devanado original del fabricante
- Reparado Usuario: Reparado por el taller del usuario
- Reparado Externo: Reparado por tercero
- Nuevo: Motor Nuevo, con devanado nuevo.

Motor	FASE	DESCARGAS	CONDICIÓN DEL DEVANADO	
		Qmax nC		
M-1	А	10	Reparado Externo	
	В	24		
	С	14		
M-2	А	120	Original	
	В	70		
	С	70		
M-3	Α	18	Reparado Externo	
	В	36		
	С	16		
M-4	А	36	Nuevo	
	В	23		
	С	25		
M-5	А	100	Reparado Externo	
	В	22		
	С	28		
M-7	А	28	Nuevo	
	В	15		
	С	20		
M-8	А	36	Reparado Externo	
	В	36		
	С	48		
M-9	А	75	Original	
	В	75		
	С	112		
M-10	А	36	Reparado Usuario	
	В	48		
	С	48		
M-11	А	30	Reparado Externo	
	В	30		
	С	48		
M-12	А	27	Original	
	В	26		
	С	36		
M-13	A	60	Nuevo	
	В	120		
	С	60		
M-14	А	180	Reparado Usuario	
	В	180		
	С	570		

 Tabla 4.2 Nivel de descargas parciales en los motores probados.

En las **Figuras 4.12** a la **4.24** se muestran los primeros mapas de descargas N-Q- $\Phi$ , obtenidos en nuestro país mediante la técnica propuesta en esta tesis, para cada una de las fases de los motores evaluados.



Figura 4.12 Mapas de descargas obtenidos en el motor M-1



Figura 4.13 Mapas de descargas obtenidos en el motor M-2



Figura 4.14 Mapas de descargas obtenidos en el motor M-3



Figura 4.15 Mapas de descargas obtenidos en el motor M-4



Figura 4.16 Mapas de descargas obtenidos en el motor M-5



Figura 4.17 Mapas de descargas obtenidos en el motor M-7



Figura 4.18 Mapas de descargas obtenidos en el motor M-8



Figura 4.19 Mapas de descargas obtenidos en el motor M-9

Desarrollo de Pruebas y Análisis de Resultados



Figura 4.20 Mapas de descargas obtenidos en el motor M-10

Desarrollo de Pruebas y Análisis de Resultados



Figura 4.21 Mapas de descargas obtenidos en el motor M-11



Figura 4.22 Mapas de descargas obtenidos en el motor M-12



Figura 4.23 Mapas de descargas obtenidos en el motor M-13



Figura 4.24 Mapas de descargas obtenidos en el motor M-14

Desarrollo de Pruebas y Análisis de Resultados

#### 4.5 Análisis de resultados

Entre mayor sea la magnitud de las DP, mayor es el grado de deterioro del aislamiento. El aislamiento ideal es aquel que no presenta DP, de estas premisas es posible efectuar una comparación entre los diferentes motores evaluados, dado que todos tienen el mismo diseño, las mismas características constructivas y operan bajo condiciones de carga similares. Con base en lo anterior, se establece una clasificación inmediata del estado dieléctrico de los motores evaluados. Esta clasificación permite jerarquizar, desde el punto de vista dieléctrico, las actividades de inspección y mantenimiento de los equipos diagnosticados.

De los resultados obtenidos, se observa, por ejemplo, que el motor identificado M-14 presentó el mayor nivel de descargas (570 nC), mientras el M-1 presentó el valor más bajo (10 nC). De la información obtenida de los historiales de mantenimiento, se sabe que ambos motores fueron reparados y sus devanados sustituidos. Sin embargo, se deduce que la calidad de la reparación del devanado del motor M-14 fue de menor calidad que la del motor M.1, o que durante la operación normal del motor M-14 se han iniciado uno o más mecanismos de deterioro, que se están manifestando con un alto nivel de DP.

Actualmente no existen trabajos publicados sobre la medición en línea de descargas parciales en motores, aplicando técnicas de banda ultra ancha con sensores de alta frecuencia, tampoco 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 grupos como el Japan IERE Council (Japan International Electrical Research Exchange Council)[5], que con base en la experiencia de varios grupos de trabajo, han emitido algunos criterios para la evaluación del estado del sistema aislante de máquinas eléctricas rotatorias de acuerdo al nivel de DP medidos. Estos criterios se muestran en la **Tabla 4.3**.

En la **Tabla 4.4**, se presenta la clasificación de bs motores de acuerdo con el nivel de DP medido en sus devanados, y tomando como referencia el criterio mencionado anteriormente, se establece su condición como "BUENO", "REGULAR" y "MALO". Con esta clasificación, se cumple un primer objetivo del método de diagnóstico propuesto en esta tesis, ya que el orden en el que aparecen los motores, indica la prioridad para su atención, esto es para llevar a cabo la inspección y mantenimiento de los mismos.

Q máx (nC)	Estado del sistema aislante		
≤ 10	En buenas condiciones		
> 10 ≤ 30	En condiciones de continuar su operación		
> 30	Es necesario llevar a cabo una inspección y determinar el origen de las descargas		

**Tabla 4.3** Criterios del IERE para evaluar un sistema aislante<br/>de acuerdo con su nivel de DP[5].

MOTOR	ORDEN SUGERIDO PARA INSPECC. Y MANTTO.	FASES	DESCARGAS Qmax nC	CLASIFICACIÓN	
M-14	INMEDIATO	А	180	MALO	
		В	180		
		С	570		
M-9	PRIORIDAD 1	А	75	MALO	
		В	75		
		С	112		
M-2	PRIORIDAD 1	А	70	MALO	
		В	70		
		С	120		
M-13	PRIORIDAD 1	А	60	MALO	
		В	120		
		С	60		
M-5	PRIORIDAD 1	А	22	MALO	
		В	28		
		С	100		
M-10	PRIORIDAD 2	А	36	REGULAR	
		В	48		
		С	48		
M-8	PRIORIDAD 2	А	36	REGULAR	
		В	36		
		С	48		
M-11	PRIORIDAD 2	A	30	REGULAR	
		В	30		
		С	48		
M-12	PRIORIDAD 3	A	27	BUENO	
		В	26		
		С	36		
M-4	PRIORIDAD 3	A	23	BUENO	
		В	25		
		С	36		
M-3	PRIORIDAD 3	A	16	BUENO	
		В	18		
		С	36		
M-7	PRIORIDAD 3	A	15	BUENO	
		В	20		
		С	28		
M-1	PRIORIDAD 3	A	10	BUENO	
		В	14		
		С	24		

**Tabla 4.4** Clasificación de motores probados de acuerdo al nivel de DP medido.

Otro objetivo del método de diagnóstico propuesto, es permitir la identificación de los mecanismos de deterioro que se presentan en los motores evaluados. Estos mecanismos son identificados mediante la interpretación de los patrones de las descargas parciales, obtenidos de la medición.

Como se mencionó anteriormente, no existen publicaciones, ni normas sobre la medición en línea de descargas parciales en motores, aplicando técnicas de banda ultra ancha. Por lo que no se tienen patrones de DP, con los cuales comparar los obtenidos durante la realización de este trabajo. Para efecto de tener una referencia de comparación, para la interpretación de los patrones de descargas parciales obtenidos, se utilizó la referencia generada por el grupo 21.03 de CIGRE, "Recognition of Discharges" [6]. En el apéndice C de esta tesis, se presentan los principales patrones de descargas parciales, que se presentan en los devanados de máquinas eléctricas rotatorias, de acuerdo con el grupo 21.03 de CIGRE. De esta comparación se concluye lo siguiente:

• Motores en buenas condiciones

El patrón mostrado en la **Figura 4.12a**, muestra el mapa de descargas obtenido en la fase 1 del motor M-1. En esta fase se midió una carga máxima de las DP de 10 nC, que resultó el menor nivel de descargas parciales del grupo de motores de la planta. Este valor nos indica que el aislamiento de este motor, es el que se encuentra en mejores condiciones y puede seguir operando normalmente. Otros motores, cuyo aislamiento se encuentran en condiciones aceptables para continuar en operación fueron los motores M-3, M-4, M-7, y M-12.

• Motores con descargas a la ranura

El patrón mostrado en la **Figura 4.24c**, se muestra el mapa de DP de la fase 3 del motor M-14. 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 (570 nC) según [6], es típico 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 el nivel inferior de 180 nC. Este mecanismo de deterioro es el más severo, desde el punto de vista eléctrico, para el aislamiento. Las descargas erosionan el aislamiento principal disminuyendo su periodo de vida útil. El nivel de DP 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 su devanado y evitar una falla prematura. En la **Figura 4.25**, se muestra la comparación entre el mapa de descargas obtenidos y el mapa de descargas de referencia con una base de tiempo elíptica [6].



a) Mapa de descargas obtenido con el circuito de medición de DP UWB en el motor M-14.



- Figura 4.25 Comparación entre mapas de descargas, medido y de referencia para el motor M-14 con problemas de descargas a la ranura.
- Motores con distorsión de graduación de campo

La **Figura 4.23b**, muestra el patrón de las DP de la fase 2 del motor M-13. Este patrón de DP es diferente al que se obtuvo en el motor M-14. Las DP 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 también en los motores M-9 y M-13 con magnitudes similares de 120 nC en una de las fases de cada motor. Aún cuando estos motores presentaron valores de DP similares, su historial es diferente, el motor M-9 conserva su devanado original fabricado hace 25 años, mientras que el motor M-13 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, sobre todo si se trata de hojuela de mica aglutinada con asbesto o resina poliéster. En la **Figura 4.26**, se muestra la comparación entre el mapa de descargas obtenidos y el mapa de descargas de referencia con una base de tiempo elíptica [6].



a) Mapa de descargas obtenido con el circuito de medición de DP UWB en el motor M-9.



- Figura 4.26 Comparación entre mapas de descargas, medido y de referencia para el motor M-9 con problemas de graduación de campo.
- Motores con problemas particulares.

