



UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR
Decanato de Estudios de Postgrado
Maestría en Ingeniería Eléctrica

MODELADO DEL COMPORTAMIENTO DE LA SUPERFICIE DE AISLADORES NO CERÁMICOS

Trabajo de Grado presentado a la Universidad Simón Bolívar por:
Julie Desireé Zambrano Jesser

Como requisito para optar al grado de
Magíster en Ingeniería Eléctrica

Realizado con la tutoría del Profesor
Juan Carlos Rodríguez Ferreira

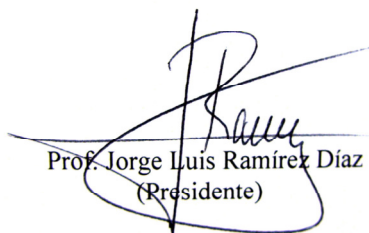
Marzo, 2009



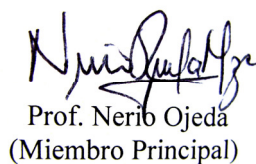
UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR
Decanato de Estudios de Postgrado
Maestría en Ingeniería Eléctrica

MODELADO DEL COMPORTAMIENTO DE LA SUPERFICIE DE AISLADORES NO CERÁMICOS

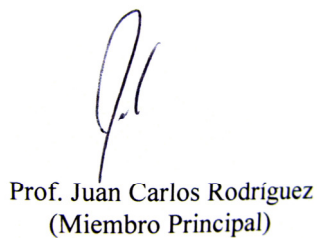
Este Trabajo de Grado ha sido aprobado en nombre de la Universidad Simón Bolívar por el siguiente jurado examinador:



Prof. Jorge Luis Ramírez Díaz
(Presidente)



Prof. Nerio Ojeda
(Miembro Principal)



Prof. Juan Carlos Rodríguez
(Miembro Principal)

Fecha: 05 de Marzo de 2009

RESUMEN

La corriente de fuga es uno de los indicadores utilizados para el estudio de las condiciones de los aisladores cerámicos y poliméricos, ya que está relacionada con el estado de las faldas y los elementos depositados en la superficie. El objetivo de este trabajo es desarrollar un modelo que represente al aislador polimérico sometido a condiciones de degradación acelerada a partir de la medición continua de la corriente de fuga. El modelo consta de parámetros eléctricos calculados a partir dichas mediciones.

Se construyó una cámara de envejecimiento artificial que estuvo operando durante cinco meses, combinando tres de los principales factores degradantes: tensión aplicada, contaminación y humedad; otro factor como rayos ultravioleta no está siendo considerado en este estudio. Dentro de la cámara se dispusieron aisladores poliméricos de goma de silicona de 15 kV nominales, para evaluar el comportamiento superficial de las faldas de los mismos en el laboratorio a partir de la medición de su corriente de fuga. El ciclo de envejecimiento consistía en contaminar el aislador, dejarlo en reposo para el secado del contaminante y por último, someterlo a las condiciones de tensión y humedad. Cada ciclo es de cuatro a cinco días, durante los cuales se monitoreó la corriente de fuga.

Al final de cada mes, se retiraron de la cámara muestras sobre las cuales se contabilizó el efecto de los períodos de reposo sobre la recuperación de las características superficiales y, finalmente, se aplicaron sobre los aisladores pruebas eléctricas complementarias, con el fin de evaluar sus propiedades y condiciones de envejecimiento, tales como tensión de ruptura y resistencia superficial, según las cuales los aisladores no presentaron síntomas de degradación en el período de estudio.

En base a los resultados se obtiene un modelo de la superficie del aislador que describe el comportamiento físico del mismo bajo las condiciones de simulación, que relaciona los parámetros eléctricos con los fenómenos físicos que ocurren en la superficie.

Palabras clave: Aisladores poliméricos, corriente de fuga, envejecimiento artificial, hidrofobicidad, contaminación artificial.

INDICE GENERAL

INDICE DE FIGURAS	VI
INDICE DE TABLAS	X
LISTADO DE SÍMBOLOS Y ABREVIACIONES	XII
CAPÍTULO I.	1
1. INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II.	6
2. TÉCNICAS DE DIAGNÓSTICO	6
2.1. Corriente de Fuga en Aisladores	12
2.1.1. Corriente de Fuga en Aisladores Cerámicos	12
2.1.2. Corriente de Fuga en Aisladores Poliméricos	16
CAPÍTULO III.	18
3. DEGRADACIÓN ARTIFICIAL.	18
3.1. Proceso de Degradación	18
3.2. Cámaras de Envejecimiento Acelerado.	22
3.2.1. Degradación por Efecto Corona	22
3.2.2. Cámara para Degradación por Contaminación	24
3.2.2.1. Descripción del Caolín	25
3.2.3. Cámara para Degradación por Radiación Ultravioleta	27
3.2.4. Cámara para Degradación por Radiación Ultravioleta y Humedad	29
3.2.5. Cámara Rotatoria (RWDT – por sus siglas en inglés)	29
CAPITULO IV.	31
4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	31
4.1. Características Constructivas	31
4.1.1. Características de los Aisladores	31
4.1.2. Descripción de la Cámara de Envejecimiento	32
4.2. Procedimiento Experimental	35
4.2.1. Sistema de Medición de la Corriente de Fuga	35
a. Equipos de medición	35
b. Procesamiento de las mediciones: Descripción del Software	37

	IV
4.2.2. Contaminación de los Aisladores	37
4.2.2. Ciclo de Envejecimiento	38
4.3. Técnicas de Diagnóstico	41
CAPÍTULO V.	42
5. CORRIENTE DE FUGA EN AISLADORES POLIMÉRICOS	42
5.1. Mediciones de la Corriente de Fuga	43
5.1.1. Resultados dentro de la cámara	43
5.1.2. Resultados fuera de la cámara	51
5.2. Procesamiento de las Mediciones	55
5.2.1. Dentro de la cámara	55
5.2.2. Resultados fuera de la cámara	60
5.3. Evaluación de Resultados	63
5.3.1. Dentro de la cámara	63
5.3.2. Fuera de la cámara	66
5.3.2.1. Coeficiente de Degradación	66
5.4. Aisladores Contaminados con Sal	70
5.4.1. Resultados Obtenidos	70
5.4.2. Influencia del Modo de Contaminación.	75
CAPITULO VI.	77
6. MODELO ELÉCTRICO DEL AISLADOR	77
6.1. Modelo del Aislador Cerámico.	77
6.2. Modelo del Aislador Polimérico	80
6.2.2. Antecedentes	80
6.2.3. Modelo Eléctrico Propuesto.	82
6.2.3.1. Interpretación de los Parámetros del Modelo Propuesto	84
6.2.3.1.1. Aislador sin contaminación	85
6.2.3.1.2. Aislador contaminado con la solución salina	87
6.2.3.1.3. Aislador Contaminado con Sal y Caolín	87
6.2.3.2. Formulación Matemática	88
6.2.3.3. Cálculo de los Parámetros Modelados	94
6.2.3.3. Aplicación del Modelo	100
CAPÍTULO VII.	104
7. CONCLUSIONES	104
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107
APÉNDICE 1. AMPLIFICADOR DE CORRIENTE	115

A.1.1. Etapa I. Amplificación	116
A.1.2. Etapa II. Inversión de Fase	118
A.1.3. Etapa III. Alta Impedancia de Entrada	119
APENDICE 2. RUTINA CÁLCULO DE FOURIER	120
APENDICE 3. ESTADO DE LOS AISLADORES	121
A.3.1. Tensión de Ruptura a Baja Frecuencia	123
A.3.2. Resistencia Superficial	126
APENDICE 4. PARÁMETROS EN AISLADORES SIN CONTAMINACIÓN	128
APENDICE 5. CÓDIGO EN ATP EMTP – AISLADOR 15 KV CONTAMINACIÓN SEVERA	130
APENDICE 6. CARACTERISTICAS DE LOS AISLADORES	131
APENDICE 7. DISTRIBUCIÓN LOGARITMICA DE CAPACITANCIA	134
APENDICE 8. CORRIENTE CAPACITIVA PARA LA SEGUNDA Y TERCERA REMOCION	140

INDICE DE FIGURAS

FIG. 1. ESTRUCTURA QUÍMICA DE LA SILICONA	2
FIG. 2. MONTAJE EXPERIMENTAL PARA LA MEDICIÓN DE LA CORRIENTE DE FUGA.	14
FIG. 3. ETAPAS DE DEGRADACIÓN [9]	19
FIG. 4. PROCESO DE DEGRADACIÓN [9]	21
FIG. 5. CÁMARA DE DEGRADACIÓN POR EFECTO CORONA [4],[6] .	23
FIG. 6. CÁMARA DE DEGRADACIÓN CORONA CLAVOS [4],[6].	23
FIG. 7. CÁMARA DE DEGRADACIÓN POR CONTAMINACIÓN [5].	26
FIG. 8. CÁMARA DE DEGRADACIÓN POR CONTAMINACIÓN [4].	27
FIG. 9. MONTAJE PARA LA DEGRADACIÓN POR RAYOS ULTRAVIOLETA [36].	28
FIG. 10. CONFIGURACIÓN DEL RWDT [29]	29
FIG. 11. AISLADOR POLIMÉRICO BAJO ESTUDIO	32
FIG. 12. VISTA SUPERIOR - CÁMARA INSTALADA	33
FIG. 13. VISTA SUPERIOR - CÁMARA PROGRAMADA	34
FIG. 14. VISTA FRONTAL DE LA CÁMARA.	34
FIG. 15. VISTA LATERAL DE LA CÁMARA INSTALADA	35
FIG. 16. MONTAJE EXPERIMENTAL – MEDICIÓN DE LA CORRIENTE DE FUGA	36
FIG. 17. MONTAJE EXPERIMENTAL – MEDICIÓN DE LA CORRIENTE DE FUGA	37
FIG. 18. ETAPAS DE LA SIMULACIÓN EXPERIMENTAL.	39
FIG. 19. FLUJOGRAMA DEL CICLO DE DEGRADACIÓN DE LOS AISLADORES DENTRO DE LA CÁMARA	40
FIG. 20. FLUJOGRAMA DE LAS MEDICIONES FUERA DE LA CÁMARA	40

FIG. 21. CORRIENTE EN UN CICLO DE ENVEJECIMIENTO EN CONDICIONES DE HUMEDAD (AISLADOR DE 15 KV CONTAMINACIÓN SEVERA) (A) PRIMER DÍA DEL CICLO (B) SEGUNDO DÍA DEL CICLO (C) TERCER DÍA DEL CICLO (D) CUARTO DÍA DEL CICLO	44
FIG. 22. CORRIENTE DE FUGA Y COMPOSICIÓN ARMÓNICA - TENSIÓN APLICADA 15 KV	45
FIG. 23. CORRIENTE DE FUGA Y COMPOSICIÓN ARMÓNICA - TENSIÓN APLICADA 23 KV	46
FIG. 24. CORRIENTE DE FUGA AISLADOR SIN CONTAMINANTE SOMETIDO A 15 KV	47
FIG. 25. CORRIENTE DE FUGA AISLADOR CONTAMINACIÓN SEVERA SOMETIDO A 15 KV	48
FIG. 26. CORRIENTE DE FUGA AISLADOR CONTAMINACIÓN MEDIA SOMETIDO A 15 KV	48
FIG. 27. CORRIENTE DE FUGA AISLADOR CONTAMINACIÓN LIGERA SOMETIDO A 15 KV	49
FIG. 28. MAGNITUD DE LA CORRIENTE DE FUGA TOTAL DEL AISLADOR 15 KV, CONTAMINACIÓN SEVERA	50
FIG. 29. CORRIENTE (AZUL – 1:33.33 μA) Y TENSIÓN (ROJO - 1:1 KV) DE LA PRIMERA REMOCIÓN DE AISLADORES DE LA CÁMARA. AL SACARLO. (B) 1 HORA DESPUÉS. (C) 1 DÍA DESPUÉS. (D) 7 DÍAS DESPUÉS.	52
FIG. 30. CORRIENTE (AZUL – 1:33.33 μA) Y TENSIÓN (ROJO - 1:1 KV) DE LA PRIMERA REMOCIÓN DE AISLADORES DE LA CÁMARA. AL SACARLO. (B) 1 HORA DESPUÉS. (C) 1 DÍA DESPUÉS. (D) 7 DÍAS DESPUÉS.	52
FIG. 31. CORRIENTE (AZUL – 1:33.33 μA) Y TENSIÓN (ROJO - 1:1 KV) DE LA PRIMERA REMOCIÓN DE AISLADORES DE LA CÁMARA. AL SACARLO. (B) 1 HORA DESPUÉS. (C) 1 DÍA DESPUÉS. (D) 7 DÍAS DESPUÉS.	53
FIG. 32. DISTRIBUCIÓN LOGARÍTMICA DE LA CORRIENTE DEL AISLADOR DE 15 KV CONTAMINACIÓN SEVERA.	56
FIG. 33. CORRIENTE PROMEDIO POR NIVEL DE TENSIÓN Y GRADO DE CONTAMINACIÓN.	57
FIG. 34. IMPEDANCIA FUNDAMENTAL DEL AISLADOR	58
FIG. 35. DESFASAJE ENTRE TENSIÓN Y CORRIENTE FUNDAMENTAL	59
FIG. 36. PORCENTAJE DE CORRIENTE CAPACITIVA PARA LA PRIMERA EXTRACCIÓN	61
FIG. 37. PORCENTAJE DE CORRIENTE CAPACITIVA PARA LA PRIMERA EXTRACCIÓN	61
FIG. 38. PORCENTAJE DE CORRIENTE CAPACITIVA PARA LA PRIMERA EXTRACCIÓN	62

FIG. 39. RECTAS DE PORCENTAJE DE CORRIENTE CAPACITIVA VS. TIEMPO.	67
FIG. 40. COMPONENTE FUNDAMENTAL DE LA CORRIENTE DE LOS AISLADORES CONTAMINADOS SÓLO CON SAL	72
FIG. 41. ÁNGULO DE DESFASAJE TENSIÓN CORRIENTE	73
FIG. 42. AISLADOR CON SAL (IZQUIERDA) Y AISLADOR CON CAOLÍN (DERECHA)	74
FIG. 43. PROCESO DE FORMACIÓN DE BANDAS SECAS [55]	78
FIG. 44. MODELO ELÉCTRICO DEL AISLADOR.	79
FIG. 45. MODELO ELÉCTRICO DEL AISLADOR PROPUESTO [5].	81
FIG. 46. FORMACIÓN DE ARCOS PARCIALES EN SUPERFICIES POLIMÉRICAS	83
FIG. 47. MODELO ELÉCTRICO PROPUESTO	84
FIG. 48. SUPERFICIE HIDRÓFOBA DEL AISLADOR	85
FIG. 49. SUPERFICIE HIDRÓFOBA DEL AISLADOR	86
FIG. 50. CAPACITANCIA SUPERFICIAL DEL MATERIAL	86
FIG. 51. MONTAJE PARA LA MEDICIÓN DE LA CAPACITANCIA DEL AISLADOR	89
FIG. 52. CORRIENTE Y RESISTENCIA EN FUNCIÓN DEL VOLTAJE – AISLADOR 15 KV/CONTAMINACIÓN SEVERA	94
FIG. 54. CAPACITANCIA SUPERFICIAL EN AISLADORES CONTAMINADOS CON CAOLÍN	96
FIG. 55. CAPACITANCIA SUPERFICIAL EN AISLADORES CONTAMINADOS CON SAL	96
FIG. 56. RESISTENCIA SUPERFICIAL EN AISLADORES A 7 KV	97
FIG. 57. RESISTENCIA SUPERFICIAL EN AISLADORES A 15 KV	98
FIG. 58. RESISTENCIA SUPERFICIAL EN AISLADORES A 23 KV	98
FIG. 59. RESISTENCIA SUPERFICIAL EN AISLADORES SIN CONTAMINACIÓN	99
FIG. 60. RESISTENCIA Y CORRIENTE EN FUNCIÓN DE LA TENSIÓN	101

FIG. 61. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN – CORRIENTE EN FUNCIÓN DEL TIEMPO	101
(AZUL: CORRIENTE MEDIDA – ROJO: CORRIENTE SIMULADA)	101
FIG. 62. RESISTENCIA Y CORRIENTE EN FUNCIÓN DE LA TENSIÓN	102
FIG. 63. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN – CORRIENTE EN FUNCIÓN DEL TIEMPO	103
(AZUL: CORRIENTE MEDIDA – ROJO: CORRIENTE SIMULADA)	103
FIG. 64. CIRCUITO DE AMPLIFICACIÓN.	115
FIG. 65. CONEXIÓN DEL CIRCUITO DE AMPLIFICACIÓN Y MEDICIÓN	115
FIG. 66. DIAGRAMA CIRCUITAL DE LA ETAPA I DEL AMPLIFICADOR DE CORRIENTE	116
FIG. 67. TENSIÓN DE ENTRADA (AZUL) Y TENSIÓN A LA SALIDA (VERDE) DEL AMPLIFICADOR CON SATURACIÓN	117
FIG. 68. DIAGRAMA CIRCUITAL DE LA ETAPA II DEL AMPLIFICADOR DE CORRIENTE	119
FIG. 69. DIAGRAMA CIRCUITAL DE LA ETAPA III DEL AMPLIFICADOR DE CORRIENTE	119
FIG. 70. ESQUEMA EXPERIMENTAL DE LA PRUEBA DE RIV [9]	122
FIG. 71. INSPECCIÓN VISUAL	122
FIG. 72. TENSIÓN DE RUPTURA EN SECO	123
FIG. 73. TENSIÓN DE RUPTURA EN CONDICIONES HÚMEDAS.	124
FIG. 74. MONTAJE EXPERIMENTAL PARA MEDIR RESISTENCIA SUPERFICIAL	126
FIG. 75. RESISTENCIA SUPERFICIAL DE LA CADENA DEGRADADA	127

