



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

## **PRUEBAS PREDICTIVAS A PARARRAYOS DE ÓXIDO METÁLICO PARA ALTA TENSIÓN TIPO SUBESTACIÓN**

German Antonio Juárez Vidaurre

Asesorado por el Ing. José Guillermo Bedoya Barrios

Guatemala, agosto de 2005

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PRUEBAS PREDICTIVAS A PARARRAYOS DE ÓXIDO  
METÁLICO PARA ALTA TENSIÓN TIPO SUBESTACIÓN**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**GERMAN ANTONIO JUÁREZ VIDAURRE**

ASESORADO POR: ING. JOSÉ GUILLERMO BEDOYA BARRIOS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO ELECTRICISTA**

GUATEMALA, AGOSTO DE 2005

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Ing. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXÁMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Juan Fernando Morales Mazariegos
EXAMINADOR	Ing. Francisco Javier González López
EXAMINADOR	Ing. Carlos Francisco Gressi López
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

**HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**PRUEBAS PREDICTIVAS A PARARRAYOS DE ÓXIDO  
METÁLICO PARA ALTA TENSIÓN TIPO SUBESTACIÓN,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Mecánica Eléctrica con fecha 24 de enero del 2003.

A handwritten signature in black ink, consisting of several overlapping loops and lines, positioned above the printed name.

**German Antonio Juárez Vidaurre**

Guatemala 28 de marzo de 2005

Ingeniero  
Gustavo Benigno Orozco  
Coordinador del Área de Potencia  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería, USAC.

Estimado ingeniero Orozco:

Me permito dar aprobación al trabajo de graduación titulado: **Pruebas predictivas a pararrayos de óxido metálico para alta tensión tipo subestación**, realizado por el señor German Antonio Juárez Vidaurre, por considerar que cumple con los requisitos establecidos.

Por tanto, el autor de este trabajo de graduación y yo, como su asesor, nos hacemos responsables por el contenido y conclusiones del mismo.

Sin otro particular, me es grato saludarle.

Atentamente,

  
Ing. José Guillermo Bedoya Barrios  
Asesor



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 25 de mayo de 2005.

Señor Director  
Ing. Enrique Edmundo Ruiz Carballo  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado: **Pruebas predictivas a pararrayos de óxido metálico para alta tensión tipo subestación**, desarrollado por el estudiante German Antonio Juárez Vidaurre, por considerar que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,

Ing. Gustavo Benigno Orozco Godínez  
Coordinador Área de Potencia

GBOG/sro



El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante German Antonio Juárez Vidaurre titulado: **Pruebas predictivas a pararrayos de óxido metálico para alta tensión tipo subestación**, procede a la autorización del mismo.

  
Ing. Enrique Edmundo Ruiz Carballo  
DIRECTOR



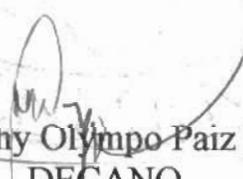
GUATEMALA, 28 de JULIO 2,005.



Ref. DTG. 317-2005.

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **PRUEBAS PREDICTIVAS A PARARRAYOS DE ÓXIDO METÁLICO PARA ALTA TENSIÓN TIPO SUBESTACIÓN**, presentado por el estudiante universitario **German Antonio Juárez Vidaurre** procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

  
Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos  
DECANO



Guatemala, agosto 12 de 2,005

/gdech

## **AGRADECIMIENTOS A**

- Jehová Dios** por su amor, conocimiento, bendiciones, por mi vida y mi familia
- mi madre Alma Aurora  
Vidaurre Trinidad** por su amor, cariño y confianza
- mi querida abuelita “Conchita”,  
María Concepción Trinidad  
Viuda de Vidaurre** por su compañía, cariño y ejemplo de diligencia
- mis hermanos Marvin, Norman,  
Eluvia, María José, Jeannette y  
Karla** por ser parte integral de mi vida y ser la motivación que me ha dado fortaleza para luchar por el logro de mis metas
- Patty** por su cariño, apoyo, amistad, compañía y amor
- mis amigos, Elkin, Otto, Irving,  
Salvador, Beatriz y Petrocelli** por enriquecer mi vida con su amistad
- Instituto Técnico Vocacional  
“Dr. Imrich Fischmann”,** por haber sido la cuna donde nacieron y cumplieron muchos de mis sueños e ideales, y donde conocí a mis grandes amigos
- mis profesores** por contribuir en mi formación a lo largo de la vida

**mis ex alumnos del Instituto Técnico Vocacional “Dr. Imrich Fischamnn”** por su amistad, confianza, los momentos vividos y las metas alcanzadas en conjunto

**Ing. Edgar Florencio Montufar Urizar,** por honrar la noble vocación docente con su conocimiento, experiencia, motivación, sabiduría, humildad y ejemplo

**profesor Eduardo Albués** por sus sabias enseñanzas en las aulas de la Escuela Marista

**Colegio Nueva Vida, en especial a Madre Pilar Baratech, Madre Amabilis Peláez y Madre Matilde Gaztelu** por su cariño, abnegación, ayuda, confianza y entrega a la niñez y juventud guatemalteca

**Ing. José Guillermo Bedoya Barrios** por aceptar asesorarme y por su apoyo en la realización de este trabajo

**personal del laboratorio de mediciones de la subestación Guatemala Sur, en especial a Don Mauricio Anzueto Amado e ing. Rodolfo Rodríguez** por compartir sus años de experiencia y por su apoyo en la realización de mediciones a equipos eléctricos de potencia

**mis compañeros de trabajo, en especial al ing. Francisco Hernández -Francis-, Lilian Pérez de Gálvez –Lili- e ing. Javier Madrigal** por su amistad y ejemplo

**sección socioeconómica de la Universidad de San Carlos de Guatemala, especialmente a la licenciada Anselma de Molina** por el apoyo en mi paso por las aulas universitarias

**mis compañeros becados de la Universidad de San Carlos de Guatemala** por la amistad, convivencias e ideales compartidos

**Universidad de San Carlos de Guatemala** por ser mi Alma Mater

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	IX
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XIII
GLOSARIO.....	XV
OBJETIVOS.....	XIX
RESUMEN.....	XXI
INTRODUCCIÓN.....	XXV

### **1. PARARRAYOS DE ÓXIDO METÁLICO, FUNDAMENTOS, CLASIFICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS**

1.1 Fundamentos	1
1.1.1 Conceptos generales	1
1.1.2 Estructura del pararrayos	2
1.1.2.1 Varistor de óxido metálico	2
1.1.2.2 Cubierta interna	3
1.1.2.3 Envoltura externa	3
1.1.2.4 Tapas de encapsulado	4
1.1.2.5 Terminales de conexión	4
1.1.3 Funcionamiento del pararrayos	5
1.1.3.1 Funcionamiento en condiciones de voltaje nominal de la red	5
1.1.3.2 Funcionamiento en condiciones de sobre voltaje en la red	7
1.1.3.2.1 Voltaje nominal del pararrayos	7
1.1.3.2.2 Voltaje de cebado del pararrayos	8
1.1.3.2.3 Voltaje de descebado del pararrayos	8
1.1.3.2.4 Voltaje máximo de operación continua	8

1.1.4	Capacidad de sobrevoltaje - tiempo	10
1.2	Clasificación de los pararrayos	12
1.2.1	Pararrayos tipo secundario	13
1.2.1.1	Características	13
1.2.1.2	Aplicaciones	15
1.2.2	Pararrayos tipo distribución	15
1.2.2.1	Características	15
1.2.2.2	Aplicaciones	16
1.2.3	Pararrayos tipo intermedio	17
1.2.3.1	Características	17
1.2.3.2	Aplicaciones	18
1.2.4	Pararrayos tipo subestación	18
1.2.4.1	Características	18
1.2.4.2	Aplicaciones	19
1.3	Criterios de selección	19
1.3.1	MCOV	20
1.3.2	Nivel de protección	20
1.3.3	Capacidad de energía	20
1.3.4	Presión de alivio	21
1.3.5	Envolvente externo	21
1.3.6	Otras consideraciones	22

## **2. INSTRUMENTACIÓN PARA PRUEBAS PREDICTIVAS A PARARRAYOS DE ÓXIDO METÁLICO PARA ALTA TENSIÓN TIPO SUBESTACIÓN**

2.1	Medidor de resistencia de aislamiento	23
2.1.1	Construcción	24
2.1.2	Principio de operación	26
2.1.3	Recomendaciones de uso	28
2.1.4	Especificaciones	29

2.2	Medidor de factor de potencia de aislamiento	33
2.2.1	Principio electrodinámico de operación	34
2.2.2	Especificaciones	36
2.3	Medidor de pérdidas de potencia	40
2.3.1	Principio electrodinámico de operación	40
2.3.2	Especificaciones	42
2.4	Equipo medidor de corriente de fuga, sistema de monitoreo de corriente resistiva de fuga en línea.	46
2.4.1	Componentes del sistema de monitoreo de corriente resistiva de fuga	47
2.4.1.1	Monitor de corriente de fuga LCM II	48
2.4.1.2	Sonda de campo, antena.	49
2.4.1.3	Transformador de corriente	49
2.4.1.4	Sonda de corriente	49
2.4.2	Arreglo del sistema de monitoreo de corriente resistiva de fuga	50
2.4.3	Interfase de usuario del monitor de corriente de fuga LCM II	51
2.4.3.1	Interruptor de alimentación	51
2.4.3.2	Diodo luminoso	52
2.4.3.3	Pantalla LCD	52
2.4.3.4	Botones de control	52
2.4.3.5	Perilla giratoria	52
2.4.3.6	Botón selector	53
2.4.4	Conectores del monitor de corriente de fuga LCM II	53
2.4.4.1	Conector para la fuente de poder	54
2.4.4.2	Conector para fuente de poder externa DC	54
2.4.4.3	Conector para sonda de entrada	54
2.4.4.4	Conectores de puesta a tierra	55
2.4.4.5	Conectores para salidas de prueba	55

2.4.4.6	Conectores para salidas a osciloscopio	56
2.4.4.7	Conector del puerto RS-232	56
2.4.5	Principio de operación del sistema de monitoreo de corriente resistiva de fuga	57
2.4.5.1	Efecto de la temperatura ambiente y del voltaje de operación sobre la componente resistiva de la corriente de fuga del pararrayos	59
2.4.5.2	Efecto del contenido de tercer armónico en el voltaje de la red sobre la componente resistiva de la corriente de fuga del pararrayos	61
2.4.5.3	Método de análisis del armónico de tercer orden con compensación por armónicos en el sistema de voltaje	63
2.4.6	Características de operación	66
2.4.6.1	Corrección del efecto de la temperatura ambiente y del voltaje de operación sobre la componente resistiva de la corriente de fuga del pararrayos	66
2.4.6.2	Corrección del efecto del contenido de tercer armónico en el voltaje de la red sobre la componente resistiva de la corriente de fuga del pararrayos	70
2.4.7	Especificaciones del equipo de monitoreo de corriente resistiva de fuga	70

### **3. PROTOCOLOS DE PRUEBAS PREDICTIVAS A PARARRAYOS DE ÓXIDO METÁLICO PARA ALTA TENSIÓN TIPO SUBESTACIÓN**

3.1	Pruebas fuera de línea	73
3.1.1	Prueba de aislamiento a pararrayos de óxido metálico para alta tensión tipo subestación	73
3.1.1.1	Objetivo de la prueba de resistencia de aislamiento	74

3.1.1.2 Pasos previos a la realización de la prueba de aislamiento	75
3.1.1.3 Recomendaciones para la realización de pruebas de aislamiento	76
3.1.1.4 Mecanismo de funcionamiento de la prueba de aislamiento	77
3.1.1.5 Protocolo de la prueba de aislamiento	77
3.1.1.5.1 Prueba de tensión por pasos	77
3.1.1.5.1.1 Protocolo de la prueba de tensión por pasos	79
3.1.1.5.2 Prueba de absorción del dieléctrico	79
3.1.1.5.2.1 Protocolo de la prueba de absorción del dieléctrico	80
3.1.1.5.3 Tendencia del aislamiento	81
3.1.1.5.3.1 Protocolo de la prueba de tendencia del aislamiento	82
3.1.2 Prueba de factor de potencia de aislamiento	83
3.1.2.1 Objetivo de la prueba de factor de potencia de aislamiento	83
3.1.2.2 Factor de disipación D	84
3.1.2.3 Efecto de la temperatura en el factor de potencia de aislamiento	85
3.1.2.4 Protocolo de la prueba de factor de potencia de Aislamiento	85
3.1.3 Prueba de pérdidas de potencia	86
3.1.3.1 Objetivo de la prueba de pérdidas de potencia	86
3.1.3.2 Protocolo de la prueba de pérdidas de potencia	86
3.2 Prueba en línea	88
3.2.1 Prueba de corriente de fuga en pararrayos de óxido metálico para alta tensión tipo subestación	89

3.2.1.1	Objetivo de la medición de la corriente de fuga en pararrayos de óxido metálico para alta tensión tipo subestación	89
3.2.1.2	Montaje y consideraciones del sistema de monitoreo de corriente resistiva de fuga	90
3.2.1.2.1	Fuente de poder	90
3.2.1.2.2	Aterrizaje del sistema de medición LCM II	91
3.2.1.2.3	Instalación de la sonda de corriente	92
3.2.1.2.4	Instalación del transformador de corriente tipo Clip	93
3.2.1.2.5	Instalación de la sonda de campo	94
3.2.1.3	Protocolo de la medición de la corriente resistiva de fuga en pararrayos de óxido metálico para alta tensión tipo subestación	96

#### **4. MEDICIONES DE CAMPO Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

4.1	Resistencia de aislamiento	100
4.1.1	Resultados de medición de resistencia de aislamiento	100
4.1.2	Discusión de resultados de medición de resistencia de aislamiento	100
4.2	Pérdidas de potencia	104
4.2.1	Resultados de medición de pérdidas de potencia	104
4.2.2	Discusión de resultados de medición de pérdidas de potencia	105
4.3	Corriente resistiva de fuga	107
4.3.1	Resultados de medición de corriente resistiva de fuga	108
4.3.2	Discusión de resultados de medición de corriente resistiva de fuga	110

<b>CONCLUSIONES</b>	113
<b>RECOMENDACIONES</b>	115
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	117
<b>ANEXOS / APÉNDICES</b>	121



# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1. Característica no lineal de un varistor de óxido de zinc, comparado con el comportamiento de un varistor de silicato de carbono y una resistencia lineal	2
2. Partes de un pararrayos de óxido metálico tipo distribución con envoltorio de polímero	4
3. Modelo eléctrico de pararrayos tipo estación bajo condiciones normales de voltaje	6
4. Curva sobrevoltaje – tiempo de un pararrayos	11
5. Aspecto exterior de un pararrayos tipo secundario	13
6. Aspecto exterior de un pararrayos tipo distribución con cubierta de polímero	16
7. Aspecto exterior de un pararrayos tipo intermedio	17
8. Aspecto exterior de un pararrayos tipo subestación	19
9. Megger comercial marca AVM modelo BM11D	24
10. Circuito magnético del megger y sus conexiones eléctricas	25
11. Elemento móvil del ohmímetro del megger	26
12. Característica voltaje en terminales – carga en terminales para un megger marca AVO serie BM220	31
13. Relaciones angulares entre A, Q, P, y S que determinan el valor del factor de potencia de aislamiento.	33
14. Esquema de conexiones eléctricas de un medidor de factor de potencia de bobinas cruzadas	34
15. Equipo medidor de factor de potencia de aislamiento modelo MP 2500D, equipo portátil.	38

16. Equipo medidor de factor de potencia de aislamiento modelo MP 12HD, equipo fijo.	39
17. Esquema de conexiones eléctricas de un medidor de pérdidas de potencia electrodinómetro	40
18. Equipo para medición de pérdidas de potencia M4000	44
19. Monitor de corriente de fuga, vista de la carátula del monitor	48
20. Equipo medidor de corriente de fuga, componentes y estuche para su transporte	50
21. Arreglo de los componentes del sistema LCM II con inclusión de PC	51
22. Interfase entre usuario y panel frontal del LCM II	53
23. Conectores en el panel posterior del LCM II	57
24. Característica típica corriente - voltaje en un pararrayos de óxido metálico para alta tensión tipo subestación que muestra el efecto de la temperatura ambiente y de las relaciones $U / U_r$	59
25. Efecto del contenido de armónicos de voltaje en la red sobre el contenido de armónicos de la corriente de fuga de un pararrayos de óxido metálico	62
26. Curva de voltaje de operación en p.u. del voltaje nominal del pararrayos	67
27. Curva de ajuste a temperatura ambiente de 20 °C	68
28. Gráfica tensión - resistencia para la tendencia de resistencia de aislamiento del pararrayos	78
29. Conexiones a realizar para aterrizar el LCM II cuando se realizan mediciones en campo	91
30. Conexiones a realizar para aterrizar el LCM II cuando se realizan mediciones en laboratorio	92
31. Sonda de corriente, cable de medición y conector para LCM II	92
32. Transformador de corriente tipo clip, sonda de corriente y cable especial de conexión	93

33. Ensamblaje de la sonda de campo	94
34. Datos de fabricante y resultados de medición de corriente resistiva de fuga de “pararrayos E”.	108
35. Representación gráfica de los resultados de medición de corriente resistiva de fuga de “pararrayos E”.	109
36. Datos de fabricante y resultados de medición de corriente Resistiva de fuga de “pararrayos F”	109
37. Representación gráfica de los resultados de medición de corriente resistiva de fuga de “pararrayos F”.	110

## TABLAS

I. Clasificación de pararrayos según norma ANSI/IEEE c 62.11 de 1,987	12
II. Características generales de pararrayos MOSA modelo E	14
III. Características generales de pararrayos MOSA, modelo F	14
IV. Influencia de la temperatura ambiente y del voltaje del sistema sobre el valor de la componente resistiva de la corriente de fuga de un pararrayos de óxido metálico para alta tensión tipo subestación	60
V. Interpretación de las relaciones de absorción dieléctrica	80
VI. Resultados de medición de aislamiento en pararrayos A.	101
VII. Resultados de medición de aislamiento en pararrayos B.	102
VIII. Resultados de medición de pérdidas de potencia en pararrayos C y D.	104



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>MCOV</b>	Maximum Continuous Over Voltage -voltaje máximo de operación continua-
<b>MOV</b>	Metal Oxide Varistor -varistor de óxido metálico-
<b><math>\Omega</math></b>	Ohms
<b>BIL</b>	Basic Impulse Insulate Level -nivel básico de aislamiento al impulso por rayo-
<b>M<math>\Omega</math></b>	Mega Ohms
<b>V</b>	Voltios
<b>°C</b>	Grados centígrados
<b>mA</b>	mili Amperios
<b>HR</b>	Humedad relativa
<b>kV</b>	kilo Volts
<b>Hz</b>	Hertzios
<b>nF</b>	nano Faradios
<b>A</b>	Amperios
<b>DC</b>	Corriente directa
<b>AC</b>	Corriente alterna
<b>LCM II</b>	Leakage Current Monitor II -monitor de corriente de fuga II-
<b>I<sub>3r</sub></b>	Tercer armónico de la corriente resistiva de fuga
<b>I<sub>3t</sub></b>	Tercer armónico de la corriente total de fuga
<b>I<sub>3c</sub></b>	Tercer armónico de la corriente capacitiva de fuga

<b>I1t:</b>	Fundamental de la corriente total de fuga
<b>I1p</b>	Fundamental de la corriente de sonda de campo
<b>I3p</b>	Tercer armónico de la corriente de sonda de campo
<b>Cm</b>	centímetros
<b>Pulg</b>	pulgadas
<b>Kg</b>	kilo gramos
<b>Lbs</b>	libras
<b>Ah</b>	Amperios - hora
<b>LED</b>	Light Emisor Diodo, diodo emisor de luz.



## GLOSARIO

<b>Celda</b>	Estructura básica para la generación de electricidad por medios electroquímicos consistente en dos placas de diferente metal sumergidas en una solución electrolítica.
<b>Corriente alterna</b>	Energía eléctrica caracterizada por el cambio en el tiempo de la magnitud y polaridad del voltaje y flujo de corriente.
<b>Corriente continua</b>	Energía eléctrica caracterizada por la invariabilidad en el tiempo de la magnitud y polaridad del voltaje y flujo de corriente.
<b>Corriente transitoria de absorción</b>	Flujo electrónico de corriente directa requerido en un breve período para la polarización de una estructura dieléctrica.
<b>Corriente transitoria de fuga capacitiva</b>	Componente capacitiva de la corriente transitoria de absorción.
<b>Dieléctrico</b>	Término con que se designa a un material aislante que es utilizado para mejorar la capacidad de almacenamiento de energía a través de un campo eléctrico.

<b>Metrología</b>	Ciencia que tiene por objeto de estudio a los sistemas de medida.
<b>Nivel básico de aislamiento al impulso</b>	Valor de cresta del máximo impulso de voltaje que es capaz de resistir un aislamiento sin que se produzca falla.
<b>Sobre voltaje transitorio</b>	Voltaje cuya magnitud excede el valor nominal durante un corto período de tiempo, como consecuencia de descargas electroatmosféricas o de apertura y cierre de circuitos.
<b>Ohm</b>	Unidad de resistencia eléctrica.
<b>Protocolo de prueba</b>	Diversos pasos que en un orden lógico forman la rutina a seguir para la realización de pruebas y mediciones a un pararrayos.
<b>Resistencia de lastre</b>	Resistor conectado en el circuito eléctrico interno de un megger para proteger sus bobinas contra sobre corriente en caso que los terminales de línea y tierra del medidor sean cortocircuitados.
<b>Subestación eléctrica</b>	Conjunto de equipos eléctricos, conductores y sistemas que forman parte de un nodo en un sistema eléctrico de potencia.

**Temperatura ambiente**

Temperatura presente bajo condiciones de intemperie en un punto geográfico.

**Varistor**

Resistor cuya magnitud de resistencia eléctrica es variable y dependiente del valor de voltaje aplicado entre sus terminales.

**Voltaje de operación**

Diferencia de potencial eléctrico presente en los terminales de un pararrayos mientras está conectado al sistema eléctrico de potencia energizado.



## RESUMEN

Los pararrayos son dispositivos utilizados en esquemas de protección contra sobrevoltaje en los sistemas de potencia. Con el paso del tiempo la tecnología aplicada en la construcción de estos dispositivos ha evolucionado, hasta llegar a los pararrayos basados en óxidos metálicos, la cual utiliza como elemento principal de funcionamiento un varistor de óxido metálico, debido a su característica de resistencia no lineal variable con el voltaje. La estructura básica de un pararrayos de óxido metálico está compuesta por una columna de discos de óxido de zinc, alojados en un tubo de fibra de vidrio, el cual está cubierto por una envoltura externa que puede ser de porcelana o polímero; los terminales de conexión del pararrayos son el punto de contacto entre la columna de óxido metálico y la instalación eléctrica que se protege contra sobrevoltaje. Las tapas de encapsulado se encargan de mantener la hermeticidad de la estructura interna, evitando que los agentes contaminantes lleguen al interior del pararrayos.

El objetivo del pararrayos en el sistema de potencia es suprimir o reducir los sobrevoltajes que, eventualmente, aparecen en los sistemas de potencia como consecuencia de maniobra de interruptores o de descargas electroatmosféricas y de esa forma proteger la integridad dieléctrica de los componentes del sistema de potencia, transformadores, aisladores, interruptores, etc. El comportamiento del pararrayos ante condiciones de voltaje nominal y sobrevoltaje en la red queda descrito por su circuito equivalente y por los valores de voltaje durante una descarga, respectivamente. En condiciones de voltaje nominal, circula, permanentemente, por el pararrayos una corriente de fuga con una componente capacitiva y una componente resistiva. La variación en la magnitud de la corriente resistiva de fuga es un indicador del estado del pararrayos que al ser monitoreado permite establecer su estado.

Los equipos utilizados para realizar pruebas a pararrayos y establecer su estado consisten, generalmente, en megger, medidor de factor de potencia de aislamiento, medidor de pérdidas de potencia y medidor de corriente resistiva de fuga. Los instrumentos que constituyen estos equipos de medición basan su funcionamiento en principios electrodinámicos y análisis de armónicos para poder determinar el valor de los parámetros eléctricos medidos en las pruebas aplicadas a los pararrayos. Es muy común encontrar equipos comerciales “multimedición” que son equipos capaces de realizar la medición de diferentes parámetros eléctricos. Los fabricantes proporcionan información respecto a los tipos de mediciones que pueden realizar sus equipos, las características eléctricas, ambientales, de exactitud, rangos y resolución de medida, peso y tamaño de estos, para que sirvan a los usuarios como guía para la correcta selección de los equipos y su apropiado uso durante la realización de las pruebas predictivas; las especificaciones, también, son importantes para conocer las condiciones adecuadas de almacenamiento.

Las pruebas predictivas se aplican a los pararrayos siguiendo una serie de pasos en un orden específico, que constituye el protocolo de la prueba. Las pruebas predictivas a pararrayos pueden agruparse en dos grandes categorías: las pruebas fuera de línea y las pruebas en línea. Las primeras requieren la desenergización del pararrayos de la red, mientras las segundas se realizan con el pararrayos conectado a la red energizada. En general, los protocolos de prueba para pararrayos consideran la preparación del pararrayos antes de la realización de la prueba. Dada la naturaleza y característica capacitiva de un pararrayos mientras está conectado a la red, la preparación del pararrayos incluirá cortocircuitar sus terminales, para el caso de las pruebas de aislamiento realizadas fuera de línea, con el fin de eliminar corrientes residuales que puedan afectar los resultados de la medición. Posteriormente, dependiendo del tipo de prueba que se trate, existe un orden secuencial para realizar las conexiones del equipo de medida con el pararrayos y para la realización de la medición.

La realización de las pruebas predictivas a pararrayos persigue la obtención de las magnitudes de los parámetros eléctricos medidos, es decir, de la resistencia de aislamiento, factor de potencia de aislamiento, pérdidas de potencia y corriente resistiva de fuga. Luego de obtenidas las magnitudes indicadas, el siguiente paso para conocer el estado del pararrayos es la interpretación de resultados de las mediciones. La interpretación de los resultados se basa en las recomendaciones y datos proporcionados por el fabricante del pararrayos y en la comparación con los valores obtenidos en pruebas realizadas a pararrayos nuevos iguales o muy similares al pararrayos medido; estas recomendaciones, datos y comparaciones son utilizados en la determinación de la tendencia e interpretación de los resultados. Estos resultados pueden indicar que el MOV del pararrayos se encuentra en mal estado o sus discos cortocircuitados, bajos valores de resistencia de aislamiento o altos valores de corriente resistiva de fuga, debido a la fatiga que causan los esfuerzos eléctricos de los sobrevoltajes que es muy probable que falle si no es reemplazado; además, la interpretación de resultados puede llevar a la detección de fallas en el montaje interno del pararrayos, como conexiones flojas mediante corrientes resistivas de fuga inferiores a las indicadas por el fabricante correspondientes a pararrayos nuevos.



## **OBJETIVOS**

### **General**

Describir las pruebas predictivas que se aplican a pararrayos de óxido metálico para alta tensión tipo subestación y la correcta interpretación de los resultados obtenidos.

### **Específicos**

1. Describir los diferentes tipos de pararrayos de óxido metálico para alta tensión y sus características técnicas.
2. Describir la instrumentación utilizada en las pruebas predictivas a pararrayos de óxido metálico para alta tensión tipo subestación.
3. Describir los protocolos de las pruebas predictivas aplicadas a pararrayos de óxido metálico para alta tensión tipo subestación.
4. Interpretar los resultados obtenidos al aplicar las pruebas predictivas a pararrayos de óxido metálico para alta tensión tipo subestación.



## INTRODUCCIÓN

Los pararrayos son elementos muy importantes dentro del esquema de protección de un sistema de potencia; su correcto dimensionamiento y selección garantizan la protección de las instalaciones eléctricas para las cuales se diseñan. Con el paso del tiempo, las condiciones ambientales y las operaciones del pararrayos por sobrevoltaje en la red le causan fatiga, la cual se traduce en cambio de las características de sus materiales constitutivos, esto provoca en muchos casos que el pararrayos no funcione, correctamente, en condiciones de voltaje nominal o de sobrevoltaje en la red o que falle, provocando daños a otros componentes de la red o causando salidas innecesarias de esta.