En el motor M-5 en las fases B y C se midió un nivel de DP 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 esta sometido a los mismos esfuerzos de operación. La alta actividad de DP en la fase A debe tener como origen un defecto puntual, que es necesario revisar, para poder determinar su origen.

#### 4.6 Conclusiones del análisis de resultados

Como se mencionó anteriormente, los resultados obtenidos mediante el método de diagnóstico propuesto en esta tesis son los primeros en el ámbito nacional e internacional, por este hecho, deben ser considerados como importantes. Del análisis de resultados, se pueden enfatizar aspectos que dan un fuerte soporte experimental a la técnica de medición empleada y que se mencionan a continuación.

• Sensibilidad

Las mediciones realizadas permiten asegurar que esta técnica de diagnóstico, tiene la sensibilidad para permitir una clasificación del sistema aislante de motores similares, de acuerdo al nivel medido de descargas parciales. Esto se observa en los resultados medidos, que van desde una descarga mínima de 10 nC hasta una descarga máxima de 570 nC, lo que implica de manera evidente un motor con un mayor deterioro respecto al otro.

• Identificación de mecanismos de falla con base en los patrones de DP obtenidos.

De la comparación de los mapas de DP obtenidos y mapas de DP de referencia normalizados, se encontró plena coincidencia entre ambos patrones, respecto a los mecanismos de deterioro que los generan. Esta comparación se complementó con la inspección realizada al motor M-14 después de fallar. A este motor se le diagnosticó descargas a la ranura, fallando posteriormente por esta causa (ver **Tabla 4.5**).

• Confiabilidad

Los motores designados M-14, M-9 y M-2, se evaluaron en el mes de diciembre del 2000, resultando los sistemas aislantes más deteriorados, de acuerdo a los niveles de descargas parciales medidos, por lo que se recomendó su atención inmediata, sin embargo debido a la necesidad de operación continua de los equipos, solo se tomaron previsiones para su sustitución inmediata en caso de falla. En la **tabla 4.5**, se muestra la clasificación de los sistemas aislantes de estos tres motores probados.

Al continuar operando los motores, los mecanismos de falla evolucionaron con el tiempo y finalmente provocaron las fallas de los motores. El orden en que fallaron los motores, es el mismo que se estableció en la clasificación obtenida de la evaluación mediante la técnica de diagnóstico implementada.

 Tabla 4.5
 Clasificación del sistema aislante de motores similares con base en la medición de DP UWB.

MOTOR	ORDEN SUGERIDO PARA INSPECCIÓN Y MANTENIMIENTO	FASES	Q MÁXIMA (nC)	FECHA DE EVALUACIÓN	FECHA DE FALLA
M 14	Inmediato	A	180	Disistent as 2000	2 Eshara 01
1 <b>v1-</b> 14	Inneulato	C B	570	Diciembre 2000	3 Febrero 01
		А	75		
M-9	Prioridad 1	В	75	Diciembre 2000	10 Diciembre 02
		С	112		
		А	70		
M-2	Prioridad 2	B	70	Diciembre 2000	17 Marzo 03
		С	120		

Estos resultados obtenidos, permitieron hasta esta fecha, predecir con 100% de exactitud la falla de los motores evaluados, lo que en la actualidad ningún método de diagnóstico de motores permite. Adicionalmente, como se observa en la **Tabla 4.5**, la aplicación periódica del método de diagnóstico implementado en este trabajo de tesis, permite el análisis de la tendencia en los niveles de DP en el motor, lo que hace de este método de diagnóstico, una herramienta novedosa, con una sensibilidad adecuada, alta confiabilidad, de aplicación sencilla y segura, que permite detección de fallas incipientes de manera anticipada.

# CAPÍTULO

# **Conclusiones y Recomendaciones**

### 5.1 Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos durante el desarrollo de este trabajo de tesis, se concluye lo siguiente:

- a) Actualmente existen métodos de diagnóstico basados en técnicas de medición normalizadas, para la detección de descargas parciales (DP) en motores de gran capacidad en mediana y alta tensión fuera de operación y en operación. Estas técnicas de medición utilizan anchos de banda de estandarizados que se encuentran en el rango de los 30 kHz a 500 kHz, por lo que se ven afectadas por el alto nivel de interferencia electromagnética, presente en las plantas donde se encuentran instalados los motores, dificultando la detección en línea de las DP.
- b) Las técnicas normalizadas de medición en línea de DP en motores de alta tensión, utilizadas actualmente, se basan en la utilización de capacitores de alto voltaje, los cuales son conectados en las terminales de cada fase, lo que hace de estas técnicas un método invasivo, que requiere de la desconexión eléctrica del motor y de modificaciones físicas a la estructura del mismo.
- c) Los métodos normalizados actuales para la detección de descargas en cavidades de un dieléctrico sólido, se realizan en términos de un circuito capacitivo equivalente conocido como el modelo ABC, cuya operación no corresponde de ninguna manera al proceso físico que ocurre en el sistema real. Esto resulta evidente ya que el modelo ABC, representa un fenómeno físico (DP), el cual inherentemente es un problema de campos, en términos de parámetros de circuitos concentrados.
- d) La teoría de Pedersen, considera las limitaciones del modelo ABC y cuantifica la relación entre los transitorios que produce la descarga parcial y la creación o cambio de una distribución de carga en el espacio entre los electrodos del sistema, producida por una descarga eléctrica. Utilizando como base estos conceptos de carga inducida planteados por Pedersen, fue posible la implementación de un circuito de medición nuevo, no invasivo, diferente a los circuitos normalizados de medición de DP, que permite la detección de descargas en motores de gran capacidad durante su operación normal, utilizando técnicas de banda ultra ancha esto es un ancho de banda de 2 a 40 MHz.

- e) El circuito de medición implementado, se aplicó de una manera práctica, segura y no invasiva en el diagnóstico de trece motores de 2500 C.P. a 13.8 kV, operando en planta. Obteniéndose los primeros resultados en el ámbito nacional e internacional de la aplicación de un método de diagnóstico de motores basado en la detección de DP utilizando técnicas de medición de banda ultra ancha, empleando sensores de campo cercano.
- f) Durante el proceso de calibración, realizado como parte de la implementación en planta del circuito de medición, se determinó que la longitud de los cables principales de los motores de gran capacidad probados, en este caso de 30 a 40 m, no atenúan significativamente las señales de los pulsos de las descargas parciales medidas. Esto se concluyó después de inyectar un pulso conocido de 10 nC en una de las terminales del motor en su caja de conexiones principales y medir de 9 a 10 nC con los sensores instalados en los cables de energía a la llegada del interruptor en el cuarto de control. Este es un hecho importante, dado que podemos evitar el abrir la caja de conexiones de los motores para realizar este tipo de calibración normalizada, haciendo que esta técnica de medición sea de aplicación práctica, segura y no invasiva.
- g) Los resultados obtenidos de las mediciones realizadas en planta, permiten asegurar que esta técnica de medición, tiene la sensibilidad suficiente para permitir una clasificación del sistema aislante de motores similares, de acuerdo al nivel medido de DP. Dado que se lograron realizar mediciones con sensibilidades de 10 nC hasta 600 nC, con niveles de ruido de 8 nC en la planta.
- h) No existen referencias específicas de resultados obtenidos mediante la aplicación de esta técnica de medición, para la identificación de mecanismos de fallas en motores con base en los patrones de descargas. Sin embargo como una primera etapa en la validación de esta técnica, para la interpretación de los patrones de descargas obtenidos, se utilizaron patrones de referencia aceptados internacionalmente, encontrándose plena coincidencia respecto a los mecanismos de deterioro que los generan. Esto se comprobó de manera parcial con el motor M-14 después de la falla de su aislamiento. Este motor fue diagnosticado, mediante la técnica de medición implementada en esta tesis, con un severo problema de descargas a la ranura (descargas entre la superficie de las bobinas y las laminaciones del núcleo de estator), fallando a los pocos meses de este diagnóstico. Durante su reparación se encontró una falla a tierra en la sección recta de la ranura, comprobándose el diagnóstico inicial.
- i) Los motores evaluados denominados M-14, M-9 y M-2, resultaron los sistemas aislantes más deteriorados, de acuerdo a los niveles de descargas parciales medidos. Al continuar operando los motores, los mecanismos de falla evolucionaron provocando la falla de estos. El orden en que fallaron estos motores, es el mismo que se estableció en la clasificación obtenida de la evaluación mediante el método de diagnóstico implementado. Estos resultados obtenidos, han permitido hasta esta fecha, predecir con 100% de exactitud la falla de los motores evaluados, lo que en la actualidad ningún método de diagnóstico de motores permite.

j) Los resultados obtenidos en este trabajo de la fundamentación teórica, implementación y aplicación de un método de diagnóstico en línea mediante la detección de descargas parciales aplicando técnicas de medición en banda ultra ancha (UWB), permiten concluir que este método es una herramienta novedosa, con una sensibilidad adecuada, alta confiabilidad, de aplicación sencilla y segura, que permite detección de fallas incipientes de manera anticipada en motores de gran capacidad en mediana y alta tensión.

#### **5.2 Aportaciones**

Las aportaciones de este trabajo de tesis son:

- Un método de diagnóstico nuevo mediante la detección de descargas parciales aplicando técnicas de medición en banda ultra ancha (UWB), con una sensibilidad desde 10 nC hasta 600 nC, alta confiabilidad y de aplicación sencilla y segura, que permite evaluar las condiciones dieléctricas del aislamiento de motores de inducción de gran capacidad y tensión eléctrica de 13,8 kV. Esto sin interrupción del proceso en el que se encuentren instalados estos equipos.
- Los primeros resultados obtenidos en el ámbito nacional e internacional mediante la aplicación de un método de diagnóstico de motores basado en la detección de DP utilizando técnicas de medición de banda ultra ancha, empleando sensores de campo cercano.