INDICE DE TABLAS

TABLA I. ESTADOS DE LA CORRIENTE DISRUPTIVA EN AISLADORES CERÁMICOS [13]	13
TABLA II. ESTADOS DE LA CORRIENTE DISRUPTIVA EN AISLADORES CERÁMICOS	14
TABLA III. FORMAS DE ONDA DE CORRIENTE PARA DISTINTOS AISLADORES [1].	17
TABLA IV. CARACTERÍSTICAS DE LOS AISLADORES.	32
TABLA V. CARACTERÍSTICAS DE LA MEZCLA CONTAMINANTE	38
TABLA VI. VALORES PICO DE LA CORRIENTE (A) EN LA PRIMERA REMOCIÓN	54
TABLA VII. VALORES PICO DE LA CORRIENTE (A) EN LA SEGUNDA REMOCIÓN	54
TABLA VIII. VALORES PICO DE LA CORRIENTE (A) EN LA TERCERA REMOCIÓN	54
TABLA IX. VALORES PROMEDIOS Y VARIANZAS DE LA DISTRIBUCIÓN LOGARÍTMICA DE LA CORRIENTE.	56
TABLA X. VALORES PROMEDIOS DE LAS CORRIENTES.	57
TABLA XI. IMPEDANCIA FUNDAMENTAL EN $M\Omega$	58
TABLA XII. DESFASAJE TENSIÓN CORRIENTE EN GRADOS.	59
TABLA XIII. PORCENTAJE DE CORRIENTE CAPACITIVA (1 ^{ERA} EXTRACCIÓN)	60
TABLA XIV. PORCENTAJE DE CORRIENTE RESISTIVA Y CAPACITIVA (2 ^{DA} EXTRACCIÓN)	62
TABLA XV. PORCENTAJE DE CORRIENTE RESISTIVA Y CAPACITIVA (3 ^{ERA} EXTRACCIÓN)	63
TABLA XVI. PROCESO DE RUPTURA EN EL AISLADOR.	64
TABLA XVII. PENDIENTE DE LA CURVA	68
TABLA XVIII. COMPONENTE FUNDAMENTAL DE LA CORRIENTE DE LOS AISLADORES CONTAMINADOS SÓLO CON SAL - FORMAS DE ONDA DE CORRIENTE CON CAOLÍN - FORMAS DE ONDA DE CORRIENTE CON SAL	70
TABLA XIX. DIFERENCIA ENTRE LAS MAGNITUDES DE CORRIENTES FUNDAMENTALES EN LOS AISLADORES CON CAOLÍN Y CON SAL.	72

TABLA XX. DIFERENCIA PORCENTUAL ENTRE LOS ÁNGULOS DE LOS AISLADORES CONTAMINADOS CON CAOLÍN Y CON SAL	73
TABLA XXI. VALORES DE RESISTENCIA SUPERFICIAL NO LINEAL	100
TABLA II. VALORES DE RESISTENCIA SUPERFICIAL NO LINEAL	102
TABLA XXII. RESISTENCIA SUPERFICIAL EN Ω	127
TABLA XXIII. RESISTENCIA SUPERFICIAL	128

LISTADO DE SÍMBOLOS Y ABREVIACIONES

V_n : tensión nominal

V_1 : Componente fundamental de la tensión

CF: Corriente de fuga

V_1 es el valor pico de la tensión aplicada.

ω frecuencia fundamental

C_{vol} es la capacitancia volumétrica, propia del material

C_{sup} es la capacitancia volumétrica, propia del material

i_{vol} corriente volumétrica

i_{total} corriente total medida

i_{sup} corriente superficial

Φ_1 desfase entre voltaje y corriente fundamentales.

Φ_{sup} desfase entre voltaje y corriente superficial fundamentales.

CAPÍTULO I.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de materiales poliméricos para aislamiento externo ha aumentado rápidamente durante las últimas décadas debido a las ventajas que presentan al comienzo de su vida útil. Entre las más relevantes destacan su peso ligero, resistencia al vandalismo y mejor comportamiento en zonas de contaminación que los aisladores cerámicos [1,2,3,4,5].

La limitación en el uso de estos aisladores es la preocupación acerca de la erosión, agrietamiento, cambios en la superficie, absorción de agua y reducción de la tensión de ruptura en condiciones de servicio por efecto del envejecimiento. En función solventar estas desventajas, se han utilizados un amplio rango de materiales orgánicos para la fabricación de aisladores desde sus comienzos.

En los años 50 se utilizó la resina epóxica para aislamiento externo dando buenos resultados. Más tarde, entre 1975-1980 se incluyeron materiales como el Etileno propileno (EPR) y la goma de silicona (SIR) entre 1976-1983. También han sido usados materiales como TEFLÓN [6].

La primera experiencia con silicona (SIR, por sus siglas en inglés, Silicone Rubber) fue con RTV-SIR (Room Temperature Vulcanized) la cual presentó baja resistencia al rasgamiento a consecuencia del clima, por lo que fueron remplazados por HTV-SIR (High Temperature Vulcanized) obteniéndose mejores resultados [5,6].

En 1986 se introdujo en el mercado una aleación entre EPM (Etileno propileno monómero) y SIR, la cual fue cambiada luego a Etileno Propileno Dieno Monómero (EPDM) con componentes de silicona en 1989. Esta aleación le proporciona al aislador mejores propiedades mecánicas que las del EPDM, tales como rigidez por efecto de la silicona [5,6].

En la actualidad el material más utilizado es la goma de silicona, un material elastómero hecho de la mezcla de polidimetil-siloxano (PDMS), como se muestra en la fig. 1, con aditivos tales como retardante de llama para evitar flameo durante eventos que pueden tener lugar en el sistema de alta tensión y otros que le proporcionan en la generalidad de los casos mayor resistencia mecánica. Se utilizan aditivos como antioxidantes, colorantes, elementos para su procesamiento y estabilizadores [2,7,8].

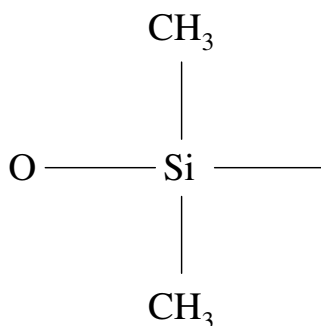


Fig. 1. Estructura química de la silicona

La molécula de PDMS presenta bajas fuerzas moleculares, alta energía intermolecular entre los siloxanos y alta flexibilidad de la cadena, la cual es parcialmente polar. Estas características le proporcionan al caucho de silicona propiedades que hacen al material apropiado para aislamiento de alta tensión: buenas propiedades como aislante eléctrico, baja energía superficial, superficie hidrofóbica y no pegajosa, insoluble al agua, alta estabilidad térmica y de oxidación y baja reactividad, toxicidad y combustión [2].

Como consecuencia de su naturaleza orgánica, el material pierde propiedades por efecto del clima y las condiciones a las que están expuestos al colocarse en servicio. Este proceso es conocido como envejecimiento o degradación.

La silicona puede recuperar sus propiedades superficiales luego de episodios de degradación debido a la presencia de estructuras o polímeros de bajo peso molecular que se encuentran en el volumen del material y a su reorientación superficial. La extrema flexibilidad de la cadena de siloxanos y las reducidas fuerzas moleculares entre los grupos metilo, los cuales son una combinación de doble enlace de carbono con características hidrófobas, produce una temperatura de transición vítrea baja y elevado volumen libre de PDMS. Por su parte, las cadenas de bajo peso molecular migran a la superficie de forma continua, incluso después de varios años de servicio a la intemperie, formando una especie de reja o de película superficial, que cubre la capa contaminante depositada en la superficie del aislador [9]. Este proceso no tiene un patrón de comportamiento definido, sino que por el contrario, no es lineal, razón por la cual el proceso de degradación ha sido descrito de forma cualitativa. Las normas desarrolladas hasta ahora reconocen el proceso de recuperación y degradación, más no se incluyen estas consideraciones en el diseño por la inexistencia de pruebas concluyentes [9-10].

Actualmente, no existen técnicas normalizadas para la evaluación de los aisladores poliméricos que han estado en servicio, aunque organizaciones a nivel mundial procuran desarrollar normas, guías y pruebas aplicables tanto para diseño como para su evaluación [20-28].

Una de las técnicas que más se plantea en la literatura es la medición de la corriente de fuga y su respectiva descomposición espectral para identificar deterioro en la superficie del aislador polimérico, estando los esfuerzos enfocados a relacionar la corriente de fuga con el estado del aislador, ya que según algunos autores, la misma es una “huella dactilar” del estado de la superficie. Sobre esta base se propone utilizar la medición de la corriente de

fuga para el modelado del comportamiento del aislador no cerámico, ya que contiene información acerca del estado de la superficie [5,11-19].

La ventaja que presenta la corriente de fuga es que puede ser monitoreada en línea, estando relacionada con el estado de las faldas, ya que la misma dependerá de las irregularidades y de los elementos depositados en la superficie.

Entre los factores de degradación mencionados en la literatura se encuentran las descargas superficiales o corona por tensión aplicada, la contaminación, humedad, temperatura, rayos ultravioleta y crecimiento de organismos biológicos. Este último factor resulta particularmente difícil de simular artificialmente, y los otros como radiación ultravioleta, aunque muy estudiado en aisladores poliméricos, en la silicona no son tan influyentes como en otros materiales como EPR y Teflón [2-7,36,37].

El objetivo de este trabajo es desarrollar un modelo eléctrico de aisladores poliméricos de silicona sometidos a degradación artificial en el laboratorio de Alta Tensión a partir de la medición de la corriente de fuga. Para esto, se construyó una cámara de envejecimiento acelerado que combinaba tres de los factores degradantes: tensión, humedad y contaminación, durante un período de 5 meses aproximadamente, según la normativa disponible que se describe más adelante.

Los aisladores estuvieron constantemente monitoreados a través de su corriente de fuga. Con las medidas registradas de corriente se construye un modelo eléctrico de la superficie del aislador que simula el comportamiento físico del mismo ante condiciones de tensión aplicada, contaminación y humedad. Con la obtención de un modelo, a partir la corriente de fuga, además de describir el comportamiento, es posible desarrollar una metodología para la evaluación del estado de la superficie del aislador no cerámico.

Para evaluar el estado de los aisladores una vez que han sido sometidos a las condiciones de simulación, se aplicaron pruebas de tensión de ruptura en seco y húmedo, medición de la resistencia superficial e inspección visual. Los resultados obtenidos muestran que los aisladores no presentaron síntomas de envejecimiento.

A partir de los resultados obtenidos fue posible caracterizar los fenómenos que tienen lugar en la superficie y proponer un modelo similar al utilizado para aisladores cerámicos, que gracias a la vasta experiencia que se tiene con éstos, se facilita comprensión la del comportamiento de los mismos.

El trabajo está constituido por siete capítulos. En el capítulo a continuación se describen las técnicas de diagnóstico aplicadas a aisladores poliméricos, entre las cuales destaca la corriente de fuga, parámetro relevante en el que se basa el estudio. Seguidamente, se describen las metodologías reportadas para la degradación artificial y la descripción del montaje experimental desarrollado en el laboratorio para evaluar el comportamiento de los aisladores de silicona bajo estudio. El capítulo cinco contiene los resultados obtenidos en las mediciones realizadas en la cámara. En el capítulo 6 se describe el modelo eléctrico obtenido a partir de las mediciones. El último capítulo contiene las conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO II.

2. TÉCNICAS DE DIAGNÓSTICO

La interacción del aislador polimérico con el ambiente de servicio hace complicado establecer procedimientos para la evaluación del estado del mismo. La inspección visual ha sido la técnica de más común para la evaluación en línea de aisladores cerámicos, pero los resultados pueden ser engañosos en poliméricos, debido a que los cambios en la apariencia no están directamente relacionados con cambios en las propiedades dieléctricas. Se ha demostrado que la decoloración del material, o la rotura de las faldas no se traduce en reducción de la tensión de soporte [20].

Se han desarrollado normas para la evaluación y dimensionamiento de aisladores poliméricos. En todas las normas disponibles se recomienda la inspección visual; en unas para verificar que las dimensiones del elemento sean las adecuadas estando enmarcadas dentro de las pruebas de calidad, y en el resto como herramienta para determinar el estado del mismo [10,20-24].

En las siguientes normas se definen las características y se recomiendan pruebas requeridas para el dimensionamiento de aisladores poliméricos:

- IEC 61109 Composite Insulator for Overhead Lines With Nominal Voltage Greater than 1000V-Definitions, Test Method and Acceptance Criterion
- IEEE Std 987-2001 Guide for application of Composite Insulators.

- ANSI C29.13-2000 American National Standard for Composite Suspension Insulators for Overhead Transmission Lines Test.
- IEEE 1024: For Specifying Distribution Composite Insulators (suspension type and dead-end type)
- ANSI C29.13: Insulators – Composite distribution dead-end type
- IEC 61466: Composite string insulator units for overhead lines with a nominal voltage greater than 1000 V.

Los ensayos contenidos en estas normas son aplicables sólo a aisladores nuevos. Aunque se hace referencia al proceso de degradación, se establecen que las experiencias con la reducción de las propiedades no son concluyentes como para ser incluidas en el diseño y selección del aislador. Inclusive, en el Std. 987- 2001 [21], se recomienda que los aisladores poliméricos se seleccionen con la distancia de fuga equivalente de los cerámicos, a pesar de la capacidad que tienen de transferir hidrofobicidad a la capa de contaminación [16,20,22].

En la misma norma [21] se describe el proceso de degradación y sus características, mas no se proponen pruebas de degradación. La norma IEC 1109 [20], propone un ciclo de envejecimiento con una duración de 5000 h, donde el aislador es sometido a esfuerzos eléctricos en condiciones climáticas acentuadas, que también, según la misma referencia, puede ser utilizado para evaluar su resistencia a la erosión y rasgamiento, disminuyendo el tiempo a 1000 h. Este mismo tipo de prueba también se menciona en la C29.13-2000 [10], donde se proponen dos métodos, que consisten en aplicar tensión y sumergir al aislador en una mezcla de agua con sal.

Entre las pruebas mecánicas destaca la de tensión mecánica, de compresión y carga máxima, en diferentes condiciones, que se aplican para garantizar que el aislador sea capaz de soportar el peso del conductor una vez en servicio.

Entre las Pruebas eléctricas descritas figuran la Tensión de Ruptura en seco a baja frecuencia, Tensión de Ruptura en condiciones de humedad a baja frecuencia y de arco de potencia, haciendo referencia a la norma C29.1-1982 (American National Standard Test Methods for Electrical Power Insulators) [10], que es una norma diseñada para aisladores cerámicos.

Para la evaluación de las propiedades del aislador en campo se utilizan las normas relativas a los materiales poliméricos, las STRI y algunos métodos alternativos, que se mencionan a continuación. En general, las técnicas empleadas para determinar el grado de deterioro del aislador son cualitativas [26-28], destructivas (mecánicas, físico-químicas), y en muchos casos sólo pueden ser realizadas en el laboratorio, limitando su implementación.

- STRI Guide 8 Guidelines for inspection and analysis of silicone grease on high voltage insulators.
- STRI Guide 1 – 92/1 Hydrophobicity Classification Guide 92/1
- STRI Guide 5, 2005 Guide for Visual Identification of Deterioration & Damages on Suspension Composite Insulators.
- IEC 60587: Test method for evaluating resistance to tracking and erosion of electrical insulating materials used under severe ambient conditions.
- ASTM D2240: Standard test method for rubber property – durometer hardness.
- ASTM D2303: Standard test methods for liquid-contaminant, inclined-plane tracking and erosion of insulating materials
- IEC 60410: Sampling plans and procedures for inspection by attributes
- ASTM A153: Standard specification for zinc coating (hot-dip) on iron and steel hardware.

La norma STRI 8 propone pruebas para la evaluación de la condición superficial, como hidrofobicidad, la capacidad de las partículas a incrustarse, la adhesión de la grasa (suavidad) y del espesor de la capa, regularmente de color blanco, de partículas de relleno de la grasa (tiza).

La norma STRI 503 hace recomendaciones para identificar los tipos de deterioro que tienen lugar en el aislador polimérico mediante inspección visual, siendo una técnica cualitativa basada en la experiencia que se tiene en el uso de los mismos, mientras que la norma STRI 1/92 propone un estudio cuantitativo de la hidrofobicidad del material, para lo cual se definen 7 estados posibles que van desde hidrófobo hasta hidrofílico, mediante el cálculo del ángulo de contacto con la superficie.

Las normas ASTM contemplan estudios de las propiedades del material de forma cuantitativa, mas estas pruebas deben realizarse en laboratorios con muestras y no con el aislador completo, las cuales son destructivas.

Para la inspección visual se examinan los cambios de color, la rugosidad, la erosión, las fracturas y las cavidades. Aunque ésta es una de las técnicas más utilizadas, debe ir acompañada de otras para determinar el verdadero estado de la superficie, en [18,22] se dan recomendaciones al respecto.

Aún así, la inspección visual puede ser ambigua. Una superficie contaminada no necesariamente está deteriorada, ya que los elementos de bajo peso molecular migran a la superficie en presencia de los contaminantes y la misma puede ser tan hidrofóbica con la contaminación que sin ella, como se evidencia en [11]. En otros casos, a menos de que se retire el contaminante, no es posible detectar las micro fracturas que pueden tener lugar en la superficie.

Por otra parte, el comportamiento en condiciones de contaminación de los polímeros depende de la recuperación de sus propiedades, es decir, de los tiempos de exposición y reposo, por lo cual no se ha planteado una norma para realizar este tipo de estudios en laboratorios, como se ha realizado para los aisladores tradicionales.