El conocimiento del estado del pararrayos es muy importante para la toma de decisiones de mantenimiento o reemplazo del pararrayos, antes que este falle, mientras está conectado a la red o que no proteja, adecuadamente, a la instalación en que está conectado; por esa razón, el presente trabajo de graduación aborda el tema de las pruebas predictivas que permiten conocer el estado del pararrayos con base en la medición de parámetros eléctricos que se constituyen en indicadores de sus características de funcionamiento. El enfoque de este trabajo se ha dirigido con especial énfasis a un tipo de prueba -de aplicación reciente en nuestro país- que se realiza con el pararrayos “en línea”, es decir, conectado a la red energizada; esta prueba es la prueba de monitoreo de corriente resistiva de fuga, la cual presenta muchas ventajas debido a que el tiempo requerido para su realización es reducido y no requiere interrupción del suministro de energía eléctrica, desmontaje ni preparación del pararrayos.

La prueba de medición de la corriente resistiva de fuga se puede aplicar únicamente a pararrayos de óxido metálico, porque es, únicamente, en estos pararrayos donde circula de forma permanente una corriente de fuga cuya componente resistiva se ve afectada por la variación en las características del varistor de óxido metálico.

Aunque el enfoque de este trabajo se dirige a la prueba de monitoreo de corriente resistiva de fuga, también trata las pruebas que se realizan “fuera de línea”, es decir,

aquellas que para ser aplicadas al pararrayos requieren que este se desenergice y desmonte de la red. Este grupo de pruebas son pruebas relacionadas con las características dieléctricas del pararrayos.

Para tener una clara comprensión del tema tratado, el trabajo inicia con una presentación de la teoría relacionada con el pararrayos, su construcción, funcionamiento, clasificación y consideraciones para la correcta selección de pararrayos, sin tocar el tema de dimensionamiento de la protección contra sobrevoltaje usando pararrayos por no relacionarse con los fines de este trabajo. A continuación, se trata la instrumentación utilizada para la realización de las pruebas predictivas a pararrayos de óxido metálico para alta tensión tipo subestación, destacando su principio de operación y las especificaciones que los fabricantes proporcionan para sus equipos. Luego se presentan los protocolos de prueba para las pruebas “en línea” y “fuera de línea”, explicando la teoría que sustenta la prueba; seguidamente, se presentan los resultados obtenidos en pruebas que el Instituto Nacional de Electrificación -INDE - realiza a pararrayos tipo subestación conectados en instalaciones de su propiedad para finalizar con la discusión e interpretación de dichos resultados. Los resultados presentados corresponden en una prueba específica a un pararrayos diferente, debido a que en la práctica -por razones económicas y de tiempo- se prefiere aplicar una sola prueba predictiva a un pararrayos. La interpretación de resultados se realiza aplicando los criterios de interpretación aplicables a cada una de las pruebas.

La correcta realización de pruebas predictivas a pararrayos de óxido metálico para alta tensión tipo subestación y la correcta interpretación de los resultados obtenidos en las pruebas proporciona información importante para la toma de decisiones en cuanto a la realización de mantenimientos o reemplazo de los pararrayos antes que estos fallen, reduciendo de esa forma los riesgos respecto de la seguridad e integridad de las personas y evitando los perjuicios económicos asociadas al daño del aislamiento de los equipos en los sistemas de potencia, la pérdida de continuidad en el suministro de energía eléctrica, incremento en el precio spot de la energía debido a la indisponibilidad del generador más económico.

# **1. PARARRAYOS DE ÓXIDO METÁLICO, FUNDAMENTOS, CLASIFICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS**

## **1.1 Fundamentos**

### **1.1.1 Conceptos generales**

El pararrayos es el dispositivo cuya función consiste en reducir los sobrevoltajes que eventualmente aparecen en instalaciones eléctricas como consecuencia de condiciones externas e internas al sistema eléctrico: descargas electroatmosféricas, condiciones operativas del mismo -apertura y cierre de circuitos- respectivamente.

Para dar protección a la instalación eléctrica, el pararrayos se encuentra conectado de forma permanente a la red entre fase y tierra, y actúa únicamente cuando el voltaje alcanza o supera un valor determinado; el pararrayos opera por efecto directo de la tensión. En un sistema de potencia interconectado, el pararrayos cobra vital importancia debido a que sin la función protectora de este, las sobretensiones inducidas podrían perforar los aisladores de la red de transmisión, o los aislamientos de los generadores, transformadores y demás componentes del sistema, ocasionando con esto daños y deterioro en los equipos, con la consecuente reducción de continuidad y calidad del servicio de energía eléctrica y pérdidas económicas.

En sus orígenes los pararrayos fueron construidos en base a explosores, sin embargo la tecnología aplicada en su fabricación ha ido evolucionando hasta llegar a la aplicación de resistores no lineales dependientes del voltaje –varistores- constituidos por óxidos metálicos.

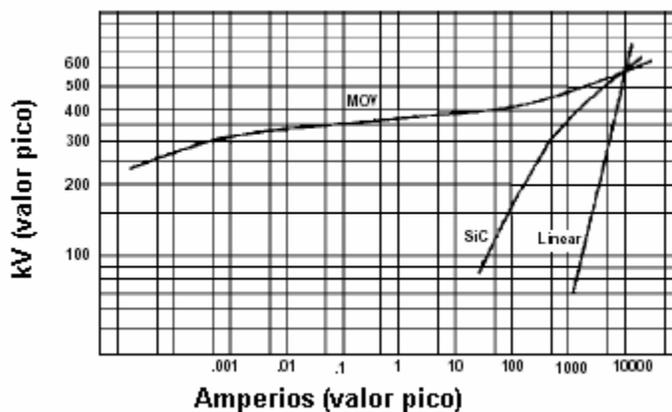
## 1.1.2 Estructura del pararrayos

El elemento principal del pararrayos de óxido metálico es un resistor no lineal, formado por una serie de pastillas de óxido metálico alojadas en un cilindro de fibra de vidrio. El arreglo descrito anteriormente se encuentra envuelto por un recubrimiento de porcelana vitreada o por una envolvente de polímeros con compuestos de silicón. El pararrayos cuenta en los extremos con tapas que lo sellan herméticamente y permiten establecer la conexión eléctrica con el exterior.

### 1.1.2.1 Varistor de óxido metálico, MOV por sus iniciales en inglés.

Generalmente se fabrica de óxido de zinc, material que posee una característica no lineal poco pronunciada en la zona de sub tensión y una característica no lineal muy pronunciada en la zona de sobretensión; este comportamiento es el adecuado para la respuesta rápida que se requiere cuando surgen sobrevoltajes en la red. La figura 1 muestra de forma comparativa el comportamiento de la resistencia eléctrica de un MOV en función del voltaje presente entre sus terminales.

**Figura 1. Característica no lineal de un varistor de óxido de zinc, comparado con el comportamiento de un varistor de silicato de carbono y una resistencia lineal.**



Fuente: Hubbell / Ohio Brass, "Zinc-Oxide Arrester Design and Characteristics", p. 12

### **1.1.2.2 Cubierta interna**

El cilindro que aloja las pastillas de óxido metálico debe ser un buen aislante eléctrico y poseer suficiente capacidad para soportar las altas temperaturas causadas por las corrientes que son drenadas a tierra en condiciones de sobrevoltaje; dicho requerimiento es crítico debido a que este es el componente que mantiene contacto directo con el elemento generador de calor del pararrayos, MOV. Uno de los materiales que cumple con estas condiciones es la fibra de vidrio, por lo que es usada en la fabricación de la cubierta interna.

### **1.1.2.3 Envoltura externa**

La envoltura externa del pararrayos cumple la función de proteger a los componentes internos de los efectos del ambiente; está hecha de porcelana vitreada o de silicón dieléctrico. Ambos materiales son excelentes como aislante eléctrico. La porcelana vitreada posee mejores propiedades mecánicas mientras que el silicón dieléctrico es más resistente a los efectos contaminantes del ambiente; es por eso que el uso de porcelana vitreada se encuentra muy extendido en pararrayos sometidos a esfuerzos mecánicos, y en general, en aquellos cuyo montaje se efectúa sobre pedestal. Sin importar el material externo de la envoltura, su forma está constituida por campanas o faldones; dicha forma permite incrementar la distancia de fuga entre la terminal energizada del pararrayos y tierra.

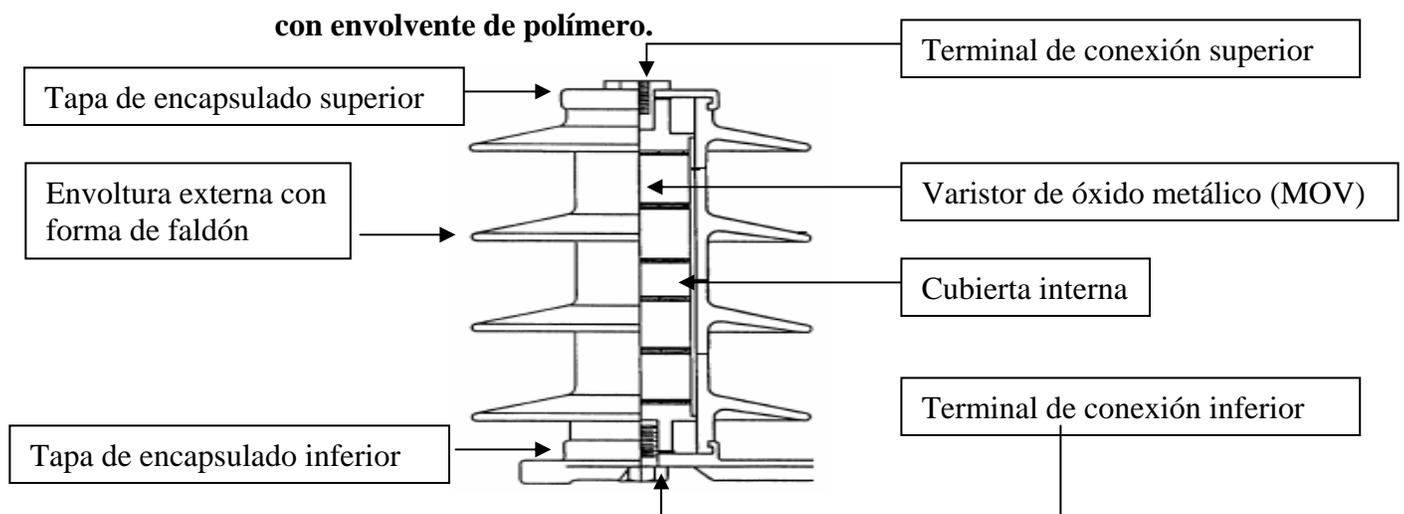
#### 1.1.2.4 Tapas de encapsulado

Los extremos longitudinales del pararrayos están herméticamente cerrados mediante tapas presurizadas de encapsulado; de esta forma se trata de evitar que la humedad ingrese al interior del pararrayos. Estas tapas están hechas de metal, por lo que constituyen una parte viva en la estructura del pararrayos.

#### 1.1.2.5 Terminales de conexión

Son el medio que une eléctricamente el MOV del pararrayos con la instalación que se protege. Con el fin de reducir la resistencia de contacto los terminales de conexión poseen un baño de plata, mejorándose de esa forma su conductividad. La unión mecánica y eléctrica de los terminales y demás componentes del pararrayos se realiza mediante procesos industriales especiales de soldadura. La figura 2 presenta las partes de un pararrayos, usando como ejemplo la estructura de un pararrayos tipo distribución.

**Figura 2. Partes de un pararrayos de óxido metálico tipo distribución**



**Fuente:** Ohio Brass, "DynaVar station class and intermediate surge arresters" , p..30-4

### **1.1.3 Funcionamiento del pararrayos**

El funcionamiento del pararrayos se basa en el comportamiento no lineal, variable y dependiente del voltaje que posee el varistor. La siguiente explicación de funcionamiento del pararrayos es eminentemente descriptiva y no cuantitativa, debido a que no es el propósito de este capítulo extenderse en los cálculos correspondientes al dimensionamiento de pararrayos. Antes de describir el comportamiento de un pararrayos con la red en condiciones de voltaje nominal y con la red en condiciones de sobrevoltaje, es necesario indicar que dicho comportamiento queda descrito de la siguiente manera:

- para condiciones de voltaje nominal, se describe el funcionamiento del pararrayos por un circuito equivalente RC que modela su efecto en la red a la que está conectado
- para condiciones de sobrevoltaje el funcionamiento se describe mediante los valores de voltaje y corriente a través del pararrayos, valores tipificados en pruebas de impulso.

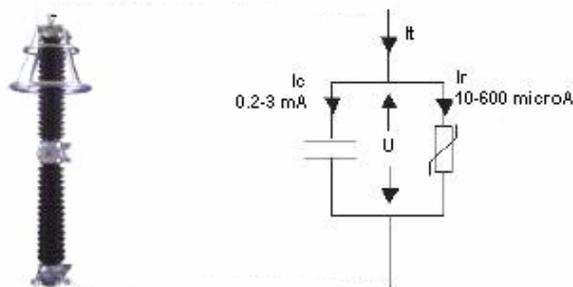
#### **1.1.3.1 Funcionamiento en condiciones de voltaje nominal de la red**

En condiciones normales de operación de la red, voltaje nominal, el pararrayos se comporta como un aislante eléctrico conectado entre la línea y tierra; en estas circunstancias el varistor de óxido metálico presenta un valor muy alto de resistencia eléctrica. Aunque en términos prácticos se suele considerar que la resistencia del varistor se hace infinita, dicha consideración pierde validez a medida que el voltaje nominal de la red sea de “media tensión” o “alta tensión”, debido a que no existe un aislador eléctrico perfecto así como no existe un conductor eléctrico perfecto. Lo anterior nos indica que en condiciones normales de operación de la red, circularán a través del varistor y sobre la superficie del pararrayos pequeñas corrientes de fuga de tipo capacitivo y resistivo.

También es muy importante mencionar que en condiciones normales de operación de la red, debido a la topología eléctrica de la conexión del pararrayos, entre línea y tierra, este último se encuentra sometido permanentemente a un voltaje alterno, por lo que el pararrayos, constituido por una estructura dieléctrica y sometido a una diferencia de potencial, se configura como un capacitor. Un capacitor manifiesta una reactancia capacitiva cuando se encuentra sometido a un voltaje alterno, dicha reactancia es función de la frecuencia del voltaje aplicado. Para los valores nominales de frecuencia en un sistema de potencia, 50 Hz o 60 Hz, la reactancia capacitiva tiene un valor tal que permite el paso de una pequeña corriente eléctrica de tipo capacitivo. La superposición de las corrientes antes mencionadas, la de tipo capacitivo y la de tipo resistivo, constituye una corriente total de fuga cuyo valor se encuentra en el orden de 0.2 mA a 3 mA; dicha corriente fluye de manera permanente entre línea y tierra a través del pararrayos, bajo condiciones normales de operación de la red.

El modelado del pararrayos consiste en la conexión paralelo de dos elementos: un resistor R y un capacitor C. El resistor R representa la alta resistencia eléctrica del varistor y el dieléctrico del recubrimiento externo. El capacitor C representa el efecto capacitivo total del pararrayos. El circuito equivalente se muestra en la figura 3.

**Figura 3. Modelo eléctrico de pararrayos tipo estación bajo condiciones normales de voltaje.**



**Fuente:** TransiNor As, “User manual LCM II versión 1.01”, p.10

### **1.1.3.2 Funcionamiento en condiciones de sobrevoltaje en la red**

La condición de sobrevoltaje en el sistema al cual está conectado el pararrayos provoca el comportamiento dinámico del varistor de óxido metálico, lo que se traduce en la consecuente reducción en el valor de su resistencia eléctrica e incremento del valor de corriente que pasa por el y que es drenada a tierra. Este comportamiento dinámico se ve reflejado, según la ley de Ohm, en el valor del voltaje presente entre los terminales del pararrayos.

Existen valores de voltaje con formas de onda tipificadas, que se aproximan a las formas de onda de voltaje transitorio que se presenta en condiciones de sobrevoltaje del sistema, para las cuales el pararrayos cruza la frontera entre las características de un conductor y las características de un aislante. Estos valores de voltaje corresponden al voltaje presente en terminales del pararrayos cuando se le aplican impulsos de corriente con forma de onda tipificada, y describen el comportamiento del pararrayos en condiciones de sobrevoltaje. Los valores de voltaje que describen el comportamiento dinámico del pararrayos son los siguientes:

#### **1.1.3.2.1 Voltaje nominal del pararrayos**

Es el máximo valor eficaz de voltaje de fase a tierra permisible entre los terminales del pararrayos, para el cual ha sido diseñado, a fin de garantizar una correcta operación bajo períodos de sobretensión. El voltaje nominal es usado como parámetro de referencia para las características específicas de operación.

#### **1.1.3.2.2 Voltaje de cebado del pararrayos**

Es la mínima magnitud de voltaje que provoca el estado pleno de conducción del pararrayos. Corresponde al punto de la característica voltaje – corriente en el cual la pendiente de la recta tangente a la curva se reduce significativamente, punto de inflexión.

#### **1.1.3.2.3 Voltaje de descebado del pararrayos**

Es el máximo valor de voltaje que, luego de la descarga a través del pararrayos y la eliminación del sobrevoltaje, provoca el corte del paso de corriente, haciendo que el pararrayos alcance y mantenga el estado de aislador.

#### **1.1.3.2.4 Voltaje máximo de operación continua, MCOV por sus iniciales en inglés.**

Es el máximo valor de voltaje al cual puede quedar sometido el pararrayos antes de iniciar el estado de conducción. En la característica voltaje – corriente del varistor, corresponde al punto en el cual la pendiente de la recta tangente a la curva empieza a reducir su valor.

Ahora que ya se han explicado los valores de voltaje que describen el comportamiento del pararrayos en condiciones de sobrevoltaje en la red, será más fácil desarrollar una breve descripción de la operación del pararrayos al momento de presentarse un sobrevoltaje en la red: cuando el voltaje en la red es el nominal, el pararrayos se comporta, en términos prácticos, como un aislador eléctrico conectado entre línea y tierra, a través del cual circula permanentemente una pequeña corriente de

fuga que posee una componente resistiva y una componente capacitiva predominante. Cuando aparece un sobrevoltaje en la red, éste se ve reflejado en los terminales del pararrayos, conectados entre la línea y tierra; al momento que el voltaje en los terminales del pararrayos supera el MCOV se inicia la reducción de la resistencia eléctrica del MOV, y empieza la circulación de una corriente a través del pararrayos. Al momento que el voltaje en los terminales del pararrayos supera el valor del voltaje de cebado, se da una reducción abrupta y significativa en la resistencia eléctrica del MOV y a través del pararrayos circula una corriente que es drenada a tierra. Luego que el sobrevoltaje se ha eliminado y llega a una magnitud igual o menor a la del voltaje de descebado se interrumpe el paso de corriente por el pararrayos y este recupera el estado de aislador que poseía antes de que apareciera el sobrevoltaje. El ciclo de operación descrito se repetirá siempre que aparezca un sobrevoltaje en la red.

Al conocer el ciclo de operación del pararrayos en condiciones de sobrevoltaje resulta fácil entender que el diseño de la protección contra sobrevoltajes usando pararrayos, se debe fundamentar en la selección adecuada del MCOV del pararrayos y su relación con el máximo sobrevoltaje tolerable en el sistema, trasladado a su valor equivalente entre línea y tierra, que es donde se encuentra conectado el pararrayos; el valor de sobrevoltaje equivalente entre línea y tierra que pueda ocurrir en la red depende de si el neutro del sistema se encuentra aterrizado o está flotante. Una mala selección del MCOV del pararrayos dará como resultado la conducción permanente de corrientes menores a la de descarga plena –para selección de valores muy bajos de MCOV en el pararrayos- que provocarán sobre calentamiento, reducción en la vida útil o hasta destrucción del pararrayos; si el MCOV seleccionado es muy alto se reduce el margen de protección que da el pararrayos a la red; en ese caso el pararrayos podría no actuar al aparecer un sobrevoltaje en la red con lo cual podrían dañarse los componentes de la instalación que debían protegerse.

#### 1.1.4 Capacidad de sobrevoltaje - tiempo

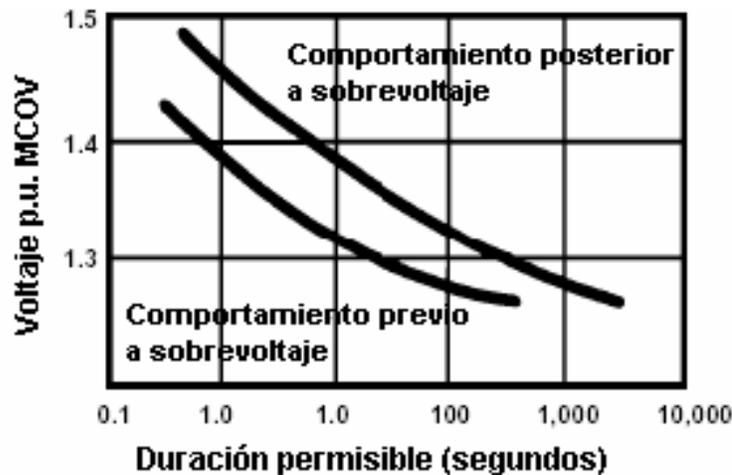
Al momento que un sobrevoltaje es drenado a tierra, en el pararrayos se disipa una potencia eléctrica por efecto Joule, debido a que la resistencia del MOV no es  $0 \Omega$ , lo que significa que el pararrayos se ve sometido a la presencia de temperaturas elevadas. El valor de la potencia disipada por el MOV, potencia que se convierte en calor, es máximo cuando el producto del cuadrado de la corriente que pasa por el pararrayos y la resistencia eléctrica del pararrayos es máximo; a su vez la energía que se disipa en un pararrayos -en el MOV- depende del valor de la potencia por efecto Joule y del tiempo durante el cual se disipa dicha potencia. Debido a que en el pararrayos tanto la corriente drenada a tierra como la resistencia eléctrica del MOV son dependientes del valor del voltaje –sobrevoltaje-, se puede concluir que la capacidad de disipar potencia por efecto Joule del pararrayos también es dependiente del valor del sobrevoltaje y del tiempo que permanezca el sobrevoltaje entre sus terminales; dicho en otras palabras, el sobrevoltaje que puede soportar un pararrayos está limitado especialmente por su característica de capacidad térmica al calor producido por efecto Joule cuando debido a un sobrevoltaje una corriente es drenada a tierra. Bajo esta consideración, la capacidad aislante o dieléctrica del pararrayos en la selección del pararrayos no es tan crítica como su capacidad térmica por efecto Joule, ya que su capacidad aislante queda garantizada al seleccionar adecuadamente el voltaje nominal del pararrayos -a los pararrayos no se les especifica el Nivel Básico al Impulso, BIL en inglés, porque son construidos con un BIL adecuado al valor de su voltaje nominal.

Aunque los sobrevoltajes que aparecen en la red se encuentran en el orden de  $\mu s$ , cuando son causados por descarga electroatmosférica, y ms, cuando son causados por maniobra de circuitos, es importante conocer la característica de límite térmico del pararrayos. Dicha característica suele presentarse en tablas del fabricante como una curva de sobrevoltaje – tiempo. Si los límites térmicos del pararrayos se superan entonces se provocarán daños a sus elementos constitutivos, lo cual incide en el rápido

envejecimiento, deterioro o hasta destrucción de los mismos; en consecuencia el MOV del pararrayos ya no presentará la misma característica de comportamiento frente a la presencia del voltaje nominal y de los sobrevoltajes en la red, por lo que la componente resistiva de la corriente permanente de fuga también cambiará.

A continuación, en la figura 4, se presentan dos curvas que describen la capacidad temporal al sobrevoltaje, de un pararrayos tipo Dyna Var de la marca Ohio Brass. Dichas curvas describen el tiempo máximo que puede permanecer un sobrevoltaje entre terminales del pararrayos sin provocar daño a sus elementos. La primer curva indica la capacidad del pararrayos previo a recibir el primer sobrevoltaje. Luego que el pararrayos ha drenado a tierra corriente por primera vez debido a la presencia de sobrevoltaje, sus características son modificadas y su capacidad temporal al sobrevoltaje queda descrita por la segunda curva.

**Figura 4. Curva sobrevoltaje – tiempo de un pararrayos**



**Fuente:** Ohio Brass, “DynaVar Station Class and Intermediate Surge Arresters”, p. 3

Para la correcta selección de un pararrayos es de gran utilidad conocer los tiempos típicos durante los cuales los sobrevoltajes permanecen en la red, en virtud de lo cual la capacidad térmica del pararrayos deberá satisfacer las condiciones en que operará.

## 1.2 Clasificación de los pararrayos

Los pararrayos se distinguen por sus características técnicas, de protección y aplicación. De esa forma algunos son más robustos que otros, soportan mayores o menores corrientes de descarga, mayores o menores voltajes máximos de operación continua, mayores o menores tiempos de descarga, etc. A continuación se presenta de forma tabulada la clasificación, algunos de los parámetros y su valor para los pararrayos que hacen ANSI / IEEE según la clase a que corresponden; posteriormente se describen las principales características y aplicaciones que distinguen a los pararrayos según dicha clasificación.

**Tabla I. Clasificación de pararrayos según norma ANSI/IEEE c 62.11 de 1,987**

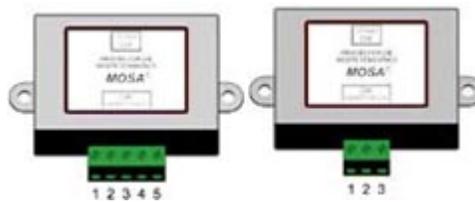
Clasificación de pararrayos (clase)	Corriente de impulso Onda 8x20 $\mu$ s kA(valor cresta)			Corriente de impulso por maniobras 45 $\mu$ s kA (valor cresta)	Mínima corriente onda 4x10 $\mu$ s kA (valor cresta)	
<b>Secundario</b>	1.5			-	10	
<b>Distribución</b>						
Servicio pesado	10			500	100	
Servicio normal	5			500	65	
<b>Intermedio</b>	5			500	65	
<b>Estación</b>	Voltaje máximo del sistema					
		800 kV	550 kV	<550 kV		
	3-150 kV	20	15	10	500	65
	151-325 kV	20	15	10	1000	65
326-900 kV	20	15	10	2000	65	

**Fuente:** tabulación elaborada con información de tesis 08T(3582)OF, Tobías Gutty, “protección de líneas de transmisión contra descargas electroatmosféricas usando pararrayos de polímeros”, p. 20,21

## 1.2.1 Pararrayos tipo secundario

A continuación se presenta el aspecto típico de un pararrayos tipo secundario.

**Figura 5. Aspecto exterior de un pararrayos tipo secundario**



**Fuente:** Editores S.R.L. , “Revista ingeniería eléctrica, noticias y productos, edición No. 146”, p.110

### 1.2.1.1 Características

En esta categoría se agrupa a los pararrayos para baja tensión es decir, los pararrayos que protegen equipos e instalaciones cuyo voltaje nominal de operación es menor a 2,400 V, generalmente para montaje en interiores. La figura 5 muestra dos pararrayos tipo secundario. Este tipo de pararrayos está formado por un MOV alojado en una carcasa que lo protege; la estructura completa es muy liviana. Su capacidad de corriente de descarga y nivel de protección para corriente nominal de descarga son las mas bajas comparados con los otros tipos de pararrayos. A continuación se presentan dos tablas características de datos de pararrayos tipo secundario típicos. Dichas tablas corresponden a pararrayos tipo secundario, marca MOSA; la tabla II muestra las características del modelos E y la tabla III las del modelo F.