#### 5.3 Recomendaciones

Para complementar el método de diagnóstico presentado, se recomienda elaborar trabajos enfocados a:

- a) Desarrollar sistemas de detección de descargas parciales basados en técnicas de medición en banda ultra ancha para motores, que considere la utilización de registradores de alta velocidad y que eviten la utilización de amplificadores que causen distorsión en los pulsos medidos de las descargas.
- b) Establecer correlaciones entre los patrones obtenidos de la medición de descargas con métodos normalizados fuera de línea y los patrones obtenidos mediante la aplicación de esta técnica, con base en la realización de trabajos experimentales, que consideren la medición con ambos métodos a los mismos equipos.
- c) Documentar la relación entre las condiciones y fallas reales ocurridas en el sistema aislante del motor y los valores y patrones de descargas obtenidos mediante la aplicación de esta técnica.

## **Referencias y Bibliografía**

- [1] G. Paoletti, A. Rose, "Improving Existing Motor Protection for Medium Voltage Motors", IEEE Transactions on Industry Application, May/June, 1989.
- [2] Motor Reliability Working Group, "Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations, Part I", IEEE Transaction on IA, Vol. IA-21, No. 4, July/Aug., 1985.
- [3] B. E. Preusser, "Motor Current Signature Analysis as a Predictive Maintenance Tool", Proceedings of the American Power Conference, 1989.
- [4] P. Roman, "Maintaining Electrical Equipment for Peak Performance", IEEC Conference, Sept., 1997.
- [5] 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.
- [6] CIGRE Working Group 21.03, "Recognition of Discharges", Electra, CIGRE Publication No 11, Paris 1969, pp. 61-98.
- [7] Joint Group Discussion SC 15 and SC 33, "Dielectric Diagnosis and its Effect on Insulation Coordination", CIGRE Session Paris, 1990.
- [8] CIGRE, "Material Reliability for Network equipment", CIGRE Session Paris, Panel 3, 1994.
- [9] G. Ch. Litchtenberg, "Novi Commentarii Societatis Regiae Gottingae", tom 8, 1777
- [10] J. C. Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, Dover, New York, 1954
- [11] H Hertz, *Hertz's Miscellaneous Papers*. Macmillan, London, Chs. 5,6, 1986.
- [12] H. Schering, *Bridges for Loss Measurements*, Report on the Activities of the Physical-Technical Institute of Realm, Germany, 1919.
- [13] A. Schwaiger, Over the Unloading procedures on insulators, Rosental-Mitt. H. 6, 1925.

- [14] W. L. Lloyd, E. C. Starr, "Investigation of the Alternating Current Corona with the Cathode-ray Oscilloscope", ETZ 49, 1935.
- [15] A. N. Arman, A. T. Starr, "The Measurement of Discharges in Dielectrics", J. IEE 79 pp. 67-81, 88-94. 1936.
- [16] G. Mole, "Portable Discharge Detector", CIGRE-Session, Paris, No. 105App. I, 1954.
- [17] G. Mole, "Basic Characteristics of Corona Detector Calibrators", IEEE Trans. PAS 89, pp.198-204, 1970.
- [18] C. A. Bailey, "A Study of Internal Discharges in Cable Insulation", IEEE paper No. 31, 1966.
- [19] H. Okamoto, H. Kenji, "Partial Discharge Tests and Noise Suppression of 500 kV Transformers", IEEE Summer Power Conference, Vancouver, 1973.
- [20] I. A. Black, "A Pulse Discrimination System for Discharge Detection in Electrically Noisy Environments", Paper 3.2-02, 2nd. ISH Zurich, 1975.
- [21] T. Tanaka, T. Okamoto, "A Minicomputer-based Partial Discharge Measurement System", IEEE International Symposium on Electric Insulation, Conf. Record 86-89, Philadelphia, 1978.
- [22] E. Lemke, "A New Method for PD Measurement of Polyethylene Insulated Power Cables", paper 43.13, 3<sup>rd</sup> ISH, Milan, 1979.
- [23] N. Fujimoto, S. A. Boggs, R. C. Madge, "Electrical Transients in Gas Insulated Switchgear", Trans. of the March, Meeting of Canadian Electric Association, 1981.
- [24] S. A. Boggs, G. C. Stone, "Fundamental Limitations in the Measurement of Corona and Partial Discharge", IEEE Trans., EI 17, pp.143-150, 1982.
- [25] B. Fruth, L. Niemeyer, M. Haessig, "Phase Resolved PD Measurements and Computer Aided PD Analysis Performed on Different H.V. Apparatus", 6<sup>th</sup> International Symposium on H.V. Engineering, pp. 15.03-15.06, New Orleans, 1989.
- [26] M. Hikita, K. Yamada, A. Nakamura, T. Mizutani, "Measurement of PD by Computer and Analysis of PD Distribution by the Monte Carlo Method", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 25, pp. 453-468, 1990.

- [27] H.G. Kranz and R. Krump, "PD Diagnosis Using Statistical Optimization on a PC-Based System", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 27, pp. 93-98, 1992.
- [28] E. Gulski and F.H. Kreuger, "Computer Aided Recognition of Discharge Patterns", IEEE Trans. EI, Vol. 27, pp. 82-92, 1992.
- [29] E. Gulski, "Computer Aided Measurement of PD in H.V. Equipment", IEEE Trans. EI, Vol. 28, pp. 969-983, 1993.
- [30] H. Suzuki and T. Endoh, "Pattern Recognition of PD in XLPE Cables Using a Neural Network", IEEE Trans. On Electrical Insulation, Vol. 27, pp. 543-549, 1992.
- [31] A. A. Mazroua, M. M. Salama and R. Bartnikas, "PD Pattern Recognition with Neural Networks Using the Multilayer Perception Technique", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 28, pp. 1082-1089, 1993.
- [32] H. G. Kranz, "Diagnosis of PD Signals Using Neural Networks and Minimum Distance Classification", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 28, pp. 1016-1024, 1993.
- [33] E. Gulski, and A. Krivda, "Neural Networks as a Tool for Recognition of PD", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 28, pp. 984-1001, 1993.
- [34] M. M. Salama and R. Bartnikas, "Fuzzy Logic Applied to PD Pattern Classification", IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 7, pp. 118-123, 2000.
- [35] R. J. van Brunt, E. W. Cernyar and P. von Glahn, "The Importance of Unraveling Memory Propagation Effects in Interpreting Data on PD Statistics", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 28, pp. 905-916, 1993.
- [36] P. Von Glahn and R. J. van Brunt, "Continuous Recording and Stochastic Analysis of PD", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 8, pp. 220-227, 2001.
- [37] E. Robles P., *Características y Evaluación de la Calidad de Aislamientos Eléctricos*, Tesis de Mestría, SEPI-ESIME, Instituto Politécnico Nacional, 1974.
- [38] T. I. Asiain O., *Pruebas de Descargas Parciales a Transformadores de Distribución*, Tesis de Licenciatura, ESIME Instituto Politécnico Nacional, 1981.
- [39] R. Méndez A., Técnicas de Medición y Localización de Descargas Parciales en Transformadores con Ayuda de la Computadora Digital, Tesis de Mestría, SEPI-ESIME, Instituto Politécnico Nacional, 1987.

- [40] International Electrotechnical Commission, *Standard IEC-60270 High Voltage Testing Partial Discharge Measurements*, Third Edition, Switzerland, 2000.
- [41] P. H. F. Morshuis, *Partial Discharge Mechanisms*, PhD Thesis, Delf University Press, 1993.
- [42] Institute of Electrical and Electronic Engineers, *IEEE Standard 1434-2000 IEEE Trial-use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery*, New York, 2000.
- [43] M. Kaufhold, K. Schafer, K. Bauer, A. Bethge, J. Risse, "Interface Phenomena in Stator Winding Insultion-Challenges in Design, Diagnosis, and Service Experience", IEEE Electrical Insulation Magazine, Volume 18 No.2, March-April 2002.
- [44] G. H. Miller, "Trends in Insulations Materials and Process for Rotating Machines", IEEE, Electrical Insulation Mag. Vol. 14 no. 5, pp. 7-11, 1998.
- [45] United States Department of The Interior, Bureau of Reclamation, *Permissible Loading of Generators and Large Motors Facilities, Instructions, Standards, and Techniques* Volume 1-4, March 1991.
- [46] J. E. Neal, "Modern Class 155 Resin Rich Insulation System for Hydroelectric Generators", Electrical India, pp. 13-20, 1979.
- [47] W. Mc. Dermid, "Insulation Systems and Monitoring for Stators Windings of Large Rotating Machines", IEEE Electrical Insulation Magazine, Volume 9, No.4, July/August 1993.
- [48] M. Leijon, M. Dahlgren, L. Walfridsson, Li Ming; A. Jaksts, "A recent development in the electrical insulation systems of generators and transformers", IEEE Electrical Insulation Magazine, 2001.
- [49] Institute of Electrical and Electronic Engineers, IEEE Standard IEEE 432-1992, *IEEE Guide for Insulation Maintenance for Rotating Electric Machinery*, New York, 1992.
- [50] J. S. Simons, "Diagnostic Testing of High Voltage Machine Insulation", IEE Proceedings, Vol. 127, Pte. B, No. 3, 1980.
- [51] A. Wichmamn, "Two Decades of Experience and Progress in Epoxi-mica Insulation Systems for Large Rotating Machines", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102 pp. 71-82, January 1983.