Las normas que proponen un procedimiento de contaminación artificial fueron diseñadas para aisladores cerámicos. No está disponible un procedimiento normado para poliméricos, por lo que, según la literatura consultada, se recurre a la norma IEC 60507 [30] para tal fin, mas las evaluaciones del grado de contaminación y de la tensión de soporte no son aplicables a los poliméricos debido a que se ha demostrado que el contaminante puede ser recubierto por el material y que son capaces de mantener su tensión de soporte en condiciones de contaminación a largo plazo [20].

Las siguientes normas son utilizadas para pruebas de contaminación (normas para aisladores cerámicos):

- IEC 60815: Guide for the selection of insulators in respect of polluted conditions
- IEC 60507: Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on A.C. systems.

La norma IEC 60507 es aplicable sólo a aisladores cerámicos, pero es utilizada para poliméricos porque es la única que propone un método de contaminación y ha sido utilizada para estudiar poliméricos internacionalmente, como se aprecia en las referencias [1,6,12,14,15,31-35], entre otras.

Se proponen dos métodos de contaminación del aislador: con niebla limpia y niebla salina. Esta última se logra mezclando sal en agua y rociando la solución sobre los aisladores limpios durante la ejecución de la prueba.

Para la prueba de niebla limpia se le aplica a los aisladores contaminación artificial según el Método de Capa Sólida. Se prepara una mezcla con Caolín o Tonoko y sal común disuelta en agua que permite simular un grado ligero, medio o severo de contaminación, según sean las proporciones. La mezcla se rocía sobre los aisladores secos y se deja reposar para el secado de la capa de Caolín durante un mínimo de 8 horas. El aislador finalmente es colocado en la cámara de niebla.

De estas normas, sólo el método de contaminación es aplicable a aisladores poliméricos, dado que las pruebas de evaluación propuestas no consideran la capacidad del material de recuperar sus propiedades, como tampoco la penetración del contaminante en la composición del material, lo que puede arrojar resultados erróneos, como por ejemplo en la medición del ESDD (Densidad de depósito de sal equivalente).

Otra técnica de diagnóstico propuesta en las mismas normas es la prueba de Tensión de Ruptura, que puede ser aplicada a aisladores poliméricos, con la salvedad de que los mismos pueden recuperar sus propiedades al cabo de un tiempo, lo que trae como consecuencia resultados diferentes según sean los períodos de reposo.

Otras técnicas han sido utilizadas de forma alternativa, como la medición de descargas parciales y de la corriente de fuga. La corriente de fuga es considerada un reflejo del estado superficial del aislador, primero porque su comportamiento, capacitivo o resistivo, puede indicar la formación de capas continuas conductoras, lo cual es un síntoma de pérdida de hidrofobicidad, además de que permite detectar variaciones transitorias, tipo descargas eléctricas superficiales, producto de la contaminación o de variaciones superficiales, como erosiones, grietas o microcavidades [14,16].

A pesar de que aún no se ha determinado la relación entre la corriente de fuga y la superficie del aislador, se ha demostrado que la misma varía con los cambios en las faldas producto del envejecimiento [2,4,5,7,18,19]. Así puede apreciarse en los trabajos previos en el laboratorio, donde se midió la magnitud las corrientes de fuga y su evolución en el tiempo [4,7].

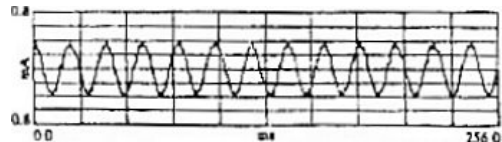
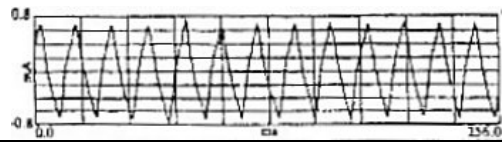
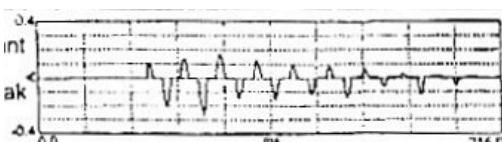
Hasta ahora, se conoce con certeza el comportamiento de los aisladores cerámicos, ya que ha sido ampliamente estudiado, por lo que son una referencia obligada para la comprensión del desempeño del aislamiento polimérico. Dentro de este contexto se hace necesario presentar información concerniente a estos como basamento para el estudio. A continuación se describe la corriente de fuga en aisladores cerámicos y poliméricos en condiciones de contaminación.

2.1. Corriente de Fuga en Aisladores

2.1.1. Corriente de Fuga en Aisladores Cerámicos

Para aisladores cerámicos en condiciones de contaminación, se describen siete estados, con diferentes formas de onda de corriente superficial que van desde la energización hasta la ruptura, siendo el último estado en el que se alcanza [13,17]. Los estados se muestran en la tabla I.

Tabla I. Estados de la corriente disruptiva en aisladores cerámicos [13]

Condición	Forma de Onda de Corriente
Estado 1. Sin descargas Senoidal	
Estado 2. Descargas débiles, suave sonido audible, sin señal visible Triangular	
Estado 3. Algunas descargas visibles, descargas con sonido continuo	
Estado 4. Arcos locales débiles. Distorsionada	
Estado 5. Intermitentes arcos locales fuertes. Picos intermitentes	
Estado 6. Intermitentes arcos locales fuertes, justo antes de la ruptura dieléctrica. Picos Intermitente	

Con el fin de estudiar el comportamiento previamente descrito, en el laboratorio se realizaron mediciones de la corriente de un aislador cerámico en condiciones de contaminación, humedad y tensión aplicada.

La prueba se realizó según la norma IEC 60507 [30], utilizando el método de capa sólida para la contaminación y de niebla limpia para la humidificación de la cámara. El aislador se colocó dentro de la cámara de lluvia, como se muestra en la fig. 2. La tensión se elevó gradualmente. Los resultados se muestran en la tabla II.

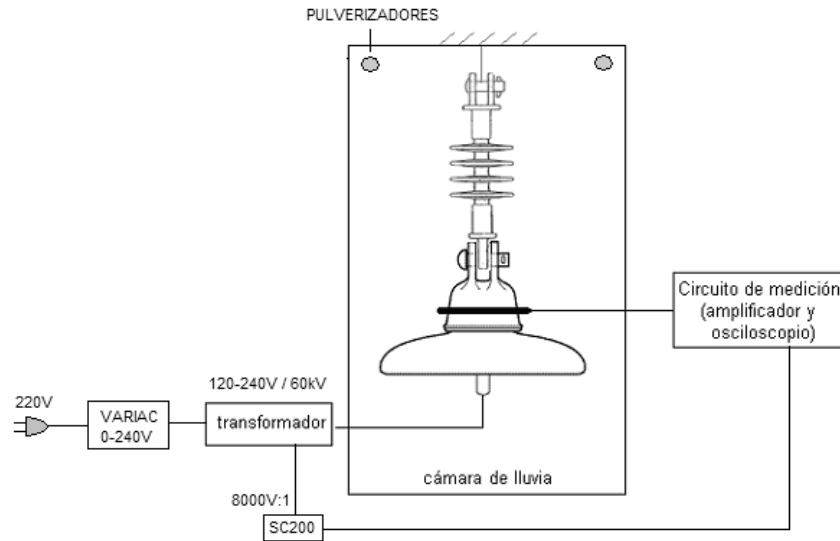
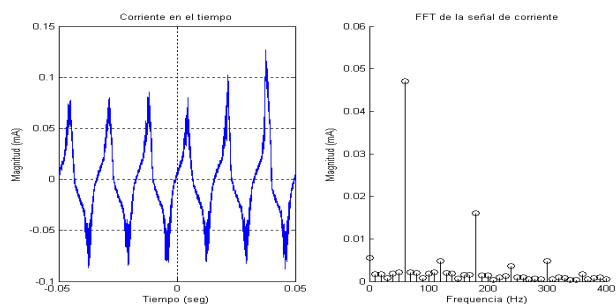


Fig. 2. Montaje experimental para la medición de la corriente de fuga.

Tabla II. Estados de la corriente disruptiva en aisladores cerámicos

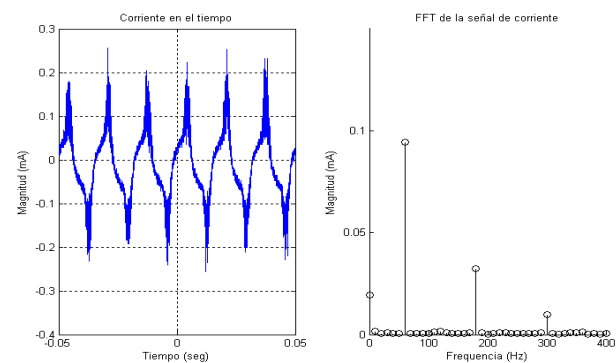
Condición	Forma de Onda de Corriente
Estado 1. Sin descargas Senoidal	
Estado 2. Descargas débiles, suave sonido audible, sin señal visible. está relacionada con la formación de la banda seca en la superficie del material por el calentamiento de la superficie [13] Triangular	

Estado 3. Algunas descargas visibles,
descargas con sonido continuo



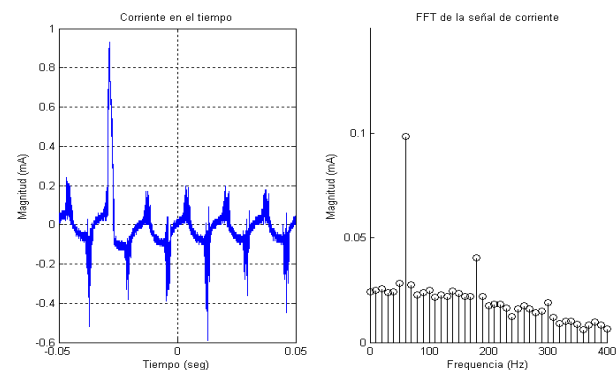
Estado 4. Arcos locales débiles.

Distorsionada



Estado 5. Intermitentes arcos locales
fuertes.

Picos intermitentes



Se puede apreciar que se obtienen comportamientos similares a los reportados previamente. Esta validación permitió hacer la evaluación y calibración de los equipos e instrumentos de medición.

Las corrientes en aisladores cerámicos están caracterizadas y cada forma de onda está asociada a los eventos que tienen lugar en la superficie, mientras que en los aisladores poliméricos no tiene el mismo comportamiento en condiciones de contaminación, por la

capacidad que tiene el material de recuperarse. A continuación se estudia la corriente en estos últimos.

2.1.2. Corriente de Fuga en Aisladores Poliméricos

Las corrientes resultantes son dependientes del tiempo de exposición a la contaminación y de reposo. En presencia de contaminación y humedad se deforma mostrando un comportamiento no lineal, similar al obtenido en aisladores cerámicos.

La corriente de fuga ha sido estudiada sin alcanzar resultados concluyentes que permitan establecerla como técnica de diagnóstico [5,11-19]. Se ha utilizado para determinar la afectación de las condiciones climáticas en los aisladores poliméricos [2,5]. También, se ha pretendido asociar la magnitud y composición armónica de la misma con el estado de las faldas y los eventos que tienen lugar en la superficie [1,6,13,17].

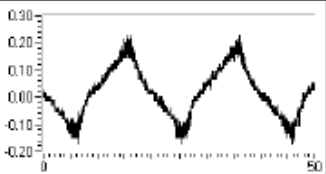
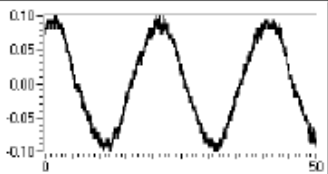
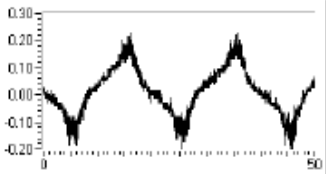
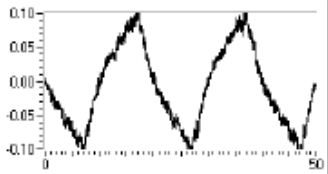
En trabajos previos del laboratorio de Alta Tensión de la USB se ha demostrado que un aumento en el deterioro del polímero es equivalente a un aumento en el nivel de las corrientes de fuga, esto se puede apreciar también en [4,6,36].

A diferencia de los aisladores cerámicos, al estudiar las corrientes en poliméricos se hacen mediciones entre brechas temporales, debido a la recuperación de las propiedades. Un ejemplo de este resultado es el que se muestra en la tabla III. Para un mismo aislador, se tienen formas diferentes de corriente, luego de 1 hora y de un día de haber sido desenergizado.

Los aisladores de prueba son de goma de silicona, con longitudes de fuga de 790 mm y 853 mm respectivamente, con 0.22 kV/cm y 0.24 kV/cm, contaminados artificialmente y sometidos al mismo campo eléctrico (0.23 kV/cm).

Estos resultados evidencian variaciones superficiales, relacionadas con pérdida y recuperación de la hidrofobicidad del material de forma temporal, por lo que la deformación de la forma de onda no es directamente asociada al deterioro de la superficie.

Tabla III. Formas de onda de corriente para distintos aisladores [1].

Lfuga/ Esfuerzo eléctrico	1 h	1 día
790mm/0.23 kV/cm		
853mm/0.23 kV/cm		

En los aisladores cerámicos no se aprecia este comportamiento y los cambios en la forma de onda que puedan existir entre períodos de tiempo bajo las mismas condiciones de humectación sólo puede deberse al retiro del contaminante de la superficie. La pérdida de las propiedades del polímero forma parte del proceso de degradación, el cual se estudia en el siguiente capítulo, al igual que las metodologías para su estudio en laboratorios.

En el capítulo V, se describe el comportamiento de la corriente de fuga en aisladores poliméricos, donde se muestra el comportamiento previamente mostrado.

CAPÍTULO III.

3. DEGRADACIÓN ARTIFICIAL.

Las propiedades de la superficie de los aisladores poliméricos se modifican por la exposición al ambiente, a las condiciones de servicio y las características orgánicas del material [1,2-6,9,37]. Por ello, a pesar de que estos aisladores presentan un mejor comportamiento al comienzo de su vida útil que los aisladores tradicionales, al envejecer el material pierde las propiedades y empiezan a presentar fallas, lo que puede limitar su aplicación [1,5-6,9].

Este proceso se conoce como degradación y su relación en el tiempo no es lineal, lo que dificulta cuantificar el grado de deterioro y conocer a ciencia cierta el estado de dichos aisladores. El proceso de degradación es descrito en este capítulo así como también las metodologías desarrolladas para reproducir este proceso en laboratorios.

Las cámaras descritas a continuación y las pruebas de diagnóstico realizadas están basadas en las normas que contemplan la evaluación del aislador completo. Existen normas que proponen la degradación del material polimérico mediante el uso de probetas, que no se abarcan en este estudio.

3.1. Proceso de Degradación

Debido a la naturaleza no pasiva del polímero el proceso de degradación no ha sido cuantificado. La característica regenerativa del polímero tiende a disminuir en el tiempo [6,9],

en cuyo caso se dice que el material envejece y la forma en que ocurre este proceso y cómo es la influencia de los agentes involucrados no se conoce con certeza. Los síntomas típicos de este proceso son la decoloración, aumento de la aspereza, rugosidad y erosión de la superficie.

Se definen dos estados en el proceso de degradación: uno denominado estado temprano, caracterizado por fenómenos electro-químicos y otro de degradación a largo plazo, con ocurrencia de procesos termo-electro-químicos [2,3,6,9]. Estos estados se muestran en la fig. 3.

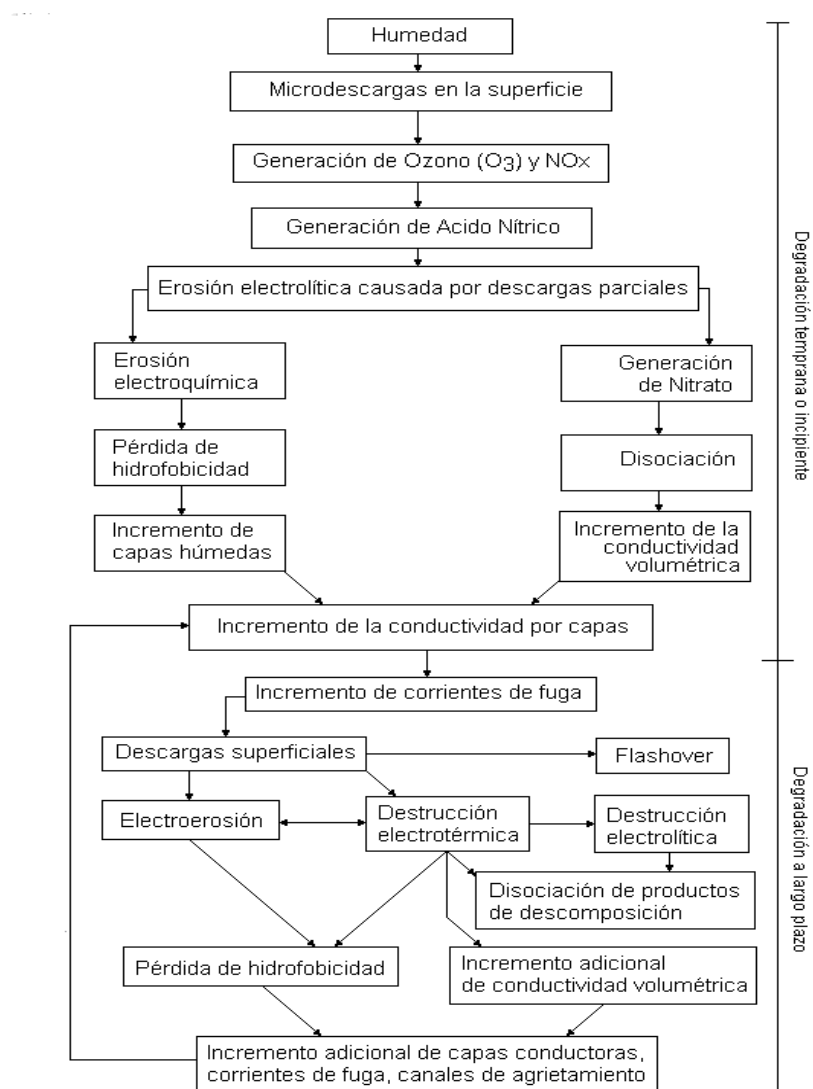


Fig. 3. Etapas de degradación [9]

El envejecimiento o degradación de un polímero es consecuencia de las reacciones que tienen lugar en el mismo, las cuales pueden ser de oxidación o de hidrólisis y generalmente conduce a una disminución del grado de polimerización del material, lo que genera cambios significativos en su estructura resultando en la pérdida de sus propiedades. Ocurren en el material cambios físicos y/o químicos, como resultado de los efectos combinados de radiación atmosférica, agua, microorganismos y gases [6,9,10,21,22,26-28].