**Tabla II. Características generales de pararrayos MOSA modelo E**

Características Generales Modelos E				
	E-50	E-110	E-220	EP-220
Tensión nominal	50 V	110 V	220 V	220 V
Frecuencia nominal	50 Hz			
Corriente nominal		6 A		10 A
Corriente nominal de descarga (onda 8/20 $\mu$ s)	1 kA	2 kA	2,5 kA	2,5 kA
Corriente máxima de descarga (onda 8/20 $\mu$ s)	2 kA	3 kA	5 kA	5 kA
Nivel de protección para corriente nominal de descarga (onda 8/20 $\mu$ s)	$\leq 300$ V	$\leq 500$ V	$\leq 800$ V	$\leq 800$ V

**Fuente:** Editores S.R.L. , “Revista ingeniería eléctrica, noticias y productos, edición No. 146”, p.80

**Tabla III. Características generales de pararrayos MOSA, modelo F**

Características Generales Modelos F				
	F-50	F-110	F-220	FP-220
Tensión nominal	50 V	110 V	220 V	220 V
Frecuencia nominal	50 Hz			
Máxima tensión permanente de servicios	65 V	125 V	350 V	350 V
Corriente nominal de descarga (onda 8/20 $\mu$ s)	2 kA	2,5 kA	3 kA	3 kA
Corriente máxima de descarga (onda 8/20 $\mu$ s)	6 kA	6 kA	8 kA	8 kA
Nivel de protección para corriente nominal de descarga (onda 8/20 $\mu$ s)	$\leq 450$ V	$\leq 750$ V	$\leq 1300$ V	$\leq 1300$ V

**Fuente:** Editores S.R.L. , “Revista ingeniería eléctrica, noticias y productos, edición No. 146”, p.82

### **1.2.1.2 Aplicaciones**

Los pararrayos tipo secundario se aplican en la protección de instalaciones eléctricas domiciliarias y comerciales de bajo voltaje, contra sobretensiones por lo que generalmente se instalan en tableros principales y de distribución, a la entrada del suministro de energía eléctrica. Además, su uso es conveniente para el resguardo de equipos electrónicos tales como: computadoras, equipos de audio, TV, video, PLC, etc.

## **1.2.2 Pararrayos tipo distribución**

### **1.2.2.1 Características**

Los pararrayos tipo distribución se fabrican para proteger equipos e instalaciones cuyo voltaje nominal se encuentra en el rango de 2,400 a 34,500 V. Su estructura es funcionalmente similar a la de los pararrayos tipo secundario: un elemento MOV alojado en una carcasa, que en este caso es de porcelana o polímero. La figura 6 muestra un pararrayos tipo distribución. Sin embargo las dimensiones, el material de la carcasa y la forma externa de los pararrayos tipo distribución son diferentes a las de los pararrayos tipo secundario para poder garantizar la distancia mínima de fuga entre la línea y tierra.

**Figura 6. Aspecto exterior de un pararrayos tipo distribución con cubierta de polímero.**



**Fuente:** Ohio Brass, “pararrayos de media tensión de óxido de zinc ref. PDV-65 (5kA) y PDV-100 (10 kA) edición 10.98.B”, p.1

### **1.2.2.2 Aplicaciones**

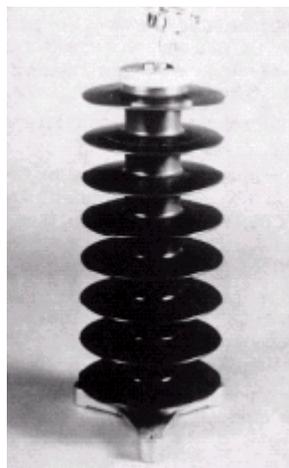
Las aplicaciones de los pararrayos tipo distribución requieren, por lo general, que estos sean instalados a la intemperie, aunque también se fabrican para aplicaciones en interiores. Dichas aplicaciones comprenden la protección de transformadores de distribución, bancos de capacitores y otros equipos.

### 1.2.3 Pararrayos tipo intermedio

#### 1.2.3.1 Características

Estos son pararrayos diseñados para la protección de equipos e instalaciones cuyo voltaje está comprendido en el rango de 2,400 V a 138,000 V, razón por la cual poseen una estructura que garantiza tanto la distancia mínima de fuga, como la operación segura del pararrayos en condiciones de sobrevoltaje. Internamente poseen un MOV. Debido a los efectos de presión interna que surgen durante la descarga a través del pararrayos, derivado de los valores de corriente de descarga para los cuales estos son diseñados, su estructura posee un mecanismo de alivio de sobre presión interna; además se fabrican como una sola unidad para todos los rangos de voltaje. La figura 7 muestra un pararrayos tipo intermedio.

**Figura 7. Aspecto exterior de un pararrayos tipo intermedio**



**Fuente:** Ohio Brass, "DynaVar station class and intermediate surge arresters" , p.30-1

### **1.2.3.2 Aplicaciones**

Las características constructivas de los pararrayos tipo intermedio permiten que puedan ser aplicados en la protección contra sobrevoltajes de líneas de transmisión, transformadores móviles, y en general, de transformadores de mediana potencia.

### **1.2.4 Pararrayos tipo subestación**

#### **1.2.4.1 Características**

Los pararrayos tipo subestación están diseñados para la protección de equipos e instalaciones cuyo voltaje de operación se encuentre en el rango de 2,400 V a 765,000 V. Al igual que los otros tipos de pararrayos, se fundamenta en la operación de un MOV. Su estructura es característicamente robusta, con el fin de garantizar tanto la distancia mínima de fuga como el seguro drenado de corrientes a tierra durante la presencia de sobrevoltaje. Al igual que el pararrayos tipo intermedio, también posee un mecanismo de alivio de sobre presión interna -aunque depende mucho del fabricante y del modelo que se trate- con el mismo fin. La figura 8 muestra un pararrayos tipo subestación.

Su capacidad de corriente de descarga y nivel de protección para corriente nominal de descarga son los mas altos comparados con los otros tipos de pararrayos, superando éste último –en algunos casos- los 850,000 V. La parte externa del pararrayos es de porcelana o polímero –columna envuelta por polímero-, ya que este material soporta muy bien los esfuerzos mecánicos a que se encuentra sometido, por su montaje.

**Figura 8. Aspecto exterior de un pararrayos tipo subestación**



#### **1.2.4.2 Aplicaciones**

La aplicación principal del pararrayos tipo subestación se encuentra en la protección de equipos de gran potencia, como los transformadores de potencia en subestaciones eléctricas. El presente trabajo de graduación está orientado a las pruebas predictivas que se realizan a este tipo de pararrayos, a fin de determinar su estado y condiciones eléctricas.

### **1.3 Criterios de selección**

Los criterios que a continuación se describen de forma sintetizada para la selección de pararrayos, hacen referencia a aspectos eléctricos, mecánicos y ambientales, todos ellos importantes para garantizar la correcta operación y seguridad en la protección contra sobrevoltajes transitorios mediante esquemas de protección con pararrayos.

### **1.3.1 MCOV**

Es muy importante que el pararrayos seleccionado para una aplicación determinada cumpla con limitar el valor del sobrevoltaje permitido a un valor previamente determinado, para ello debe seleccionarse el pararrayos cuyo valor de MCOV sea igual o inmediatamente superior al valor MCOV de diseño. El MCOV de diseño es al valor de MCOV obtenido mediante cálculos que consideran el voltaje pico que se presenta entre fase y tierra. Los fabricantes de pararrayos proveen información mediante tablas en cuanto a los valores de MCOV de sus pararrayos.

### **1.3.2 Nivel de protección**

El nivel de protección de un pararrayos indica el valor de sobrevoltaje que el pararrayos puede soportar durante una operación. Este valor corresponde al máximo valor de voltaje que puede estar presente entre los terminales del pararrayos durante la descarga sin dañarlo permanentemente. El nivel de protección del pararrayos seleccionado para la protección de una red determinada debe ser igual o superior al valor pico del máximo sobrevoltaje que puede ocurrir en esa red, de lo contrario el pararrayos y la instalación eléctrica que este protege podrían quedar destruidos o dañados si dicho valor de sobrevoltaje ocurre.

### **1.3.3 Capacidad de energía**

Debe compararse los tiempos máximos de los sobrevoltajes ocurridos o esperados en la red donde se va a instalar el pararrayos y confrontarlos con la curva “sobrevoltaje – tiempo” que describe la capacidad térmica del pararrayos. El pararrayos que cumpla con

este criterio de diseño será aquel cuya curva “sobrevoltaje – tiempo” sea superior a la del “sobrevoltaje – tiempo” de la red.

#### **1.3.4 Presión de alivio**

Esta presión es la máxima presión que un pararrayos puede soportar durante una descarga, y depende del valor de la corriente drenada a tierra durante la operación del pararrayos. Los fabricantes proveen tablas con los valores de kA rms que pueden soportar sus pararrayos, lo cual es un indicativo de la máxima presión que esas corrientes producen; dichos valores han sido determinados en pruebas de laboratorio. Los kilo Amperios especificados en pararrayos con cubierta externa de porcelana son validos únicamente para la primera operación de drenado a tierra, si luego de una primera operación del pararrayos ocurre consecutivamente un segundo sobrevoltaje es muy probable que el pararrayos de porcelana se fracture o explote; en la práctica, suelen ocurrir varios “re-cierres” consecutivos en la red, lo que implica sobrevoltajes de maniobra consecutivos en la red, ante estas circunstancias tienen mejor desempeño los pararrayos con cubierta de polímero.

#### **1.3.5 Envoltente externo**

Este criterio de selección permitirá tomar la opción que mejor satisfaga las condiciones de montaje, presión de alivio, distancias de fuga requeridas y grado de contaminación del ambiente. Es interesante resaltar que un pararrayos con cubierta de polímero es más liviano que uno de porcelana, que el pararrayos de polímero no se fractura tan fácilmente como uno de porcelana, que para iguales dimensiones físicas un pararrayos de polímero ofrece mayor distancia de fuga que uno de porcelana, y que un pararrayos de polímero resiste mejor que un pararrayos de porcelana las condiciones de

alta contaminación del ambiente. La única ventaja que presentan los pararrayos de porcelana frente a los de polímero es mayor resistencia a los esfuerzos mecánicos, debido a su dureza, pero es un material muy frágil.

### **1.3.6 Otras consideraciones**

Existen otros factores que no son de carácter técnico sino comercial y que deben ser tomados en cuenta al momento de seleccionar un pararrayos, algunos de ellos son: calidad respaldada por la marca del fabricante, soporte técnico, disponibilidad de información.

## **2. INSTRUMENTACIÓN PARA PRUEBAS PREDICTIVAS A PARARRAYOS DE ÓXIDO METÁLICO PARA ALTA TENSIÓN TIPO SUBESTACIÓN**

La instrumentación utilizada para la realización de las pruebas predictivas a pararrayos de óxido metálico para alta tensión tipo subestación consiste en medidor de resistencia de aislamiento –megger-, medidor de factor de potencia de aislamiento, medidor de pérdidas de potencia y equipo medidor de corriente de fuga. A continuación se presenta una descripción de los equipos mencionados, destacando aspectos relacionados con su construcción, principio de operación y las características técnicas para el correcto uso y almacenaje de los mismos.

### **2.1 Medidor de resistencia de aislamiento**

El instrumento utilizado para la medición de resistencia de aislamiento es el megger, el cual es un instrumento que mide resistencia eléctrica y que es mostrado en la figura 9. El valor de la resistencia es medido mediante un mecanismo electromecánico e indicado sobre una escala. La resistencia eléctrica indicada en un instrumento tipo ohmímetro, como el megger, es independiente del valor del voltaje utilizado para la medición. A continuación se describe la construcción y principio de funcionamiento de un megger electromecánico, a efecto de comprender su operación durante las mediciones.

**Figura 9. Megger comercial marca AVM modelo BM11D**

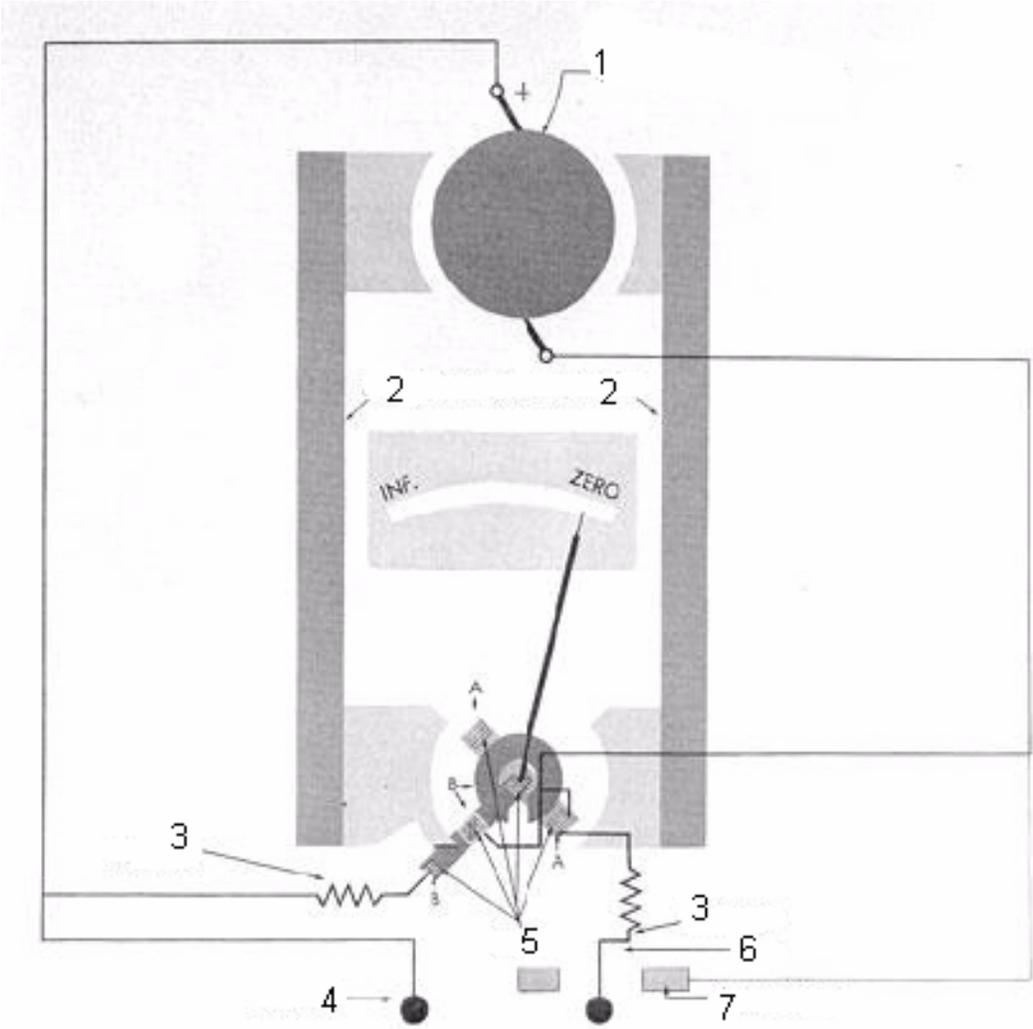


**Fuente:** [www.radsur.com/instrumentos/avo](http://www.radsur.com/instrumentos/avo)

### **2.1.1 Construcción**

El megger consta de dos elementos principales formados por un generador manual de corriente directa de tipo magneto, el cual suministra la corriente para realizar la medición, y un elemento móvil con una aguja, mediante el cual el valor de la resistencia en medición es indicado sobre una escala. Las figuras 10 y 11 ilustran el circuito magnético junto con las conexiones eléctricas en el instrumento, y la construcción del elemento móvil del ohmímetro, respectivamente. La parte fija del magneto es utilizada tanto por el generador como por el ohmímetro. La armadura del generador se hace girar manualmente; su velocidad de rotación es acelerada a través de engranajes y mantenida a una velocidad constante mediante un mecanismo de fricción cuando la velocidad de rotación de la manivela es excedida. Los meggers tipo III generan 500 V y poseen una escala de medida comprendida entre 0 y 100 MegaOhms.

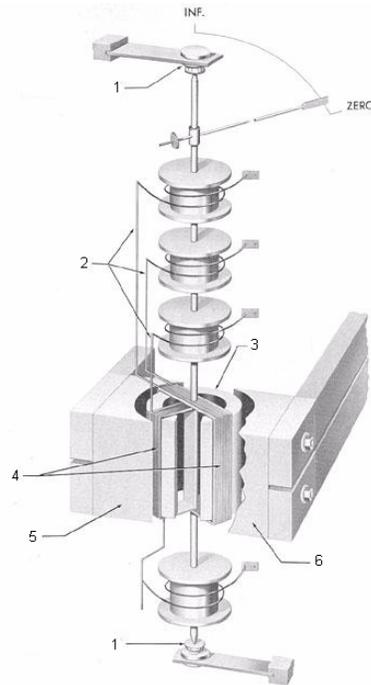
**Figura 10. Circuito magnético del megger y sus conexiones eléctricas**



- |                                  |                     |
|----------------------------------|---------------------|
| 1. Armadura del generador        | 5. Bobinas          |
| 2. Barras del magneto permanente | 6. Línea            |
| 3. Resistor                      | 7. Anillo de guarda |
| 4. Tierra                        |                     |

**Fuente:** [www.maritime.org/fleetsub/elect/chap18.htm](http://www.maritime.org/fleetsub/elect/chap18.htm)

**Figura 11. Elemento móvil del ohmímetro del megger**



- |                                     |                         |
|-------------------------------------|-------------------------|
| 1. Pivotes                          | 4. Bobinas              |
| 2. Ligamentos conductores flexibles | 5. Polo magnético norte |
| 3. Núcleo de hierro                 | 6. Polo magnético sur   |

**Fuente:** [www.maritime.org/fleetsub/elect/chap18.htm](http://www.maritime.org/fleetsub/elect/chap18.htm)

### 2.1.2 Principio de operación

El sistema del ohmímetro consta de dos bobinas, identificadas como A y B en la figura 10; ambas bobinas están montadas sobre el mismo elemento móvil, junto con la aguja indicadora, y además están inmersas en un campo magnético permanente. La bobina A está conectada en serie con una resistencia entre la terminal negativa del generador y la terminal de línea, y es llamada bobina de corriente. La bobina B está en serie con otra resistencia, y está conectada entre los dos terminales del generador, y es llamada bobina de potencial. El elemento móvil está montado sobre un pivote y

soportado por un resorte que lo hace estar libre para rotar sobre su eje para desplazarse a través de la escala. Por lo tanto, cuando el generador aún no ha sido operado, la aguja puede permanecer en cualquier posición de la escala. Cuando la corriente fluye a través de las bobinas A y B, ellas tienden a hacer rotar al elemento móvil, cada una de ellas en dirección opuesta sobre la escala. La aguja tomará aquella posición en la escala para la cual las fuerzas de torsión producidas por las bobinas sean de igual magnitud.

Cuando el instrumento es operado haciendo girar la manivela, con el circuito abierto o con un aislamiento “perfecto” colocado entre los terminales de línea y tierra, no fluye corriente por la bobina A. La bobina de potencial B, inmersa en el campo magnético permanente de la parte fija, es la única que provoca campo magnético y por lo tanto controla el movimiento del núcleo laminado con forma C, colocando a la aguja en una posición opuesta, indicando un valor infinito en la escala. Cuando una resistencia es colocada entre los terminales de línea y tierra, una corriente fluye a través de la bobina A, que también está inmersa en el campo magnético permanente de la parte fija, produciéndose el respectivo torque opuesto al producido por la bobina B, eso provoca que la aguja se mueva desde la posición que indica un valor infinito en la escala hasta otras posiciones en las cuales el torque provocado por ambas bobinas se balancea. Una escala calibrada puede obtenerse conectando resistencias de valor conocido entre los terminales de línea y tierra mediante marcar los valores respectivos sobre los puntos para los cuales la aguja queda en reposo sobre la escala.

Debido a que los cambios en el valor del voltaje afectan en la misma proporción a la magnitud de corriente que fluye a través de las dos bobinas, la posición del elemento móvil es independiente del voltaje producido por el generador manual de corriente directa. En el caso que los terminales de línea y tierra sean cortocircuitados, la resistencia de lastre identificada con el número 3 en la figura 10, es suficiente para proteger a la bobina de corriente.

El rango de resistencia que pueden medir los meggers es muy amplio; pueden medir valores de resistencia eléctrica desde unos cuantos Ohm, para el caso de medición de resistencia de sistemas de puesta a tierra, hasta el orden de miles de MegaOhm, como en el caso de mediciones de resistencia de aislamiento.

Los usos frecuentes del megger se enfocan en la medición de la resistencia de aislamiento de cables, aisladores, devanados de motores, generadores, transformadores y pararrayos.

Para prevenir la desmagnetización del generador manual tipo magneto, el megger nunca debe ser conectado a un circuito a través del cual esté fluyendo corriente, ni debe ser colocado cerca de piezas polares de motores ni generadores.

### **2.1.3 Recomendaciones de uso**

El megger debe ser tratado como instrumento de medida muy delicado, debido a que contiene un sistema interno muy frágil, compuesto por una bobina móvil montada sobre un sistema de pivote, el cual puede dañarse a causa de una manipulación inadecuada. El megger posee un anillo aislador de guarda alrededor de cada terminal externa, dicho anillo está conectado a un circuito interno. El conjunto del anillo y el circuito interno cumplen la función de evitar que pase por el elemento de la bobina móvil cualquier corriente de fuga que pudiera estar circulando a través de la superficie sucia de la carcasa, y que pudieran conducir a una lectura errónea en el circuito objeto de medición. El anillo de guarda debe permanecer intacto y limpio.

Debe darse especial atención a las condiciones de los terminales del medidor, debido a que la suciedad o ruptura parcial o total de las agregaría resistencia al circuito objeto de medición, dando como resultado lecturas incorrectas.

Los meggers se construyen de tal forma que su mecanismo de pivote no pueda lubricarse externamente. El ensamble original del medidor provee suficiente lubricación al mecanismo para que pueda funcionar adecuadamente por muchos años.

El estado del megger puede verificarse a través de una serie de pruebas, las cuales consisten en cortocircuitar sus terminales externos y hacer girar a baja velocidad la manivela del generador tipo magneto; en dicho caso, la aguja en la escala debiera indicar un valor de cero Ohms. Con los terminales externos de línea y tierra separados, la aguja debe indicar un valor infinito en la escala, aunque se haga girar la manivela del generador tipo magneto. Puntos intermedios de la escala pueden ser verificados al medir resistencias cuyo valor es conocido. Un fallo puede existir en el megger en caso que la aguja permanezca sobre la escala en la posición infinito o en la posición cero cuando se conecta entre sus terminales resistencias de diferentes valores y se hace girar la manivela del generador tipo magneto.

#### **2.1.4 Especificaciones**

Las principales características que describen a un megger están relacionadas con especificaciones eléctricas, mecánicas, ambientales y de funcionamiento, para las cuales el medidor está diseñado y para las cuales el fabricante garantiza el correcto funcionamiento del medidor.

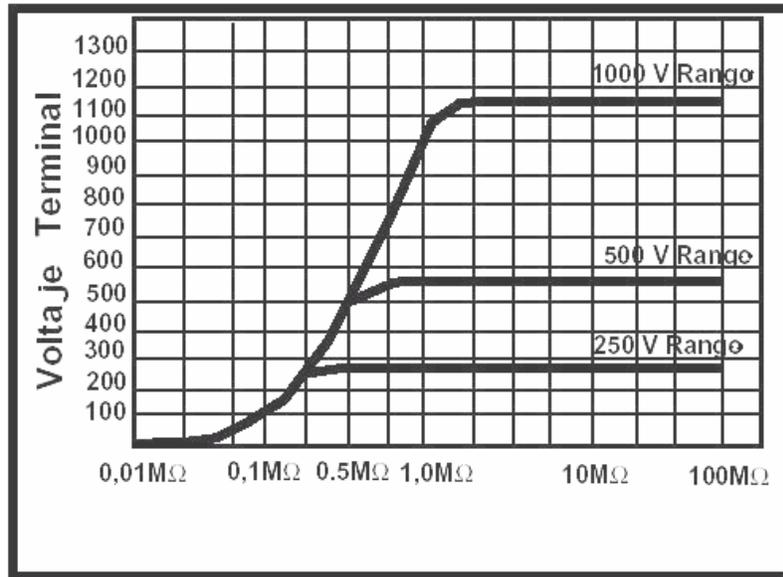
A continuación se describen las especificaciones técnicas y comerciales de un megger, tomando como ejemplo las correspondientes a un megger marca AVO serie BM220, que es un megger digital:

- Pantalla indicadora digital / analógica
- Máximo valor de resistencia que puede medir para una prueba de aislamiento: 999 MΩ
- Resolución mínima para pruebas de continuidad: 0.01 Ω
- Desconexión automática del medidor después de 5 minutos de no estar en uso, para ahorro de carga de la batería del medidor. Si el instrumento no será usado por varios meses, es recomendable remover las baterías del medidor.
- Detección automática de voltaje cuando el circuito objeto de medición se encuentra accidentalmente energizado.

Para pruebas de aislamiento:

- Voltaje nominal de prueba d.c. : 250 V / 500 V / 1000 V
- Rango de medición: Digital 0.01 MΩ - 999 MΩ
- Voltaje en terminales con circuito abierto d.c. : 0% - 30% del voltaje de prueba
- Corriente de corto circuito: 2mA
- Corriente de prueba con carga: 1 mA
- Exactitud a 20° C:
  - +/- 3% para lecturas de hasta 10 MΩ
  - +/- 5% para lecturas de hasta 100 MΩ
  - +/- 30% para lecturas de hasta 999 MΩ
- Característica de voltaje en terminales – carga entre terminales: el voltaje de prueba en terminales del medidor se mantiene en un valor, en función del rango del voltaje de prueba seleccionado; esta característica es mostrada de forma gráfica en la figura 12 para cada rango de voltaje de prueba seleccionado en el medidor.

**Figura 12. Característica voltaje en terminales – carga en terminales para un megger marca AVO serie BM220**



**Fuente:** AVO Instruments, “Megger AVO BM220 manual”, p.2

Para pruebas de continuidad:

- Rango automático de medición: 0.01 Ω - 99.9 MΩ
- Voltaje en terminales para circuito abierto: 5V +/- V d.c
- Corriente de corto circuito:
  - 0.01 Ω - 9.99 Ω : 210 mA
  - 10.0 Ω - 99.9 Ω : 21 mA
- Exactitud, a 20° C:
  - +/- 3% para lecturas 0.01 Ω - 9.99 Ω
  - +/- 5% para lecturas 10.0 Ω - 99.9 Ω

Descarga automática: Cuando el botón de prueba es liberado después de haberse realizado una prueba de aislamiento, el dispositivo al cual se le midió el aislamiento será descargado automáticamente.

Condición de la batería: si la batería llega al estado de baja carga, un indicador aparecerá en la pantalla.

Tiempo de vida de la celda: la celda es capaz de suplir al medidor típicamente para más de 3,000 pruebas, cada una con duración de 5 segundos.

Fusible: El instrumento está protegido con un fusible cuya capacidad de corriente es de 500 mA, 440 V de cerámica con dimensiones de 32 x 6 mm.

Categoría de instalación: categoría III, es decir, cableado fijo.

Rango de temperatura:

- Operación:
  - -20°C a +60°C para mediciones hasta 100 MΩ
  - -20°C a +40°C para mediciones arriba de 100 MΩ hasta el total del rango.
- Almacenamiento:
  - -25°C a +65°C

Condiciones operativas de humedad:

- 90% de humedad relativa –HR- a temperatura máxima de 40°C

Fuente de poder: 6 celdas de 1.5 V tipo IEC LR6, es decir, celda recargable de Níquel-Cadmio.

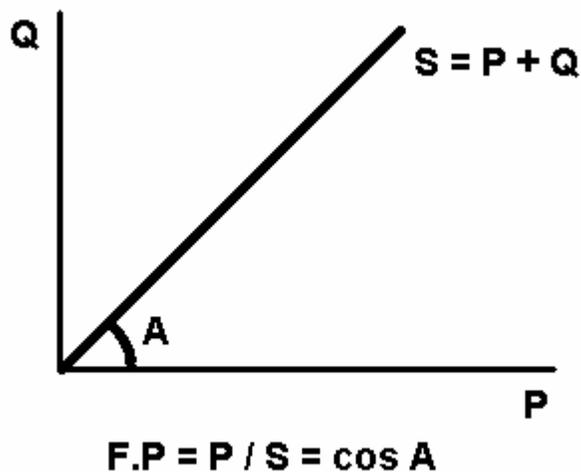
Peso del medidor: 530 g.