- [52] K. Bauer, M. Kaufhold and H. Wang, "High Voltage Winding Insulation for High Power ASD", in Proc. INSUCON'98, Harrogate, May 1998.
- [53] Berth, Kaufhold, "Electrical Stress in PWM Inverter Fed Motors", IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. 47 no. 2, pp.396-402, 2000.
- [54] D. Fink, H. W. Beaty, *Standard Handbook for Electrical Engineers*, McGraw-Hill Book Company, Pages 4-117, 118, 1987.
- [55] *Westinghouse Electrical Maintenance Hints*, Westinghouse Electric Corporation Printing Division, Trafford, Pa, Pages 19-14 and 15, and Page 7-231976.
- [56] J. Millman, H. Taub, *Pulse, Digital and Switching Waveforms*, McGraw-Hill Book Company, Pages 50-54,1965.
- [57] C. Kane, B. Lease, A. Golubev, I. Blokhintsev, "Practical Applications of Periodic Monitoring of Electrical Equipment for Partial Discharges," NETA Conference, March 1998.
- [58] C. H. Flurscheim, Power Circuit Breaker Theory and Design, Pages 556-557, Peter Peregrinus Ltd. on behalf of the Institution of Electrical Engineers, 1985.
- [59] J. C. Townsend, *The Theory of Ionization of Gases by Collision*, Constable & Co. Ltd. London U.K. 1910.
- [60] A. Pedersen, "The Theory and Measurement of Partial Discharge Transients", IEEE Trans. Elect. Insul., Vol. 26, pp. 487-497, 1991.
- [61] R. Bartnikas and E.J. Mc Mahon (eds), *Engineering Dielectrics Vol. I. Corona Measurement and Interpretation*, ASTM Special Technical Publication STP 669, ASTM, Philadelphia, USA, 1979.
- [62] Whitehead, *Dielectric Breakdown in solids*, Clarendon Press Oxford 1951.
- [63] F. H. Kreuger, *Discharges Detection in High Voltage Equipment*, Temple Press Books, London 1964.
- [64] F. H. Krueger, *Partial Discharge Detection in High Voltage Equipment*, Butterworths, London 1989.
- [65] R. Bartnikas, "A Commentary on Partial Discharge Measurement and Detection", IEEE Trans. Elect. Insul. Vol. 22, pp. 629-653, 1987.
- [66] W. McAllister, " Electric Field Theory and the Fallacy of Void Capacitance", IEEE Trans. Elect. Insul., Vol. 26, 1991.

- [67] D. T. Paris and F.K. Hurd, *Basic Electromagnetic Theory*, McGraw-Hill New York, pp 185-186, 1969.
- [68] H. Repp, K. W. Nissen and P. Röhl, "Partial Discharges in Voids. Inception Conditions and Detections Limits", Siemens Forschungs- und Entwick-Lungsberichte, Vol. 12, pp. 101-106, 1983.
- [69] A. Pedersen, "Partial Discharges in Voids in Solid Dielectrics. An Alternative Approach", 1987 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, IEEE Publication 87CH2462-0 pp. 58-64, 1987.
- [70] G. C. Crichton, P.W. Karlsson and A. Pedersen, "Partial Discharges in Ellipsoidal and Spheroidal Voids", IEEE Trans. Elect. Insul., Vol. 24, pp. 335-342, 1989.
- [71] A. Pedersen, "Current Pulses Generated by Partial Discharges in Voids in Solid Dielectrics. A Field Theoretical Approach", Conference Record 1986 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, IEEE Publication 86CH2196-4-DEI, pp. 112-114, 1986.
- [72] A. Pedersen, On the Electrostatics of Probe Measurements on Surface Charge Densities, in L. G. Chistophorou and D. W. Bouldin (eds.), Gaseous Dielectrics V, Pergamon Press New York, pp. 235-240, 1987.
- [73] P. C. Clemmow, *An Introduction to Electromagnetic Theory*, Cambridge University Press Cambridge 1973.
- [74] C. Oatley, *Electric and Magnetic Fields. An Introduction*, Cambridge University Press, Cambridge, pp 47-51, 1976.
- [75] J. Fisher, *Electridynamik*, Springer Verlag, Berlin 1976.
- [76] 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.
- [77] G. Joos, *Theoretical Physics*, Blackie and Son, Glasgow 1934.
- [78] A. Pedersen, "On the Electrical Breakdown of Gaseous Dielectrics. An Engineering Approach", IEEE Trans. Elect. Insul. Vol. 24, pp. 721-739, 1989.
- [79] A. Stratton, *Electromagnetic Theory*, McGraw-Hill, New York 1941.

- [80] 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.
- [81] E. Nasser, *Fundamentals of Gaseous Ionization and Plasma Electronics*, John Wiley & Sons, 1971.
- [82] I. Reynolds, "On the Behavior of Natural and Artificial Voids in Insulation under Internal Discharge", Tran. AIEE, RAS 77, pp 604-608, Feb. 1959.
- [83] E. Kuffel, W. S. Zaengl, *High-Voltage Engineering*, Pergamon Press, 1984.
- [84] Salvage, "Electric Stresses in Gaseous Cavities in Solid Dielectrics", Proceedings IEE, Vol. 111, pp. 1162-1172, 1964.
- [85] J. H. Mason, "Discharge Detection and Measurements", Proceedings IEE, Vol. 112, pp. 1407-1423, 1965.
- [86] N. Wiegart, et al. "Inhomogeneous Field Breakdown in GIS- The Prediction of Breakdown Probabilities and Voltages. Part II", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 3, pp. 931-938, 1988.
- [87] J. Johnson, M. Warren, "Detection of Slot Discharges in H.V. Stator Windings during Operation", Trans AIEE, Part II, pp 1993-1999, 1951.
- [88] 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, pp. 10-21, January 1967
- [89] G. Zingales, "Present State and Prospects of Standardization on PD Measurements", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 28 No. 6, pp. 902-904, Dec 1993,
- [90] P. Morshuis, "Assessment of Dielectric Degradation by Ultra wide-band PD Detection", IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2 No. 5, pp. 744-756, Oct. 1995.
- [91] V. R., Garcia-Colon, "Distributed PD Measuring Techniques (D-PM) for Installed Power Equipment Diagnosis", Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, IEEE, pp. 442-445, 2002.
- [92] A. Wilson, R. J. Jackson, N. Wang, "Discharge Detection Techniques for Stator Windings", Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, Vol. 132 B, pp.234-244, 1985.

- [93] A. Wilson, "Site Discharge Testing Aids Plant Maintenance", Electrical Times, 13 February. 1976.
- [94] W. Hutter, "Partial Discharge Detection in Rotating Machines", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 8, no. 3, pp. 21-32, May/June 1992.
- [95] S. R. Campbell, G. C. Stone, H. G. Sedding, W. Mc Dermid, "Practical On-line Partial Discharge Test for Turbine Generators and Motors", IEEE Transaction EC, pp 281-287, June 1999.
- [96] J. F. Lyles, T. E. Goodeve, "Using Diagnostic Technology for Identifying Generator Winding Maintenance Needs", Hydro Review, June 1993, pp 58-67.
- [97] G. C. Stone, S. Tetrault, H. G. Sedding, "Monitoring Partial Discharge on 4 kV Motor Windings", IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference, Banff, Canada, pp 159-165.
- [98] E. Gulsky, A. Krivda, "Neural Networks as a Tool for Recognition of PD", IEEE Transaction EI, pp. 159-165, 1993
- [99] A. Contin, M. Cacciari, G. C. Montanari, "Use of Mixed Weibull Distribution for the identification of PD Phenomena", IEEE Transaction DEI, pp. 1166-1178, 1995.
- [100] A. Wilson, "Slot discharge damage in air cooled stator Windings", Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, Vol. 138 A, no. 3 pp. 153-160, May 1991.



## Teoría de las Descargas Parciales

### A.1 Introducción

Las descargas parciales pueden ser descritas como un pulso eléctrico o una descarga en una cavidad llena de gas o sobre una superficie dieléctrica de un sistema aislante sólido o líquido. Este pulso o descarga conecta parcialmente el espacio entre el aislamiento de fase a tierra o de fase a fase. Las descargas parciales pueden ocurrir en cualquier cavidad entre el conductor del cobre y el núcleo aterrizado del motor. Las cavidades pueden localizarse entre el conductor de cobre y el aislamiento, en el mismo aislamiento de manera interna o entre el sistema aislante externo y el núcleo aterrizado, esto es a lo largo de toda la superficie del aislamiento. En la **Figura A.1**, se ilustran las posibles localizaciones de las cavidades dentro del sistema aislante del motor.

Las descargas parciales son consideradas como descargas internas, en una cavidad que puede estar llena de gas, de un dieléctrico expuesto a un campo eléctrico de corriente alterna. Siempre la cavidad tiene una permitividad más baja que el medio que la rodea, resultando en un incremento de la intensidad del campo eléctrico en la cavidad y si éste es lo suficientemente fuerte, en descargas internas.

Los pulsos de las descargas parciales ocurren a altas frecuencias, por lo tanto se atenúan rápidamente cuado pasan a tierra. Las descargas son efectivamente pequeñas trayectorias de ionización, que ocurren dentro del sistema aislante, deteriorándolo y eventualmente haciéndolo fallar completamente. Otra sección del motor, en la que pueden ocurrir descargas parciales y pueden resultar eventualmente en una erosión, es la superficie del aislamiento. Estas descargas pueden cortocircuitar el gradiente entre la tensión aplicada y tierra, a través de grietas o trayectorias de contaminación en la superficie del aislamiento, esto se ilustra en la **Figura A.2**.

La teoría de las descargas parciales, implica un análisis de materiales, campos eléctricos, características de trayectorias de ionización, propagación y atenuación de ondas de pulso, sensitividad espacial de sensores, respuesta a la frecuencia y calibración, ruido e interpretación de datos.

En este apéndice se presentan las diferentes teorías que se han desarrollado para el estudio y análisis de una Descarga Parcial (DP). Actualmente no es posible determinar de una manera directa la magnitud de una DP, y la mayoría de las veces la localización exacta, del defecto que la produce, por lo que se han desarrollado métodos indirectos de medición basados en las teorías que se presentan en este apéndice.



Figura A.1. Cavidades internas en el sistema aislante de un motor.



Figura A.2. Trayectoria de la descarga parcial externa.

#### A.2 Teoría de avalanchas (Teoría de Townsend)

La teoría de avalanchas desarrollada originalmente por Townsend[59], para el estudio de los rompimientos eléctricos en gases expuestos a un campo eléctrico, se basa en el siguiente principio: Un número  $n_0$  de electrones iniciales son acelerados dentro del campo eléctrico, adquiriendo suficiente energía para liberar un número de electrones secundarios, mediante la colisión con los átomos/ moléculas del gas, iniciando con esto una avalancha de electrones.