Los cambios físicos consisten en decoloración, pérdida del brillo superficial, formación de grietas, microfracturas, superficie pegajosa, polvorienta, erosión superficial y pérdida de propiedades como la resistencia a la tracción y el alargamiento. Los cambios químicos, por su parte, consisten en la incorporación de oxígeno a la estructura, rotura de cadenas, aparición de reacciones de entrecruzamiento, entre otros. [21,22, 26-28].

En la IEEE Std 987-2001 [21] se define el envejecimiento como el deterioro de la superficie, acelerado por la exposición al entorno de servicio, esfuerzos eléctricos y carga mecánica, teniendo como consecuencias de este proceso los siguientes aspectos:

- a. Oxidación superficial y reacciones químicas, que cambian la superficie del polímero y estructura del volumen.
- b. Resquebrajadura superficial y el agrietamiento debido a los efectos de la radiación, de la temperatura, del ozono, y del agua.
- c. Erosión causado por la actividad superficial de la descarga.

Los factores influyentes se pueden dividir en tres tipos, como se muestra en la fig. 4 [7,9]: ambientales, eléctricos y mecánicos. Estos factores son consecuencia de su operación en el sistema eléctrico y todos contribuyen a la despolimerización del material, por ruptura de las cadenas poliméricas o pérdida de elementos de bajo peso molecular, lo que a su vez

ocasiona deterioro en las faldas del aislador disminuyendo su resistencia mecánica y eléctrica.

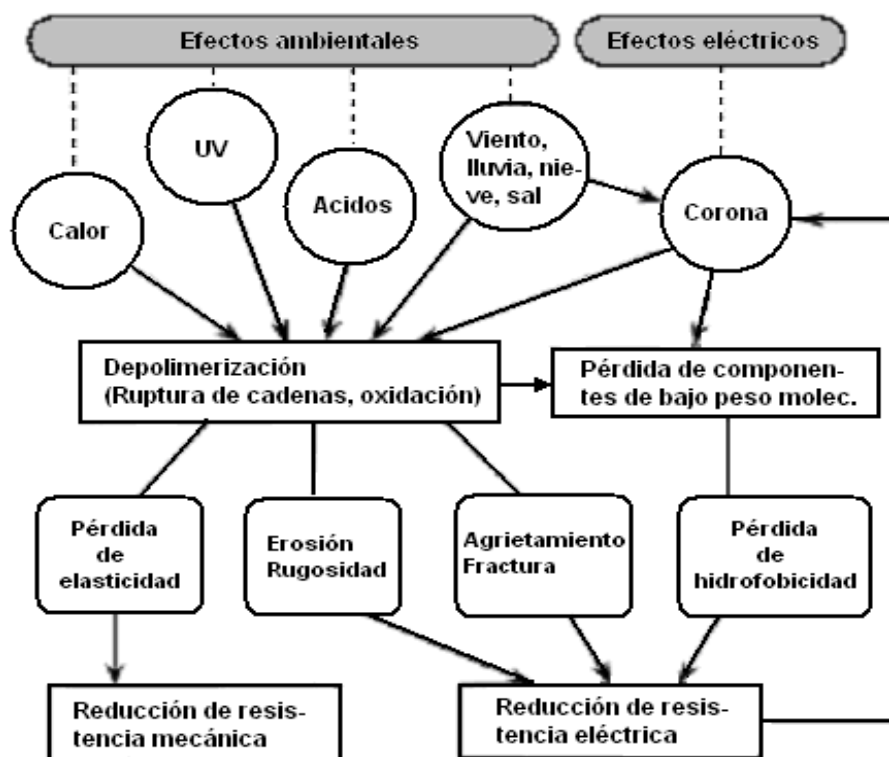


fig. 4. Proceso de degradación [9]

Se pueden mencionar como las principales causas de degradación del polímero durante su operación en el sistema los siguientes aspectos [6,7,9, 21,22,36]:

- Luz solar
- Efecto Corona
- Humedad
- Contaminación.
- Temperatura

Para estudiar el efecto de la degradación en laboratorios suele recurrirse a procesos de envejecimiento acelerados, en donde las variables degradantes son maximizadas con el fin de acortar el tiempo de envejecimiento y evaluar los efectos resultantes, esto permite extrapolar sus resultados a condiciones reales de operación a largo plazo. Se recurre al uso de Cámaras de envejecimiento acelerado, conocidas también como cámaras de degradación artificial.

3.2. Cámaras de Envejecimiento Acelerado.

Han sido diseñadas diversas cámaras de degradación artificial en función de los parámetros más influyentes. Las más utilizadas son las de contaminación, corona y rayos ultravioleta, descritas a continuación, en conjunto con cámaras multiesfuerzos, que involucran dos o más de los factores influyentes de forma simultánea para acelerar aún más el proceso [2,4-7,36-38].

3.2.1. Degradación por Efecto Corona

El objetivo de esta prueba es intensificar el campo eléctrico y la formación de ozono en el área circundante al aislador, para evaluar la respuesta del mismo ante la aplicación de la tensión en servicio.

Se han propuesto diversas pruebas para estudiar el efecto de las descargas sobre los aisladores poliméricos, entre ellas está la cámara cuyo esquema se presenta en la fig. 5 [4,14,35,38]. La misma consta de un punto para la energización de los aisladores dentro de una cámara cerrada; afectando en mayor medida las faldas inferiores del aislador.

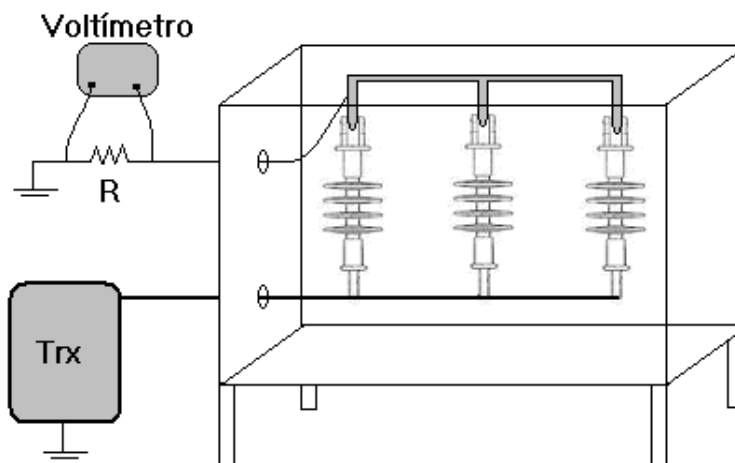


Fig. 5. Cámara de degradación por efecto corona [4],[6] .

Esta cámara simula la condición de los aisladores en servicio, donde las faldas inferiores son las más afectadas por las descargas tipo corona consecuencia del campo eléctrico aplicado.

Una variante, es otra cámara es la denominada *Corona con Clavos*, en la cual todas las faldas del aislador son sometidas a descargas tipo corona como se muestra en la fig. 6 [4].

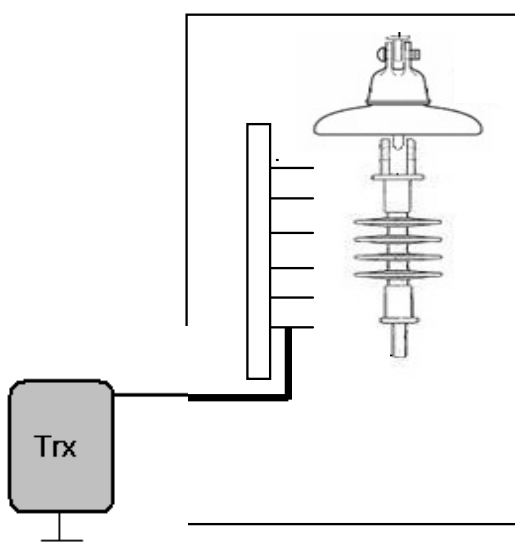


Fig. 6. Cámara de degradación Corona Clavos [4],[6].

La diferencia entre las cámaras reside en que con esta última se busca la degradación del aislador, mientras que en la primera, se simulan condiciones similares a las de operación. Adicionalmente, el aislador colocado dentro de la cámara Corona Clavos está siendo bombardeado constantemente por partículas de ozono.

El tiempo de aplicación de esta prueba según la norma IEC 1109 es de 5000 h [20], lo que equivale a 6 meses aproximadamente. Trabajos realizados en el laboratorio reportan degradación por corona aproximadamente después de dos meses y medio, aproximadamente (2000 h) [4,7].

3.2.2. Cámara para Degradación por Contaminación

El depósito de contaminantes en la superficie del aislador, combinado con la humedad y en presencia de tensión, generará actividad eléctrica superficial, como descargas entre gotas o que el desplazamiento de la gota genere un camino de alta conductancia y como consecuencias de las descargas se deteriora el material (erosión). Para evaluar este efecto se han construido una diversidad de cámaras de pequeño, mediano y gran tamaño [38].

Estas cámaras combinan la aplicación de la tensión con la contaminación del aislador haciendo uso de cualquiera de los métodos de contaminación descritos en la norma IEC 60507 [30], en la cual se consideran dos aspectos:

1. Humectación del contaminante, evaluando su impacto en la tensión de soporte de ruptura del aislador.
2. La aplicación del contaminante (material conductivo) sobre la superficie, para lograr una conductividad de la superficie.

Los métodos descritos son los siguientes:

Niebla salina, donde el contaminante se rocía directamente sobre el aislador mezclado con agua.

Niebla limpia, en el que considera la aplicación del contaminante mezclando sal y Caolín o Tonoko sobre el aislador, y la evaporación de agua para la humectación de la cámara [30].

3.2.2.1. Descripción del Caolín

Los contaminantes constan de dos partes fundamentales: una eléctricamente inerte que al humedecerse no se disocia en iones, y que por lo tanto no es conductora y cuya función es darle a la capa sus características adhesivas y absorbentes, y una parte eléctricamente activa que al humedecerse se disocia y presenta características conductoras [39].

El uso de Caolín tiene la función de adherir la sal a la superficie del aislador de forma uniforme. En aisladores poliméricos también ha sido utilizado este material [5,15,32,33, 35,40-45], a pesar de que las características del Caolín son las de una cerámica o arcilla. Entre las propiedades del Caolín están: la ligereza, un tamaño de partícula muy fina que facilita el mezclado, bajo contenido en hierro, fácilmente dispersable en agua, no es tóxico y tiene comportamiento inerte [46-47].

Hasta ahora, no ha sido normalizada una metodología de contaminación aplicable a aisladores poliméricos, como se mencionó previamente. Algunos autores han hecho uso de la que se especifica en la norma IEC 60507 [30] de aisladores cerámicos, otros, aunque realizan procedimientos según la misma norma, omiten el uso del Caolín en la mezcla contaminante.

Algunos autores, proponen la destrucción de la hidrofobicidad de la superficie antes de la aplicación del contaminante.

En [38] se muestran otras cámaras utilizadas en laboratorios alrededor del mundo, con el mismo principio, que utilizan el método de niebla salina para la contaminación de los aisladores. Las cámaras de las fig. 7 utiliza el método de niebla limpia.

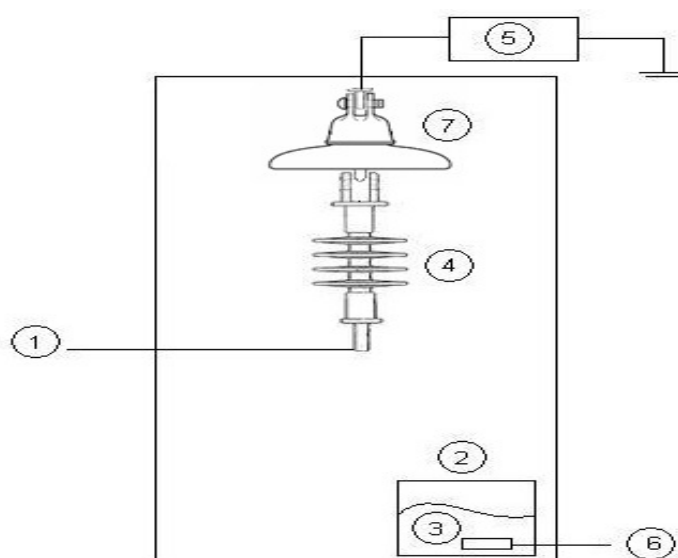


Fig. 7. Cámara de degradación por contaminación [5].

1. Aplicación de tensión AC a través de un transformador. 2. Tanque de agua desmineralizada. 3. Resistencias de calentador. 4. Aislador bajo estudio. 5. Circuito de medición de la corriente de fuga. 6. Toma de 120/60Hz para las resistencias. 7. Aislador de aislamiento.

La humedad dentro de la cámara dependerá de las condiciones externas, aún así se sugiere que la misma debe encontrarse entre 50-100 gr/hm³ [5], o una humedad de 0.9 lts/h, en promedio [15]. Esta humedad es producida con agua desmineralizada cuya conductividad debe estar alrededor de 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ [5,21,23].

Otro método de contaminación consiste en gotear sobre el aislador la solución salina cuya concentración dependerá del grado de contaminación que se quiere simular [4]. A pesar de

que la construcción de esta cámara resulta muy sencilla, tiene la desventaja de que al gotear la mezcla sobre el aislador, se determina de antemano el camino de las descargas superficiales y la consecuente degradación, objetivo principal de la utilización de esta cámara. El esquema se muestra en la fig. 8.

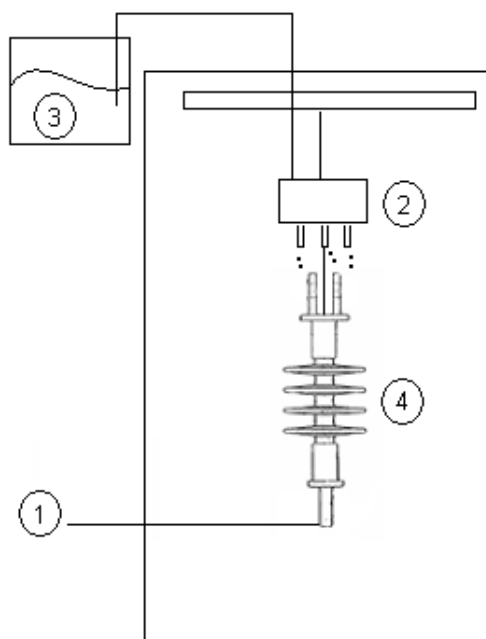


Fig. 8. Cámara de degradación por contaminación [4].

1. Aplicación de tensión AC a través de un transformador. 2. Goteadores. 3. Contenedor de solución salina. 4. Aislador bajo estudio.

Estas publicaciones reportan que luego de 500 h los aisladores han mostrado síntomas de envejecimiento.

3.2.3. Cámara para Degradación por Radiación Ultravioleta

La radiación natural de rayos ultravioleta no destruye la cadena polimérica de la silicona, ya que la atracción entre el silicio y el oxígeno tiene una alta energía molecular. Sólo la radiación con longitud de onda inferior a 280 nm puede atacar a las cadenas poliméricas

[48]. Adicionalmente, a los materiales utilizados para fabricar aisladores se les añade componentes como ZnO_2 y TiO_2 capaces de absorber la radiación UV y proteger el material del envejecimiento [2,48]. Aún así, la radiación ultravioleta ha sido una de las principales causas de deterioro para materiales poliméricos, y este efecto ha sido muy estudiado, haciendo uso de cámaras con paredes de metal o madera [4,6,8,28,36,37].

En el interior de la cámara, como se muestra en la fig. 9, se encuentran las lámparas de luz ultravioleta. El número de lámparas dependerá de la irradiancia que se quiera conseguir y de las dimensiones de la cámara [36].

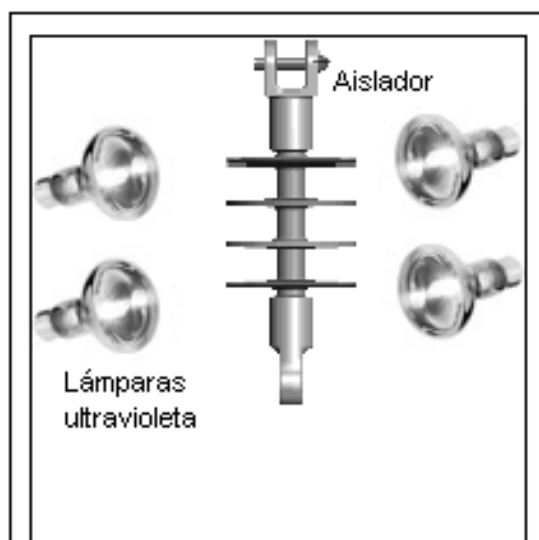


Fig. 9. Montaje para la degradación por rayos ultravioleta [36].

Según la norma ASTM D750 [49] el nivel de irradiancia debe ser de 25 W/m^2 y ha resultado satisfactorio utilizar lámparas cuya longitud de onda es de 250nm. El montaje debe contener también un medidor de intensidad ultravioleta [4,6,8,28,36].