Dimensiones: 195 x 98 x 40 mm.

## 2.2 Medidor de factor de potencia de aislamiento

El medidor de factor de potencia de aislamiento es un aparato destinado a probar las condiciones operacionales de un aislamiento de alta tensión, a través de la medición del factor de potencia, pérdidas en volt-amperes, pérdidas activas y capacitancia, en el aislamiento. El factor de potencia de aislamiento se obtiene por las razones entre las magnitudes de la potencia activa –P- y la potencia aparente –S- o mediante el coseno del ángulo –A- entre S y P, que son medidos en el aislamiento del pararrayos. La figura 13 muestra de forma gráfica las relaciones mencionadas.

**Figura 13. Relaciones angulares entre A, Q, P, y S que determinan el valor del factor de potencia de aislamiento .**



Los ensayos pueden ser realizados en tensiones de 500 V a 12 KV. Los medidores de factor de potencia de aislamiento son utilizados para pruebas de aislamiento a transformadores de potencia, disyuntores, pararrayos, cables de alta tensión, transformadores de potencial y de corriente, reactores, reguladores de tensión, máquinas de giro y aceites aislantes.

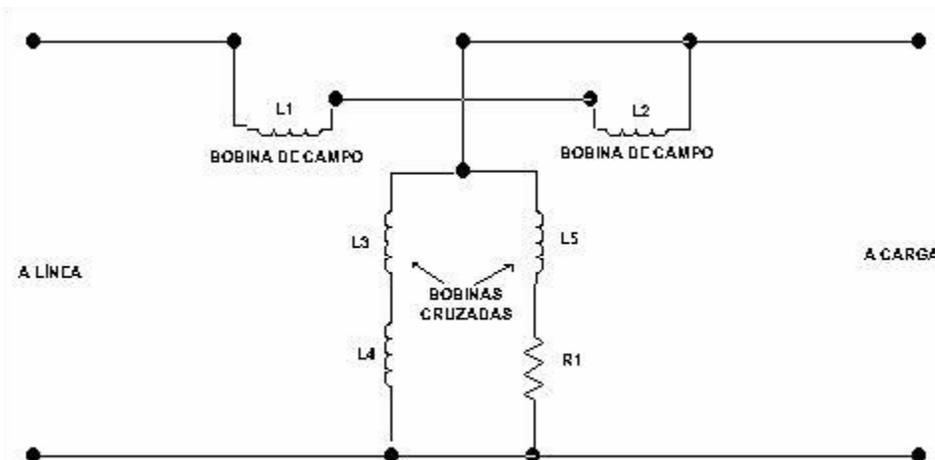
### 2.2.1 Principio electrodinámico de operación

Por definición, el factor de potencia es el coseno del ángulo de fase entre el voltaje y la corriente, por lo que la medición se realiza a partir de dicho ángulo de fase. Esto se demuestra en la operación del “medidor de factor de potencia de bobinas cruzadas”, un medidor electrodinámico.

El instrumento es básicamente un movimiento de electro dinamómetro, donde el elemento móvil consiste en dos bobinas montadas en el mismo eje, pero con un ángulo recto entre ellas. La bobina móvil gira en el campo magnético producido por la bobina de campo que conduce la corriente de línea.

Las conexiones eléctricas para este medidor se muestran en el diagrama de la figura 14

**Figura 14. Esquema de conexiones eléctricas de un medidor de factor de potencia de bobinas cruzadas**



**Fuente:** William D. Cooper, “Instrumentación electrónica moderna y técnicas de medición”, p.93

La bobina de campo - L1 y L2- se conecta en serie con la línea y conduce la corriente de la línea. Una de las bobinas móviles -L5- está conectada en serie con una resistencia -R1- a través de las líneas y recibe corriente de la diferencia de potencial aplicado. La segunda bobina -L3- del elemento móvil está conectada en serie con un inductor -L4- también a través de las líneas.

Dado que no se utilizan resortes de control, el balance del elemento móvil depende del par resultante desarrollado por las dos bobinas cruzadas. Cuando el elemento móvil está balanceado la contribución del par total de cada uno de los elementos debe ser igual pero de signo opuesto. El par desarrollado en cada bobina es función de la corriente a través de ellas y por lo tanto, depende de la impedancia en cada circuito de la bobina. El par también es proporcional a la inductancia mutua entre cada par de bobinas cruzadas y la bobina de campo estacionaria. Esta impedancia mutua depende de la posición angular de los elementos de las bobinas cruzadas respecto a la posición de la bobina de campo estacionario.

Se puede demostrar que cuando el elemento móvil está equilibrado, su desplazamiento angular es una función del ángulo de fase entre la corriente de línea - bobina de campo- y el voltaje de línea -bobinas cruzadas-. La indicación de la aguja, la cual está unida al elemento móvil, se calibra en términos del ángulo de fase del factor de potencia.

La bobina exterior es la bobina de potencial, la cual está conectada a la línea trifásica del sistema. La aplicación de voltaje trifásico a la bobina de potencial hace que esta actúe como estator de un motor de inducción trifásico, con lo cual se crea un “flujo magnético rotatorio”. La bobina central, o bobina de corriente, se conecta en serie con una de las líneas de fase y ésta polariza las aletas de hierro. Las aletas polarizadas se mueven por el campo magnético rotatorio y toman la posición que el campo rotatorio tiene cuando el flujo de polarización es máximo. Esta posición es una indicación del

ángulo de fase y , por lo tanto, del factor de potencia. El instrumento se puede utilizar en sistemas monofásicos, con una red de desplazamiento de fase -similar a la utilizada en los monotes monofásicos- para obtener el campo magnético rotatorio requerido.

Ambos tipos de medidores de factor de potencia se limitan a mediciones de señales con frecuencias relativamente bajas y por lo general se utilizan con la señal a la frecuencia de la línea de energía -60 Hz-. Las mediciones de fase a mayores frecuencias suelen ser mas exactas y mejor realizadas cuando se emplean técnicas o instrumentos electrónicos especiales.

### **2.2.2 Especificaciones**

Un equipo para medición de factor de potencia de aislamientos para alta tensión debe poseer como especificaciones mínimas las relacionadas con el nivel de voltaje de su fuente primaria de alimentación, tensiones eléctricas de ensayo, configuraciones para las pruebas, rangos para medición de potencia, exactitud de las mediciones. El fabricante garantiza las especificaciones y la correcta operación del equipo medidor de factor de potencia si las condiciones de uso se respetan.

Con propósitos ilustrativos, a continuación se detallan las especificaciones proporcionadas por el fabricante para dos diferentes equipos medidores de factor de potencia de aislamiento.

Especificaciones para el equipo de medición de factor de potencia de aislamiento modelo MP2500D, equipo portátil:

- Alimentación: 120V / 60 Hz
- Tensión de ensayo: 500 a 2,5KV, continuamente ajustable
- Corriente de Salida: 0 a 40 mA
- Voltímetro: 0 a 2,5kV
- Configuraciones de prueba: ST – TERRA – GUARD
- Lecturas de Watts y VA: Indicador digital de 3 y 1/2 dígitos y galvanómetro con 50 divisiones para ajuste de punto mínimo de Watt
- Medición de Factor de Potencia: 0 a 100%
- Mediciones de Watts: 0 a 200W
- Mediciones de VA: 0 a 200VA
- Mediciones de capacitancia: 0 a 100 nF

Accesorios suministrados:

- Cable de alimentación
- Cable de alta tensión
- Cable de baja tensión
- Cable de puesta a tierra
- Cable de control remoto
- Cinco collares conductivos para prueba de tacos
- Maleta de cuero para cables

Accesorios opcionales:

Balde de acero inoxidable para prueba de aceites aislantes modelo CED 11

El medidor cuyas especificaciones han sido indicadas, corresponde al equipo mostrado en la figura 15

**Figura 15. Equipo medidor de factor de potencia de aislamiento modelo MP 2500D, equipo portátil.**



**Fuente:** [www.nansen.com.br/\\_espanhol/instrumentos](http://www.nansen.com.br/_espanhol/instrumentos)

A continuación se presentan las especificaciones para el equipo de medición de factor de potencia de aislamiento modelo MP12HD, equipo fijo, mostrado en la figura 16:

- Alimentación: 120V / 60 Hz
- Tensión de ensayo: 2 a 12kV, continuamente ajustable
- Corriente de Salida: 0 a 200 mA ó 0 a 3,8 A con Resonador RD 10 -Accesorio Opcional-
- Voltímetro: 0 a 12 kV
- Configuraciones de prueba: ST – GUARD – TERRA
- Lecturas de Watts y mA: Indicador digital de 3 y 1/2 dígitos
- Medición de Factor de Potencia: 0 a 100%
- Mediciones de corriente: 0 a 200mA ó 0 a 3,8 A con Resonador RD 10
- Mediciones de capacitancia: 0 a 260nF
- Mediciones de Watts: 0 a 2kW

- Cancelador de interferencia para mediciones próximo a circuitos de alta tensión
- Accesorios suministrados:
- Cable de alimentación
- Cable de alta tensión
- Dos cables de baja tensión
- Cable de puesta a tierra
- Cable de control remoto
- Cinco collares conductivos para prueba de tacos
- Maleta de cuero para cables

Exactitud:

- Capacitancia:  $\pm 1$  pF ó 0,5% -lo que sea mayor-
- Factor de Potencia:  $\pm 0,1$  FP ó 5% -lo que sea mayor-
- Accesorios opcionales:

Balde de acero inoxidable para prueba de aceites aislantes modelo CED 11

**Figura 16. Equipo medidor de factor de potencia de aislamiento modelo MP 12HD, equipo fijo.**



Fuente: [www.nansen.com.br/espanhol/instrumentos](http://www.nansen.com.br/espanhol/instrumentos)

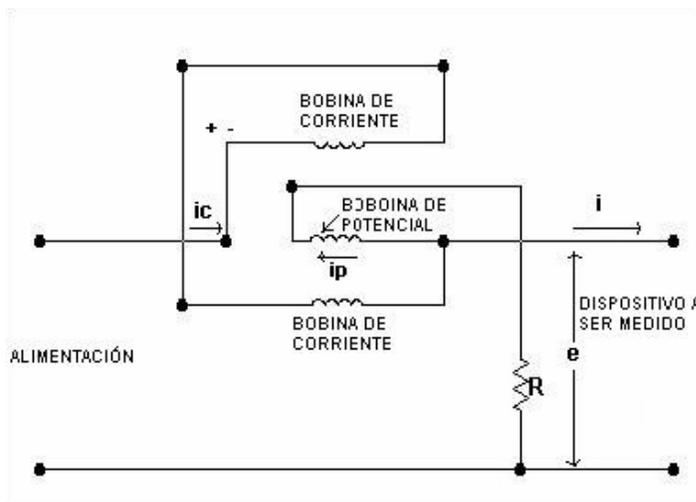
## 2.3 Medidor de pérdidas de potencia

El instrumento medidor de pérdidas potencia mide la razón a la cual la energía activa es consumida por el material aislante del dispositivo objeto de medición; de manera muy similar a los demás instrumentos de medición de aislamiento basa su funcionamiento en el movimiento electrodinámico.

### 2.3.1 Principio electrodinámico de operación

El movimiento electrodinámico sirve para indicar tanto la potencia de CD como de CA para cualquier onda de voltaje y corriente; esto es, no se reduce a ondas senoidales. Los componentes básicos del medidor de pérdidas de potencia son: bobinado de corriente arrollado sobre una estructura fija y bobinado de voltaje arrollado sobre una estructura móvil giratoria. El circuito eléctrico básico que muestra las conexiones entre los diferentes bobinados del medidor de pérdidas de potencia se muestra en la figura 17; con base en esta figura se describirá a continuación el funcionamiento del medidor.

**Figura 17. Esquema de conexiones eléctricas de un medidor de pérdidas de potencia electrodinámico**



**Fuente:** William D. Cooper, "Instrumentación electrónica moderna y técnicas de medición", p.88

Las bobinas fijas o arrollamiento de campo que aparecen en la figura 17 como dos elementos separados, están conectadas en serie y llevan una corriente de línea total  $i_c$ . La bobina móvil, colocada en el campo magnético de las bobinas fijas, está conectada en serie con una resistencia limitadora de corriente a través de la línea de potencia, en la cual circula una pequeña corriente  $i_p$ . El valor instantáneo de la corriente en la bobina móvil es

$$i_p = e / R_p \quad \text{donde}$$

$e$ : es el voltaje instantáneo a través de la línea de potencia

$R_p$ : es la resistencia total de la bobina móvil y su resistencia en serie.

La deflexión de la bobina móvil es proporcional al producto de estas dos corrientes  $i_c$  e  $i_p$ , y queda descrita por la función

$$\Theta = K * (1/T) * \int_0^T i_c i_p dt = K * (1/T) * \int_0^T i \frac{e}{R_p} dt = K^2 * (1/T) * \int_0^T e i dt \quad \text{donde:}$$

$K$ : constante del instrumento

$i_c$ : corriente instantánea en las bobinas de campo

$i_p$ : corriente instantánea en la bobina de potencial

$T$ : período

Por definición, la potencia promedio de un circuito es

$$P = (1/T) * \int_0^T e i dt$$

Lo anterior indica que el movimiento del electrodinamómetro, conectado en la configuración de la figura 16 tiene una deflexión proporcional a la potencia promedio. Si la corriente  $i$  y el voltaje  $e$  son cantidades variables senoidales de la forma

$$e = E_m \sin wt \quad e \quad i = I_m \sin (wt \pm \theta)$$

entonces la deflexión queda descrita por la expresión

$$\Theta = K_3 * E I * \cos \theta \quad \text{donde}$$

E: valor rms del voltaje

I: valor rms de la corriente

$\theta$ : ángulo de fase entre el voltaje y la corriente

K3: constante de proporcionalidad.

De la última expresión se observa que la deflexión del electrodinamómetro es igual a la potencia promedio consumida por el aislamiento del dispositivo objeto de medición multiplicada por una constante de proporcionalidad K3. Dicha potencia consumida constituye las pérdidas de potencia en el aislamiento del dispositivo bajo prueba.

### 2.3.2 Especificaciones

Los equipos analizadores de características aislantes de dispositivos de potencia suelen ser equipos multimedición, lo que significa que un mismo equipo puede ser utilizado para la realización de diferentes mediciones y pruebas de aislamiento. Para el caso de los equipos medidores de pérdidas de potencia se tomará como ejemplo el equipo de medición M4000 mostrado en la figura 18, que es un analizador de

aislamiento formado por dos componentes: el módulo de pruebas M4100 y la computadora o módulo de control M4200. En esta sección se describirá las características y especificaciones del equipo de medición.

El M4000 es un equipo inteligente, lo que significa que adicionalmente a proporcionar los resultados de las pruebas y mediciones, es capaz de interpretarlos y generar reportes que predicen el estado del dispositivo objeto de medición. Se trata de un equipo robusto y portátil que puede ser utilizado en el laboratorio de medición o en el campo, que mantiene sus especificaciones de exactitud aún bajo severas condiciones de electrostática e interferencia electromagnética debido a su característico blindaje. La manipulación del equipo para la realización de las pruebas es muy simple y segura; para garantizar la seguridad durante el uso del equipo, tanto el instrumento como su fuente de voltaje tienen un aterrizaje común y deben unirse al sistema local de tierra; la circuitería del equipo protege tanto el aparato como a la persona que lo opera; además, el equipo posee una luz que se activa de forma intermitente para indicar que el equipo ha sido energizado y al momento que se inicia la medición el equipo emite un sonido de alarma.

También puede automatizarse el equipo de medición con el uso del programa de computación desarrollado por el fabricante del M4000, ejecutable en ambiente Windows; este programa de computación se constituye en una interfase muy amigable entre el equipo de medición y el usuario; el programa de computación permite el despliegue digital de los parámetros medidos, presenta gráficas de voltaje, corriente y pérdidas de potencia en tiempo real, permite la selección y actualización de parámetros de los dispositivos a medir y la parametrización del aparato a la frecuencia de la red, ya sea esta de 50 o 60 Hz.

**Figura 18. Equipo para medición de pérdidas de potencia M4000**



**Fuente:** [www.pinkcityelectronics.com/doble.htm](http://www.pinkcityelectronics.com/doble.htm)

Las principales especificaciones del equipo M4000 se refieren a características eléctricas, de exactitud para cada una de las diferentes pruebas que el equipo puede realizar, de condiciones de interferencia, condiciones ambientales de almacenamiento y funcionamiento, y de dimensiones físicas; dichas especificaciones son las siguientes.

Especificaciones eléctricas del equipo:

- Voltaje de alimentación de 95 a 132 VCA.
- Frecuencia autoseleccionable en el rango de 47 a 63 Hz.
- Corriente máxima consumida por el equipo: 20 A a 110V / 10 A a 220V.
- Máxima potencia que puede requerir el equipo: 3 kVA.
- Voltaje de salida para pruebas: 0 a 12 kV.
- Distorsión armónica provocada por el equipo: 2%.
- Corriente máxima que provee el equipo durante las mediciones: 100 mA de forma continua a 10 kV / 300 mA de forma intermitente a 10 kV.

## Especificaciones de exactitud para diferentes mediciones

### Pruebas de frecuencia:

- Rango: 45 a 70 Hz
- Resolución: 0.1 Hz
- Exactitud: +/- 1% de la lectura
- Pruebas de capacitancia:
- Rango: 0 a 2.7 microF
- Resolución: 0.1 pF
- Exactitud: +/- 0.5% de la lectura

### Pruebas de inductancia:

- Rango: 132H a 1000kH con voltaje de prueba de 10 kV
- Resolución: 0.001 mH
- Exactitud: +/- 1.5% de la lectura

### Prueba de factor de potencia:

- Rango: 0% a +/- 100%
- Resolución: 0.01%
- Exactitud: +/- 1% de la lectura

### Prueba de pérdidas de potencia:

- Rango: 0kW a 2kW
- Resolución: 0.5 mW
- Exactitud: +/- 2% de la lectura con voltaje de prueba de 10 kV

#### Especificación de máximas condiciones de interferencia

- Electrostática a frecuencia de la red: 15 mA, rms, en cualquier cable
- Electromagnetismo a frecuencia de la red: 500 microT, a 60 Hz, en cualquier dirección.

#### Especificaciones ambientales

- Temperatura de operación: -20°C a +50°C
- Temperatura de almacenamiento: -40°C a +70°C
- Humedad: 80% a 90% sin condensación.

#### Especificaciones de peso y tamaño

- Instrumento: altura 10-1/4", profundidad 20", ancho 25-1/4" / peso aproximado 100 lbs.
- Fuente portátil: 9" x 8" x 8", peso aproximado 6 lbs.
- Caja para accesorios: 20" x 12" x 9" / peso aproximado 44 lbs
- Carretilla para transporte, opcional: 48-1/2 x 20-1/2" x 19-1/2" / peso aproximado 33-1/2 lbs.

### **2.4 Equipo medidor de corriente de fuga, sistema de monitoreo de corriente resistiva de fuga en línea.**

El equipo de medición que se describe a continuación, es un equipo portátil que monitorea permanentemente la componente resistiva de la corriente de fuga de pararrayos de óxido metálico -MOSA, metal oxide surge arrester por sus siglas en inglés-, lo que significa que es un equipo cuya medición se realiza con el pararrayos en línea.

Este equipo de medición puede realizar mediciones únicamente en pararrayos de óxido metálico que estén aislados eléctricamente de la estructura sobre la cual están montados y que se encuentren aterrizados mediante un conductor aislado eléctricamente de dicha estructura.

El valor de la corriente de fuga de un pararrayos de óxido metálico es un indicador de su estado; pararrayos fatigados tienen mayor probabilidad de falla porque las características mecánicas y eléctricas de los materiales con que se fabrican han perdido las calidades que garantizan su adecuada operación. Existen valores críticos admisibles para la corriente de fuga de pararrayos de óxido metálico, valores que al ser superados indican una inminente falla del pararrayos.

El equipo de monitoreo de corriente resistiva de fuga es en realidad un sistema con diversos componentes, que al ser instalados e interconectarse permiten la obtención de los valores de corriente de fuga del pararrayos de óxido metálico objeto de medición; la obtención de este dato -corriente resistiva de fuga- permite predecir el estado del pararrayos -su fatiga- y tomar decisiones respecto a su mantenimiento o reemplazo antes que falle.

#### **2.4.1 Componentes del sistema de monitoreo de corriente resistiva de fuga**

El sistema de monitoreo de corriente resistiva de fuga se compone de diversos dispositivos periféricos que censan los parámetros eléctricos del pararrayos en línea y los transfieren a un dispositivo central que después de recibirlos los procesa mediante la aplicación de algoritmos de cálculo y corrección para mostrar en pantalla el resultado de la medición. A continuación se enlistan y describen los componentes del sistema de monitoreo de corriente resistiva de fuga.

### 2.4.1.1 Monitor de corriente de fuga LCM II

Posee un microprocesador interno que mide las señales provenientes de las sondas de campo y de corriente, y calcula el valor de cresta de la componente resistiva de la corriente de fuga. Los valores medidos son mostrados en la pantalla del monitor, tanto los valores corregidos como los no corregidos. Luego de esto los datos de corriente de fuga pueden ser almacenados en la memoria y descargados a una PC mediante una interfase RS-232. La PC es normalmente usada en la oficina, y no en el campo, para poder preparar mediciones, analizar y administrar los datos de la corriente de fuga.

Todos los conectores para entradas y salidas del monitor se encuentran en la parte posterior del mismo. A los conectores de entrada y salida del monitor se conectan, entre otros, la sonda de corriente y la salida hacia la PC. El monitor de corriente de fuga LCM II se muestra en la figura 19.

**Figura 19. Monitor de corriente de fuga, vista de la carátula del monitor**



**Fuente:** [www.transinor.no/](http://www.transinor.no/)

#### **2.4.1.2 Sonda de campo, antena.**

Está hecha de aluminio y se coloca cerca de la base del pararrayos. La sonda de campo es conectada a la sonda de corriente mediante un cable coaxial de 5m de largo. La sonda de campo provee información respecto al voltaje aplicado al pararrayos, y a partir de ese dato el 3er armónico de la componente capacitiva de la corriente de fuga es calculado. Durante la medición, el plato de la antena debe estar eléctricamente aislado.

#### **2.4.1.3 Transformador de corriente**

Su operación se basa en el principio de “cero flujo” para medición de la corriente total que circula de forma continua a través del pararrayos. El secundario de este transformador es conectado a la sonda de corriente del monitor de corriente de fuga. En caso de una medición “fija” se utiliza un CT, y para mediciones “portátiles”, se utiliza un transformador de corriente tipo clip.

#### **2.4.1.4 Sonda de corriente**

La sonda de corriente se encarga de recibir el voltaje y la corriente inducidos en la sonda de campo y el transformador de corriente, respectivamente, y luego los transporta hacia el LCM II. Además la sonda de corriente contiene un sensor de temperatura que puede ser usado para medir la temperatura ambiente durante la medición. Los componentes electrónicos de la sonda son alimentados –energizados– desde el LCM II. Los componentes del sistema de monitoreo de corriente resistiva de fuga se muestran en la figura 20.

**Figura 20. Equipo medidor de corriente de fuga, componentes y estuche para su transporte**

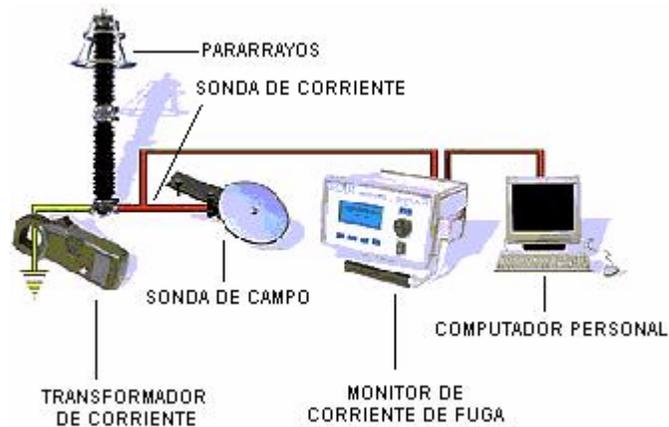


**Fuente:** TransiNor As, “Applications of LCM-Leakage Current Monitor, information LCM-99-001”, p.4

#### **2.4.2 Arreglo del sistema de monitoreo de corriente resistiva de fuga**

Los componentes del sistema de monitoreo de corriente resistiva se interconectan de tal forma que los valores de corriente inducida en el transformador de corriente y de voltaje inducido en la sonda de campo son trasladados a la sonda de corriente, y de allí son transferidos al monitor de corriente de fuga LCM II. La manera en que estos componentes deben montarse y conectarse al pararrayos objeto de medición será tratada en el capítulo 3 dedicado a los protocolos de prueba. El arreglo descrito anteriormente se ilustra en la figura 21.

**Figura 21. Arreglo de los componentes del sistema LCM II con inclusión de PC**



**Fuente:** TransiNor As, “LCM II- A complete system for condition monitoring of your metal oxide surge arrester”, p.2

### **2.4.3 Interfase de usuario del monitor de corriente de fuga LCM II**

El monitor de corriente de fuga LCM II posee un panel frontal con diversos controles que permiten la comunicación entre el sistema de monitoreo de corriente resistiva de fuga y el operador a cargo de efectuar la medición, es decir, el panel frontal constituye la interfase de comunicación entre el instrumento y el operador del mismo. La internase contiene los siguientes controles e indicadores

#### **2.4.3.1 Interruptor de alimentación**

Cumple la función de energizar y desenergizar el sistema monitor de corriente resistiva de fuga.

### **2.4.3.2 Diodo luminoso**

Es un diodo luminoso de color rojo que al estar encendido indica que el monitor de corriente está conectado a una fuente de poder.

### **2.4.3.3 Pantalla LCD**

Muestra visualmente los modos y las diferentes opciones del menú del sistema monitor de corriente resistiva de fuga; despliega el estado de la medición y los valores medidos.

### **2.4.3.4 Botones de control**

Son cuatro botones usados para administrar y dirigir el sistema de menú, es decir, para seleccionar e intercambiar entre los diferentes modos, menús y opciones del instrumento.

### **2.4.3.5 Perilla giratoria**

Permite la realización de dos operaciones básicas:

- Desplazamiento entre los diferentes parámetros específicos del menú
- Modificación del valor de los parámetros

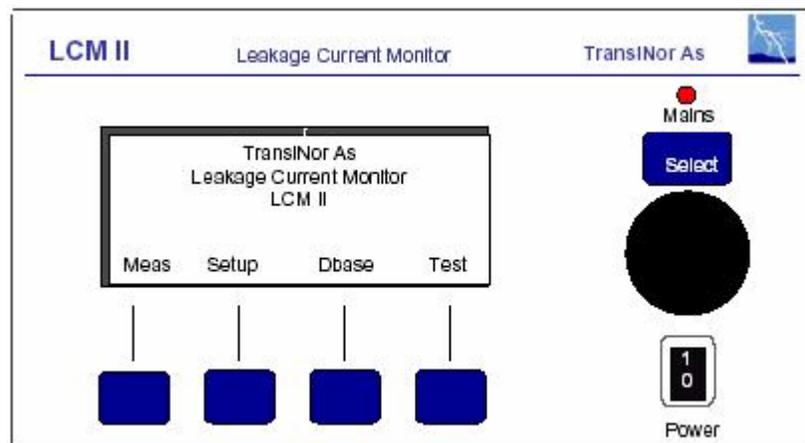
### 2.4.3.6 Botón selector

Se utiliza para realizar dos acciones sobre los parámetros específicos del menú:

- Seleccionar cambios en los parámetros
- Confirmar los cambios en los parámetros

A continuación, la figura 22 muestra la localización de los diferentes controles en el panel frontal del monitor de corriente de fuga LCM II, según la rotulación que el fabricante coloca en el equipo.