El número de los electrones liberados a una distancia x desde el punto de inicio a lo largo de las líneas del campo, será:

$$n(x) = n_0 e^{\mathbf{a} x} \tag{A.1}$$

Donde  $\alpha$  es llamada el coeficiente de ionización de Townsend y es dependiente del campo aplicado *E* y la presión del gas *p* y puede demostrarse que es una función de (*E/p*) y *p* [81]. Sin embargo, otros experimentos mostraron, que también otros procesos en el gas y en el cátodo (en el caso de electrodos metálicos) influencian el desarrollo de las avalanchas. Incluyendo esos fenómenos, el cálculo del número total de electrones liberados da lugar a algunos criterios de rompimiento, cuya dependencia en el tipo de gas, la presión de éste y el espacio entre electrodos, es por ejemplo expresado por curvas de Pashen, las cuales pueden ser experimentalmente determinadas[82]. Estas curvas muestran la dependencia de la fuerza de ruptura del campo en los parámetros mencionados, en el caso de electrodos metálicos. Estas curvas no pueden ser directamente utilizadas en el caso de superficies dieléctricas, como podría ser el caso de cavidades en un dieléctrico.

Algunos autores como Pedersen [78], hacen notar que el desarrollo exponencial de la liberación de nuevos electrones dependiente de a y x, es solamente válido desde un punto en el cual existe un número suficiente de electrones liberados.

#### A.3 Descargas canal

En el caso de una descarga de este tipo, se forma un canal de descarga en un campo eléctrico fuerte, lo cual resulta en una descarga rápida entre los electrodos. Durante la colisión de los electrones acelerados con las moléculas del gas y la resultante ionización, se presentan cargas en el espacio, las cuales pueden fomentar la formación de subsecuentes avalanchas de electrones. Si el campo causado por las cargas espaciales alcanza el mismo orden de magnitud que el campo aplicado, los fotones emitidos por las moléculas excitadas pueden iniciar nuevas avalanchas por fotoionización y esas pueden empezar la tercera generación de avalanchas. Esto puede conducir a la formación de un canal de descarga que cruza la totalidad del espacio entre electrodos.

El canal puede ser observado como un plasma, la cual en el caso de electrodos metálicos, resultará en la descarga rápida entre electrodos, mencionada anteriormente. Dado que las

avalanchas de electrones secundaria y terciaria se inician como resultado de la fotoionización en el gas, el tiempo de formación de las descargas canal (desde el inicio de la primera avalancha a la ruptura eléctrica), puede ser mucho menor al tiempo de formación de las descargas Townsend, las cuales se basan en el movimiento de los electrones a través del espacio entre electrodos.

Un criterio aproximado, comúnmente mencionado para la formación de canales, es que el número de electrones liberados en las avalanchas primarias debe exceder el valor de  $10^8$ . Esto puede ser transformado en la comúnmente utilizada longitud crítica  $x_0$  para la avalancha y el criterio de canal puede ser escrito como:

$$\int_{0}^{x_{0}} (\boldsymbol{a}(x) - \boldsymbol{h}(x)) dx = K$$
(A.2)

Donde h es el coeficiente de acoplamiento del electrón. La constante K generalmente se supone de un valor de 18[78], pero debe enfatizarse que este valor no puede establecerse igual al valor del logaritmo del número de electrones requerido, debido al progreso no exponencial de la ionización en el inicio de la avalancha.

#### A.4 El modelo ABC de Whitehead

El modelo ABC fue propuesto por Whitehead[62], este es un modelo útil para la descripción de la relación entre una descarga en una cavidad de un dieléctrico, localizado entre dos electrodos, y la medición de la variación del voltaje en éstos. Este modelo se denomina ABC, dado que se basa en un circuito equivalente formado por tres capacitancias designadas como Ca, Cb, y Cc.

Como se muestra en la **Figura A.3**, la cavidad es considerada como la capacitancia  $C_c$ , acoplada en serie con  $C_b$ , la cual representa la capacitancia entre la cavidad y los electrodos. En paralelo con estas se encuentra el capacitor formado por los dos electrodos y la parte restante del dieléctrico del sistema, a la cual se denomina  $C_a$ .



Figura A.3. Modelo ABC. Configuración de electrodos y diagrama equivalente de capacitancias
En el caso de la presencia de una descarga, el desplazamiento de carga en la cavidad causará una neutralización del campo interno, lo cual observado desde el exterior será interpretado como una descarga total del "Capacitor"  $C_c$ . Debido a esto, la carga en los electrodos cambia y la recarga de éstos, por medio de los conductores de conexión, puede ser medida y a ésta se le conoce como la llamada carga aparente  $q_{app}$ , la cual de acuerdo al modelo ABC, puede ser calculada del cambio de la carga  $q_{cav}$ , en el capacitor de la cavidad como:

$$q_{cav} = \frac{C_c + C_b}{C_b} q_{app} \tag{A.3}$$

La presuposición es que  $C_a >> C_b >> C_c$ , este requerimiento se satisface, debido a las reducidas dimensiones de la cavidad. La deducción de esta expresión pueden encontrarse en [62,83]. El modelo ABC, ha probado ser aplicable, en algunos casos, para la ilustración de algunos fenómenos relacionados con descargas parciales, como por ejemplo las secuencias de descargas en una cavidad, el cual se presenta a continuación.

Si un campo de corriente alterna (c.a.), es aplicado a una cavidad en un dieléctrico y éste es suficiente para producir descargas, será posible detectar una descarga por cada semiperiodo, si realizamos las siguientes suposiciones: Que existe un electrón de arranque presente, que la cavidad es simétrica y que todas las cargas dentro de la cavidad se rearreglarán después de la descarga.

El voltaje aplicado a los electrodos es llamado el voltaje de inicio. Si éste se incrementa, pueden existir más descargas por semiperiodo. El tiempo de la descarga, relacionado a la fase del voltaje aplicado (comúnmente denominado fase del pulso), dependerá de las condiciones en la cavidad. En la **Figura A.4**, se presenta una secuencia de descargas, suponiendo un voltaje aplicado 5 veces mayor  $(5E_i)$  que el voltaje de inicio  $(E_i)$  y las mismas consideraciones mencionadas en el párrafo anterior.

El tiempo para la primera descarga, en las pendientes crecientes positiva y negativa, es denominado como voltaje de inicio de descargas. Para una descripción extensa e ilustrativa de las secuencias de las descargas para diferentes configuraciones, basándose en el modelo ABC, se recomienda ver la referencia [61]. Si el voltaje aplicado se incrementa continuamente, el número de descargas por cada semiperiodo, bajo las mismas suposiciones anteriores, se incrementarán de manera constante hasta que las descargas individuales no puedan ser detectadas.



**Figura A.4.** Secuencia de descargas en una cavidad simétrica sometida a un campo de corriente alterna (La forma de los pulsos detectados dependen del sistema de medición).

#### A.6 El campo eléctrico en una cavidad esférica

El campo eléctrico dentro de una cavidad esférica, sometida a un campo homogéneo inicial no distorsionado, es también homogéneo; y suponiendo que el diámetro de la cavidad es pequeño, comparado con la distancia entre los electrodos, la fuerza del campo  $\vec{E}_h$  en la cavidad puede ser determinada por:

$$\vec{E}_h = \frac{3\boldsymbol{e}_r}{2\boldsymbol{e}_r + 1} \cdot \vec{E} \tag{A.4}$$

En la cual  $\vec{E}$  es la fuerza del campo eléctrico en el ambiente homogéneo y  $\varepsilon_r$  es la permitividad relativa del medio circundante [84,85].

#### A.7 Mecanismos de inicio de descargas

Se deben satisfacer las siguientes condiciones para que se produzca una descarga:

El voltaje aplicado debe dar como resultado un campo eléctrico en la cavidad, mayor que la resistencia al voltaje de inicio y debe existir un electrón libre de inicio. En el caso de electrodos metálicos, la producción de electrones libres requiere mucho menos energía que en el caso de superficies dieléctricas, donde los electrones deben ser separados de una molécula de gas o de la superficie. La energía necesaria para la ionización de las moléculas

de gas, por ejemplo, puede ser transferida de: Partículas rápidas, radiación ultravioleta o radiación cósmica. Esta radiación casi siempre estará presente y su efecto de ionización en un volumen constante es dependiente del tipo y la presión del gas. En experimentos con cámaras de ionización, el rango de ionización del nitrógeno N<sub>2</sub> a 1 bar absoluto, fue de 2 iones/cm<sup>-3</sup>s<sup>-1</sup> [86].

De las otras fuentes de ionización mencionadas, las radiaciones ultravioletas pueden ser las emitidas por ciertas descargas, que se hallan presentado previamente en la misma cavidad. Así también, el campo eléctrico puede tener un efecto de ionización. Debe esperarse que la taza de ionización también dependerá de la temperatura y posiblemente del contenido de humedad del gas o de la superficie, sin embargo el análisis en detalle de estos aspectos, se encuentran fuera del alcance de esta tesis.

# APÉNDICE Técnicas Normalizadas para la Detección de Descargas Parciales en Motores

# **B.1 Introducción**

Junto con el monitoreo de temperatura, la detección y medición de las descargas parciales, se ha convertido en una de las formas más ampliamente utilizada para el monitoreo de la condición del sistema aislante de los devanados de las máquinas eléctricas rotatorias, debido a su alta sensibilidad para detectar problemas en éste. Las DP son un síntoma de la mayoría de los mecanismos de deterioro del devanado de estator del motor. Cada descarga parcial, genera un pequeño pulso de corriente, que se propaga a través de la totalidad del devanado del estator. Aún cuando la duración de estos pulsos es de 1 a 3 ns, en su transformada de Fourier, cada pulso genera frecuencias que van de c.d. hasta cerca de 1 GHz[24]. Esos pulsos eléctricos, son detectados y procesados de diversas maneras por diferentes sistemas de monitoreo de DP.