El tiempo de exposición recomendado es de 5000 h [49], aunque algunas autores reportan que luego de 39 mil horas de la prueba según lo especifica la ASTM [48], la goma de silicona

no perdió sus propiedades. Otros afirman [8,28] que la radiación ultravioleta no cambia la hidrofobicidad de la superficie, sólo pierde elementos de bajo peso molecular.

3.2.4. Cámara para Degradación por Radiación Ultravioleta y Humedad

La combinación de la condensación del agua con los rayos UV acelera el proceso de envejecimiento [4,6,8,28,36]. Para lograr la condensación del agua se combina un proceso de vaporización, que produce niebla limpia, con la cámara previamente descrita (ver fig. 9).

3.2.5. Cámara Rotatoria (RWDT – por sus siglas en inglés)

Esta prueba es recomendada en la norma ANSI C29.13 – 2000 [21] para obtener la resistencia a la erosión del material. Adicionalmente, se indican que con tiempos de 1000h y 5000 h es posible evaluar la degradación del aislador [23]. Esta es una prueba combinada, denominada RWDT por sus siglas en inglés Rotating Wheel Dip Test. El esquema es mostrado en la fig. 10.

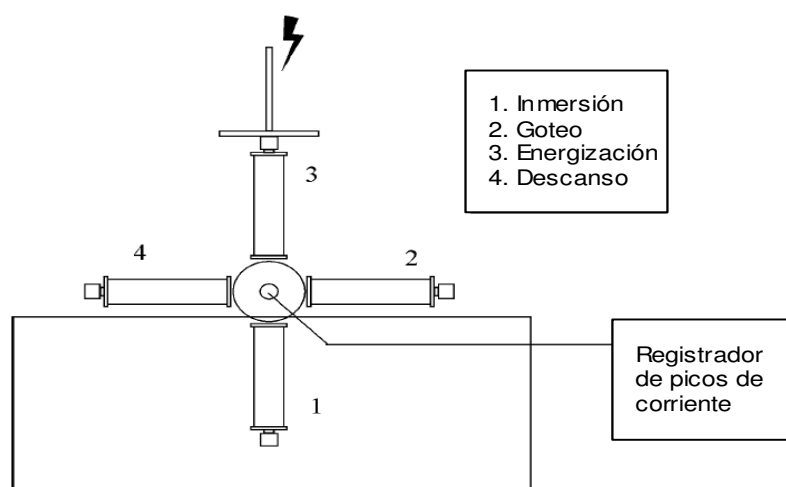


Fig. 10. Configuración del RWDT [29]

El montaje experimental consta de cuatro estaciones, en cada una de las cuales el aislador permanece durante un minuto. En el estado inicial el aislador se encuentra sumergido en el agua, seguidamente se deja reposar en posición horizontal siendo luego energizado y por último el mismo se deja descansar [5,23]. Con este montaje se reportan envejecimiento en horas.

La degradación con este tipo de configuración es más rápida que con el resto de las cámaras mencionadas, alrededor de una hora según [5] lo que puede arrojar resultados engañosos ya que el material no tiene oportunidad de recuperar sus propiedades.

CAPITULO IV.

4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En este capítulo se describe el procedimiento experimental implementado en este estudio, las características de los aisladores, el ciclo de envejecimiento, el procedimiento de contaminación de aisladores, la cámara de degradación artificial utilizada y los ensayos aplicados en los mismos.

Los factores considerados son: tensión, contaminación y humedad. Otros, como la degradación por rayos ultravioleta son referenciados en la literatura como menos influyentes y no están incluidos.

4.1. Características Constructivas

4.1.1. Características de los Aisladores

Los aisladores utilizados en el estudio tienen tensión nominal de 15 kV, hechos de goma de silicona con núcleo de fibra de vidrio cuyos datos se muestran en la fig. 11 y en la tabla IV. En el apéndice 6 se muestra el catálogo de dicho aislador.

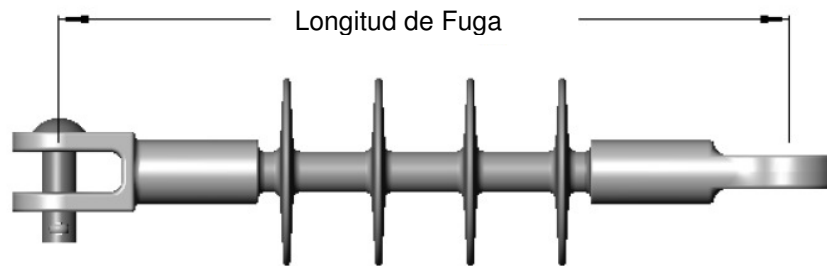


Fig. 11. Aislador polimérico bajo estudio

Tabla IV. Características de los aisladores.

Voltaje Nominal	Modelo	Sección Longitudinal	Distancia de arco (mm)	Distancia de fuga (mm)	Voltaje de Ruptura (kV)				Peso (kg)
					60 Hz		Impulso		
					Seco	Húmedo	Positivo	Negativo	
15	DS-15M	330	192	410	90	65	140	145	1,18

4.1.2. Descripción de la Cámara de Envejecimiento

La construcción de la cámara de envejecimiento acelerado contempla la colocación de 48 aisladores dentro de la misma cámara, para que todos estén sometidos a las mismas condiciones de humedad. Los parámetros a evaluar son los siguientes:

- Tensión aplicada: Se consideran tres niveles de tensión en función del valor nominal: $\frac{1}{2} V_n$, V_n y $1.5 V_n$.
- Contaminación: se aplican tres grados de contaminación: ligera, media y severa, según la norma IEC 60507 y un aislador sin contaminante.

El aislador sin contaminante servirá de referencia en las mediciones, mientras que la implementación de tres grados de contaminación tiene como objetivo tener un rango para el estudio de la influencia de la contaminación.

El método de contaminación aplicado es el de capa sólida, según [30] como se describe más adelante, por lo cual la humidificación de la cámara se realiza según el método de niebla limpia, a través de la evaporación de agua. Los valores relativos de humedad alcanzaban un valor promedio entre 60% y 95%.

Por cada nivel de tensión se colocaron dos barras, cada una de las cuales energizará 8 aisladores, totalizando 16 aisladores por cada nivel de tensión. Una barra servirá para energizar 4 aisladores con contaminación severa y 4 con media y la otra tendrá 4 con contaminación ligera y 4 limpios. En las fig. 12, 13, 14 y 15 se muestra la colocación de los aisladores dentro de la cámara de envejecimiento.



Fig. 12. Vista superior - Cámara Instalada

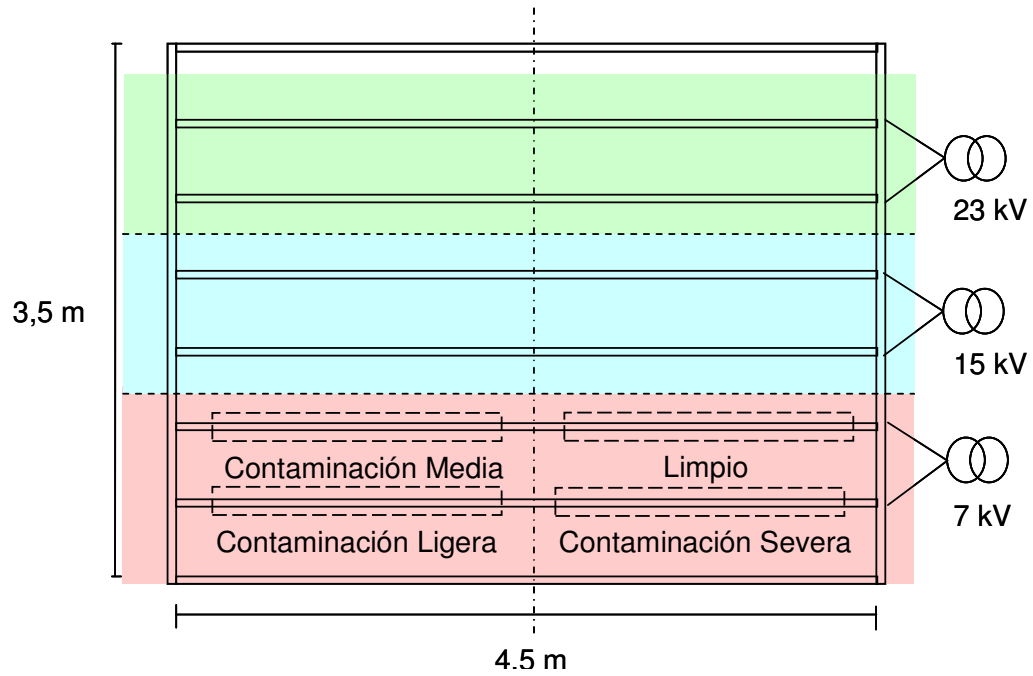


Fig. 13. Vista superior - Cámara Programada

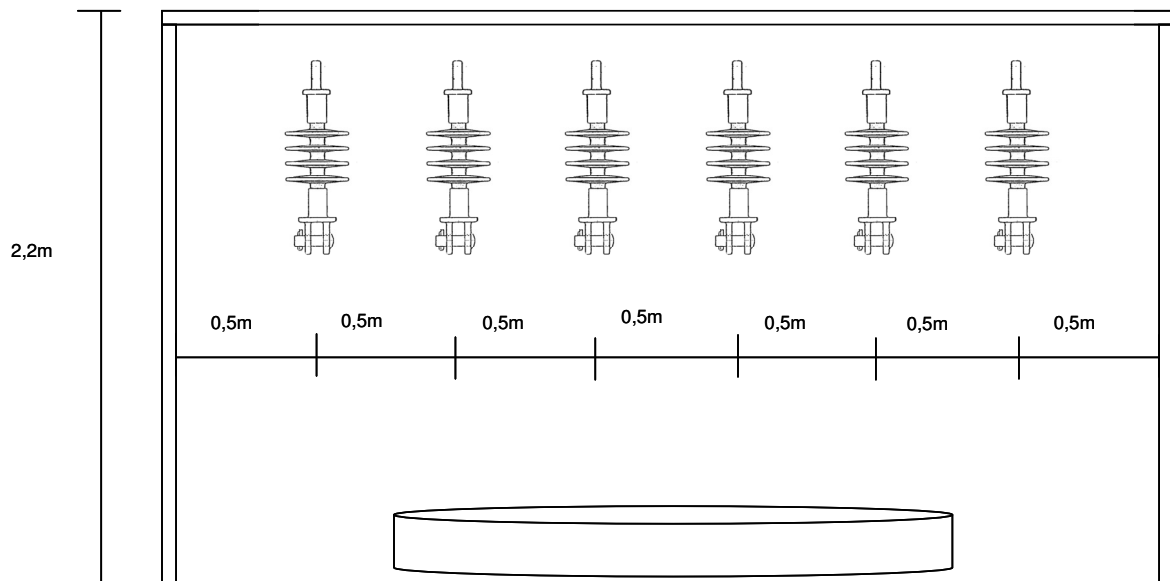


Fig. 14. Vista frontal de la cámara.

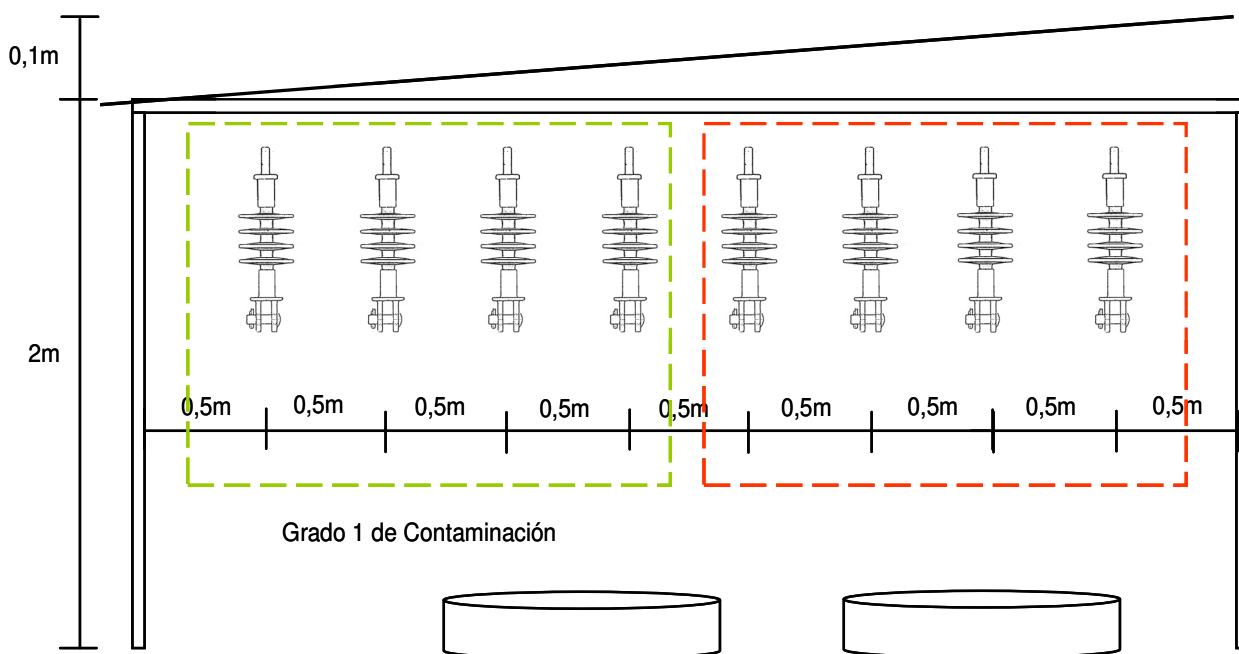


Fig. 15. Vista Lateral de la cámara instalada

4.2. Procedimiento Experimental

4.2.1. Sistema de Medición de la Corriente de Fuga

a. Equipos de medición

Se implementó un sistema de medición de la corriente de fuga y de tensión aplicada, haciendo uso de dos canales diferentes del osciloscopio digital y consideraciones de protección como se muestra en la fig. 16.

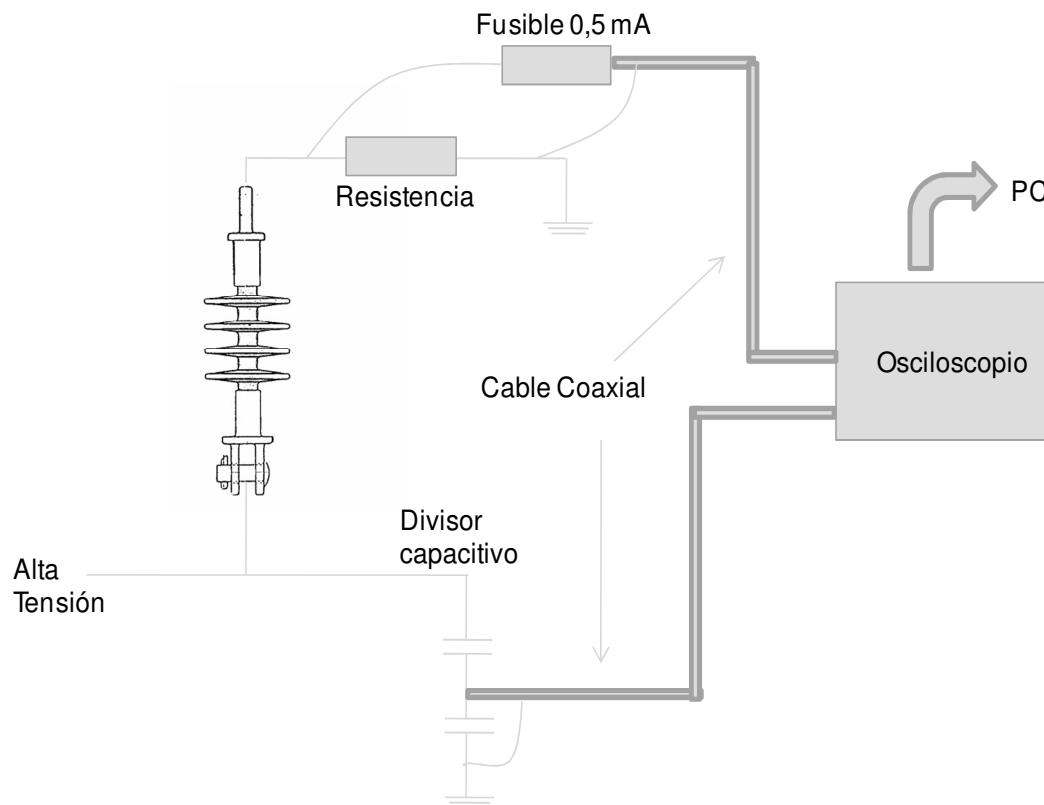


Fig. 16. Montaje experimental – medición de la corriente de fuga

La corriente de fuga fue medida a través de una resistencia conectada en serie con el aislador. Se colocaron diferentes valores de resistencias ($1\text{ k}\Omega$ - $10\text{ k}\Omega$, $\frac{1}{2}\text{ w}$, $\pm 5\%$ de tolerancia) según fuese la magnitud de la corriente. La tensión fue medida haciendo uso de un divisor capacitivo de tensión.

Inicialmente se había diseñado un circuito amplificador de corriente, como el que se muestra en la fig. 17, pero fue descartado por lo poco práctico de su uso para la repetición de las mediciones. En el apéndice 1 se describe el funcionamiento del mismo.