**Figura 22. Interfase entre usuario y panel frontal del LCM II**



**Fuente:** TransiNor As, “User manual LCM II versión 1.01”, p.16

### 2.4.4 Conectores del monitor de corriente de fuga LCM II

Las conexiones entre el LCM II, los componentes del sistema que captan las señales del pararrayos de óxido metálico y la fuente externa de alimentación, se realizan en los conectores localizados en la parte posterior del LCM II, los cuales se describen a continuación.

#### **2.4.4.1 Conector para la fuente de poder**

En este conector se introduce el cable de poder para suministro de voltaje de corriente alterna al sistema monitor de corriente resistiva de fuga; la fuente de corriente alterna debe ser de 50/60 Hz, 110 – 230 Volts. La batería interna del instrumento inicia su proceso de carga desde el momento en que el instrumento es conectado a la fuente de poder, sin importar que el interruptor de alimentación esté en posición de “conectado” o “desconectado”.

#### **2.4.4.2 Conector para fuente de poder externa DC**

El sistema de monitoreo de corriente resistiva de fuga también puede ser alimentado por una fuente externa de corriente directa –DC-, siempre que el voltaje de alimentación de esta se encuentre en el valor de 12 – 18 Volts, con la capacidad adecuada -mínimo de 2.4 Ah-. Es en este conector a donde se incorpora la fuente de poder externa DC.

#### **2.4.4.3 Conector para sonda de entrada**

En este conector, ubicado en la esquina superior derecha del panel posterior, se coloca la terminal procedente de la sonda de corriente. Mediante esta conexión, las señales de la corriente del transformador de corriente y la sonda de campo, junto con la temperatura ambiente llegan al monitor y son medidos. El suministro de energía para la sonda de corriente es tomada del monitor de corriente de fuga LCM II mediante el cable acoplado a este conector.

#### **2.4.4.4 Conectores de puesta a tierra**

Este juego de conectores de puesta a tierra posee tres diferentes conectores, que pueden ser interconectados entre sí y con sistemas externos de puesta a tierra. Los tres conectores son:

- EXT. GND : conexión a tierra para aterrizaje local en la subestación.
- CHASIS GND : conexión a tierra para aterrizaje del chasis del LCM II
- MAIN GND : conexión a tierra tomando el aterrizaje de la fuente de poder

#### **2.4.4.5 Conectores para salidas de prueba**

Estos conectores permiten tomar señales de prueba generadas por el mismo instrumento, con el fin de simular las señales reales procedentes de los dispositivos de campo. Las señales procedentes de los conectores para salidas de prueba permiten verificar el correcto funcionamiento del sistema de monitoreo de corriente resistiva de fuga. Las salidas de prueba, según la rotulación de cada conector, son las siguientes:

- FIELD: proporciona una señal que simula a la señal de la sonda de campo. La señal procedente de este conector se transfiere mediante un cable coaxial a la entrada que la sonda de corriente posee para conectar la terminal de la sonda de campo.
- CURRENT : mediante la conexión de un cable entre estos dos conectores, se forma un lazo de corriente que simula la corriente total de fuga del pararrayos. La corriente que circula por este lazo es medida por el transformador de corriente.

- V.TRSF : Este conector genera una señal que simula la señal procedente del transformador de voltaje externo que mide continuamente el voltaje de operación para mediciones permanentes. Esta señal llega al monitor LCM II mediante el adaptador al cual se acopla la señal del transformador de voltaje.

#### **2.4.4.6 Conectores para salidas a osciloscopio**

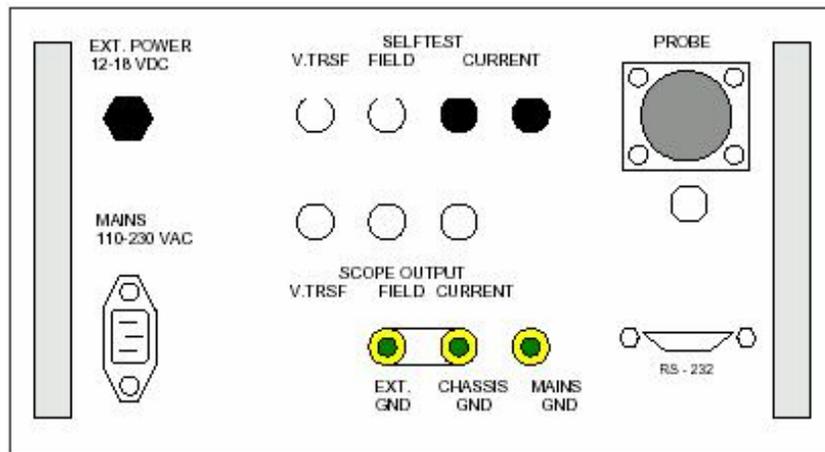
Las señales procedentes de la sonda de corriente y de la sonda de campo pueden ser monitoreadas en un osciloscopio mediante los dos conectores rotulados como “CURRENT” y “FIELD”, respectivamente. De la misma forma, el conector de salida “V.TRSF” puede ser conectado a un osciloscopio con el fin de monitorear el voltaje de la fase a la que está conectado el pararrayos objeto de medición -asumiendo que un transformador de voltaje está conectado al adaptador del transformador de voltaje-.

#### **2.4.4.7 Conector del puerto RS-232**

Mediante la conexión del cable apantallado de datos al conector del puerto RS-232, el instrumento puede comunicarse con una PC utilizando el programa de ambiente Windows creado por TransiNor As para el sistema de administración con PC.

A continuación, la figura 23 muestra esquemáticamente el panel posterior del monitor de corriente LCM II, donde se identifican los diferentes conectores según la rotulación que el fabricante coloca sobre el equipo, los cuales fueron descritos en los párrafos precedentes.

**Figura 23. Conectores en el panel posterior del LCM II**



**Fuente:** TransiNor As, “User manual LCM II versión 1.01”, p.18

#### **2.4.5 Principio de operación del sistema de monitoreo de corriente resistiva de fuga**

Para comprender el principio de operación del sistema de monitoreo de corriente resistiva de fuga es necesario recordar que en condiciones normales de voltaje en la red, a través del pararrayos circula de forma permanente una corriente de fuga; esta corriente de fuga tiene dos componentes, una capacitiva y una resistiva, debidas a la estructura del pararrayos y a la topología de este en la red. En virtud de lo antes expuesto, para condiciones normales de voltaje en la red, el efecto del pararrayos en la red puede ser representado mediante un capacitor y un resistor variable no lineal, conectados en paralelo y con sus terminales conectados entre la línea que se protege y tierra.

La magnitud de la corriente resistiva de fuga que circula por el pararrayos -a través del resistor variable no lineal- se ve afectada por la característica no lineal de los bloques de óxido metálico que forman el pararrayos, debido a que estos, por su naturaleza no lineal, introducen armónicos de corriente de 3er orden en la componente resistiva de la corriente de fuga.

El monitoreo de la corriente resistiva de fuga, cuya cambio en magnitud está fuertemente afectado por el cambio en la magnitud de los armónicos de corriente de 3er orden bajo condiciones normales de voltaje en la red, proporciona información confiable referente al estado del pararrayos en sus bloques de óxido metálico, ya que incrementos muy drásticos en el valor de la corriente resistiva de fuga indican una reducción brusca del valor de la resistencia de los bloques de óxido metálico del pararrayos; en otras palabras, indican modificación de las características de resistencia no lineal del bloque de óxido metálico, lo que significa fatiga en el pararrayos.

Las modificaciones en las características de resistencia no lineal de los bloques de óxido metálico del pararrayos pueden haber sido causadas por los esfuerzos de sobre tensiones temporales en la red -descargas electro atmosféricas, apertura y cierre de circuitos-, las condiciones de la intemperie –contaminación-, por envejecimiento normal del material o por la combinación de varias de esas causas.

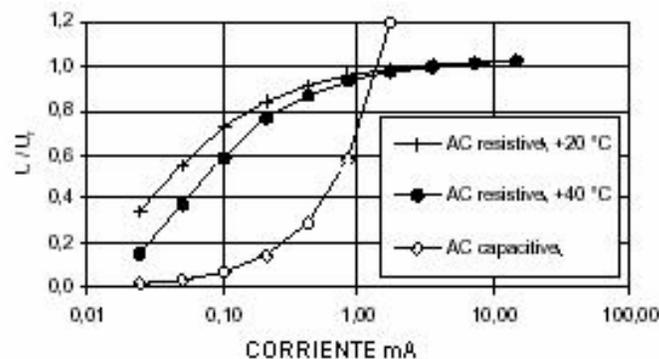
Habiendo recordado el modelo eléctrico y los efectos del comportamiento no lineal de los bloques de óxido metálico del pararrayos en condiciones normales de voltaje en la red, resulta consecuente indicar que el principio de operación del sistema de monitoreo de corriente resistiva de fuga se fundamenta en la medición indirecta -cálculo- de la componente resistiva de la corriente de fuga permanente del pararrayos, ya que esta es un indicador del estado del pararrayos. Además, el principio de operación del sistema de monitoreo de corriente resistiva de fuga considera los efectos de la temperatura ambiente, del voltaje de operación y del contenido de 3er armónico en el voltaje de la red. Estos efectos serán expuestos a continuación, para poder explicar posteriormente con mayor detalle el "método de análisis del armónico de 3er orden con compensación por armónicos en el sistema de voltaje", que es el método por el cual el sistema de monitoreo de corriente resistiva de fuga -LCM II- calcula el valor de la corriente resistiva de fuga del pararrayos.

Una vez conocido el valor de la corriente resistiva de fuga del pararrayos a través de la medición, existen valores críticos con los cuales debe ser comparada la medición. Si dichos valores críticos -que son provistos por los fabricantes- son superados, eso significa que el pararrayos está próximo a fallar.

#### 2.4.5.1 Efecto de la temperatura ambiente y del voltaje de operación sobre la componente resistiva de la corriente de fuga del pararrayos

La medición de la corriente resistiva de fuga a un mismo pararrayos bajo diferentes condiciones de temperatura ambiente y voltaje de operación -voltaje presente entre los terminales del pararrayos- puede dar como resultado distintos valores de corriente resistiva de fuga. Esto se debe a que la corriente resistiva de fuga - y por extensión la corriente de fuga permanente- es dependiente de la temperatura ambiente y del voltaje de operación, tal como lo muestra el gráfico de la figura 24. En dicha figura se ha representado en el eje de las abscisas el valor de la componente de la corriente de fuga en mili Amperes y en el eje de las ordenadas la relación entre el voltaje de operación  $U$  y el voltaje nominal del pararrayos  $U_r$ .

**Figura 24. Característica típica corriente - voltaje en un pararrayos de óxido metálico para alta tensión tipo subestación que muestra el efecto de la temperatura ambiente y de las relaciones  $U / U_r$**



**Fuente:** TransiNor As, “User manual LCM II versión 1.01”, p.10

Como se observa en el gráfico anterior, la corriente capacitiva de fuga únicamente se ve afectada por el valor del voltaje de operación, no así por la temperatura ambiente, mientras que la corriente resistiva de fuga se ve afectada por ambas variables, temperatura ambiente y voltaje de operación.

Si los efectos de la temperatura y del voltaje de operación no son tomados en cuenta para la medición de la corriente resistiva de fuga, los datos obtenidos serán errados porque cambiarán en función de las condiciones de temperatura a que se realicen las mediciones y del voltaje de operación a que se encuentre sometido el pararrayos.

Para ilustrar las variaciones que pueden introducirse en la medición del valor de la componente resistiva de la corriente de fuga por prescindir los efectos de temperatura y voltaje de operación, la tabla IV muestra la tabulación de los valores obtenidos para mediciones realizadas bajo diferentes condiciones de temperatura y voltaje de operación, para un pararrayos de óxido metálico.

**Tabla IV. Influencia de la temperatura ambiente y del voltaje del sistema sobre el valor de la componente resistiva de la corriente de fuga de un pararrayos de óxido metálico para alta tensión tipo subestación**

<b>Temperatura ( °C )</b>	0	0	0	20	20	20	40	40	40	50	50	50
<b>Voltaje del sistema (KV)</b>	380	400	420	380	400	420	380	400	420	380	400	420
<b>Valor de medición sin corrección (micro A)</b>	31	39	47	47	48	70	67	82	99	75	92	112
<b>Valor de medición con corrección (microA)</b>	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46

**Fuente:** TransiNor As, “User manual LCM II versión 1.01”, p.11

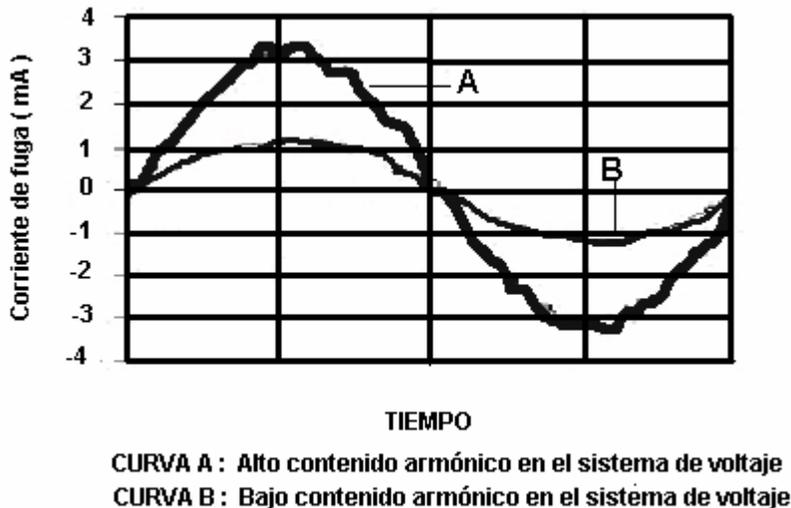
Dichos valores se obtuvieron aplicando tres valores de voltaje de operación diferentes para un mismo valor de temperatura ambiente y la prueba se repitió para cuatro diferentes valores de temperatura. La variación del valor de la corriente resistiva de fuga en función de la temperatura ambiente y del voltaje de operación introduce la dificultad de comparación e interpretación de datos, porque las reducciones o incrementos registrados en la corriente resistiva de fuga no pueden ser cotejados para determinar el estado del pararrayos. Por tal razón es necesario efectuar una corrección o compensación a los valores medidos y así poder comparar en una misma referencia de temperatura y voltaje de operación los valores de corriente resistiva de fuga que proporciona el LCM II.

#### **2.4.5.2 Efecto del contenido de tercer armónico en el voltaje de la red sobre la componente resistiva de la corriente de fuga del pararrayos**

Una característica de corriente – voltaje como la mostrada en la figura 23 representa el comportamiento de un pararrayos de óxido metálico cuando está sometido a la tensión de un voltaje senoidal. Los bloques de resistencia no lineal de óxido de zinc –ZnO- introducen un armónico de corriente de tercer orden en la corriente resistiva de fuga. Esta componente de la corriente resistiva de fuga es generada por el mismo pararrayos y es el mejor indicador para la detección de cambios en la característica no lineal del pararrayos a lo largo del tiempo, debido al envejecimiento del material.

El contenido de armónicos de voltaje en la red incrementa el contenido de armónicos en la corriente de fuga del pararrayos. La figura 25 ilustra el efecto de los armónicos de voltaje de la red sobre el valor de la corriente de fuga del pararrayos.

**Figura 25. Efecto del contenido de armónicos de voltaje en la red sobre el contenido de armónicos de la corriente de fuga de un pararrayos de óxido metálico**



**Fuente:** TransiNor As, “User manual LCM II versión 1.01”, p.11

Los armónicos de corriente generados por los armónicos de voltaje en la red interfieren con los armónicos que genera el pararrayos. Según la norma IEC 60099-5, la presencia de armónicos de voltaje en el sistema puede llegar a introducir armónicos capacitivos de corriente de la misma magnitud que los armónicos de corriente resistiva generados por el mismo pararrayos. Lo anterior implica que si hay armónicos de voltaje presentes en la red y estos son ignorados, el error en las mediciones de la corriente resistiva de fuga puede ser muy alto. Por ejemplo, si el contenido armónico en el voltaje es de 0.5% o de 1%, los errores en el tercer armónico de la corriente resistiva de fuga están en los rangos de +/- 50% y +/- 100% respectivamente.

Es importante destacar que el contenido de armónicos de voltaje en la red es una variable que depende de diversas condiciones cambiantes del sistema, como la carga conectada y la configuración de la red. En otras palabras, si el contenido de armónicos de voltaje de la red es ignorado por el sistema que monitore la corriente resistiva de fuga, no será posible determinar si un incremento en la corriente resistiva de fuga es

debido al envejecimiento del material o si es un incremento debido a la variación del contenido de armónicos de voltaje en la red. Por lo tanto, es necesaria la aplicación de un sistema de medición que aplique un método que considere automáticamente los efectos de los armónicos de voltaje en la red y los compense.

#### **2.4.5.3 Método de análisis del armónico de tercer orden con compensación por armónicos en el sistema de voltaje**

Es el método de medición implementado en el LCM II y su principio, consiste en que los armónicos de corriente de tercer orden introducidos en la corriente de fuga del pararrayos por los armónicos de voltaje de la red son eliminados para poder determinar el armónico de corriente de tercer orden en la corriente resistiva de fuga generado por el propio pararrayos; esta componente de la corriente resistiva de fuga puede ser relacionada con la corriente resistiva de fuga total y por eso es una medida de la condición del pararrayos de óxido metálico.

La corriente de fuga total del pararrayos es medida por un transformador de corriente, por lo que se requiere que el pararrayos esté aislado eléctricamente de la base sobre la cual está montado y aterrizado mediante un conductor aislado con el objetivo de facilitar la medición de la corriente de fuga total, a través de este conductor.

La componente capacitiva de la corriente de fuga puede contener armónicos de corriente debido al efecto de los armónicos de voltaje de la red; si el tercer armónico de la corriente capacitiva de fuga puede ser determinado –indirectamente-, entonces el tercer armónico de la corriente resistiva de fuga puede ser determinado.

A continuación se describe la forma en que el tercer armónico de la corriente resistiva de fuga es determinado por el sistema LCM II.

Para determinar el tercer armónico de la corriente capacitava de fuga se coloca una sonda de campo –antena- en la parte inferior del pararrayos, entre su base aislada y la estructura que lo soporta; la función de la sonda de campo es captar el campo eléctrico alrededor del pararrayos. Este campo eléctrico está determinado por la capacitancia del pararrayos y por eso está fuertemente relacionado con la componente capacitiva de la corriente de fuga que circula por el pararrayos. El voltaje inducido en la sonda de campo es medido y convertido a una “corriente debida al campo eléctrico alrededor del pararrayos”, denominada “corriente de sonda de campo” y representada por  $I_p$ . Con la obtención de la corriente  $I_p$  puede determinarse el tercer armónico de la corriente capacitiva de fuga mediante la conversión a series de Fourier de la  $I_p$  junto con un procedimiento de escala.

Para una configuración trifásica el tercer armónico de la corriente resistiva de fuga,  $I_{3r}$ , se determina, fasorialmente, como:

$$I_{3r} = I_{3t} - I_{3c} = I_{3t} - (0.75) * ( | I_{1t} | / | I_{1p} | ) * I_{3p}$$

Donde:

$I_{3r}$ : tercer armónico de la corriente resistiva de fuga

$I_{3t}$ : tercer armónico de la corriente de fuga total

$I_{3c}$ : tercer armónico de la corriente capacitiva de fuga

$| I_{1t} |$ : magnitud de la corriente total de fuga, fundamental

$| I_{1p} |$ : magnitud de la corriente de sonda de campo, fundamental

$I_{3p}$ : tercer armónico de la corriente de sonda de campo

Para comprender mejor la anterior expresión matemática, es necesario retomar el circuito eléctrico equivalente de un pararrayos en condiciones normales de voltaje en la red, mostrado en el capítulo uno, en la figura 3; a partir de dicho circuito es fácil deducir que la sumatoria de los fasores de corriente resistiva y capacitiva es igual a la corriente total de fuga, lo cual aplica para la sumatoria de los fasores de corriente fundamentales y los fasores de corrientes armónicos de tercer orden.

El sistema LCM II mide directamente la corriente total de fuga del pararrayos  $I_t$ ; a partir de esa corriente total de fuga medida se obtiene el tercer armónico de la corriente total de fuga,  $I_{3t}$ , mediante la conversión a series de Fourier. La corriente de sonda de campo,  $I_{1p}$ , es obtenida mediante la sonda de campo, y convirtiéndola a series de Fourier se obtiene el tercer armónico de la corriente de sonda de campo  $I_{3p}$ . En el Apéndice C se amplía esta explicación.

Mediciones hechas a varios bloques de óxido de Zinc, ZnO, han mostrado que el valor pico de la corriente resistiva de fuga total  $I_r$ , es típicamente 4 veces la magnitud del tercer armónico de la corriente resistiva de fuga  $I_{3r}$ , y es ese el valor presentado en pantalla por el sistema LCM II.

La ventaja de utilizar como base el cálculo del tercer armónico para determinar la corriente resistiva de fuga, y no armónicos de otro orden, es que no importa en cual de las tres fases del sistema trifásico se haga la medición, el método es igualmente válido. Esto se debe a que no existe inversión de fase ni desfase entre los terceros armónicos de voltaje de las tres fases de un sistema trifásico.

## **2.4.6 Características de operación**

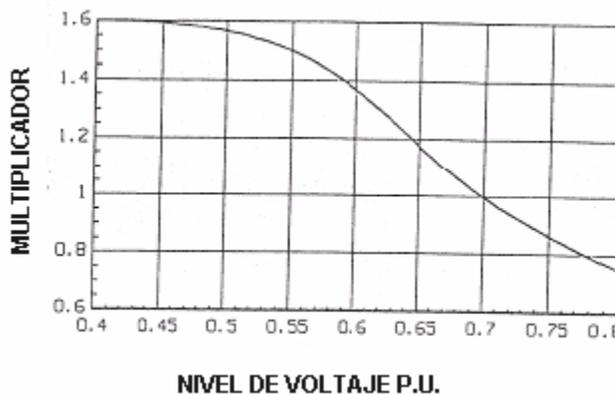
Dentro de las ventajas del LCM II se encuentra el registro del voltaje y temperatura de operación durante la medición. Esto permite conocer de manera continua las condiciones a las que está sometido el pararrayos al momento en que se realiza la medición, y de esa forma compensar las diferencias que puedan originarse en las lecturas por el efecto de la temperatura ambiente y del voltaje de operación. Una de las principales características de operación del monitor de corriente de fuga es que ajusta la medición efectuada bajo diferentes condiciones de temperatura ambiente y voltaje de operación a valores referenciados a una temperatura ambiente estándar de +20°C y a un voltaje de operación -voltaje presente entre los terminales del pararrayos- igual al 70% del voltaje nominal del pararrayos, basado en la temperatura y voltaje registrados durante la medición de campo. Por esa razón, las mediciones efectuadas en diferentes condiciones de voltaje y temperatura pueden ser fácilmente comparadas con las que se tendrían bajo las condiciones de referencia.

### **2.4.6.1 Corrección del efecto de la temperatura ambiente y del voltaje de operación sobre la componente resistiva de la corriente de fuga del pararrayos**

En las anteriores secciones de este capítulo se ha dado especial énfasis a la importancia de tomar en cuenta el efecto que tienen sobre la magnitud de la corriente resistiva de fuga la temperatura ambiente y el voltaje de operación del pararrayos. También se ha mencionado que es necesario realizar correcciones o compensaciones a los valores de corriente de fuga medidos bajo diferentes condiciones de temperatura ambiente y de voltaje de operación. Es en esta sección donde se explica la manera en que el LCM II realiza automáticamente las compensaciones antes mencionadas.

El sistema LCM II cuenta con una serie de elementos de campo que le permiten captar las magnitudes eléctricas y ambientales de un pararrayos cuando el sistema está monitoreando su corriente de fuga. Las señales que estos elementos de campo obtienen al ser montados en campo y puestos en funcionamiento son enviadas al monitor de corriente de fuga, el cual procesa las señales para obtener el valor de la corriente resistiva de fuga luego de aplicarle los factores de corrección pertinentes. Para tales efectos, el monitor de corriente de fuga ajusta las mediciones según los valores de temperatura ambiente y de voltaje de operación registrados durante la medición a curvas como las mostradas en las figuras 26 y 27, que muestran respectivamente, los valores de los factores de corrección por voltaje de operación y temperatura ambiente, que deben aplicarse según las condiciones de campo al momento de realizar las mediciones.

**Figura 26. Curva de voltaje de operación en p.u. del voltaje nominal del pararrayos**



**Fuente:** TransiNor As, “User manual LCM II versión 1.01”, p.40

La curva de ajuste 26 muestra en el eje de las ordenadas el multiplicador que se debe aplicar a la corriente resistiva de fuga calculada por el monitor LCM II, para las diferentes relaciones presentadas en el eje de las abscisas:

$$(\text{voltaje de operación}) / (\text{voltaje nominal})$$

El valor unitario del multiplicador corresponde a la relación

$$(\text{voltaje de operación}) / (\text{voltaje nominal}) = 0.7$$

que es el valor de referencia seleccionado por el LCM II; esto debido a que los criterios de diseño de protecciones con pararrayos aplicados en dimensionamiento de pararrayos seleccionan el valor nominal de voltaje del pararrayos asignando a la relación

$$(\text{MCOV}) / (\text{Voltaje}_{L-T} \text{ nominal de la red})$$

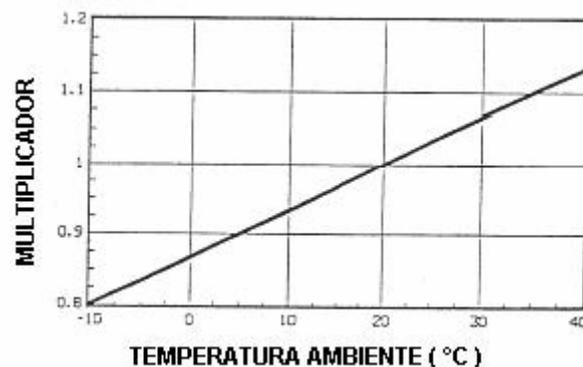
un valor que se encuentra en el rango de 0.6 a 0.8, del cual 0.7 es el valor medio.

Como ejemplo de uso de la gráfica 26, se asumirá que en una medición

$$(\text{voltaje de operación}) / (\text{voltaje nominal}) = 0.65$$

en ese caso el monitor de corriente de fuga aplicará automáticamente al valor calculado de la corriente resistiva de fuga un multiplicador de 0.88 -identificar las coordenadas en la gráfica 26-, con esto la medición quedará compensada por voltaje de operación.

**Figura 27. Curva de ajuste a temperatura ambiente de 20 °C**



**Fuente:** TransiNor As, "User manual LCM II versión 1.01", p.40

La figura 27 muestra en el eje de las ordenadas el multiplicador que debe aplicarse a la corriente resistiva de fuga calculada, para diferentes valores de temperatura ambiente mostradas en el eje de las abscisas. El valor unitario del multiplicador corresponde a una temperatura de 20 °C debido a que esa es la temperatura de referencia. Cualquier otro valor de temperatura ambiente bajo el cual se realice el monitoreo de la corriente resistiva de fuga, diferente de 20 °C, es corregido automáticamente por el monitor de corriente de fuga, aplicando el multiplicador que corresponda. Por ejemplo, si la temperatura ambiente a la cual se realiza el monitoreo de corriente resistiva de fuga de un pararrayos es de 25 °C, el multiplicador que se debe aplicar para corregir la medición y trasladarla a una referencia de 20 °C, es 0.94.

En síntesis, el monitor de corriente de fuga aplica dos multiplicadores de corrección al valor de corriente resistiva de fuga calculado: uno por compensación de la temperatura ambiente y otro por compensación del voltaje de operación.

El monitor de corriente de fuga muestra en pantalla dos valores de corriente de fuga, el primero es el valor calculado a partir de las señales procedentes de la sonda de corriente y el otro es el valor calculado y corregido tomando en cuenta los efectos de la temperatura ambiente y del voltaje de operación del pararrayos al momento en que se realizan las mediciones.