El monitoreo de DP, se empleó a finales de los 40's [87], pero su aplicación fue restringida a pocas máquinas, hasta los mediados de los 70's. Esto se debió a la gran cantidad de experiencia que se requería de parte del probador, para separar las DP del devanado de la interferencia electromagnética causada por otras fuentes en la planta. En varias ocasiones, esta interferencia dio origen a diagnósticos equivocados de sistemas aislantes en buenas condiciones, dado que esta interferencia tiene varias de las características de una DP del devanado del estator de la máquina.

Hace casi 20 años, el desarrollo de mejores sensores junto con equipos y dispositivos electrónicos de bajo costo, así como el software de reconocimiento de patrones, los cuales permitieron iniciar la separación de las DP de la interferencia, dieron un gran impulso a la aplicación de esta técnica.

Con base en la norma IEC 60270[40] y a la guía IEEE std. 1434-2000[42], en esteapéndice, se presentan los conceptos, antecedentes y una descripción general de las técnicas normalizadas que actualmente se emplean, para la detección de descargas parciales en motores de gran capacidad en mediana y alta tensión.

#### **B.2** Frecuencias de medición de DP

Las frecuencias de medición de DP, se encuentran entre 30 kHz y 500 kHz y se definen dos tipos de ancho de banda, el primero identificado como de banda ancha, por tener un ancho

similar al de la frecuencia central. La frecuencia central de la banda ancha se encuentra entre 100 y 300 kHz. El segundo tipo de amplificador normalizado para medición de DP es el de banda angosta, donde el ancho de banda puede ajustarse entre 5 y 30 kHz y la frecuencia central de medición puede moverse dentro de los límites de la banda ancha. Sin embargo, estos valores de frecuencia no están relacionados en lo absoluto con el fenómeno físico de las descargas parciales o con su evolución en el tiempo. Más bien, estos límites se definieron al final de la década de los sesentas con la finalidad de estandarizar las mediciones y poder comparar resultados de evaluación en fábrica de equipos nuevos entre unos cinco laboratorios de cables, ubicados en diferentes partes del mundo.

Con la finalidad de establecer niveles aceptables en equipos nuevos pero tomando las limitaciones tecnológicas de esa época (1970), se aceptó de manera unánime el rango de frecuencias propuesto por los 5 investigadores [40,88,89,90]. Este rango se definió en las zonas donde las fuentes de interferencia cercanas a estos laboratorios tenían menor intensidad. Recordando que para finales de los 60's no existía aún el concepto de computadoras personales, tecnología digital, telefonía inalámbrica y televisión satelital, se entenderá por que es tan difícil realizar actualmente las mediciones de DP en equipo instalado utilizando el método normalizado.

Los avances a principios de la década de los ochentas en la miniaturización e integración de circuitos electrónicos permitió el desarrollo de digitalizadores de bajo costo y con capacidad de capturar las seña les de DP en el rango de frecuencia en el que ocurren. Mediciones en laboratorio bajo condiciones controladas de interferencia demostraron que las formas de onda de la corriente producida por las DP pueden alcanzar frentes de corta duración, en el rango de 0.7 ns. Esto equivale a frecuencias cercanas a 1GHz, tiempo en que el fenómeno de ionización transitoria puede ocurrir dentro de los defectos del aislamiento que originan las descargas parciales [91].

#### B.3 Medición de DP en línea y fuera de línea.

La detección y medición normalizada de DP en motores, es posible realizarse mientras el equipo se encuentra en operación. Este método es conocido como pruebas en línea, así también, esta medición se puede realizar con el motor fuera de operación, esto se deno mina pruebas fuera de línea. Dependiendo del objetivo de la prueba, cualquiera de los dos métodos puede utilizarse y aprovechar sus ventajas.

A continuación se describen de manera general las características de los métodos para la detección y medición de DP en motores que se encuentran dentro y fuera de operación.

# **B.3.1 Medición de DP en línea.**

Actualmente existen algunos equipos en el mercado, que proporcionan al usuario capacidad para realizar pruebas normalizadas, ya sea de manera continua o periódica, mientras los motores se encuentran operando normalmente. Esto permite obtener la información para realizar un análisis de tendencia del nivel de DP en la máquina durante su tiempo de servicio.

La mayor ventaja que tiene este método, es la capacidad para el análisis de tendencias. Desde el punto de vista del mantenimiento, tener una herramienta que pueda prevenir acerca de problemas incipientes, proporciona los medios para planear las actividades de mantenimiento necesarias y con esto minimizar costos y tiempos muertos. Pruebas de este tipo, en condiciones ideales, proporcionan al usuario capacidad para monitorear efectos de descargas en las ranuras, delaminación del aislamiento y descargas en cabezales.

El estado del arte es tal que la información obtenida puede proporcionar una medida de la "condición", pero no debe considerarse concluyente por si misma. Esta debe ser complementada con otras observaciones, inspecciones y pruebas adicionales, antes de realizar un trabajo de mantenimiento basado en esta información.

Obtener datos confiables de DP en devanados de motores en operación, puede ser difícil debido a los problemas de interferencia electromagnética, ancho de banda utilizada y atenuación durante la medición. Estos aspectos, pueden dar por resultado malas lecturas que pueden no reflejar la condición real del equipo.

- Reducción de interferencia electromagnética: La reducción de interferencia es un punto importante cuando se realizan mediciones en línea, debido a que los motores no operan en un ambiente ideal para la medición de esas señales. Es posible medir señales o descargas generadas por otras fuentes, tales como equipos próximos, conmutadores, radios de comunicación etc. Muchos fabricantes de equipo de pruebas de DP, toman sus precauciones para segregar el ruido y la mayoría de los métodos son, al menos, parcialmente efectivos.
- Ancho de banda: El contenido de frecuencia de un pulso de DP es función de su tiempo de cresta y de su amplitud. Cada fuente de DP generará pulsos característicos. La frecuencia es función de la localización y tamaño de la cavidad. Esto significa que al progresar la DP, el tamaño de la cavidad cambiará, provocando con esto que la frecuencia asociada también cambie. Dado que cada punto de descarga tiene asociado una frecuencia, el ancho de banda de la frecuencia de detección del sistema de medición (sensor y detector) es una consideración importante. Las descargas que producen señales de frecuencia fuera de los límites del ancho de banda de medición, serán atenuadas o no detectadas por completo. Algunos sistemas de medición, debido a las características propias de su diseño o métodos de acoplamiento con los devanados, proporcionan anchos de banda limitados por lo que solo proveen una visión parcial de la actividad de DP que ocurren en el motor.
- Atenuación/Reflexión: Debido a la naturaleza de los pulsos de la DP, a muy altas frecuencias, el devanado del estator debe ser planteado como una red de escalera capacitiva (predominando la capacitancia a tierra). Esto es como una línea de

transmisión a altas frecuencia y una red de escalera L/C a bajas frecuencias. Dado que el pulso viaja a través del devanado, su magnitud y forma son distorsionadas por la impedancia de alta frecuencia del devanado. Entre más viaje el pulso a través del devanado, mayor será el cambio en la forma del pulso[92]. Dependiendo de la frecuencia de respuesta del detector, pulsos de diferentes frecuencias y magnitudes bajas, pueden contaminar los datos obtenidos. Debido a que los pulsos intentan viajar a través de otras impedancias, como uniones serie, etc., existirán atenuaciones o reflexiones que distorsionarán la forma del pulso de la DP.

#### **B.3.2 Medición de DP fuera de línea**

Aunque la medición de DP fuera de línea requiere más tiempo y costo para su aplicación, es un buen complemento para la prueba en línea, en caso de existir dudas acerca de los datos medidos en línea. Es conveniente realizar una prueba fuera de línea inicial, cuando el motor es nuevo. Una Medición adicional debe considerarse para un año de servicio posterior. Estas mediciones proporcionan un punto de referencia para comparaciones futuras. Las principales desventajas de las pruebas fuera de línea son:

- Se requiere de una fuente de potencia separada para energizar los devanados.
- El motor se debe poner fuera de servicio para realizar las mediciones y en algunos casos, dependiendo del tipo de prueba, se requieren desensambles parciales del equipo (por ejemplo descargas a la ranura).
- Debido a que el motor se encuentra fuera de operación, no se tienen fuerzas electromecánicas actuando dentro del motor, por lo que no es posible detectar todos los tipos de descargas parciales (descargas a la ranura por devanados flojos). Adicionalmente, la temperatura del devanado será menor.
- Todas las partes del devanado se encuentran en alto voltaje. Esto puede producir DP adicionales cerca del neutro, lo cual no ocurre bajo condiciones en línea. Puede existir un riesgo de falla cuando las pruebas involucran devanados viejos.
- La presión y humedad del aire de enfriamiento son diferentes a las que se tienen durante la operación normal del equipo.

Debido a las condiciones anteriores, es muy difícil correlacionar los resultados de las pruebas en línea y fuera de línea.

Dentro de las ventajas de las pruebas fuera de línea tenemos las siguientes:

• Se pueden eliminar otras fuentes de ruido diferentes al posible ruido radiado. Esto es debido a que todo otro equipo eléctrico se encuentra aislado del motor bajo prueba, y no

existen fuentes internas de ruido. El voltaje de prueba puede ser elevado y reducido, para determina el voltaje de inicio y voltaje de extinción de descargas.

- Se puede identificar las DP asociadas con el aislamiento de fase a fase.
- Dependiendo de la frecuencia de las fuentes de DP puede ser posible, con ciertos equipos, localizar la fuente de las DP, tal que las reparaciones necesarias se realicen de una manera precisa.
- En caso de que el rotor de la máquina se remueva, es posible obtener mediciones detalladas de la totalidad del devanado, mismas que no son posibles mediante las pruebas en línea.
- Durante la salida de operación de la máquina para la realización de pruebas fuera de línea, se pueden realizar otras mediciones e inspecciones que pueden ser útiles para identificar las fuentes de las DP.