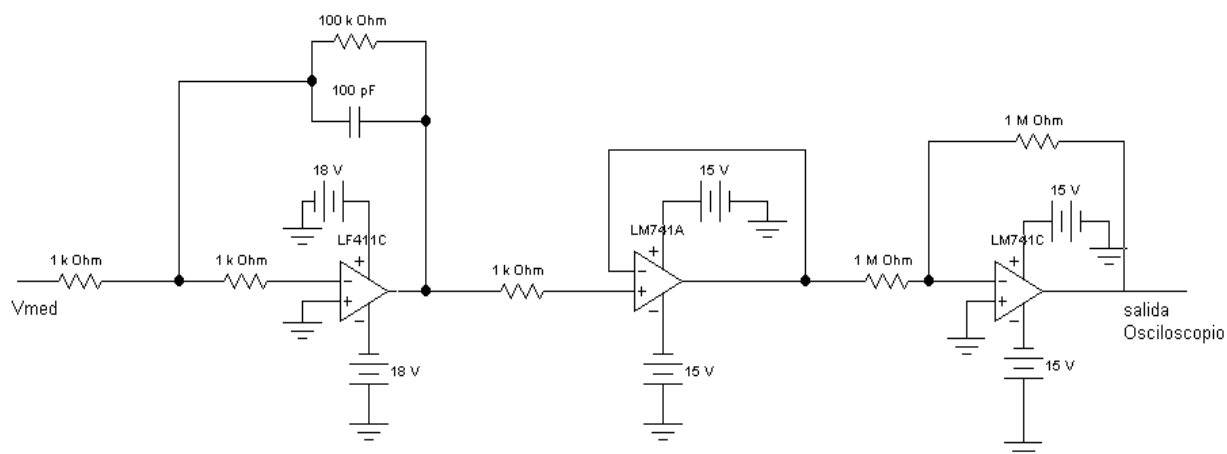


Fig. 17. Montaje experimental – medición de la corriente de fuga

b. Procesamiento de las mediciones: Descripción del Software

Los datos fueron procesados haciendo uso de la herramienta Matlab. La forma de onda tanto de corriente como de tensión registradas fueron analizadas en el dominio de la frecuencia y descompuestas en sus componentes armónicas utilizando la Transformación de Fourier, según la rutina mostrada en el apéndice 2. Con la descomposición de las ondas, se obtuvo la magnitud de la corriente por frecuencias múltiplos de la fundamental, y los desfases entre tensión y corriente correspondientes.

4.2.2. Contaminación de los Aisladores

La contaminación de los aisladores se realiza según el método de capa sólida, como se recomienda en la norma IEC 60507 [30]. En la literatura se reporta el uso de esta metodología para aisladores poliméricos [5,15,32,33, 35,40-45].

La severidad de la contaminación es indicada por el ESDD (Densidad del Depósito de Sal equivalente, por sus siglas en inglés). Por definición, la densidad de depósito densidad

equivalente de sal (ESDD) es igual a la cantidad de cloruro de sodio que, disuelto en el agua, va a cambiar la conductividad del agua al mismo valor que el resultante de la solución con contaminación obtenida de los depósitos en la superficie del aislante dividido por la superficie del aislante (mg/cm^2).

La medición de ESDD es una metodología desarrollada para aisladores cerámicos para caracterizar el grado de contaminación, según la norma IEC 60507 [30], por lo cual para determinar las proporciones de sal y Caolín de la mezcla contaminante que se aplicará sobre los aisladores poliméricos durante el período de estudio, se medirá el ESDD sobre un aislador de vidrio tipo ANSI 52-1, de área $240,5 \text{ cm}^2$.

Se hicieron tres mezclas. Por cada litro de agua se agregaron 40 gr. de Caolín y la cantidad de sal especificada en la tabla V, donde también se muestran los niveles de contaminación correspondientes según la norma IEC 60815 [54]. El contaminante fue aplicado sumergiendo los aisladores dentro de la mezcla contaminante.

Tabla V. Características de la mezcla contaminante

sal(mg)	ESDD medido (mg/cm^2)	Nivel de contaminación	Rango ESDD (mg/cm^2)
10	0.0416	Ligera	0.03-0.06
24	0.0998	Media	0.06-0.1
60	0.2495	Alta	0.3-0.60

4.2.2. Ciclo de Envejecimiento

El procedimiento experimental contempla dos partes: la evaluación de los aisladores dentro de la cámara, a través de la medición de la corriente de fuga y la segunda parte, persigue inferir la influencia de los períodos de recuperación y el estado de la superficie, mediante la medición de la corriente de fuga en distintos períodos de tiempo y la aplicación de otros

ensayos que determinen el grado de envejecimiento del aislador. En la fig. 18 se presenta un esquema que muestra la simulación experimental.

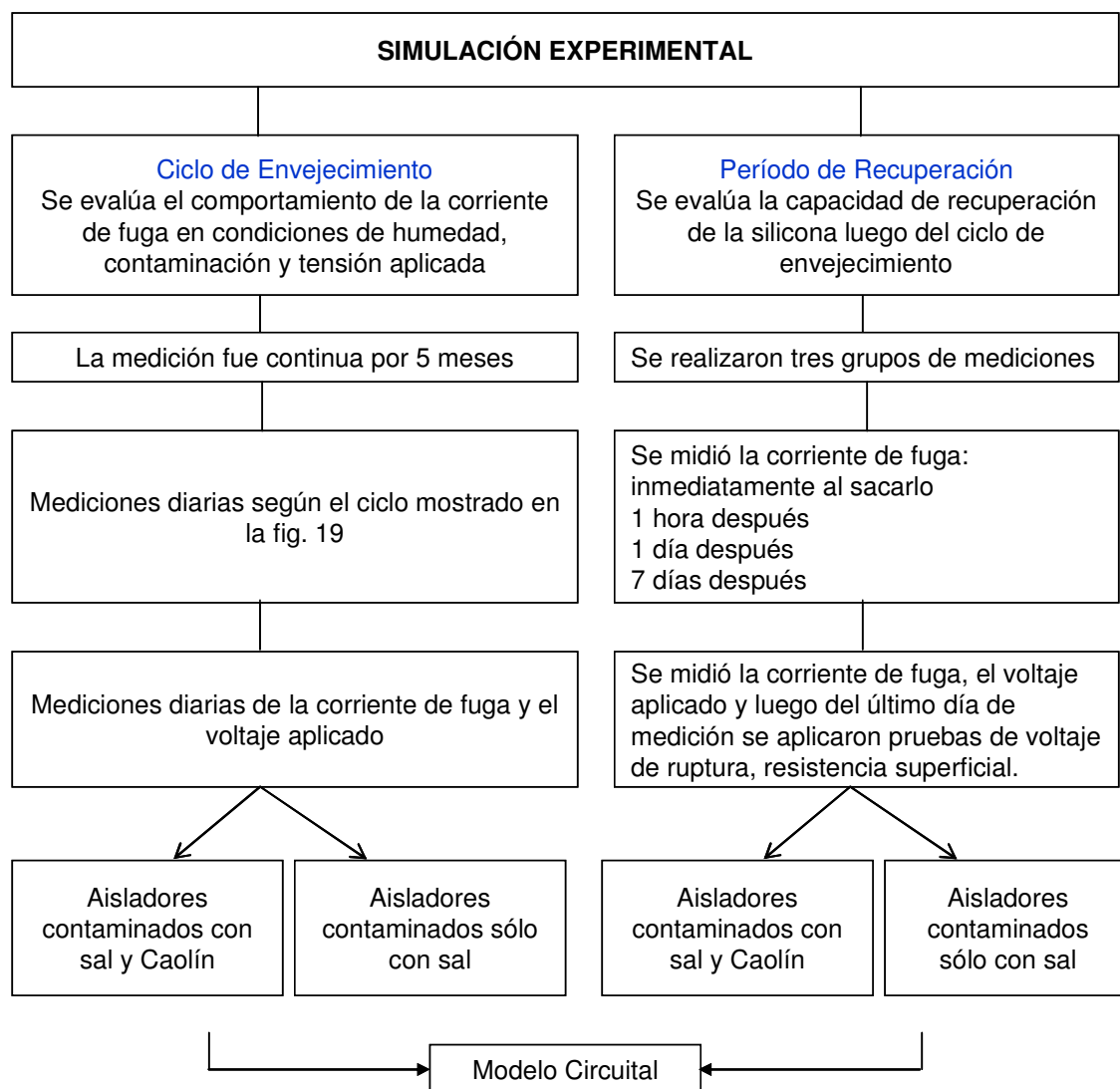


Fig. 18. Etapas de la Simulación Experimental.

De forma continua se midió la magnitud y forma de onda de la tensión aplicada y de la corriente superficial de los aisladores dentro de la cámara. Estos aisladores estaban sometidos a un ciclo de envejecimiento de 5 a 6 días, que consistió en mantener el aislador energizado bajo condiciones de humedad por un periodo de 3 a 4 días; el siguiente día

permanecía sin humedad para ser contaminado por el método de capa sólida descrito previamente y, para finalizar, el último día se dejaba en reposo para el secado de la capa de contaminación, cumpliendo con el tiempo recomendado en el método de contaminación, según se muestra en la fig. 19.

Inicio del ciclo

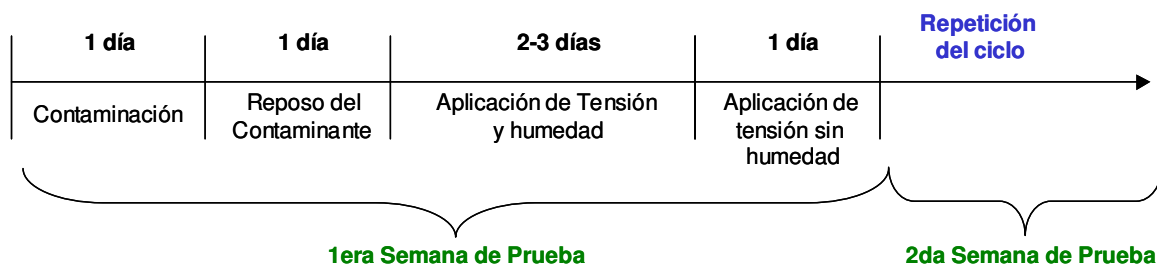


Fig. 19. Flujograma del ciclo de degradación de los aisladores dentro de la cámara

El tiempo de estudio es de cinco meses. Al final de cada mes se extrae de la cámara un aislador por cada nivel de tensión por cada grado de contaminación, lo que totaliza 12 aisladores. El procedimiento se muestra en la fig. 20.

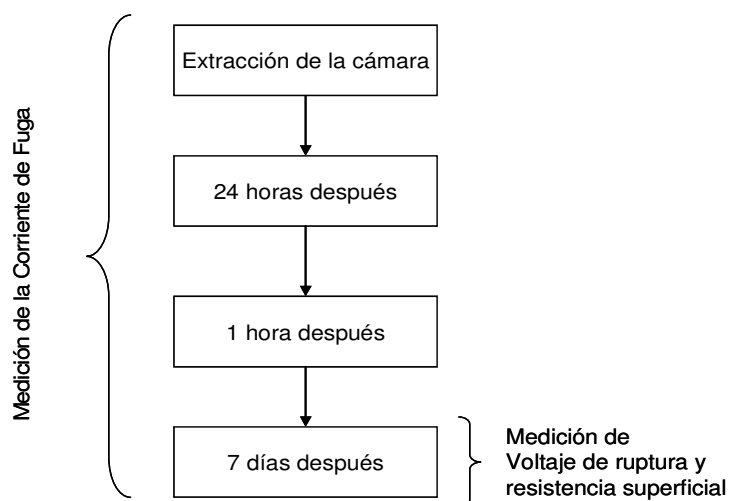


Fig. 20. Flujograma de las mediciones fuera de la cámara

Este procedimiento es aplicado los primeros cuatro meses. El último mes de prueba los aisladores fueron contaminados con una mezcla sin Caolín con el fin de comparar ambos métodos, ya que el mismo posee características cerámicas, como se mencionó en el capítulo III.

4.3. Técnicas de Diagnóstico

La corriente de fuga de los mismos fue medida inmediatamente al sacarlo, 1 hora, 1 día y una semana después para evaluar, a partir de las características de dicha corriente, la pérdida de las propiedades y su capacidad de regeneración en el tiempo. Seguidamente, se le aplicaron las siguientes pruebas:

- Tensión de ruptura a baja frecuencia en condiciones secas
- Tensión de ruptura a baja frecuencia en condiciones de humedad
- Resistencia Superficial
- RIV

CAPÍTULO V.

5. CORRIENTE DE FUGA EN AISLADORES POLIMÉRICOS

En este capítulo se presentan los resultados y análisis de la medición de las corrientes de fuga de los aisladores en las condiciones de simulación y de los otros ensayos aplicados, para establecer los parámetros de comportamiento de la superficie del mismo.

Se realizaron mediciones tanto dentro de la cámara, de forma continua, como fuera de la cámara, después de cumplido un tiempo de estudio para evaluar la respuesta de los mismos luego de haber sido sometidos a las condiciones de prueba.

Las mediciones de la corriente de fuga realizadas de forma continua, para estudiar el comportamiento de los aisladores en el tiempo, fueron agrupadas en función de mostrar las tendencias encontradas.

Por su parte, las mediciones realizadas fuera de la cámara, sirvieron para evaluar la capacidad de recuperación de los aisladores.

Este capítulo está dividido de la siguiente forma dentro y fuera de la cámara, como se muestra en la fig. 18:

- Resultados experimentales
- Procesamiento de las mediciones y,

- Análisis de resultados

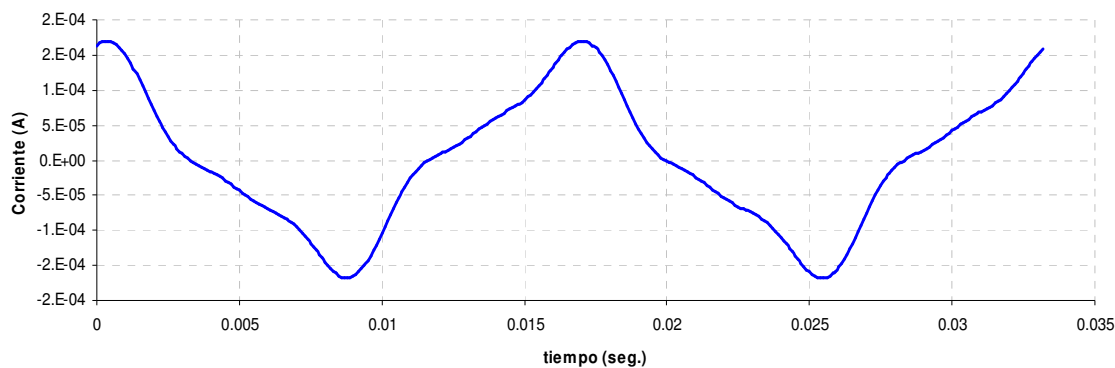
Finalmente, las mediciones de los aisladores contaminados sólo con sal y con sal y Caolín son presentadas de la misma forma que los resultados anteriores, a fin de mostrar las diferencias entre ambos métodos de contaminación.

5.1. Mediciones de la Corriente de Fuga

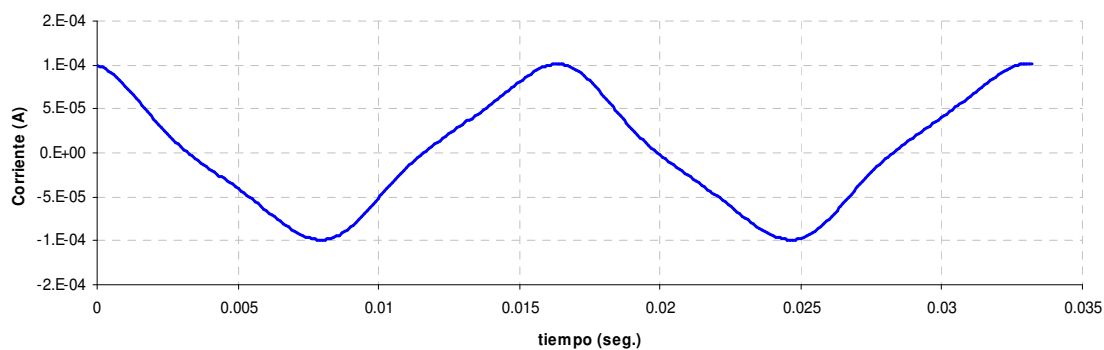
El procedimiento experimental considera el estudio de la corriente de fuga en dos condiciones: de forma continua (dentro de la cámara) y una vez que los aisladores dejan de estar sometidos a las condiciones de simulación (fuera de la cámara), para evaluar la capacidad de recuperación de la silicona, tal como se muestra en el flujograma de la fig. 18.

5.1.1. Resultados dentro de la cámara

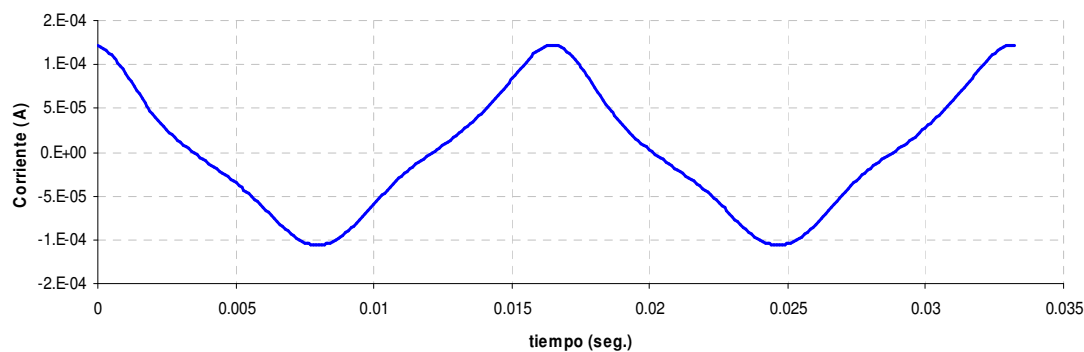
La forma de onda de las corrientes varía con el día de medición. Para apreciar la variación de las corrientes en días consecutivos, se muestran las formas de onda de corriente obtenidas en un ciclo de envejecimiento, en las mismas condiciones de humedad, para el aislador con contaminación severa a 15 kV en la fig. 21.