Para completar el ejemplo de aplicación de las curvas 26 y 27 por el monitor de corriente de fuga, se puede considerar que el valor de la corriente resistiva de fuga calculada es de un valor  $I_r = A$ , y que las condiciones bajo las cuales se realizó la medición fueron: temperatura ambiente = 25 °C, valor del voltaje de operación en por unidad del voltaje nominal del pararrayos = 0.65. Bajo las condiciones indicadas de la medición, el monitor de corriente de fuga mostrará en pantalla los valores:

- Corriente resistiva de fuga =  $A$  -calculada por el LCM II sin correcciones por temperatura ambiente ni por voltaje de operación-
- Corriente resistiva de fuga =  $A * 0.94 * 0.88 = 0.8272 * A$  -calculada y compensada por temperatura ambiente y voltaje de operación, es decir, referida a una temperatura ambiente de 20 °C y a un voltaje de operación de 0.7 por unidad del voltaje nominal del pararrayos-.

#### **2.4.6.2 Corrección del efecto del contenido de tercer armónico en el voltaje de la red sobre la componente resistiva de la corriente de fuga del pararrayos**

El monitor de corriente de fuga efectúa un análisis del armónico de voltaje de tercer orden de la red, con base en la señal recibida de la sonda de campo –antena- y la compensa de forma automática, aplicando el algoritmo de resta fasorial de corrientes armónicas de tercer orden.

#### **2.4.7 Especificaciones del equipo de monitoreo de corriente resistiva de fuga**

Las especificaciones del sistema de monitoreo de corriente de fuga están referidas a sus componentes, especialmente al monitor de corriente de fuga LCM II, en lo relativo a las dimensiones, peso, ambiente, temperatura de operación y voltaje de alimentación, las cuales se presentan a continuación.

#### Dimensiones del instrumento:

Ancho	Altura	Longitud
13 cm	21cm	30cm
5 pulg	8pulg	12 pulg

#### Peso:

- Instrumento 4.9 Kg / 10.9 lbs
- Sonda de campo y de corriente 1,5 kg / 3.3 lbs
- Unidad completa 11 kg / 24.5 lbs

#### Ambiente

- Para uso en intemperie
- Encapsulado IP 54

#### Temperatura de Operación

- Operación 10 a +50 °C 14 a 122 °F
- Almacenaje -20 a +70 °C 4 a 158 °F
- Voltaje de alimentación: 12 – 15 VDC o 110 – 230 VAC 50/60 Hz
- Batería: 9.6V 2,4 Ah
- Capacidad: 8 horas de uso
- Carga: 1.5 h.
- Rango de señales de entrada -valores pico-: 0.2 a 9.0 Volts
- Corriente total de fuga del pararrayos: 200 microA a 9mA
- Corriente de la sonda de campo: 20 microA a 0.9 mA
- Tamaño de pantalla: ancho 3.3 pulgadas x alto 1.6 pulgadas
- Resolución de pantalla : 128 x 64 píxeles

Datos de almacenaje de información:

- Reloj: se mantiene por batería interna
- Tiempo de vida de batería –Litio- : 10 años
- Capacidad de RAM : 256 KB compartidos entre los ID's de los pararrayos medidos de la base de datos, es decir, típicamente 1000 pararrayos con una medición para cada uno

Temperatura del sensor:

- Tipo PT 1000
- Rango de temperatura ambiente: -40 a +70 °C / -40 a 158 °F
- Exactitud: +/- 2°C / +/- 3.6 °F

### **3. PROTOCOLOS DE PRUEBAS PREDICTIVAS A PARARRAYOS DE ÓXIDO METÁLICO PARA ALTA TENSIÓN TIPO SUBESTACIÓN**

Las pruebas realizadas para determinar el estado de los pararrayos de óxido metálico para alta tensión tipo subestación pueden clasificarse en dos categorías, dependiendo de si el pararrayos se encuentra o no montado y conectado al circuito energizado del cual es parte en el esquema de protección por sobrevoltaje. Las dos categorías de clasificación son: pruebas fuera de línea y pruebas en línea.

#### **3.1 Pruebas fuera de línea**

Estas pruebas se realizan con el pararrayos completamente desenergizado, y desconectado del circuito al cual protege de sobrevoltaje; por lo regular se realizan en el laboratorio o taller de mediciones bajo condiciones ambientales específicas y controladas. Para desconectar y desmontar el pararrayos y así realizarle las pruebas fuera de línea, se requiere que sea desenergizado el circuito del cual es parte el pararrayos; esto se traduce en pérdida de continuidad del suministro de energía eléctrica al campo de entrada o salida al que pertenece el pararrayos, e incrementos en el tiempo requerido para efectuar la medición. En la categoría de pruebas fuera de línea se encuentran las pruebas de aislamiento.

##### **3.1.1 Prueba de aislamiento a pararrayos de óxido metálico para alta tensión tipo subestación**

La prueba de resistencia de aislamiento es una prueba que se aplica para determinar la integridad del aislamiento en el pararrayos. En elementos con baja

capacitancia las corrientes transitorias de fugas capacitivas y de absorción son insignificantes o desaparecen casi instantáneamente, y en muy poco tiempo, un minuto o menos, se establece una corriente permanente de fuga conductiva. En estas condiciones es factible realizar la medida de la resistencia de aislamiento mediante lecturas puntuales de corta duración. En cambio, cuando el elemento que se ha de comprobar posee alta capacitancia, como por ejemplo un cable muy largo, un motor, un generador de gran potencia o en este caso, un pararrayos de óxido metálico para alta tensión tipo subestación, las corrientes transitorias de fuga duran horas. Por ello, las lecturas recogidas con los medidores de aislamiento cambian constantemente, y no es posible obtener una medida puntual permanente y precisa. En estos casos se deben realizar varias medidas y determinar la tendencia entre las mismas.

Lo anteriormente expuesto es el fundamento de métodos de medición de resistencia de aislamiento, tales como: prueba de tensión por pasos y absorción del dieléctrico. Ninguno de estos métodos depende de una sola lectura, sino de un conjunto de lecturas relacionadas. Estas pruebas son aplicadas en la medición de resistencia de aislamiento de elementos con alta capacitancia, ya que las corrientes transitorias disminuyen lentamente, y las lecturas obtenidas difieren en el tiempo.

### **3.1.1.1 Objetivo de la prueba de resistencia de aislamiento**

La razón por la que se realizan pruebas de aislamiento en los pararrayos de alta tensión es la de prevenir las posibles averías en las instalaciones eléctricas -y sus distintos elementos, como transformadores, motores, etc. protegidos por el pararrayos- debido a que, a lo largo de los años el pararrayos está expuesto a factores ambientales adversos tales como el polvo, temperaturas extremas, tensiones mecánicas y vibraciones. Estos factores pueden provocar el fallo de su aislamiento eléctrico y en definitiva, son el origen de posibles pérdidas económicas o incluso humanas.

Las verificaciones periódicas del aislamiento de los pararrayos proveen una información muy valiosa sobre su posible deterioro y ayuda a predecir sus posibles fallos. Con ello se conseguirá no sólo evitar las averías de origen eléctrico, sino también prolongar la vida operativa del pararrayos, de la instalación eléctrica y de todos sus elementos.

### **3.1.1.2 Pasos previos a la realización de la prueba de aislamiento**

Para obtener medidas útiles y fiables de la resistencia de aislamiento del pararrayos, se debe cumplir cuidadosamente, previo a la realización de las mediciones, lo siguiente:

- El pararrayos se debe poner fuera de servicio y se debe desconectar de todos los elementos de su entorno eléctrico que puedan provocar fugas de la corriente de prueba y, por tanto, falsear la medida del aislamiento.
- La superficie del pararrayos debe estar limpia de carbonilla y otras materias extrañas que puedan ser conductoras en un ambiente húmedo.
- El pararrayos sometido a prueba se ha de descargar por completo antes de efectuar las mediciones.

Debe considerarse el efecto de la temperatura. Puesto que la resistencia de aislamiento es inversamente proporcional a la temperatura -la resistencia disminuye a medida que aumenta la temperatura-, las lecturas registradas variarán en función de los cambios en la temperatura del material aislante.

Se recomienda realizar las pruebas con el pararrayos a una temperatura estándar de 20 °C. En caso de no disponer de información del fabricante y conociendo la resistencia del aislamiento del pararrayos a una temperatura T dada, se puede determinar la resistencia equivalente a 20°C multiplicando por dos la resistencia por cada 10° C que T exceda de 20°C.

### **3.1.1.3 Recomendaciones para la realización de pruebas de aislamiento**

Es importante para la obtención de resultados confiables y evitar accidentes, observar las siguientes recomendaciones:

- Nunca conectar el comprobador de aislamiento –megger- a conductores con tensión o equipos excitados y seguir siempre la recomendaciones del fabricante.
- Poner fuera de servicio el equipo a probar desconectando sus fusibles y/o abriendo los interruptores.
- Descargar las tensiones producidas por efecto capacitivo tanto antes como después de la prueba.
- No utilizar un comprobador de aislamiento en una atmósfera peligrosa o explosiva, ya que el instrumento puede generar arcos eléctricos en aislamientos dañados.
- Utilizar guantes aislantes de goma apropiados para conectar los terminales de prueba.

#### **3.1.1.4 Mecanismo de funcionamiento de la prueba de aislamiento**

En la prueba de la resistencia del aislamiento, el megger aplica una alta tensión DC, VDC, al pararrayos bajo prueba. Esta alta tensión provoca una pequeña corriente eléctrica -típicamente del orden de microamperios- que circula a través del pararrayos de alta tensión y su aislamiento. La magnitud de esa corriente depende de la tensión aplicada, de la capacitancia del pararrayos, de su resistencia total y de su temperatura. Para una tensión fija, cuanto mayor es la corriente, más pequeña es la resistencia, debido a que

$$V_{dc} = I \times R \quad \text{por lo tanto}$$

$$R = V_{dc} / I \quad \text{el valor de dicha resistencia se expresa en Mega Ohms -M}\Omega\text{-.}$$

#### **3.1.1.5 Protocolo de la prueba de aislamiento**

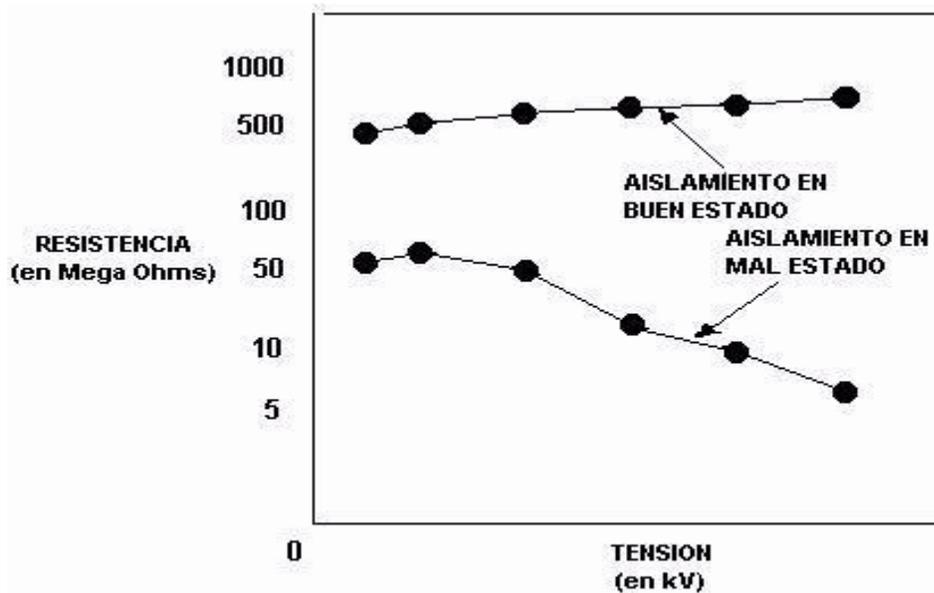
Luego de haber efectuado los pasos previos a la medición de la resistencia de aislamiento, se procede de la forma que se describe a continuación, según el método a emplear.

##### **3.1.1.5.1 Prueba de tensión por pasos**

La prueba de tensión por pasos se lleva a cabo aplicando distintos valores de tensión de prueba; se aplica cada tensión de prueba durante el mismo período, normalmente 60 segundos, se traza un gráfico de la resistencia de aislamiento registrada. Aplicando escalones crecientes de tensión, el aislamiento se somete a esfuerzos eléctricos en aumento que pueden revelar información sobre defectos tales como pequeñas perforaciones o daños físicos.

Un aislamiento en buen estado debe permanecer aproximadamente invariable durante las pruebas con distintos niveles de tensión, por lo que su resistencia se mantendrá constante durante la prueba. Sin embargo, un aislamiento deteriorado, agrietado o contaminado experimentará un incremento del paso de corriente a medida que la tensión de prueba aumenta, con la consiguiente disminución de su resistencia. Esta prueba es independiente del material aislante, de la capacitancia del equipo y del efecto de la temperatura. Con el objetivo de obtener la tendencia del comportamiento del aislamiento del pararrayos se toma en cuenta el valor de resistencia registrado al final de los 60 segundos después de aplicado cada escalón de voltaje. La figura 28 muestra los comportamientos que pueden observarse al realizar la prueba de aislamiento de tensión por pasos a un pararrayos.

**Figura 28. Gráfica tensión - resistencia para la tendencia de resistencia de aislamiento del pararrayos**



**Fuente:** Fluke Ibérica S.L., “manteniendo tu mundo en marcha”, p.10

La prueba de tensión por pasos busca tendencias de la resistencia en relación con tensiones de prueba variables.

#### **3.1.1.5.1.1 Protocolo de la prueba de tensión por pasos**

- Desenergizar el pararrayos y cortocircuitar sus extremos.
- Conectar el megger al pararrayos.
- Aplicar los voltajes de prueba, en pasos de igual duración.
- Graficar las lecturas de resistencia para cada valor de voltaje aplicado.
- Remover las conexiones entre el pararrayos y el megger.
- Cortocircuitar los extremos del pararrayos por un tiempo igual a 10 veces el tiempo que permaneció energizado.
- Ajustar los puntos graficados a la curva que mejor los una.

#### **3.1.1.5.2 Prueba de absorción del dieléctrico**

La prueba de absorción del dieléctrico es especialmente valiosa para descubrir la presencia de humedad y / o aceite en el aislante. La absorción del dieléctrico es la relación de dos lecturas de resistencia: una se toma al cabo de 30 segundos y la otra al cabo de 60 segundos, para cada valor de voltaje de prueba. Con el aislamiento en buen estado, la resistencia de aislamiento empezará por un valor bajo y aumentará a medida que se vayan haciendo más pequeñas las corrientes de fugas capacitivas y absorción.

El valor de la absorción del dieléctrico se obtiene dividiendo el valor de la prueba de 60 segundos por el valor de la prueba de 30 segundos. Un valor bajo de absorción del dieléctrico indica normalmente problemas en el aislamiento. Algunos valores son mostrados en la tabla V.

**Tabla V. Interpretación de las relaciones de absorción dieléctrica**

<b>Estado de la resistencia de aislamiento</b>	<b>Relación 60/30 s -absorción del dieléctrico-</b>
Peligroso	0 – 1,0
Deficiente	1,0 – 1,3
Bueno	1,3 – 1,6
Excelente	1,6 y superior

**Fuente:** Fluke Ibérica S.L., “manteniendo tu mundo en marcha”, p.18

### **3.1.1.5.2.1 Protocolo de la prueba de absorción del dieléctrico**

- Desenergizar el pararrayos y cortocircuitar sus extremos.
- Desmontar el pararrayos, en caso que la prueba se realice en el taller o laboratorio.
- Conectar el megger al pararrayos.

- Aplicar los voltajes de prueba y tomar la lectura de resistencia a los 30 segundos y a los 60 segundos, para cada valor de voltaje de prueba.
- Tabular las lecturas de resistencia obtenidas a 30 segundos y a 60 segundos.
- Remover las conexiones entre el pararrayos y el megger.
- Cortocircuitar los extremos del pararrayos por un tiempo igual a 10 veces el tiempo que permaneció energizado.
- Calcular la absorción del dieléctrico para cada escalón de voltaje de prueba, y luego obtener el valor promedio de las diferentes absorciones del dieléctrico.

### **3.1.1.5.3 Tendencia del aislamiento**

El comportamiento del aislamiento del pararrayos sometido a un voltaje constante durante un período -10 minutos- indicará sus características dieléctricas según correspondan a las características típicas del dispositivo medido. El pararrayos es un dispositivo que puede ser modelado eléctricamente por un capacitor conectado en paralelo con un resistor -capítulo 1-, por lo cual, durante una medición de aislamiento el valor de la resistencia medida deberá corresponder a características capacitivas, las cuales se evalúan de acuerdo a la tabulación y graficación de la variación de la resistencia eléctrica del pararrayos en el tiempo. Esta prueba no se basa en un único valor puntual de resistencia eléctrica, sino del comportamiento -variación- de la resistencia en el tiempo, basado en lecturas obtenidas durante el período de medición. Los resultados de esta prueba son los que se analizarán en el capítulo 4 en lo correspondiente a prueba de resistencia de aislamiento.

La prueba se realiza conectando el bloque pararrayos a los terminales del megger, aplicando un voltaje de prueba constante de 5kV durante 10 minutos y registrando los valores de resistencia cada 15 segundos durante el primer minuto de la prueba; para los restantes 9 minutos de la prueba se registran los valores a cada minuto. El medidor calcula automáticamente el índice de polarización –IP- como la razón entre la medición de resistencia registrada en el minuto 5 y el minuto 10.

#### **3.1.1.5.3.1 Protocolo de la prueba de tendencia del aislamiento**

- Desenergizar el pararrayos y cortocircuitar sus extremos.
- Desmontar el pararrayos, en caso que la prueba se realice en el taller o laboratorio.
- Conectar el megger al pararrayos.
- Aplicar el voltaje de prueba y tomar la lectura de resistencia durante 5 minutos de la siguiente forma:
  - Durante el primer minuto: tomar la lectura correspondiente a 15, 30, 45 y 60 segundos -4 lecturas-.
  - Para los restantes 4 minutos, tomar una lectura cada minuto, es decir, al finalizar el minuto 2, el minuto 3, el minuto 4 y el minuto 5 -4 lecturas-.
- Tabular las lecturas de resistencia obtenidas.
- Remover las conexiones entre el pararrayos y el megger.
- Cortocircuitar los extremos del pararrayos por un tiempo igual a 10 veces el tiempo que permaneció energizado.

### **3.1.2 Prueba de factor de potencia de aislamiento**

La prueba de factor de potencia de aislamiento es una prueba que se realiza para obtener información respecto al estado del aislamiento del pararrayos basándose en la medición de las pérdidas de energía que se producen en el pararrayos respecto al valor de la energía de carga que se le aplica durante la medición.

#### **3.1.2.1 Objetivo de la prueba de factor de potencia de aislamiento**

Esta prueba proporciona información sobre la calidad del aislamiento en lo referente a la detección de humedad y otros contaminantes que eventualmente modifican la calidad aislante del pararrayos. En la medición del factor de potencia de aislamiento de un pararrayos se compara la relación entre las pérdidas -energía transformada en calor por efecto Joule en el pararrayos durante la prueba- y la energía aplicada por el instrumento de medición al pararrayos como carga, por lo que esta prueba es independiente de la cantidad de aislamiento bajo prueba. Esta relación se refleja en el desfase que se produce entre el voltaje aplicado durante la prueba y la corriente total que circula a través del pararrayos como consecuencia de la aplicación del voltaje de prueba.

En la prueba de factor de potencia de aislamiento se aplica al pararrayos un voltaje de corriente alterna, a diferencia de lo que sucede en las pruebas de aislamiento -prueba de tensión por pasos y prueba de absorción del dieléctrico-, en que se aplica al pararrayos un voltaje de prueba de corriente directa. Debido al comportamiento eléctrico del pararrayos, este puede ser representado básicamente por un capacitor conectado en paralelo con una resistencia. En consecuencia, el factor de potencia del aislamiento del pararrayos es la relación de la resistencia equivalente a la impedancia equivalente del pararrayos.

### 3.1.2.2 Factor de disipación D

El factor de disipación D es un indicador utilizado para determinar el estado del aislamiento del pararrayos. Viene dado por la tangente del ángulo complementario del ángulo  $\Theta$ , siendo  $\Theta$  el ángulo de desfase entre el voltaje aplicado y la corriente total obtenida durante la prueba. Debido a que la corriente total es de valores muy pequeños -del orden de mA- se puede asumir la igualdad entre el  $\cos \Theta$  y  $\tan (90-\Theta)$ .

En la práctica, el equipo utilizado en la realización de la prueba de factor de potencia de aislamiento mide el factor de potencia en base a la comparación de las pérdidas producidas con la potencia de carga, es decir:

$$\text{f.p.} = \text{mW} / \text{mVA} \quad \text{donde:}$$

f.p. : factor de potencia de aislamiento

mW: potencia de pérdidas en mili watios

mVA: potencia de carga en mili volt amperes

De acuerdo a lo anterior el factor de potencia siempre será la relación de los Watts de pérdida dividido la carga en volt amperes; el valor obtenido de esta relación será independiente del área o espesor del aislamiento y dependerá únicamente de la humedad, la ionización y la temperatura.

El principio básico de esta prueba es la detección de cambios medibles en las características del aislamiento del pararrayos, que puedan asociarse con los efectos destructivos de agentes como el agua, el calor, etc. En general, un incremento apreciable de las pérdidas dieléctricas en AC del aislamiento es una indicación clara de deterioro.

### **3.1.2.3 Efecto de la temperatura en el factor de potencia de aislamiento**

Los valores de resistencia de aislamiento se ven fuertemente afectados con el incremento de la temperatura, por lo que es necesario ajustar los valores obtenidos a una misma base, que por norma se ha establecido a 20 °C. Dicho ajuste se realiza con el propósito de efectuar comparaciones en mediciones pasadas, presentes y futuras. Para realizar estos ajustes el fabricante del equipo proporciona tablas donde relaciona los factores de conversión de diversos equipos a la temperatura base de 20 °C.

### **3.1.2.4 Protocolo de la prueba de factor de potencia de aislamiento**

El protocolo de la prueba de factor de potencia de aislamiento es el siguiente:

- Desenergizar el pararrayos.
- Cortocircuitar los extremos del pararrayos, con el fin de eliminar las cargas residuales que este pueda tener.
- Efectuar las conexiones entre el pararrayos y el aparato medidor de factor de potencia, evitando el contacto con las partes que serán energizadas.
- Conectar el aparato medidor de factor de potencia, y desconectarlo luego de obtener una medición constante.
- Retirar las conexiones entre el pararrayos y el medidor de factor de potencia.
- Cortocircuitar el pararrayos, durante un tiempo igual a 5 veces el tiempo que este permaneció energizado.

### **3.1.3 Prueba de pérdidas de potencia**

Las pérdidas de potencia que se registran en un pararrayos son indicadoras de su calidad dieléctrica y de problemas físicos o mecánicos en su estructura. Debido a que las condiciones de intemperie -óxidos, suciedad, sales- y operación a que se encuentra sometido el pararrayos repercuten en su correcto funcionamiento, las mediciones de pérdida de potencia cobran especial importancia en la detección de problemas antes que el pararrayos falle. Si el pararrayos se ha deteriorado en sus propiedades dieléctricas su funcionamiento se verá afectado, debido a que en condiciones de voltaje nominal de la red este debe comportarse como un aislante; por otro lado, si el pararrayos ha drenado a tierra excesivas corrientes, es probable que debido a los esfuerzos mecánicos producidos en cada descarga, su ensamblaje pueda estar dañado.

#### **3.1.3.1 Objetivo de la prueba de pérdidas de potencia**

La prueba de pérdidas de potencia aplicada a un pararrayos, es una prueba que se realiza para determinar la integridad de su aislamiento y de su estructura.

#### **3.1.3.2 Protocolo de la prueba de pérdidas de potencia**

El protocolo para la realización de la prueba de pérdida de potencia en el pararrayos es el siguiente:

- Desenergizar el pararrayos y cortocircuitar sus extremos.
- Desmontar el pararrayos, en caso que la prueba se realice en el taller o laboratorio.
- Realizar las conexiones entre el M4100 y el M4200.

- Conectar los terminales de prueba del medidor de pérdidas de potencia -M4100- a los terminales del pararrayos.
- Conectar el aparato medidor de pérdidas de potencia -M4100- a la fuente de alimentación.
- Colocar el interruptor principal del aparato de medición -M4100- en la posición “conectado”.
- Seleccionar la función “medición de pérdida de potencia” en el aparato medidor de pérdida de potencia -M4100- y en el módulo de control -M4200-.
- Seleccionar el modo “prueba” en el aparato medidor de pérdida de potencia -M4100-.
- Seleccionar el voltaje de prueba en 10 KV.
- Liberar los interruptores de seguridad del aparato medidor de pérdida de potencia -M4100-.
- La pantalla del aparato de medición -M4200- indicará cuando la prueba esté concluida.

Después de concluida la medición, desmontar el equipo en el orden siguiente:

- Colocar los interruptores de seguridad del aparato medidor de pérdidas de potencia -M4100- en la posición original.

- Volver al menú principal del aparato medidor -M4200- y seleccionar la opción de “apagar el equipo”.
- Colocar el interruptor principal del aparato de medición -M4100- en la posición “desconectado”.
- Desconectar el aparato medidor de pérdidas de potencia -M4100- de la fuente de alimentación.
- Desconectar los terminales de prueba del medidor de pérdidas de potencia -M4100- de los terminales del pararrayos.
- Cortocircuitar los terminales del pararrayos por un tiempo igual a 5 veces el tiempo que este permaneció energizado.
- Remover las conexiones entre el módulo de medición M4100 y el módulo de control M4200.

### **3.2 Prueba en línea**

Es el tipo de pruebas que se realizan con el pararrayos objeto de medición en servicio, es decir montado, conectado y energizado dentro del esquema de protección por sobrevoltaje del que forma parte. Estas pruebas se realizan a la intemperie, bajo las condiciones ambientales del lugar, por lo que la instrumentación utilizada en la realización de dichas pruebas introduce algoritmos de ajuste de las condiciones ambientales a fin de presentar los resultados de la medición con valores ajustados a condiciones ambientales estandarizadas para poder interpretarlos y compararlos sobre una misma base para la toma de decisiones respecto a mantenimiento o sustitución del pararrayos en cuestión.

Estas pruebas tienen la ventaja de no requerir la desconexión y desmontaje del pararrayos, por lo que garantizan un ahorro de tiempo para su realización y una mayor continuidad en el suministro de energía eléctrica al campo de entrada o salida de la subestación a la que pertenece el pararrayos. En esta sección se describirá la secuencia de ensamblaje de los componentes del sistema de monitoreo de corriente resistiva de fuga y el protocolo que se sigue para realizar la prueba.

### **3.2.1 Prueba de corriente de fuga en pararrayos de óxido metálico para alta tensión tipo subestación**

La prueba de corriente de fuga en pararrayos es una prueba que solamente puede realizarse en pararrayos de óxido metálico, porque solamente en este tipo de pararrayos circula de forma permanente una corriente de fuga que puede ser monitoreada y analizada en sus componentes capacitiva y resistiva. La realización de esta prueba comprende una serie de pasos para el ensamblaje de los componentes y preparación del sistema de monitoreo de la corriente resistiva de fuga; concluidos estos pasos de preparación del sistema, se pone en funcionamiento el sistema, siguiendo una secuencia de operaciones para la toma de mediciones, y luego de concluirse estas, el equipo se retira siguiendo el orden inverso.

#### **3.2.1.1 Objetivo de la medición de la corriente de fuga en pararrayos de óxido metálico para alta tensión tipo subestación**

Debido a que la realización de esta prueba se basa en el seguimiento del comportamiento de la corriente resistiva de fuga del pararrayos mientras este está conectado a la red, el objetivo de esta prueba es determinar el valor de la componente resistiva de la corriente de fuga del pararrayos y la evolución de dicho valor, porque este se constituye en el indicador que permite la toma de decisiones en cuanto al mantenimiento o reemplazo del pararrayos, antes que falle.

### **3.2.1.2 Montaje y consideraciones del sistema de monitoreo de corriente resistiva de fuga**

Hay varias consideraciones importantes a tomar en cuenta respecto a los componentes y el sistema de monitoreo de corriente resistiva de fuga. Dichas consideraciones abarcan tópicos relacionados con la fuente de poder, puesta a tierra, instalación de los componentes y algunas precauciones al poner en marcha el sistema; estos tópicos se exponen esta sección.