El ancho de banda y la atenuación son consideraciones importantes. Sin embargo existe una amplia variedad de equipos, que permite cubrir la totalidad de las frecuencias del ancho de banda normalizado, realizando pruebas con más de un tipo de medición.

# B.4 Métodos de detección de DP en motores.

Las descargas parciales son acompañadas de varias manifestaciones físicas, como son pulsos eléctricos y los resultantes pulsos de radio frecuencia, pulsos acústicos, luz, así como reacciones químicas dentro de los gases de aislamiento, que puede ser tanto aire como hidrógeno. A continuación se presentan de manera resumida, los principales métodos de medir algunas de esas manifestaciones físicas, lo cual es un medio para cuantificar la actividad de descargas parciales en el devanado de estator, bobina o barra individual.

# **B.4.1 Detección de pulsos eléctricos**

Debido a que las descargas parciales involucran un flujo de iones y electrones a través de una pequeña distancia durante un periodo finito de tiempo, circula una corriente pequeña, cada vez que ocurre una DP. La corriente total será regida por el transporte de un cierto número de Coulombs de carga. El flujo de corriente crea un pulso de voltaje a través de la impedancia del sistema aislante. Uno de los principales métodos para detectar las descargas parciales, es medir el pequeño pulso de voltaje que acompaña a cada descarga parcial, o el pulso de corriente resultante. Esas cantidades son medidas en circuitos alejados de la DP.

En un devanado, bobina o barra típicos, pueden existir cientos de miles de DP por segundo, por lo que pueden detectarse varios cientos de pulsos eléctricos cada segundo. El pulso de voltaje puede ser desacoplado por medio de capacitores de alto voltaje, los cuales son conectados normalmente en las terminales de cada fase o en cualquier parte del devanado. El capacitor tiene una alta impedancia a la frecuencia del voltaje de suministro. Sin embargo a la alta frecuencia de los pulsos de voltaje de la DP, aparece como una baja impedancia. A la salida de este capacitor se conecta una impedancia de medición descrita en A.7.

De manera alternativa, un transformador de alta frecuencia puede ser instalado en el cable que conecta el neutro de la máquina a la impedancia del aterrizamiento, en los cables de fase o en otras posiciones disponibles para detectar los pulsos de corriente que acompañan las descargas parciales. La salida de los capacitores o de los transformadores de alta frecuencia, son pulsos de voltaje o corriente respectivamente, los cuales pueden ser medidos con un osciloscopio, un analizador de espectros o un analizador de amplitud de pulsos.

# B.4.2 Detección de radiación de radio frecuencia (RF)

De manera adicional a la generación de pulsos de voltaje y corriente dentro de los devanados de los motores, las chispas de las descargas también generan algunas ondas electromagnéticas de radio frecuencia, que se propagan desde el sitio donde ocurren las descargas. Los disturbios electromagnéticos que genera una DP tienen frecuencias con un rango desde los 100 kHz a varios cientos de Mhz. Un radio AM con una antena adecuada puede utilizarse para detectar la existencia de DP.

# **B.4.3 Detección de Ozono**

En máquinas enfriadas por aire, la presencia de descargas en las superficies de las bobinas o de las barras, causa reacciones químicas en el aire adyacente. Uno de los subproductos de las reacciones químicas es el ozono. Este es un gas con un olor característico. La concentración del ozono se incrementa si existe una actividad sustancial superficial de DP. (DP internas no generan cantidades detectables de ozono). Existen varios medios para medir la concentración de ozono, incluyendo sensores electrónicos.

La concentración de ozono es afectada por la temperatura y la humedad del ambiente y del volumen del flujo de aire. Puede también estar relacionado a la carga y factor de potencia de la máquina. En este método de detección la localización de los sensores es crítica.

#### **B.4.4 Detección acústica y ultrasónica**

Cada DP genera una pequeña "onda de choque", causada por el rápido incremento en la temperatura del gas localizado en la vecindad de la DP. Esta pequeña onda de choque a su vez genera ruido acústico. Cuando ocurren varios pulsos de DP en la superficie de las bobinas del estator, resulta en un sonido característico. El ruido acústico ocurre en el rango de frecuencia de varios cientos de Hertz hasta los 150 kHz, con la mayoría de la energía acústica ocurriendo alrededor de 40 kHz. Pueden utilizarse micrófonos direccionales para medir el nivel de sonido de la DP, así como para localizar el sitio donde esta ocurriendo. El

ruido acústico no será detectado si la actividad de DP es interna, a menos que la actividad sea significativa[93].

# **B.5** Sistemas de detección de DP

Casi en su totalidad, los sistemas de detección de descargas parciales actuales, contienen los siguientes componentes principales:

- a) Sensores, tales como antenas, capacitores de HV conectados en las terminales del motor, transformadores de corriente de radio frecuencia (RF), instalados en el neutro de la máquina o en el aterrizamento de los capacitores supresores de sobretensiones, son necesarios para detectar las DP. Estos sensores son sensibles a señales de alta frecuencia de las DP, y son insensibles respecto a la frecuencia de la potencia de suministro y sus armónicas. La mayoría de los sensores tienen inherentemente un rango amplio de sensibilidad a la frecuencia, generalmente de rangos tan bajos como 5 kHz hasta valores de 1 GHz.
- b) Componentes electrónicos para convertir los pulsos de una señal analógica a su forma digital.
- c) Técnicas de procesamiento digital de señales para reducir la información a cantidades manejables y ayudar a discriminar las DP en el devanado del ruido eléctrico, para asegurar una interpretación correcta de los resultados.

Todas las tecnologías actuales para la medición de descargas parciales, dependen de la mejora de uno o más de los elementos mencionados anteriormente. Esto con la finalidad de implementar el monitoreo en línea de las descargas parciales.

Actualmente los sensores de uso generalizado para la detección en línea de las descargas parciales, son los capacitores de alta tensión, instalados en cada fase de la máquina, como se mencionó, el capacitor bloquea la alta tensión de 60 Hz, mientras que es una trayectoria de baja impedancia para los pulsos de las descargas parciales de alta frecuencia. En la actualidad el valor más común de capacitores es de 80 pF. Los capacitores utilizados en las primeras etapas de esta tecnología, tenían valores de 375 a 1000 pF, esto debido a que eran los valores más comunes empleados en los detectores de DP en los laboratorios.

En general, los capacitores alimentan una carga de 50 Ohms. De esta manera el ancho de banda básico del sistema de detección, está formado por el filtro pasa altas formado por un capacitor en serie con una resistencia. Un capacitor de 80 pF, detecta frecuencias de pulsos de DP por arriba de 40 MHz. Un capacitor de 1000 pF detecta señales por arriba de 3 MHz.

En ausencia de interferencia electromagnética y suponiendo que los capacitores se encuentren localizados cerca a las bobinas/barras, cualquiera de los capacitores anteriores puede detectar las DP. En caso de que exista interferencia, la teoría de las comunicaciones

nos indica que la relación señal a ruido es mayor con la aplicación del capacitor de 80 pF [24].

Varias formas de antenas instaladas dentro del motor han sido empleadas para detectar DP en línea. La antena más utilizada es la denominada SCC. Esta es una antena que por lo general se instala debajo de las cuñas en las ranuras del estator que contienen las bobinas o las barras del motor o generador operando en alta tensión [94].

Todos los primeros monitores de DP, utilizaban un osciloscopio o una analizador de espectros RF (radio frecuencia), para desplegar las señales provenientes de los sensores de DP. Con experiencia, un Técnico Operador calificado, podía de manera subjetiva, separar las descargas parciales del estator, de la interferencia eléctrica, con base en el contenido de frecuencias, forma del pulso, tasa de repetición y la posición de fase en el ciclo de voltaje de 60 Hz.

Se han desarrollado tres medios principales para separar las descargas parciales de la interferencia. Uno requiere la instalación de al menos dos sensores por fase y la medición del tiempo de arribo [95,96]. Este método es ampliamente utilizado en hidrogeneradores y turbogeneradores enfriados por aire. El otro método es visualizar cada pulso y determinar si la forma del pulso es característico de las descargas parciales o ruido [95,97]. El tercer método consiste en utilizar técnicas de reconocimiento de patrones, para emular la habilidad del un experto para separar visualmente las descargas parciales de la interferencia. Generalmente se emplean análisis estadístico avanzado o redes neuronales [98,99]. Sin embargo, aunque se han realizado amplias investigaciones de este método, existen muy pocas aplicaciones prácticas.

En los pasados 10 años, la medición periódica de las descargas parciales durante la operación normal de los motores y generadores, ha estado cambiando hacia el monitoreo continuo de éstas, utilizando instrumentación dedicada. Esto permite tener disponibilidad continua de la medición y verificar los cambios en las tendencias en condiciones de carga nominal.

#### B.6 Sistemas de medición de pulsos eléctricos y radiación de RF

Actualmente existen en uso, un número considerable de diferentes sistemas para la detección de pulsos eléctricos. El diseño de la máquina y el tipo de actividad de DP, pueden definir el tipo de sensores y la instalación que se requiere.

Cuando ocurre una DP, en algún lugar del devanado del motor, la carga inyectada primero fluye en la capacitancia a tierra en el lugar de la inyección, modificando el voltaje local. Este cambio de voltaje, inmediatamente se convierte en la cresta de una onda que se propaga en ambas direcciones, alejándose del punto de la inyección. La naturaleza de la onda en cualquier sitio alejado del sitio de inyección depende completamente de la impedancia de la trayectoria que tiene que atravesar.

Debido a que el frente de onda del pulso de una DP puede ser del orden de nanosegundos en el sitio donde ocurre la descarga, la onda inicial de voltaje tiene frecuencias que varían desde los kHz hasta los GHz. Sin embargo, debe notarse que todos los componentes del objeto bajo prueba y el circuito de medición afectan al ancho de banda de la medición. La inductancia de la conexión de los sensores al objeto bajo prueba, puede limitar la frecuencia superior a algunos decenas de MHz.