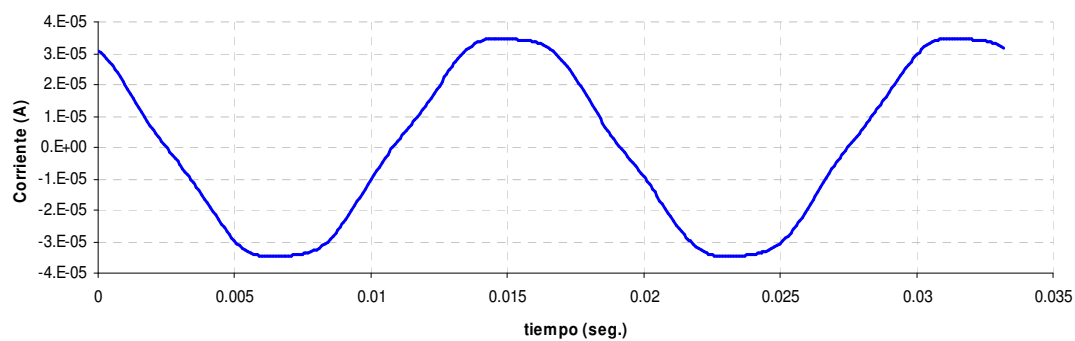
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 21. Corriente en un ciclo de envejecimiento en condiciones de humedad (aislador de 15 kV contaminación severa) (a) Primer día del ciclo (b) Segundo día del ciclo (c) Tercer día del ciclo (d) Cuarto día del ciclo

Según se puede observar en la figura 21, el primer día del ciclo de envejecimiento se presentan corrientes más altas. Esta tendencia tiene lugar en todos los aisladores. Seguidamente, las corrientes disminuyen en magnitud, lo que puede ser consecuencia del lavado, recuperación de la superficie y desprendimiento del contaminante.

En los aisladores sin contaminante la corriente tiene tendencia a ser más capacitiva durante todo el ciclo por lo general, como se muestra en las fig. 22 y 23, donde se presentan las corrientes del aislador sin contaminación el primer día del ciclo de envejecimiento para dos niveles de tensión.

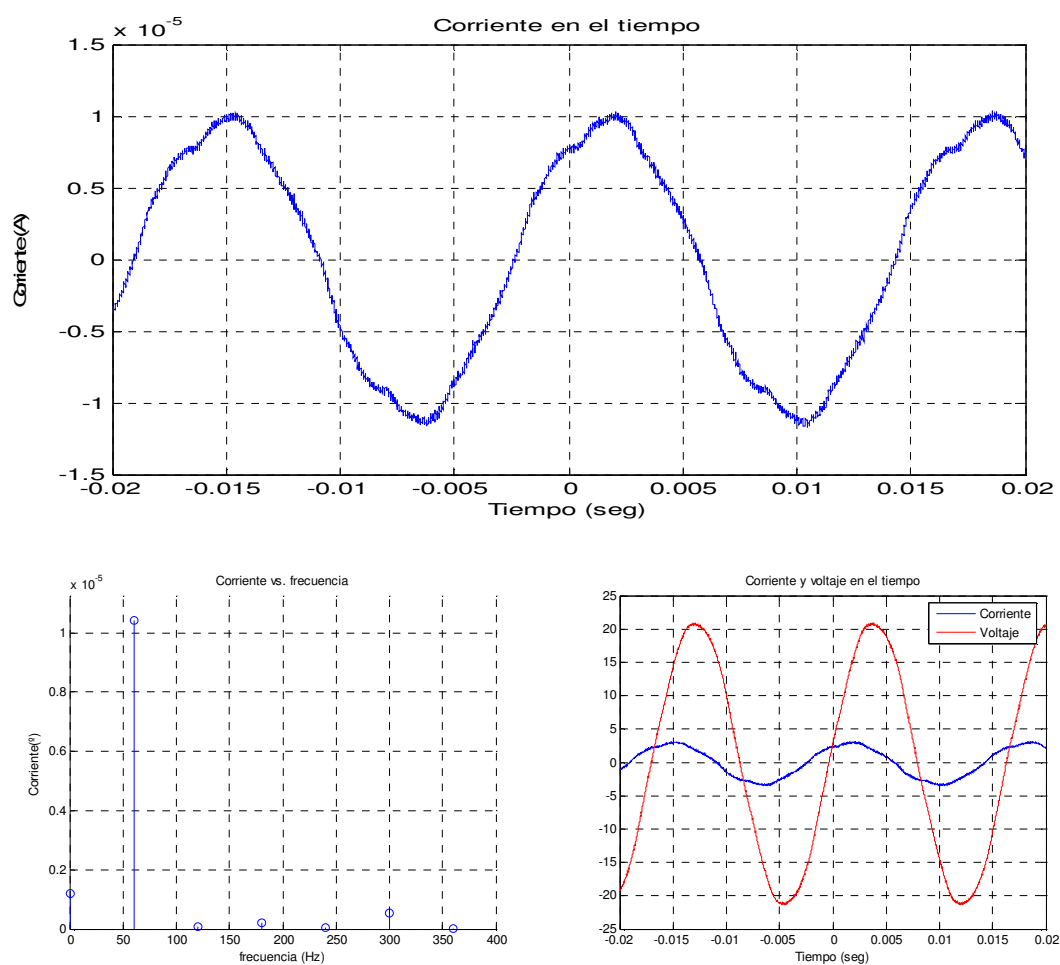


Fig. 22. Corriente de fuga y composición armónica - Tensión aplicada 15 kV

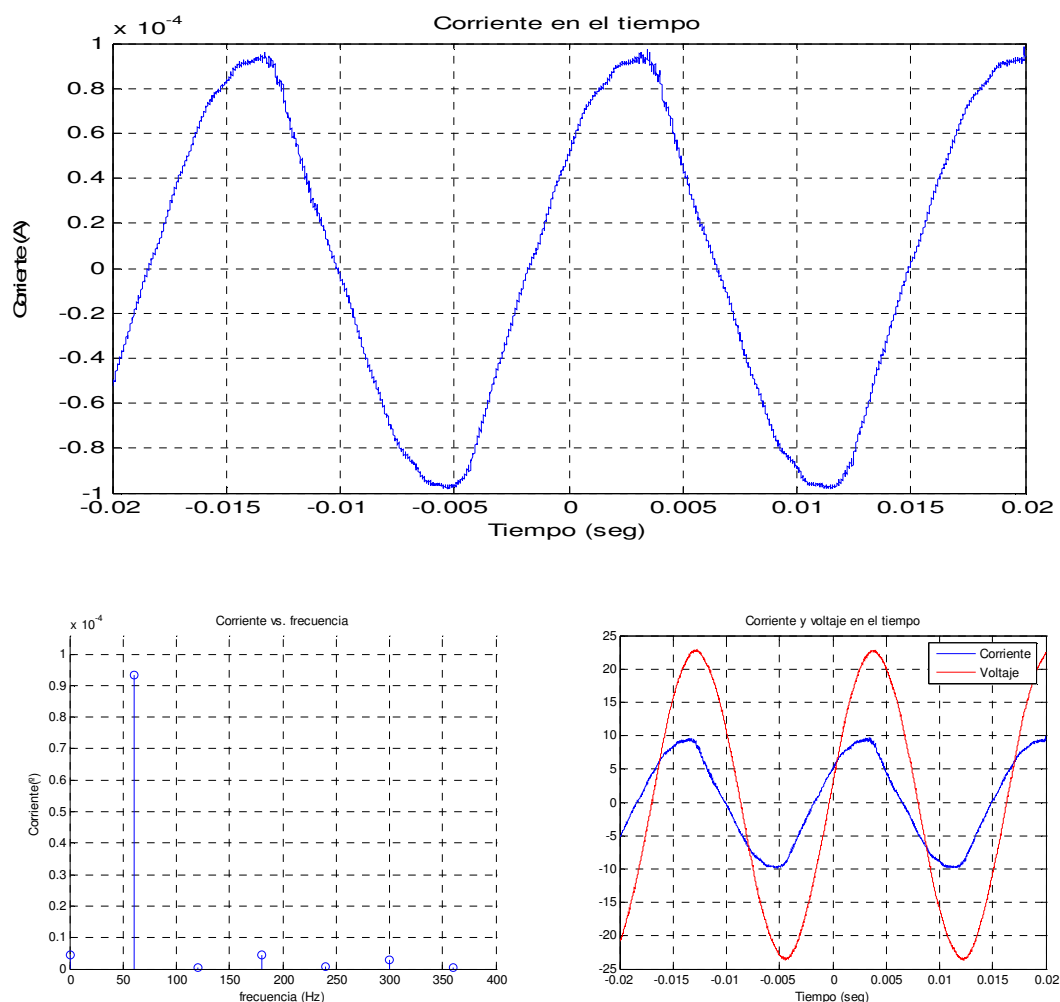


Fig. 23. Corriente de fuga y composición armónica - Tensión aplicada 23 kV

En cuanto a los aisladores con contaminación, las formas de onda de corriente de las muestras presentan la misma tendencia para los diferentes niveles de contaminación y tensión aplicada. En las figuras 24, 25, 26 y 27 se muestran las corrientes por grado de contaminación para los aisladores sometidos a 15 kV, en el segundo día del ciclo de envejecimiento.

En la misma puede apreciarse la forma de onda de la corriente de fuga medida, la descomposición en Fourier de la misma y la tensión aplicada y la corriente en una sola ventana, de forma que es posible observar el desfase entre ambas señales.

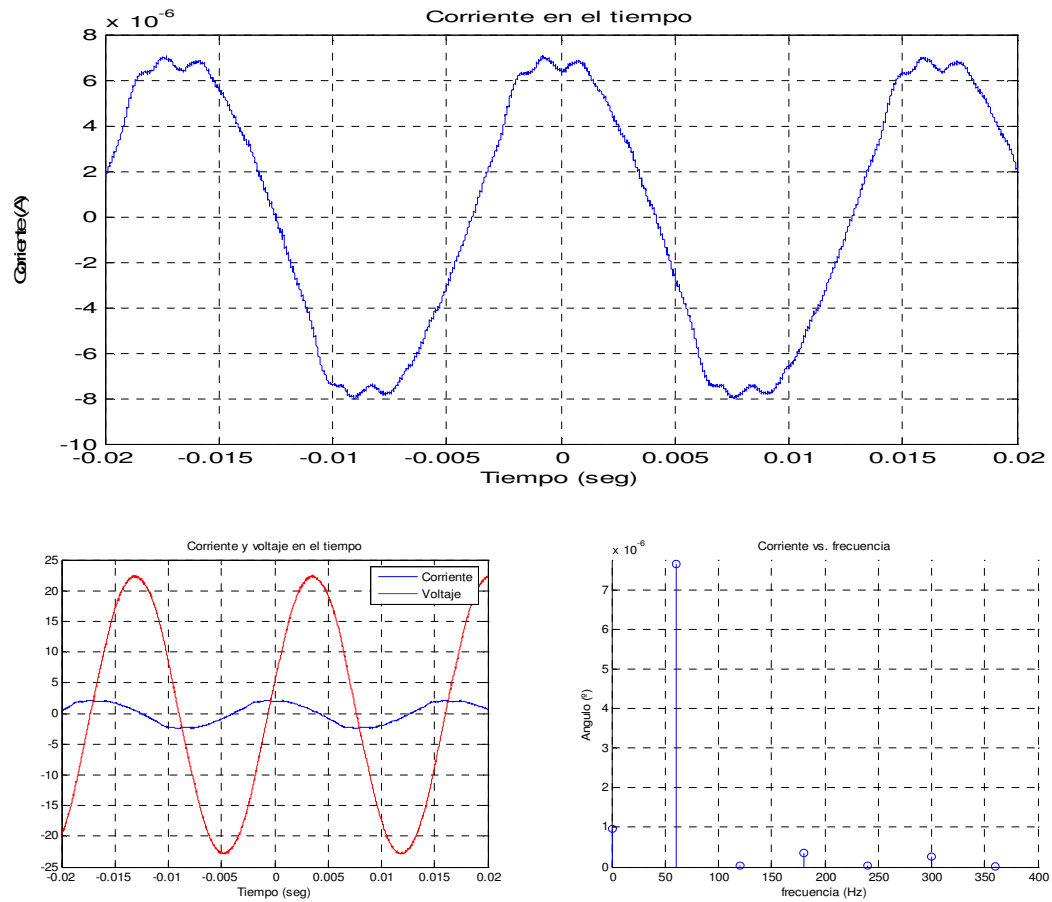
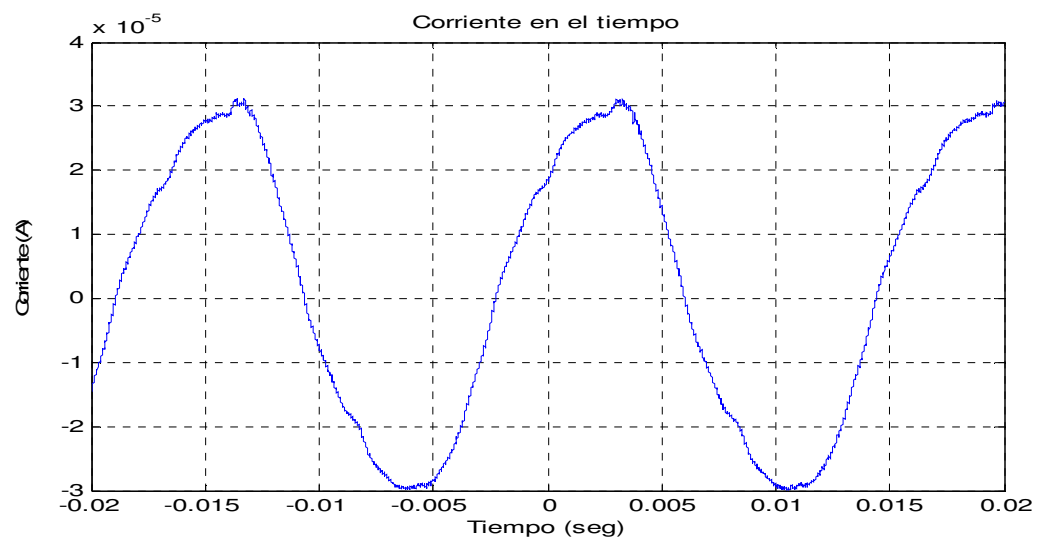


Fig. 24. Corriente de fuga Aislador sin contaminante sometido a 15 kV



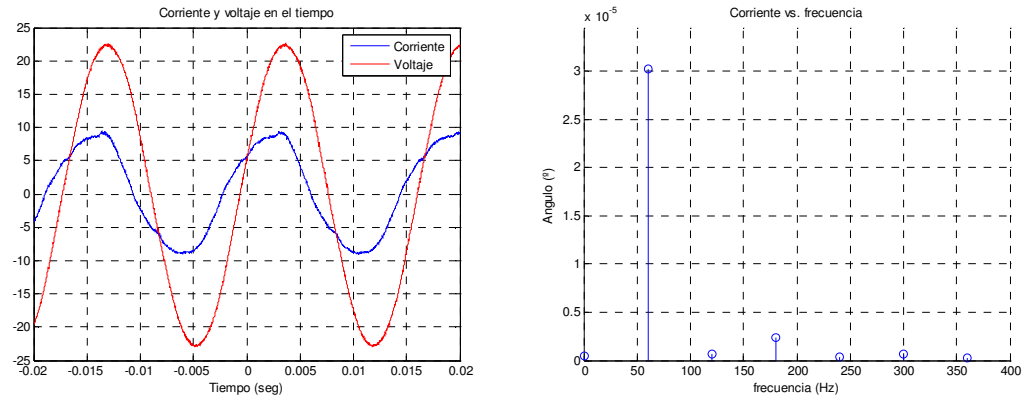


Fig. 25. Corriente de fuga Aislador contaminación severa sometido a 15 kV

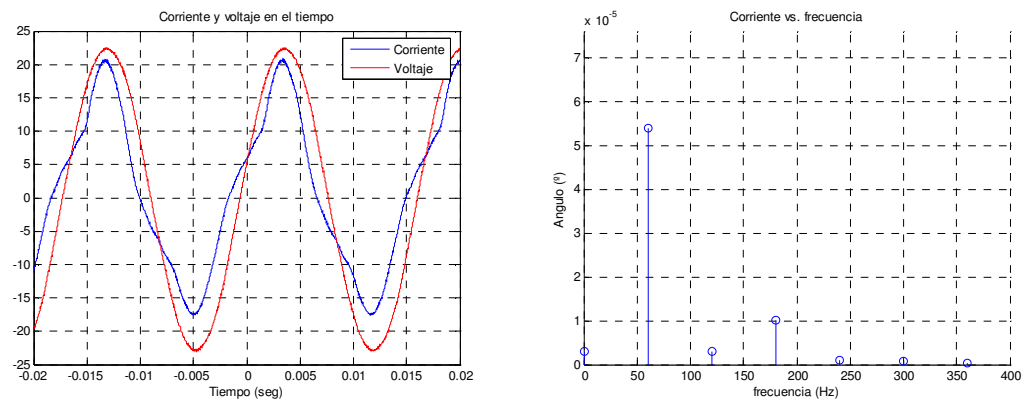
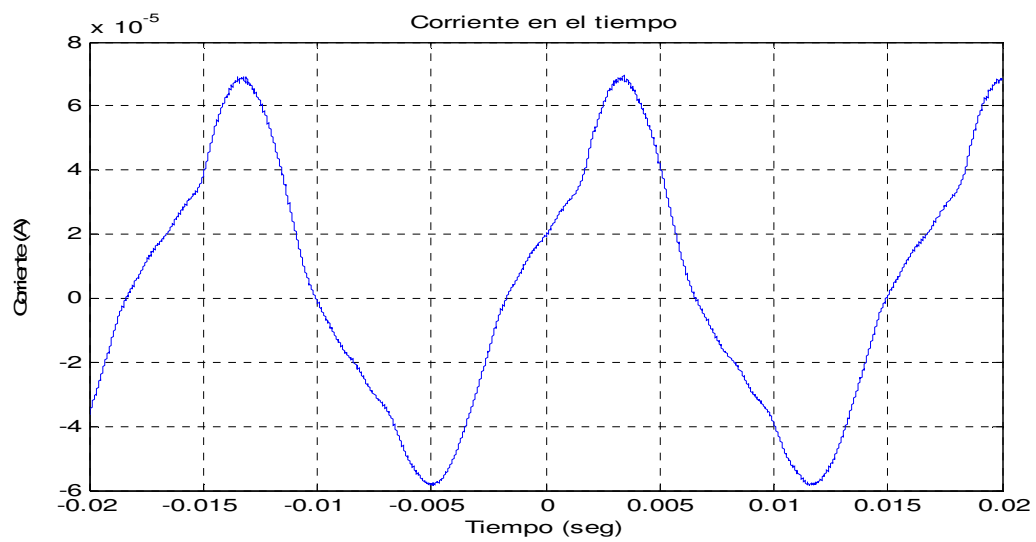