#### **3.2.1.2.1 Fuente de poder**

El sistema de monitoreo de corriente resistiva de fuga LCM II puede ser alimentado con cualquiera de dos tipos diferentes de fuentes de poder: fuente de poder AC o DC. La batería interna del sistema inicia su proceso de carga tan pronto como el sistema es conectado a una fuente externa de energía. Las opciones de alimentación del sistema de monitoreo de corriente resistiva de fuga, le dan completa flexibilidad en lugares donde, por ejemplo, no es fácilmente accesible una fuente de 230 Volts AC.

Cuando se utiliza una fuente de poder de AC, se debe estar seguro que el voltaje de suministro se encuentra en el rango apropiado de voltaje antes de conectar el sistema al mismo. Cuando el instrumento se conecta a la fuente, la lámpara roja –LED- en el panel frontal se encenderá. Si se utilice una fuente de energía de DC, se debe estar seguro que la fuente externa de voltaje DC se encuentra operando en el rango de voltaje apropiado. La fuente de energía DC se conecta al LCM II haciendo uso de un cable blindado de 5 pines. La batería del sistema queda completamente cargada luego de transcurridas 1.5 horas después de haberse conectado el sistema a una fuente apropiada AC o DC de energía. La carga completa de la batería permite que el sistema pueda operar de manera autónoma por aproximadamente 8 horas.

### 3.2.1.2.2 Aterrizaje del sistema de medición LCM II

El aterrizaje del LCM II puede realizarse de dos maneras diferentes, dependiendo del tipo de medición que se realice. Los aterrizajes que se pueden realizar son los siguientes:

- Mediciones de campo: cuando las mediciones se realizan a un pararrayos montado en campo, el LCM II debe aterrizar localmente con el conector de tierra de la fuente desconectado. El cable de 5 metros para conexión a tierra junto con la mordaza deben conectarse según lo muestra la figura 29. El sistema de aterrizaje del LCM II se conecta a la tierra local de la subestación.

**Figura 29. Conexiones a realizar para aterrizar el LCM II cuando se realizan mediciones en campo**



**Fuente:** TransiNor As, “User manual LCM II versión 1.01”, p.19

- Mediciones en laboratorio: si las mediciones de corriente resistiva de fuga se realizan a un pararrayos en laboratorio, el LCM II puede aterrizar de cualquiera de las siguientes formas: en la tierra local, según lo indicado en la figura 29, o mediante el aterrizaje de la fuente de poder, según muestra la figura 30 uniendo los conectores de tierra “CHASSIS GND” y “MANIS GND”

**Figura 30. Conexiones a realizar para aterrizar el LCM II cuando se realizan mediciones en laboratorio**



**Fuente:** TransiNor As, “User manual LCM II versión 1.01”, p.19

### 3.2.1.2.3 Instalación de la sonda de corriente

La sonda de corriente junto con el cable de medición, de 5 metros, son mostrados en la figura 31.

**Figura 31. Sonda de corriente, cable de medición y conector para LCM II**



**Fuente:** TransiNor As, “User manual LCM II versión 1.01”, p.20

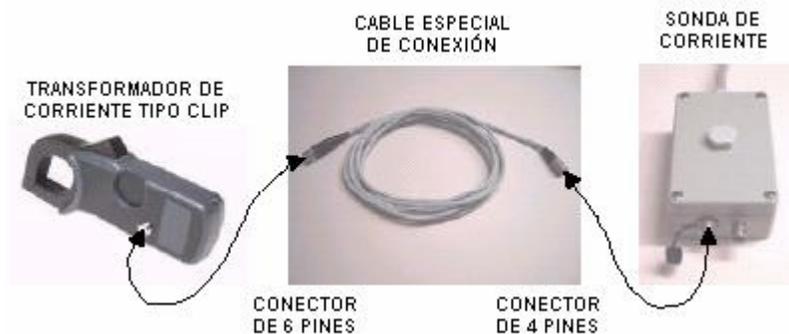
Como se observa en la figura, la sonda de corriente tiene dos conectores de entrada, uno para el transformador de corriente y el otro para la sonda de campo, y consiste en una sonda electrónica para medir la corriente total de fuga del pararrayos y la corriente de la sonda de campo; también posee un sensor de temperatura y un sistema de

circuitos para proteger el sistema contra sobrevoltaje. La sonda de corriente se conecta a la entrada “PROBE” del panel posterior del LCM II a través del conector mostrado a la derecha de la figura 31.

#### 3.2.1.2.4 Instalación del transformador de corriente tipo Clip

El transformador de corriente tipo clip se conecta a la sonda de corriente mediante un cable especial de conexión de 2.5 metros de largo, de la forma mostrada en la figura 32.

**Figura 32. Transformador de corriente tipo clip, sonda de corriente y cable especial de conexión**



**Fuente:** TransiNor As, “User manual LCM II versión 1.01”, p.20

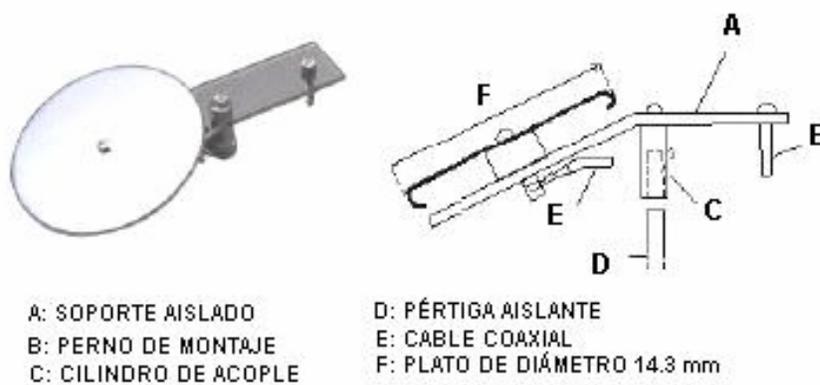
El extremo del cable que posee 6 pines en el conector, es el que se conecta al transformador de corriente tipo clip, mientras que el otro extremo del cable, con un conector de 4 pines se conecta a la sonda de corriente. Durante la realización de mediciones en campo, la mordaza del transformador de corriente tipo clip debe encerrar al cable de aterrizaje del pararrayos. Si el transformador de corriente tipo clip se va a

utilizar para realizar mediciones por períodos prolongados, debe ser protegido contra la lluvia. El transformador de corriente tipo clip está provisto de un sistema de enganche de mordaza, para asegurar que el núcleo de hierro del medidor se cierre completamente durante la medición, de lo contrario, un núcleo mal cerrado afectará los resultados de las mediciones.

### 3.2.1.2.5 Instalación de la sonda de campo

El sistema de la sonda de campo consiste en el ensamble de una antena y un cable coaxial, según se muestra en la figura 33. El cable coaxial, con longitud de 5 metros se conecta a la entrada de la sonda de campo, según se pudo ver en la figura 31. El plato de aluminio que constituye la antena tiene un diámetro de 14.3 mm.

**Figura 33. Ensamblaje de la sonda de campo**



**Fuente:** TransiNor As, “User manual LCM II versión 1.01”, p.21

Durante la realización de las mediciones, la sonda de campo debe colocarse cerca de la base del pararrayos. Cuando el sistema del LCM II se usa como equipo portátil, la sonda de campo puede colocarse en la base del pararrayos mediante el uso de la pértiga provista para tal efecto. La pértiga está hecha de un material aislante -fibra de vidrio- y posee una longitud de 3 metros. La sonda de campo se coloca en el extremo de la pértiga. En ese extremo se encaja el cilindro que posee la sonda de campo en su soporte, con la pértiga. Luego de realizado el acople entre la sonda de campo y la pértiga, la sonda de campo puede ser levantada a la altura de la base del pararrayos y dejada allí durante el tiempo de la medición. Debe tenerse la precaución de que el plato de la sonda de campo no tenga contacto con parte alguna del pararrayos ni de su base. El montaje descrito anteriormente hace posible realizar mediciones cuando el pararrayos está energizado y en servicio.

Cuando se va a instalar permanentemente el sistema de monitoreo de corriente resistiva de fuga, por un largo período de medición, puede instalarse un montaje fijo en la base del pararrayos para que soporte a la sonda de campo. Esto es sumamente útil en algunas subestaciones, donde los pararrayos pueden estar instalados de tal forma que sea impráctico usar la pértiga para la colocación de la sonda de campo, y como consecuencia de ello deba realizarse la desconexión de la línea de energía para poder efectuar la colocación de la sonda.

Durante la colocación de la sonda de campo en la base del pararrayos deben observarse ciertas precauciones, como por ejemplo, nunca levantar la antena mas allá de la base del pararrayos y no desconectar el cable coaxial de la sonda de corriente cuando la sonda de campo está colocada en la base del pararrayos, ya que esto último podría provocar choques eléctricos al operador que desmonta el equipo de medición. Es muy importante respetar el orden de la conexión y desconexión de los componentes del sistema de monitoreo de corriente resistiva de fuga.

### **3.2.1.3 Protocolo de la medición de la corriente resistiva de fuga en pararrayos de óxido metálico para alta tensión tipo subestación**

Luego de haber explicado en la sección anterior diversas consideraciones previas a la realización del monitoreo de la corriente resistiva de fuga de pararrayos de óxido metálico, y de la conexión de los diversos componentes del sistema LCM II, a continuación se describirá los pasos a seguir para la realización de esta prueba y el orden en que estos pasos deben realizarse, tanto para el inicio de la prueba como para el desmontaje del sistema, una vez concluida la medición.

El protocolo de prueba para medición de la corriente resistiva de fuga de pararrayos de óxido metálico, consta de los siguientes pasos, los cuales deben llevarse a cabo en el orden indicado:

- Alimentar el LCM II con una fuente de energía apropiada.
- Aterrizar el instrumento, de acuerdo a lo explicado en el apartado 3.2.1.2.2 “Aterrizaje del sistema de medición LCM II”.
- Conectar la sonda de corriente, mediante el cable de medida, al instrumento.
- Conectar el transformador de corriente tipo clip a la sonda de corriente y colocar el gancho del transformador de corriente alrededor del cable de puesta a tierra del pararrayos objeto de medición. Si existiera un contador de descargas electro atmosféricas conectado al conductor de aterrizaje del pararrayos, el gancho del transformador de corriente debe enganchar al conductor de tierra del pararrayos antes de que pase por el contador de descargas electro atmosféricas.

- Conectar el cable coaxial de la sonda de campo al conector de entrada respectivo de la sonda de corriente.
- Acoplar la sonda de campo con la pértiga.
- Colocar la sonda de campo en la proximidad de la base del pararrayos objeto de medición y dejarla allí durante el tiempo que se realice la prueba. Verificar que el plato no tiene contacto con la base del pararrayos ni la estructura que lo soporta.
- Colocar el interruptor de alimentación del sistema LCM II en la posición de “encendido”.
- Dejar que el sistema realice las mediciones de corriente resistiva de fuga.

Para retirar el equipo de medición una vez concluidas las mediciones, deben seguirse los pasos anteriores, pero en orden inverso, es decir:

- Colocar el interruptor de alimentación del sistema LCM II en la posición “desconectado”.
- Alejar la sonda de campo de la proximidad de la base del pararrayos objeto de medición.
- Desacoplar la sonda de campo de la pértiga.
- Desconectar el cable coaxial de la sonda de campo del conector de entrada de la sonda de corriente, al cual se encuentra conectado.

- Desenganchar el transformador de corriente tipo clip del conductor de tierra del pararrayos. Luego desconectar el transformador de corriente tipo clip a la sonda de corriente, a la cual se encuentra conectado.
- Desconectar la sonda de corriente del instrumento, mediante retirar el cable de medición que los une.
- Retirar las conexiones de aterrizaje del instrumento.
- Desconectar el cable de alimentación -del LCM II- de la fuente de energía.
- Guardar apropiadamente los componentes del sistema LCM II en el estuche provisto para ello.

#### **4. MEDICIONES DE CAMPO Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos para cada una de las diferentes mediciones tratadas en los capítulos precedentes y que son realizadas por el Instituto Nacional de Electrificación –INDE- a pararrayos de óxido metálico tipo subestación instalados en subestaciones de su propiedad; posterior a la presentación de los resultados por tipo de prueba, se realiza una discusión de los mismos con el objeto de llegar a una interpretación que permita predecir el estado de los pararrayos a los cuales corresponden las mediciones. Para ejemplificar la presentación e interpretación de los resultados de las pruebas, se utilizan únicamente dos diferentes pararrayos para cada tipo de prueba, y su estado se determina con base en los criterios propios de la prueba aplicada. Los resultados relacionados con la prueba de medición del factor de potencia de aislamiento de pararrayos se excluyen de la consideración de este capítulo, debido a que es una prueba que el laboratorio de mediciones y reparaciones del INDE no aplica a sus pararrayos.

Para cada pararrayos se especifican datos relativos al fabricante, número de serie, identificación del pararrayos en la red, condiciones ambientales a que se realizaron las mediciones -temperatura ambiente, humedad, intemperie- voltaje nominal del pararrayos, voltaje aplicado en la prueba, etcétera, según sea el caso.

Primeramente se presentan y discuten los resultados obtenidos en la medición de aislamiento, luego los obtenidos con la medición de pérdidas de potencia y finalmente los resultados obtenidos con la medición de corriente resistiva de fuga.

## **4.1 Resistencia de aislamiento**

### **4.1.1 Resultados de medición de resistencia de aislamiento**

Los resultados obtenidos en la aplicación de la prueba de aislamiento se presentan en las tablas VI y VII, las cuales, también presentan información relativa al pararrayos. La Tabla VI presenta los resultados del pararrayos denominado para efectos del presente trabajo de graduación como “pararrayos A” y la tabla VII presenta los resultados del pararrayos denominado “pararrayos B”.

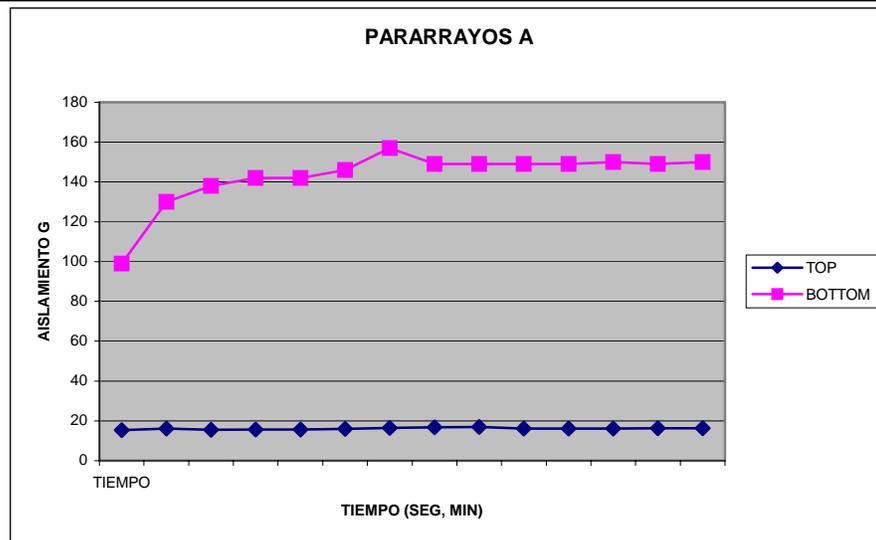
### **4.1.2 Discusión de resultados de medición de resistencia de aislamiento**

Los resultados mostrados en la Tabla VI muestran la tendencia de comportamiento de la resistencia eléctrica de los pararrayos medidos. Cada pararrayos está constituido por dos bloques separados que son acoplados en serie de forma mecánica y eléctrica cuando el pararrayos es montado al sistema de potencia. Los dos bloques de un pararrayos se denominan TOP y BOTTOM; el bloque TOP es el bloque superior al cual se conecta la línea que se energizará y el bloque BOTTOM es el bloque inferior que se asienta mecánicamente sobre la base o pedestal de la instalación. La unión serie de los dos bloques forma el cuerpo del pararrayos.

En la realización de esta prueba, las mediciones fueron tomadas cada minuto a lo largo de 10 minutos. Para el primer minuto de medición se registraron los valores de resistencia eléctrica cada 15 segundos. Para una mejor comprensión de los resultados tabulados, se complementó cada tabla con una gráfica que presenta los valores de resistencia medidos durante los 10 minutos.

**Tabla VI. Resultados de medición de aislamiento en pararrayos A.**

INSULATION TEST				
Company: ETCEE – INDE			Test Date: Feb 18 2005	
División: CENTRAL			Test Time : 07:35:25 a.m.	
Location: TALLER ELÉCTRICO GUATE S				
<b>Identification</b>				
Mfr Joslyn			CCT Desig: PARARR. 230	
Top Serial # : 8155CS180TBADBA-1			Weather: INDRS	
Bot Serial # : 8155CS180TBADBA-2			RH : 71%	
Air temp: 21 deg C				
<b>Surge Arrester Tests</b>				
		G?		
	TIME	TOP	BOTTOM	TEST KV
SECOND	15	15.26	99	5
	30	16.16	130	5
	45	15.46	138	5
	60	15.66	142	5
	1	15.66	142	5
MINUTES	2	15.9	146	5
	3	16.5	157	5
	4	16.8	149	5
	5	17	149	5
	6	16.2	149	5
	7	16.1	149	5
	8	16.2	150	5
	9	16.3	149	5
	10	16.3	150	5



Fuente: INDE

**Tabla VII. Resultados de medición de aislamiento en pararrayos B.**

**INSULATION TEST**

Company: ETCEE – INDE  
 División: CENTRAL  
 Location: TALLER ELÉCTRICO GUATE S

Test Date: Feb 18 2005  
 Test Time : 08:20:20 a.m.

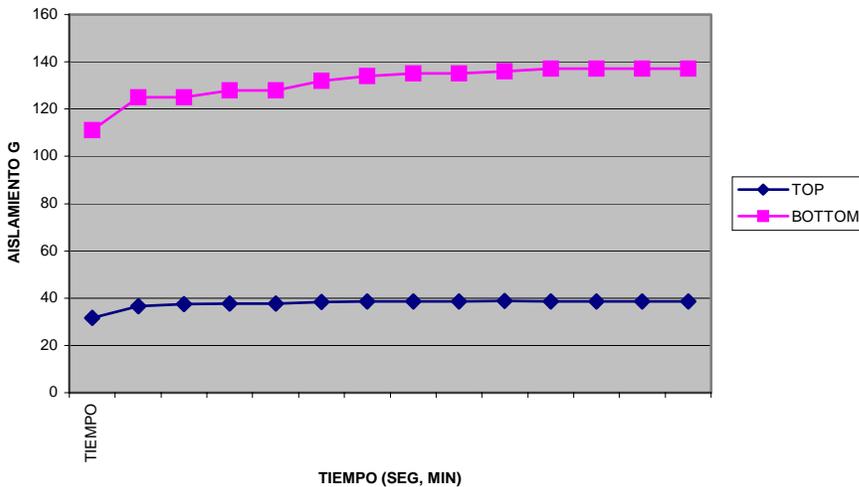
**Identification**

Mfr Joslyn  
 Top Serial # : 8155CS180TBADBA-3  
 Bot Serial # : 8155CS180TBADBA-4  
 Air temp: 21 deg C RH : 71%  
 CCT Desig: PARARR. 230  
 Weather: INDRS

**Surge Arrester Tests**

		G?		
	TIME	TOP	BOTTOM	TEST KV
SECOND	15	31.66	111	5
	30	36.6	125	5
	45	37.4	125	5
	60	37.8	128	5
	1	37.8	128	5
MINUTES	2	38.4	132	5
	3	38.6	134	5
	4	38.6	135	5
	5	38.6	135	5
	6	38.8	136	5
	7	38.6	137	5
	8	38.6	137	5
	9	38.6	137	5
	10	38.6	137	5

**PARARRAYOS B**



Fuente: INDE

Los resultados de esta prueba se interpretan a partir de la tendencia de comportamiento de la resistencia eléctrica a lo largo del tiempo de la prueba, y no únicamente como un valor puntual que indique una condición aceptable o defectuosa del pararrayos medido.

La tendencia del comportamiento de la resistencia eléctrica del pararrayos A corresponde con el comportamiento típico de dispositivos capacitivos –como el pararrayos- en los cuales la resistencia medida con el megger es variable durante los primeros minutos -aproximadamente de forma exponencial- debido a las corrientes transitorias de fuga y absorción que circulan inicialmente. Al paso de 7 minutos, el valor de la resistencia tiene menos variaciones debido a la desaparición casi completa de las corrientes de absorción, tanto en el bloque TOP como en el bloque BOTTOM. Finalmente, en el minuto 9 de medición la corriente tiene un valor que varía poco y puede considerarse constante. El valor medido al final de la prueba fué 16.3 G $\Omega$  y 150 G $\Omega$  para los bloques TOP y BOTTOM, respectivamente. Los resultados mostrados en la tabla VI indican un comportamiento del aislamiento similar al típico esperado en un pararrayos, donde predominan las características capacitivas. El bloque TOP de estos pararrayos es de menor tamaño y volumen que el bloque BOTTOM, por esa razón hay diferencia entre ambos en el valor de la resistencia medida. Por lo arriba indicado y porque la medición final se encuentra en el orden de G $\Omega$ , se concluye que el pararrayos A -en sus dos bloques- se encuentra en buen estado.

Para el pararrayos B, al que corresponde la tabla VII, los datos fueron registrados y graficados de la misma forma que para el pararrayos A, a lo largo de los 10 minutos de la prueba. Los resultados muestran que el comportamiento de la resistencia eléctrica del pararrayos B es típico y que al cabo de 9 minutos se estabiliza en un valor de 38.6 G $\Omega$  y 137 G $\Omega$  para los bloques TOP y BOTTOM, respectivamente. En virtud del comportamiento observado y del valor final en que se estabilizó la resistencia eléctrica del pararrayos, se concluye que el estado del pararrayos B -en sus dos bloques- es bueno.

## 4.2 Pérdidas de potencia

### 4.2.1 Resultados de medición de pérdidas de potencia

Los resultados correspondientes a la medición de pérdida de potencia se presentan en la tabla VIII, identificando como pararrayos C al pararrayos cuyos resultados de pérdida de potencia se presentan en la fila 1 y tiene número de serie 5321632, e identificando como pararrayos D al pararrayos cuyos datos se presentan en la fila y tiene número de serie 5321633. En este caso se trata de pararrayos tipo subestación de un solo cuerpo.

**Tabla VIII. Resultados de medición de pérdidas de potencia en pararrayos C y D.**

INDIVIDUAL SURGE ARRESTER INSULATION TEST 09-17-2004 10:39 Pg:1								
Company: ETCEE – INDE								
División: CENTRAL								
Location: TALLER ELÉCTRICO GUATE S				Special ID: PARARRAYOS B.2 69KV.				
Test Date: Jan 20 2001		Test Time : 09:33:32						
<b>Identification</b>								
Air temp: 20 deg C		RH : 69%		CCT Desig: PARARRAYOS 69 KV				
				Weather: CLOUDY				
<b>Surge Arrester Tests</b>								
No.	Location	Mfr	S / N	Type	R - KV	T - KV	mA	Watts
1	FASE R	ASEA	5321632	XAL	60	10	0.303	0.027
2	FASE S	ASEA	5321633	XAL	60	10	0.297	0.025
3	FASE T	ASEA	5321634	XAL	60	10	0.299	0.027

Fuente: INDE

#### **4.2.2 Discusión de resultados de medición de pérdidas de potencia**

Los datos obtenidos en la medición de pérdidas de potencia deben ser cotejados con los datos de pérdidas de potencia típicas que el fabricante del pararrayos proporciona para pararrayos que se encuentran en buen estado. Dichos datos se presentan en forma de tablas que registran los resultados de las mediciones que el fabricante ha realizado en laboratorio a un determinado número de pararrayos; en dichas tablas se enlistan los pararrayos por marca y número de serie. Las tablas muestran rangos de valores de pérdidas de potencia -equivalentes a voltaje de prueba de 10 kV- indicando cuantos pararrayos medidos coincidieron en cada rango. De esta manera los valores proporcionados por el fabricante mediante tablas se convierten en indicativos típicos que muestran la frecuencia de ocurrencia de los resultados de la medición en cada rango. Algunas de estas tablas se presentan en el apéndice A, el cual contiene un extracto de la información presentada por Doble Engineering Company en la sección 3 del manual Guía de pruebas a pararrayos, denominada “Tabulación de pérdidas dialécticas, datos de prueba para pararrayos”.

Las tablas anteriormente descritas representan la referencia contra la cual se interpretará los resultados obtenidos en la medición de pérdidas de potencia. El criterio aplicado en la interpretación de resultados de esta medición es: si los resultados de la medición indican que el pararrayos medido en la prueba está muy alejado del rango considerado típico, deberá tomarse las medidas pertinentes en cuanto a su mantenimiento o reemplazo, según la anomalía detectada en la medición.

En caso no existan datos de pérdidas de potencia proporcionados por el fabricante, se debe realizar mediciones a pararrayos nuevos para iniciar un registro que se constituya en la referencia contra la cual se compararán las futuras mediciones de otros pararrayos.

Las variaciones en los resultados obtenidos respecto a las tablas de referencia que muestran los valores de pérdidas de potencia típicos, pueden deberse a diferentes causas. En caso que los valores medidos sean superiores a los valores típicos, las causas pueden ser:

- Contaminación por humedad, suciedad, polvo en las superficies internas o externas del pararrayos.
- Depósitos de sal de aluminio causadas por la interacción entre la humedad y los productos resultantes del efecto corona.
- Porcelana de la cubierta externa fracturada.

En caso de mediciones de pérdidas de potencia inferiores a los valores típicos, las causas pueden ser:

- Discos de MOV dañados.
- Ensamblaje incorrecto.

La tabla VIII presenta el formato del reporte generado por el medidor M 4000 con la información de los resultados de las mediciones hechas a los pararrayos C y D. Los resultados de la medición de pérdidas de potencia se localizan debajo de la columna Watts, o sea, el conjunto de datos colocados en el extremo derecho del formato.

En el caso del pararrayos C, el valor de pérdidas de potencia es de 0.027 Watts. Por tratarse de un pararrayos marca ASEA tipo XAL, se debe cotejar el valor de la medición con las tablas del apéndice A, específicamente con la tabla que corresponde a pararrayos marca ASEA; en este caso corresponde la tabla I del apéndice.

Según se puede observar en la información de la tabla I del apéndice A, el valor obtenido en el pararrayos C corresponde al rango de 0.002 a 0.049 Watts; en dicho rango el fabricante encontró una frecuencia de 8 unidades, que corresponden al 89 % del total de unidades medidas. Esto indica que el pararrayos C presenta pérdidas de potencia similares a las del 89 % de pararrayos medidos considerados como pararrayos en buenas condiciones por las mediciones del fabricante. Por tal razón, se puede concluir que el pararrayos C se encuentra en buen estado.

Para el pararrayos D, el valor de pérdidas de potencia es de 0.025 Watts; este dato también debe compararse con la tabla I del apéndice A que corresponda a la marca y tipo de pararrayos medido, es decir, marca ASEA tipo XAL . La tabla correspondiente muestra que las pérdidas de potencia del pararrayos D se encuentran en el rango de 0.002 a 0.049 Watts; en dicho rango –que es el mismo en el cual coincidió el pararrayos C- el fabricante encontró una frecuencia de 8 unidades, que corresponden al 89 % del total de unidades medidas. El pararrayos D presenta pérdidas de potencia similares a las del 89 % de pararrayos medidos considerados como pararrayos en buenas condiciones por las mediciones del fabricante. Lo antes expuesto lleva a concluir que el pararrayos D se encuentra en buen estado.