A continuación se presentan a manera de ejemplos, casos de aplicación de sensores de pulsos eléctricos típicos y sus detectores asociados, para la medición de descargas parciales en motores operando, propuestos por la IEEE Std 1434-2000 [42].

# B.6.1 Caso 1. TC de RF acoplado con capacitores de 10 nF.

En este caso se utilizan los siguientes sensores (ver **figura 4.1**)[94]:

- a) Acoplador capacitivo de 10 nF con transformadores de corriente de alta frecuencia y banda ancha, conectado en terminales principales del motor.
- b) Transformador de corriente RF con o sin capacitor de 10 nF, conectado entre el neutro del motor y tierra.

El detector utilizado, adquiere datos en banda angosta y ancha en el dominio del tiempo y la frecuencia. Este caso se emplea en un rango de frecuencia de 10 kHz a 30 MHz.

#### B.6.2 Caso 2. TC de RF en cable de tierra de capacitores del equipo de sobretensiones.

Para este caso, se utiliza un transformador de corriente RF, colocado en el cable de tierra de los capacitores de protección de sobretensiones instalados en la terminal del motor (ver **figura B. 2**), el detector para este sistema es un analizador de ancho de pulso con capacidad para medir la fase del pulso. El rango de frecuencia es de 100 kHz – 30 MHz para el sensor y 20-350 MHz para el detector[94].

#### B.6.3 Caso 3. TC de RF en parte no aterrizada del cable principal del motor.

Para este caso, se utiliza un transformador de corriente RF tipo gancho (clamp on), colocado la parte no aterrizada del cable, cerca de la terminal del motor (ver **figura B. 3**), el detector para este sistema es un detector de descargas con pantalla para despliegue de mapas N-Q- $\Phi$ . El rango de frecuencia es de 50 a 300 kHz [100].



**Figura B.1.** Circuito de medición de descargas parciales con dispositivo de acoplamiento capacitivo de 10 nF y transformador de corriente RF.



**Figura B.2.** Circuito de medición de descargas parciales con un transformador de corriente RF, colocado en el cable de tierra de los capacitores de protección de sobretensiones.

Técnicas normalizadas para la Detección de Descargas Parciales en Motores



**Figura B.3** Circuito de medición de descargas parciales con un transformador de corriente RF tipo gancho, colocado la parte no aterrizada del cable, cerca de la terminal del motor.

#### B.7 Método normalizado de medición de descargas parciales (IEC 60270)[40]

El método normalizado de medición de descargas parciales, se basa en el modelo ABC de Whitehead[62]. Como se vio en el apéndice A, este modelo considera que el defecto donde ocurre la descarga se modela como un arreglo de 3 capacitores, identificados convencionalmente como A, B y C. El capacitor "A" corresponde al aislamiento sin defectos, el capacitor "B" representa la cavidad donde ocurren las descargas y el capacitor "C" es la parte del aislamiento en serie con el capacitor "B".

La medición de los detectores convencionales se basa en este modelo y en la transferencia de carga "aparente" de un capacitor de acoplamiento Ck al arreglo de capacitores ABC. La carga aparente del pulso de la descarga parcial, de acuerdo a IEC[66]es la carga unipolar, que inyectada en un periodo de tiempo muy corto entre las terminales del objeto bajo prueba en un determinado circuito de prueba, daría la misma lectura en el instrumento de medición que el pulso de la descarga parcial, como se mencionó anteriormente, esta carga aparente se mide en picocoulombs. Sin embargo, debe quedar claro, que la carga aparente no es igual a la cantidad de carga localmente involucrada en el sitio de la descarga, la cual no puede ser medida de una manera directa. En las figuras 4.4 y 4.5, se muestran los circuitos básicos de medición que establece la norma IEC 60270[40].







Figura B.5. Circuito normalizado de medición de descargas parciales con dispositivo de acoplamiento (CD), en serie con el objeto bajo prueba.

Cada uno de los circuitos de las figuras anteriores consiste principalmente de lo siguiente:

- a) Un objeto bajo prueba, el cual us ualmente se considera como un capacitor C<sub>a</sub>.
- b) Un capacitor de acoplamiento  $C_k$ , el cual debe ser de un tipo de diseño de baja inductancia o un segundo objeto bajo prueba  $C_{a1}$ , el cual debe ser similar al objeto bajo prueba  $C_a$ .  $C_k$  o  $C_{a1}$ , no deben tener descargas parciales al voltaje especificado de prueba, a menos que el sistema de medición sea capaz de separar las descargas del objeto bajo prueba y el capacitor de acoplamiento y medirlas de manera separada.
- c) Un sistema de medición con su impedancia de entrada (Instrumento de medición MI, cable de conexión CC, dispositivo de acoplamiento CD e impedancia de entrada Zmi).
- d) Una fuente de alta tensión (U), con un nivel de ruido lo suficientemente bajo, para permitir medir el valor especificado de las descargas parciales al voltaje de prueba especificado.

Técnicas normalizadas para la Detección de Descargas Parciales en Motores

e) Una impedancia o filtro (Z), que puede ser introducida en el lado de alta tensión, para reducir el nivel de ruido de la fuente de suministro de potencia.

La principal diferencia entre los circuitos mostrados en las **Figuras B.4** y **B.5**, es la sensibilidad de la medición. En el circuito de la F**igura B.5**, la impedancia detecta más DP, sin embargo ésta puede dañarse en caso de que falle el objeto bajo prueba ( $C_a$ ).

La calibración del sistema de medición, con el equipo a probar conectado en el circuito de prueba, se realiza inyectando pulsos de corriente de corta duración y de una carga de magnitud conocida ( $q_0$ ), en las terminales del objeto bajo prueba, tal como se muestra en el circuito de la **Figura B.6**. Los pulsos de corriente son por lo general obtenidos de un calibrador, el cual está integrado por un generador de pulsos de escalones de voltaje de amplitud  $U_0$  en serie con un capacitor  $C_0$ , tal que los pulsos de calibración son cargas repetitivas con una magnitud cada una de:

$$q_0 = U_0 C_0 \tag{B.1}$$

La finalidad de esta calibración es cuantificar el factor de escala del sistema de medición dentro del circuito de prueba y verificar que éste sea capaz de medir la magnitud especificada de las DP.



Figura B.6. Conexiones para la calibración del circuito normalizado de medición de descargas parciales.

# APENDICE

# Identificación de Descargas Parciales (Grupo 21.03 de CIGRE)

# C.1 Introducción

La identificación de los mecanismos de deterioro que se presentan en los motores evaluados, mediante la interpretación de los patrones de las descargas parciales, desplegados en los mapas obtenidos de la medición, es muy importante. Actualmente para la interpretación de los patrones de descargas parciales obtenidos mediante métodos normalizados, se utiliza de manera generalizada la referencia generada por el grupo 21.03 de CIGRE, "Recognition of Discharges" [6]. De acuerdo con este grupo de trabajo del CIGRE, los principales patrones de descargas parciales, que se presentan en los devanados de máquinas eléctricas rotatorias, son los que se presentan a continuación:

# C.2 Descargas parciales internas en una cavidad dentro del material aislante

Descargas de aproximadamente la misma amplitud, número y localización ocurren sobre la forma de onda senoidal antes de los picos de voltajes. Es decir, los pulsos aparecen cuando la curva de la forma de onda va ascendiendo. Las amplitudes de los pulsos son similares tanto en el ciclo positivo como en el negativo. En la **Figura C.1** se muestra el diagrama del patrón de estas descargas con una base de tiempo elíptica.



Figura C.1 Diagrama del patrón de descargas parciales internas en una cavidad dentro del aislante.

Identificación de Descargas Parciales (Grupo 21.03 de CIGRE)

#### C.3 Descargas parciales internas en múltiples cavidades dentro del material aislante

Descargas de aproximadamente la misma amplitud, número y localización ocurren sobre la forma de onda senoidal antes de los picos de voltajes. Es decir, los pulsos aparecen cuando la curva de la forma de onda va ascendiendo. Las amplitudes de los pulsos son similares tanto en el ciclo positivo como en el negativo. En la **Figura C.2** se muestra el diagrama del patrón de estas descargas con una base de tiempo elíptica.



**Figura C.2** Diagrama del patrón de descargas parciales internas en múltiples cavidades dentro del material aislante.

#### C.4 Descargas parciales externas superficiales

Los pulsos de las descargas ocurren sobre la forma de onda senoidal en los picos de voltaje. Las amplitudes de los pulsos son similares tanto en el ciclo positivo como en el negativo. En la **Figura C.3**, se muestra un ejemplo de este tipo de descargas con una base de tiempo elíptica.

# C.5 Descargas parciales internas en una cavidad entre el dieléctrico y el electrodo de tierra

Las descargas se presentan antes de los picos de voltaje de la onda senoidal. En este caso, se tienen un pequeño número de descargas grandes en un medio ciclo y en el otro se tiene un gran número de descargas pequeñas. Esta diferencia en amplitud debe ser mayor de 3 a 1. En la **Figura C.4**, se muestra un ejemplo de este tipo de descargas con una base de tiempo elíptica.



Figura C.3 Diagrama del patrón de descargas parciales externas



Figura C.4 Diagrama del patrón de descargas internas en una cavidad entre el dieléctrico y el electrodo de tierra

Identificación de Descargas Parciales (Grupo 21.03 de CIGRE)

# C.6 Descargas parciales internas en cavidades entre el dieléctrico y el electrodo de tierra o entre superficies dieléctricas y metales externos

Estas descargas aparecen antes de los picos de la onda senoidal y generan una configuración asimétrica, los pulsos en el ciclo negativo, tienen un mayor nivel con respecto los pulsos que aparecen en el ciclo positivo. En la **Figura C.5**, se muestra un ejemplo de este tipo de descargas.



**Figura C.5** Diagrama del patrón de descargas parciales internas en cavidades entre el dieléctrico y el electrodo de tierra o entre superficies dieléctricas y metales externos.