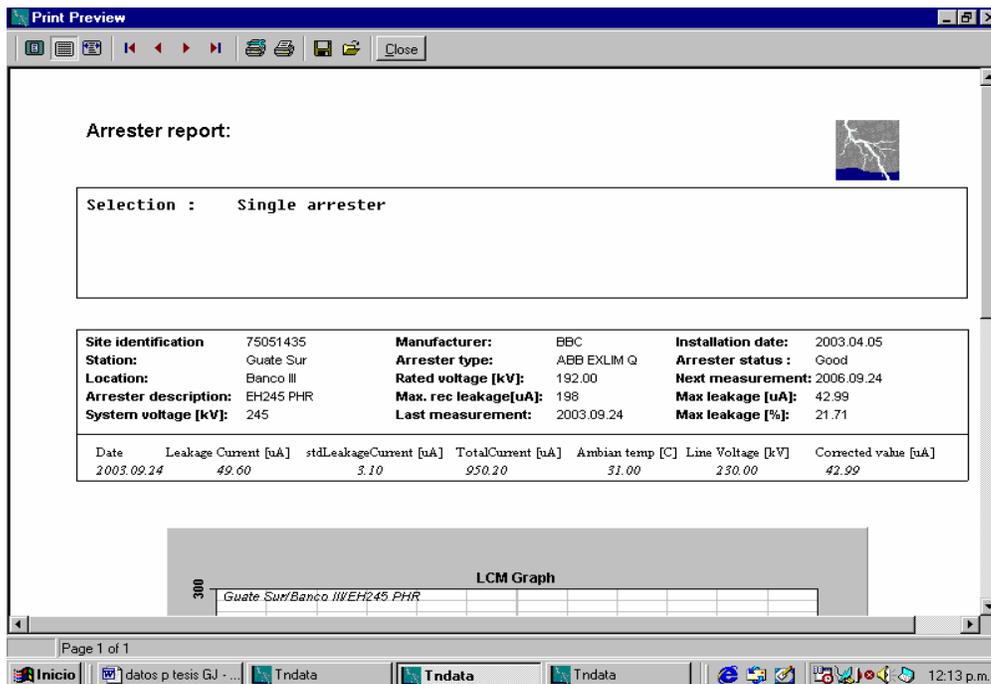
### **4.3 Corriente resistiva de fuga**

Los resultados obtenidos en la medición de la corriente resistiva de fuga para los pararrayos E y F se muestran en las siguientes figuras, generadas como reportes del programa de ambiente Windows creado por TransiNor As –Tndata- para el sistema de administración con PC.

### 4.3.1 Resultados de medición de corriente resistiva de fuga

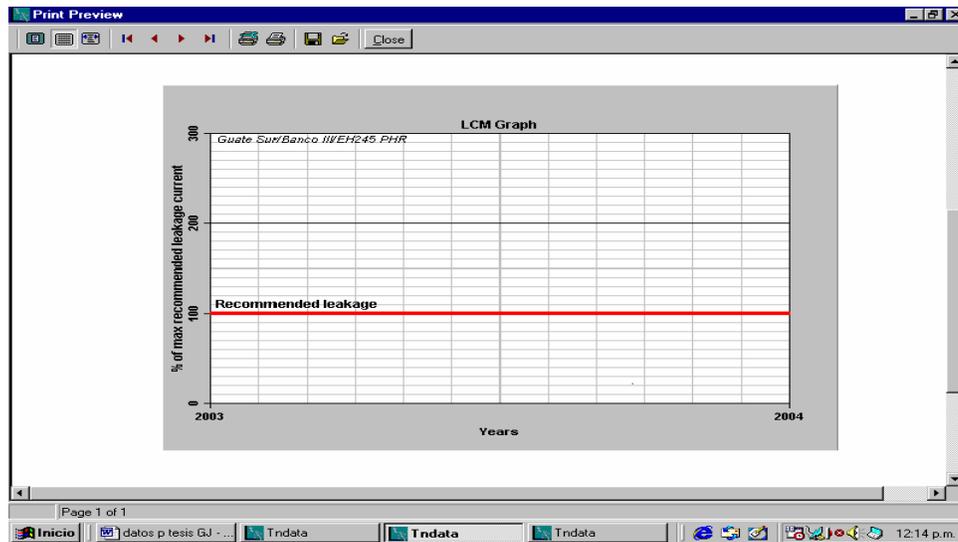
Para el caso del pararrayos E, los datos del pararrayos y los valores numéricos obtenidos en la medición se presentan en la figura 34; la figura 35 muestra la representación gráfica del valor de la corriente resistiva de fuga, respecto al máximo valor de corriente resistiva de fuga recomendada por el fabricante del pararrayos. En el caso del pararrayos F la información es presentada en las figuras 36 y 37.

**Figura 34. Datos de fabricante y resultados de medición de corriente resistiva de fuga de pararrayos E.**



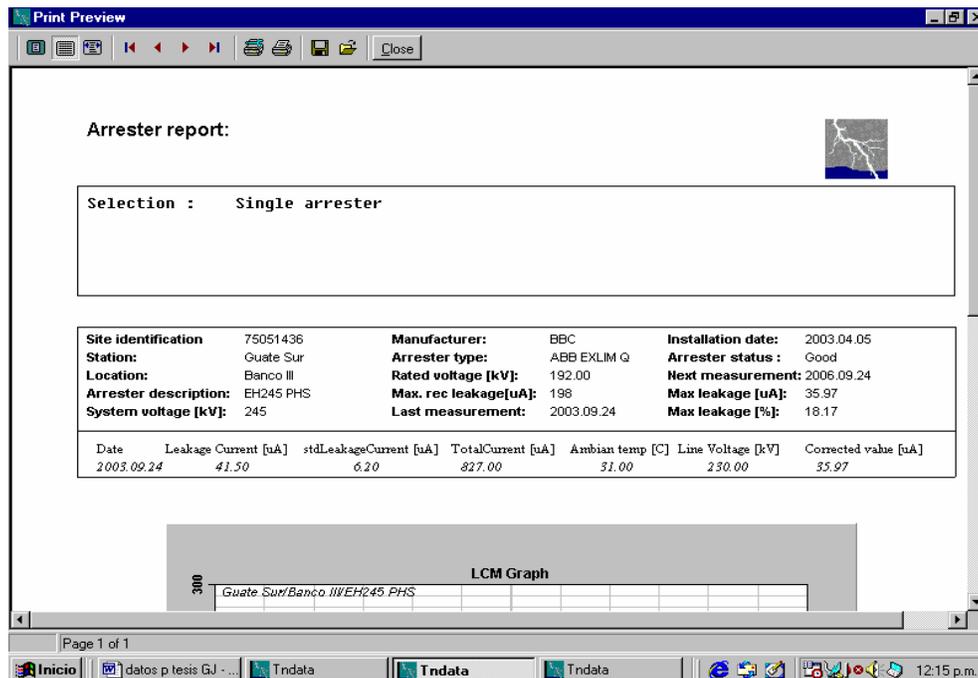
Fuente: INDE

**Figura 35. Representación gráfica de los resultados de medición de corriente resistiva de fuga de pararrayos E.**



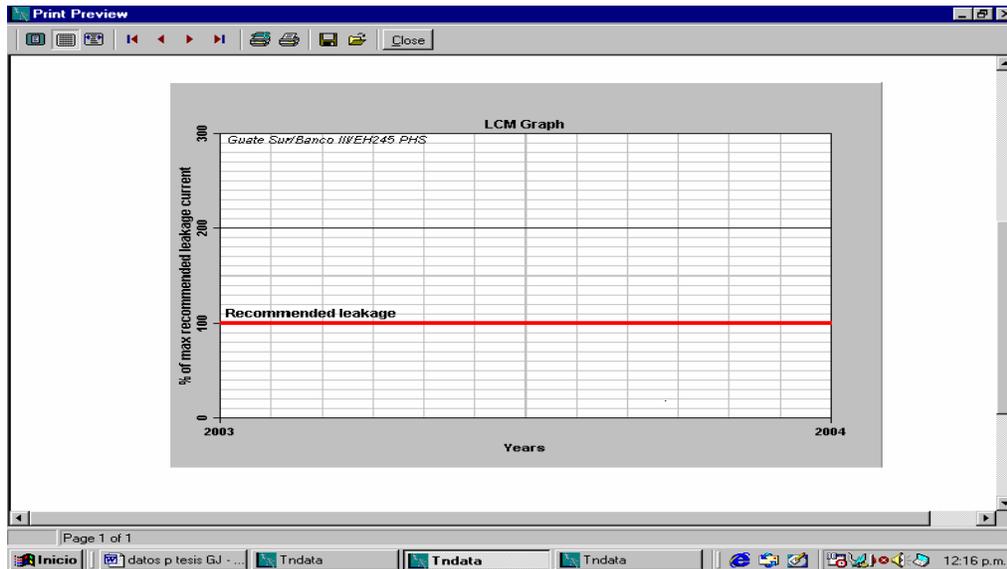
Fuente: INDE

**Figura 36. Datos de fabricante y resultados de medición de corriente resistiva de fuga de pararrayos F.**



Fuente: INDE

**Figura 37. Representación gráfica de los resultados de medición de corriente resistiva de fuga de pararrayos F.**



**Fuente:** INDE

#### **4.3.2 Discusión de resultados de medición de corriente resistiva de fuga**

Las visualizaciones gráficas del valor de la corriente resistiva de fuga del pararrayos como un porcentaje del valor máximo de corriente resistiva de fuga recomendado por el fabricante -considerado este último valor como 100%- que se muestran en las figuras 35 y 37 representan de forma muy comprensible los resultados de las mediciones hechas a los pararrayos E y F. Esta visualización facilita y automatiza la interpretación de los resultados, ya que previamente se ha cargado a la base de datos del LCM II los valores máximos de corriente resistiva de fuga recomendados por los fabricantes de pararrayos.

Para el caso del pararrayos E, según la base de datos cargada al programa, el fabricante del pararrayos tipo ABB EXLIM Q recomienda como valor máximo de corriente de fuga -Max. Rec leakage  $\mu\text{A}$ - permisible en el pararrayos, una corriente de 198  $\mu\text{A}$ . El valor corregido registrado en la medición es de 42.99  $\mu\text{A}$ , que equivale al 21.71% del valor máximo permisible recomendado. La experiencia en la realización de estas mediciones en Noruega -país de donde es originaria esta tecnología- muestra que en los pararrayos nuevos, el valor de la corriente resistiva de fuga usualmente oscila entre 20% y 30% del valor máximo -100%- recomendado por el fabricante. Debido a que esta medición se hizo 5 meses después de instalado -nuevo- el pararrayos, el valor de la corriente resistiva de fuga medido es aceptable porque se encuentra en el rango esperado. En este caso se concluye que el pararrayos medido se encuentra en perfectas condiciones.

Los resultados de la figura 36 muestran que el valor de la corriente resistiva de fuga en el pararrayos F, tipo ABB EXLIM Q es de 35.97  $\mu\text{A}$ . Este valor corresponde al 18.17% del valor de corriente resistiva de fuga máximo -100%- recomendado por el fabricante, que es de 198  $\mu\text{A}$ . Debido a que el pararrayos nuevo se instaló en abril del 2004 y la medición fue hecha en septiembre del mismo año, el valor de la medición hecha al pararrayos es aceptable porque se encuentra en el rango esperado, por lo cual se concluye que el estado del pararrayos F es bueno.

En el Apéndice B se presenta un listado de pararrayos de diferentes marcas, junto con el valor máximo de corriente resistiva de fuga que el fabricante recomienda para cada uno de ellos. Listados mas extensos, similares al mostrado, pueden usarse como una guía en la interpretación de las mediciones de corriente resistiva de fuga cuando no se dispone de un sistema que tenga una base de datos cargada.

Las mediciones realizadas a pararrayos del sistema eléctrico interconectado de Noruega, donde se lleva registro del comportamiento de la corriente resistiva de fuga de pararrayos desde 1989, muestran que normalmente, entre los años 7 y 10 de haberse instalado los pararrayos, estos presentan mayor probabilidad de falla; eso se refleja en que la corriente resistiva de fuga medida se aproxima mucho a alcanzar el 100% del valor máximo aceptable indicado por el fabricante, por lo que se recomienda la realización de mantenimiento al pararrayos o su reemplazo.

Para el caso de los pararrayos medidos en esta prueba -pararrayos E y F-, la plantilla de reporte muestra que se ha programado la realización de las mediciones cada tres años. En caso ocurran eventos especiales de falla en otros nodos de la red, cercanos al área de protección de los pararrayos medidos, o que ocurran cambios en la magnitud de los flujos de carga en la barra a la cual está conectado el pararrayos, se deberá realizar una medición a estos pararrayos antes de esas fechas. La razón es que las condiciones de estrés a las que se encontraría sometido el pararrayos bajo esos cambios serían mayores.

## CONCLUSIONES

1. Los pararrayos de óxido metálico para alta tensión tipo subestación presentan características de generación de armónicos de corriente de tercer orden que describen las condiciones de fatiga del varistor interno del pararrayos, permitiendo, de esa forma, conocer la aproximación al fin de la vida útil del pararrayos antes que este falle.
2. Los equipos comerciales de medición utilizados en la realización de las pruebas predictivas a pararrayos de óxido metálico para alta tensión tipo subestación integran en una sola unidad diversos aparatos básicos que en una sola medición registran diferentes parámetros predictivos del estado del pararrayos y los comparan con una base de datos de referencia, previamente cargada al medidor para automatizar la interpretación de los resultados.
3. Los protocolos de prueba aplicados a pararrayos de óxido metálico para alta tensión tipo subestación realizadas fuera de línea requieren en todos los casos que en la preparación del pararrayos, previo a la realización de la prueba, se cortocircuiten sus terminales y se realice una limpieza a su superficie para evitar falseo de los resultados y en consecuencia incorrecta interpretación de los resultados.
4. Los criterios de interpretación de resultados de las pruebas predictivas que se realizan a pararrayos de óxido metálico para alta tensión tipo subestación se fundamentan en parámetros de referencia que el fabricante de pararrayos proporciona para las distintas marcas y tipos de pararrayos.



## RECOMENDACIONES

1. Las mediciones de aislamiento requieren el uso de conductores apantallados que eviten las fugas de corriente durante la medición. En caso los conductores de conexión utilizados para realizar la prueba no sean apantallados, deberá evitarse su contacto con superficies metálicas o tierra mediante el uso de estructuras aislantes que los soporten.
2. Si no se dispone de datos del fabricante respecto a parámetros de referencia para interpretar los resultados de las pruebas predictivas realizadas a pararrayos de óxido metálico para alta tensión tipo subestación, para un tipo y marca de pararrayos específico, deberá recurrirse a información disponible de pararrayos similares. Se recomienda medir dichos parámetros en pararrayos nuevos que se encuentren en buenas condiciones a fin de crear un registro que sirva como referencia para la interpretación de los resultados de futuras pruebas predictivas realizadas a pararrayos.
3. En caso de ocurrencia de descargas de sobrevoltajes a tierra a través del pararrayos de óxido metálico para alta tensión tipo subestación, se recomienda la medición de la corriente resistiva de fuga del mismo, para evaluar su estado y calidad después del evento de descarga.
4. Se recomienda que las decisiones relativas a la realización de la medición de la corriente resistiva de fuga no provengan de una gerencia altamente centralizada; en todo caso deberá provenir de una gerencia distribuida que conozca las condiciones ambientales y de fallas de forma regionalizada.



## BIBLIOGRAFÍA

ENRIQUEZ, Harper. **Elementos de diseño de subestaciones eléctricas**. Limusa Noriega editores, 2005, 2da edición. México. 626p.

RAÚL MARTIN, José. **Diseño de subestaciones eléctricas**. McGraw-Hill, 1992, México.

SÁNCHEZ SÁNCHEZ, Roberto Antonio. **Selección de pararrayos en sistemas de potencia**. Tesis USAC, Facultad de Ingeniería 1977. Guatemala. 76p.

TOBIÁS CHAVARRÍA, Guty Ronald. **Protección de líneas de transmisión de 69 kV contra descargas electro atmosféricas usando pararrayos de polímeros de línea y evaluación técnico - económica**. Tesis USAC, Facultad de Ingeniería 1995. Guatemala. 193 p.

BARRIOS ARCHILA, Julio Rolando. **Protección contra sobrevoltajes usando pararrayos de óxido de Zinc**. Tesis USAC, Facultad de Ingeniería 1987. Guatemala. 53 p.

TRANSINOR. **Technical Description LCM II**. 2001. Noruega. 43p.

HELFRICK, Albert D. **Instrumentación electrónica moderna y técnicas de medición**. Prentice Hall, 1990. Versión 1.01. México. 450 p.

### **Bibliografía electrónica**

<http://www.hubellpowersystems.com>

<http://www.htinstruments.com>

<http://www.traceengineering.com>

<http://www.tecnisuport.com>

<http://webster.directhit.com>

<http://www.cepalco.com>

<http://www.stratega.com>

<http://www.secotec.com.ve>

<http://www.caivet.com>

<http://www.radsur.com/instruments>

<http://www.nansen.com.br>

<http://iie.fing.edu.uy>

<http://www.usbr.gov/power/data>

<http://www.iconosrl.com.ar/ensayos1>

<http://www.idm-instrumentos.es>

<http://www.labxnews.com>

<http://www.orbita.starmedia.com>

<http://www.disselectro.com.gt>

<http://www.iberapa.es/>

<http://www.maresa.com/>

<http://www.proind-ingenieria.com.ar/>

<http://www.celsa.com.co/html/producto.htm>

<http://www.lafacu.com>

<http://www.abb.com>



# APÉNDICE A







TABLE IV  
CANADIAN OHIO BRASS  
 (Station Class)

Type	Unit Cat. No.	KV Rating	Test KV	No. Units Tested	EQUIVALENT 10-KV WATTS LOSS							
					.001 to .025	.026 to .049	.056 to .074	.075 to .099	.10 to .19	.20 to .39		
MPR	46790	192	10	3								
MPR	210424	60	10	6	1	5		3				

TABLE V  
CANADIAN OHIO BRASS  
 (Intermediate Class)

Type	Unit Cat. No.	KV Rating	Test KV	No. Units Tested	EQUIVALENT 10-KV WATTS LOSS												
					.010 to .099	.100 to .199	.200 to .299	.300 to .399	.400 to .549	.550 to .699	.700 to .849	.850 to .990	1.00 to 1.24	1.25 to 1.49	1.50 to 1.74	1.75 to 1.99	
GP	46616	30	10	24		1	11	12									
GP	46731	120	10	25		6	12	4	3								

TABLE VI  
CANADIAN WESTINGHOUSE  
(Station Class)

Unit Style No.	KV Rating	Test KV	No. Units Tested	EQUIVALENT 10-KV WATTS LOSS							
				0 to	.50 to	1.00 to	1.50 to	2.00 to	2.50 to	3.00 to	3.50 to
				.49	.99	1.49	1.99	2.49	2.99	3.49	3.99
H-47357A	25	10	379			44	285	48	2		
H-47359A	37	10	383		64	298	17	4			
H-47402	25	10	8			3	2		2	1	
H-79565	15	10	9				1	3	4	1	
H-79567	25	10	47	1	4	23	12	1	6		
H-79569	37	10	15		2	6	4	3			
305A982G01	12	10	6					6			
305A984G04	48	10	18		18						
305A985G01	60	10	73		47	26					
306A555G01	60	10	3						3		
306A574G01	25	10	7			1	5	1			
306A575G01	30	10	6				6				
306A576G01	37	10	16		2	12	2				
411A795G01A	48	10	12		12						

TABLE VII  
E. M. P. ELECTRIC, LONDON  
(Station Class)

Unit Model No.	KV Rating	Test KV	No. Units Tested	EQUIVALENT 10-KV WATTS LOSS						
				.001 to	.050 to	.100 to	.150 to	.200 to	.250 to	
				.049	.099	.149	.199	.249	.299	
BTS-180	18	10	3	3						
HTS-303	60	10	35	2	27	6				
HTS-700	73	10	6	1	4	1				
HTS-700 E	73	10	14		4	6	4			
HTS-131 ST	121	10	22		4	16	2			
HTS-880	97	10	3		3					
HTS-1330	48	10	18	3	12	3				













TABLE XI

LINE MATERIAL

Type	Unit Cat. No.	KV Rating	Test KV	No. Units Tested	EQUIVALENT 10-KV WATTS LOSS															
					.010 to .049	.050 to .099	.100 to .149	.150 to .199	.200 to .249	.250 to .299	.300 to .349	.350 to .399	.400 to .499	.500 to .599	.600 to .699	.700 to .799	.800 to .899			
DL	AL1A25	25	10	3			2	1												
DL	AL1A30	30	10	21				2	1											
DL	AL1A37	37	10	1																
F	AL2A30	30	10	12	9	3														

TABLE XII

MAGRINI

Type	KV Rating	Test KV	No. Units Tested	EQUIVALENT 10-KV WATTS LOSS																
				.01 to .09	.10 to .19	.20 to .29	.30 to .39	.40 to .49	.50 to .59	.60 to .69	.70 to .79									
SV	30	10 (50 Hz)	6																	

TABLE XIII

NEWMAGNE

Type	KV Rating	Test KV	No. Units Tested	EQUIVALENT 10-kv Watts Loss			
				.010 to .049	.050 to .099	.100 to .149	.150 to .199
VSMF	60	10	3				



# APÉNDICE B



### CORRIENTE RESISTIVA MÁXIMA RECOMENDADA

<b>MARCA</b>	<b>TIPO</b>	<b>I<sub>r</sub>, max (μA)</b>
ABB	XAR / EXLIM R	91
	XAQ / XMQ /	130
	XAP-A / XAP-C / EXLIM Q	167
	EXLIM P-A / EXLIM P-B / EXLIM P-D	167
	EXLIM T	251
	XAP-B / EXLIM P-C	331
Bowthorpe	2VACM	91
Ohio Brass	MPR	91
	VN	130
Westinghouse	W1	91



# APÉNDICE C



Con el propósito de ampliar lo expuesto en la sección **2.4.5.3 Método de análisis del armónico de tercer orden con compensación por armónicos en el sistema de voltaje** respecto al cálculo del tercer armónico de la corriente resistiva de fuga -  $I_{3r}$  - y la conversión a series de Fourier para su determinación, a continuación se presenta las funciones y el orden en que el LCM II las evalúa para la determinación de  $I_{3r}$ . Los subíndices utilizados en este apéndice tienen el significado indicado en la sección 2.4.5.3

La medición y monitoreo del tercer armónico de la corriente resistiva de fuga  $I_{3r}$  es muy importante debido a que esta componente armónica refleja el estado de los discos que constituyen el MOV del pararrayos. El LCM II determina el valor de  $I_{3r}$  a través de un análisis a la corriente permanente de fuga del pararrayos; dicho análisis se basa en el modelo mostrado en la figura 3 del capítulo 1, donde se puede observar que la corriente de fuga total, fundamental, es igual a la suma fasorial de la corriente capacitiva, fundamental, de fuga  $I_c$  y de la corriente resistiva, fundamental, de fuga  $I_r$  :

$$I_t = I_c + I_r, \quad \text{de donde se obtiene:}$$

$$I_r = I_t - I_c$$

Esta relación fasorial también es válida para todos los componentes armónicos  $n$  que describen a cada una de las corrientes, es decir,

$$I_{nr} = I_{nt} - I_{nc}, \quad \text{que en términos del tercer armónico es:}$$

$$I_{3r} = I_{3t} - I_{3c}$$

Las mediciones han mostrado que existe una relación establecida entre las magnitudes de la corriente resistiva total (fundamental) de fuga y el tercer armónico de

la corriente resistiva total, fundamental. Típicamente se ha encontrado que la magnitud de la corriente resistiva total, fundamental, de fuga es cuatro veces la magnitud del tercer armónico de la corriente resistiva total, fundamental, es decir,

$$|I_r| = 4 |I_{3r}|$$

Otras relaciones determinadas mediante mediciones dan cuenta que el tercer armónico de la corriente capacitiva de fuga  $I_{3c}$  es igual a tres cuartos de la relación entre las magnitudes de la corriente total de fuga y la corriente total de la sonda de campo, multiplicado por la tercer armónica de la sonda de campo, es decir,

$$I_{3c} = (0.75) * ( |I_{1t}| / |I_{1p}| ) * I_{3p}$$

lo cual permite que el tercer armónico de la corriente resistiva de fuga pueda ser determinado mediante la expresión:

$$I_{3r} = I_{3t} - I_{3c} = I_{3t} - (0.75) * ( |I_{1t}| / |I_{1p}| ) * I_{3p}$$

La anterior expresión requiere que para la obtención de  $I_{3r}$  se conozcan los terceros armónicos de la corriente total de fuga y de la corriente de la sonda de campo; estos terceros armónicos son obtenidos de sus corrientes fundamentales mediante su conversión a series de Fourier.

### **Serie de Fourier**

Toda función periódica puede ser descrita mediante la superposición de funciones trigonométricas o exponenciales que forman una serie armónica. La serie de Fourier de una señal o función periódica  $x(t)$  tiene la forma

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left( a_n \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) + b_n \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) \right)$$

donde:

T : período de la función

n : orden de la armónica

a<sub>0</sub> : valor medio de la función

a<sub>n</sub>, b<sub>n</sub> : coeficientes de las series, amplitudes de las componentes rectangulares.

El vector armónico, favor, correspondiente es:

$$A_n \angle \Phi_n = a_n + j b_n$$

La magnitud del vector armónico se calcula mediante:

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

El ángulo de fase del vector armónico se calcula con la expresión:

$$\Phi_n = \tan^{-1} \left( \frac{b_n}{a_n} \right)$$

La frecuencia f [Hz] y la frecuencia angular  $\omega$  están relacionadas mediante :

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

Considerando la relación anterior, los coeficientes de Fourier se calculan de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x(\omega t) \cdot d(\omega t)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x(\omega t) \cdot \cos(n\omega t) \cdot d(\omega t)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x(\omega t) \cdot \operatorname{sen}(n\omega t) \cdot d(\omega t)$$

Las anteriores expresiones constituyen el fundamento matemático que utiliza el LCM II para la determinación de las armónicas de orden  $n = 3$ . Al aplicar la teoría de las series de Fourier para el propósito del presente trabajo de graduación -que es explicar las funciones matemáticas que evalúa el LCM II para la determinación de las terceras armónicas de la corriente resistiva de fuga, corriente capacitiva de fuga y corriente total de fuga con base en las respectivas corrientes fundamentales -las variables y coeficientes de la serie de Fourier tienen las siguientes interpretaciones:

$X(t)$  : representa, para cálculos independientes entre sí:

- la función de corriente total, fundamental, de fuga  $I_{1t}$
- la función de corriente total, fundamental, de sonda de campo  $I_{1p}$

$a_0$  : representa para cálculos independientes entre sí:

- el valor medio de la función  $X(t)$

$a_n, b_n$  : son los coeficientes de Fourier y representan para cálculos independientes entre sí:

la magnitud de cada componente rectangular del  $n$  armónico; para el caso tratado en este trabajo de graduación representan la magnitud de los componentes rectangulares del tercer armónico ( $n = 3$ ) de la corriente total, fundamental, de fuga y de la corriente total, fundamental, de sonda de campo, es decir, la magnitud de los componentes rectangulares de  $I_{3t}$  y de  $I_{3p}$  respectivamente.

$A_n$  : es la magnitud del vector armónico, fasor, que describe al fasor del  $n$  armónico; para el caso de interés de este trabajo de graduación, representa la magnitud del tercer armónico ( $n = 3$ ) de la corriente total, fundamental, de fuga y de la corriente total, fundamental, de sonda de campo, es decir, representa  $|I_{3t}|$  e  $|I_{3p}|$  respectivamente.

$\Phi_n$  : es el ángulo del armónico, favor,  $n$ . Para el propósito de este trabajo de graduación la completa caracterización de los terceros armónicos de la corriente total y de sonda de campo corresponde a  $n = 3$ .

Como se indicó en párrafos anteriores, la determinación del tercer armónico de la corriente resistiva de fuga  $I_{3r}$  requiere que los armónicos  $I_{3t}$  e  $I_{3p}$  sean conocidos.  $I_{3t}$  e  $I_{3p}$  son calculados por el LCM II aplicando las series de Fourier descritas anteriormente. Una vez calculados  $I_{3t}$  e  $I_{3p}$ , el LCM II procede a efectuar la evaluación de la función

$$I_{3r} = I_{3t} - I_{3c} = I_{3t} - (0.75) * ( |I_{1t}| / |I_{1p}| ) * I_{3p}$$

con lo cual queda determinado el armónico  $I_{3r}$ .