Fig. 26. Corriente de fuga Aislador contaminación media sometido a 15 kV

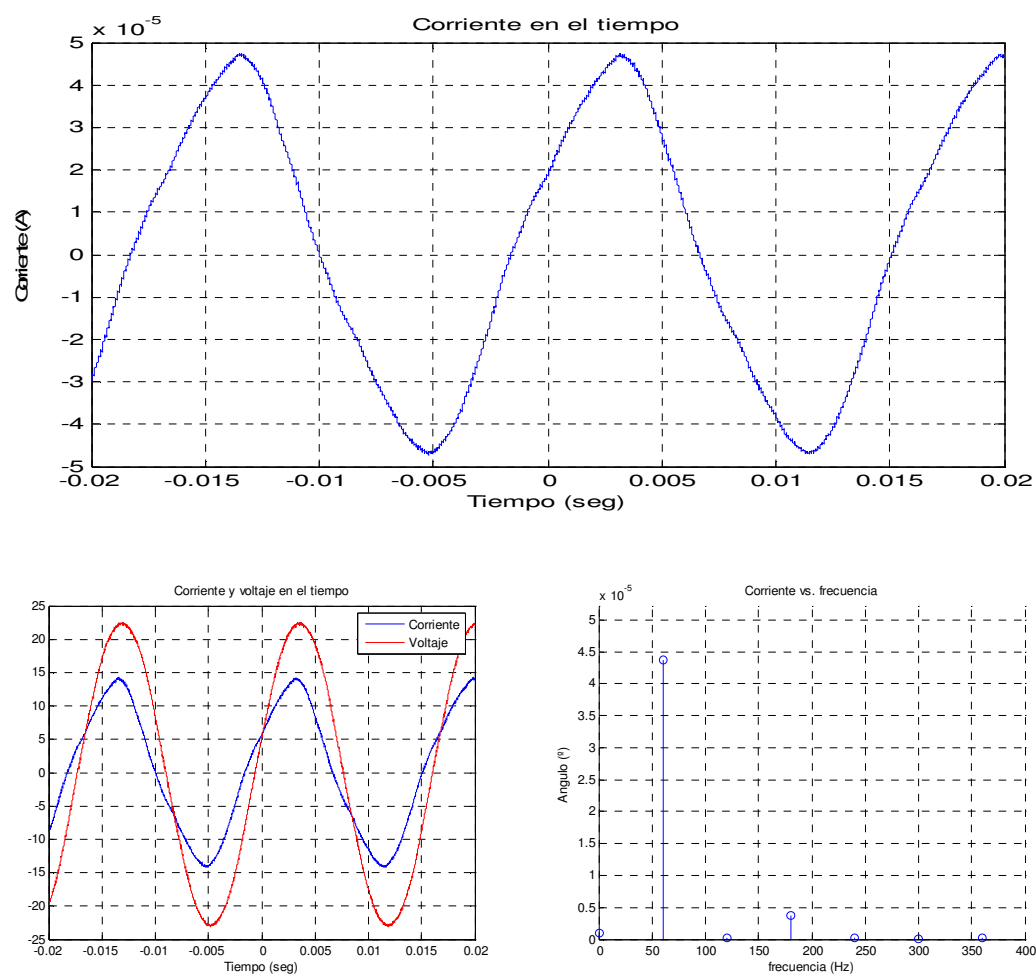


Fig. 27. Corriente de fuga Aislador contaminación ligera sometido a 15 kV

Se puede observar que la corriente varía entre los períodos de medición sin seguir un patrón definido de comportamiento que permita caracterizarla.

El comportamiento obtenido es similar al reportado en aisladores cerámicos, como se muestra en la tabla I, por lo que en el primer caso puede ser interpretado como formación de bandas secas.

Las formas de onda tienen características distorsionadas, según se muestra en las figuras anteriores. Esto se aprecia tanto en aisladores contaminados como los que no tienen contaminación aplicada, pero en aisladores sin contaminación, a diferencia del resto, es necesaria una mayor tensión aplicada para obtener deformaciones más acentuadas en la corriente.

La medición de la corriente en los aisladores sin contaminación, dada la magnitud de las corrientes, por lo regular se realizaba con la resistencia de mayor valor, a fin de amplificar la señal lo mejor posible.

Por otra parte, las magnitudes de la corriente de fuga para el aislador con contaminación severa a 15 kV, en función de los ciclos de medición, se muestra en la fig. 28, siendo el comportamiento similar al reportado en todos los aisladores bajo estudio.

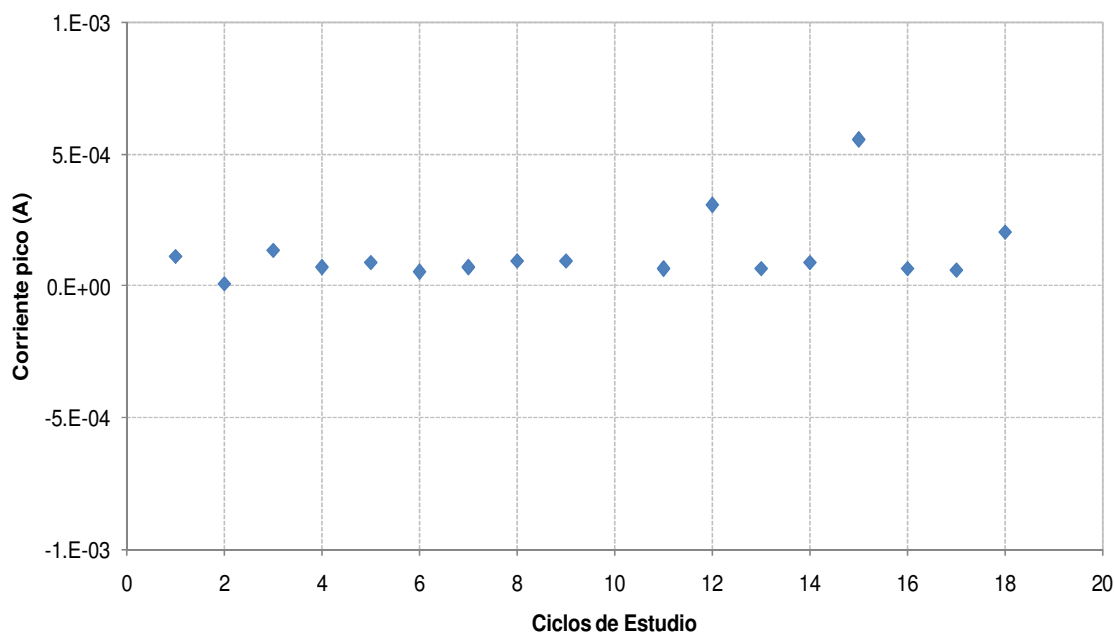


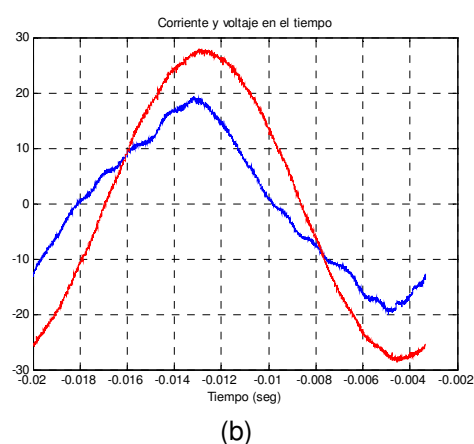
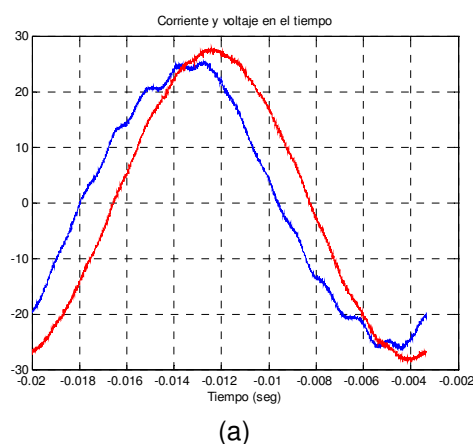
Fig. 28. Magnitud de la corriente de fuga total del aislador 15 kV, contaminación severa

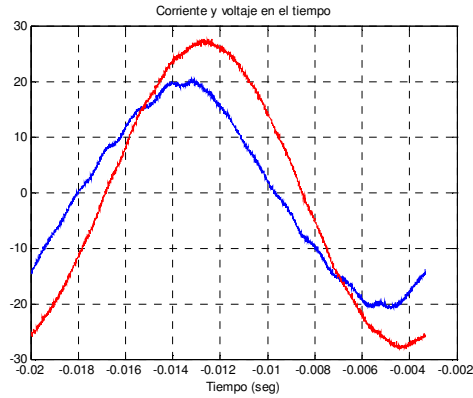
Las magnitudes de las corrientes mostradas en la fig. 28 son las correspondientes a días similares del ciclo de envejecimiento. Se puede observar que las mediciones oscilan alrededor de un valor medio. Este comportamiento se registra con el mismo patrón en el resto de los aisladores. Esta condición permite agrupar las medidas y utilizar distribuciones como la logarítmica para el análisis de resultados.

5.1.2. Resultados fuera de la cámara

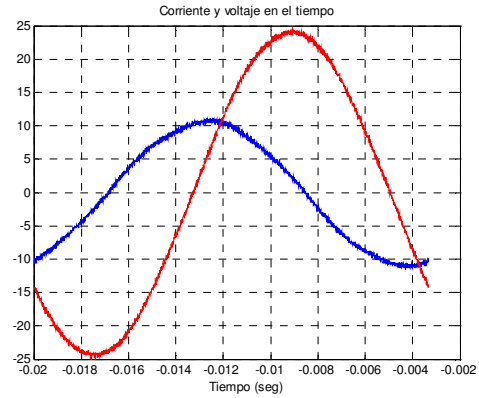
Una vez retirados de la cámara, los aisladores fueron sometidos a ensayos que se describen en el apéndice 3. Estos resultados, demuestran que los aisladores no presentan síntomas de degradación en sus propiedades eléctricas luego del periodo de estudio.

El comportamiento de las corrientes es similar para todas las muestras, por lo cual se presentan las correspondientes al aislador de 23 kV en condiciones de contaminación severa para cada extracción en la fig. 29, 30 y 31, y las tensiones para cada medición.



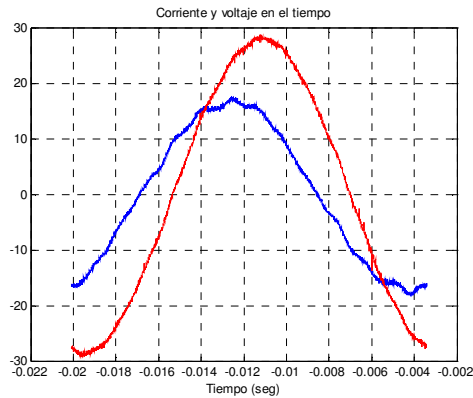


(c)

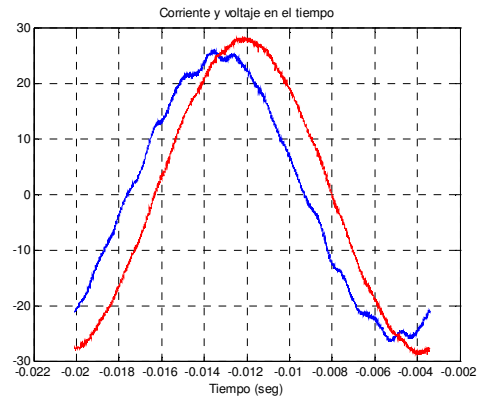


(d)

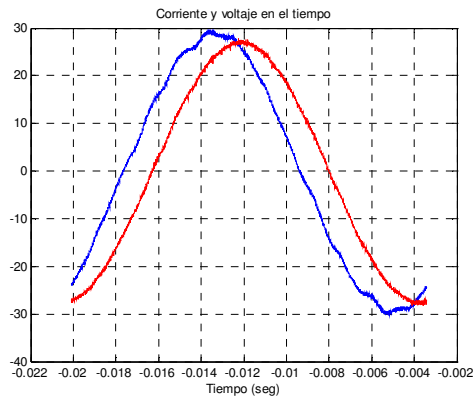
Fig. 29. Corriente (azul – $1:33.33 \mu\text{A}$) y tensión (rojo - $1:1 \text{ kV}$) de la primera remoción de aisladores de la cámara. Al sacarlo. (b) 1 hora después. (c) 1 día después. (d) 7 días después.



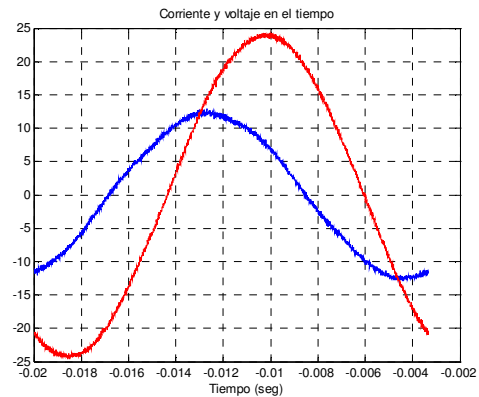
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 30. Corriente (azul – $1:33.33 \mu\text{A}$) y tensión (rojo - $1:1 \text{ kV}$) de la primera remoción de aisladores de la cámara. Al sacarlo. (b) 1 hora después. (c) 1 día después. (d) 7 días después.

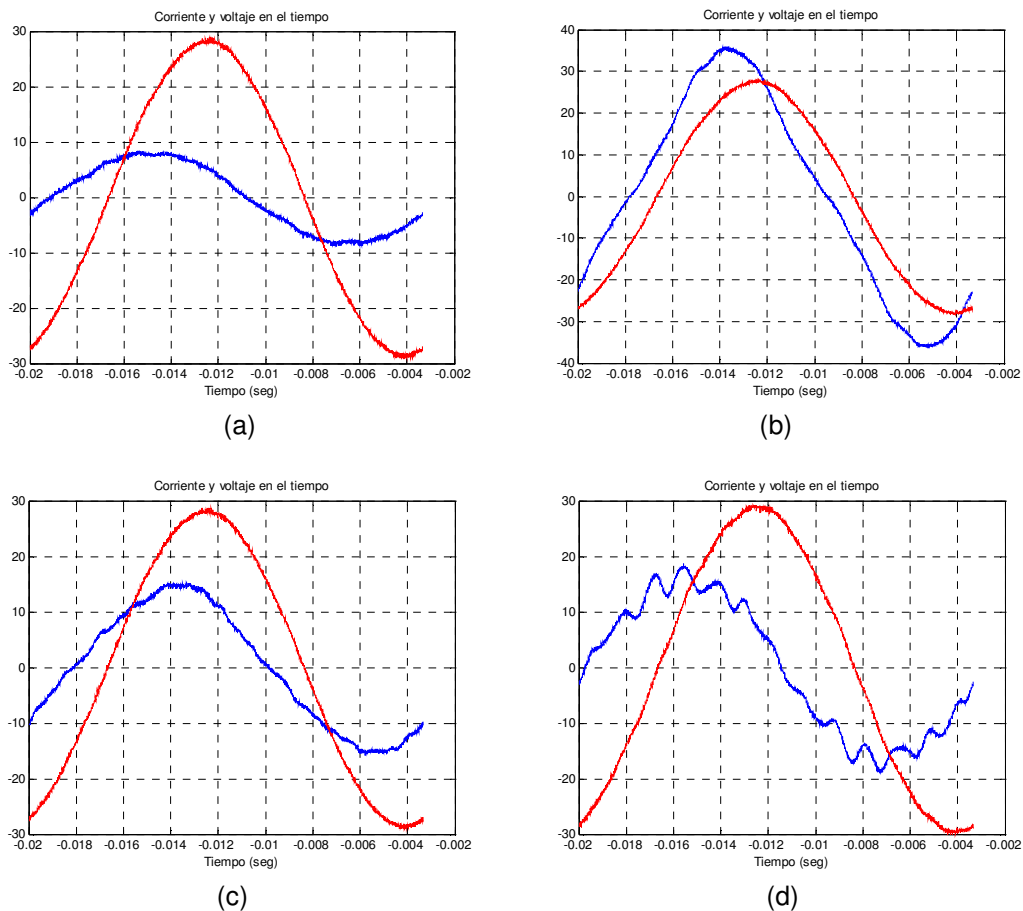


Fig. 31. Corriente (azul – 1:33.33 μA) y tensión (rojo - 1:1 kV) de la primera remoción de aisladores de la cámara. Al sacarlo. (b) 1 hora después. (c) 1 día después. (d) 7 días después.

Según se puede observar que las magnitudes de corriente no responden a una relación lineal de aumento o disminución de la misma entre períodos de evaluación.

Los valores picos de las corrientes son las que se muestran en las tablas VI. VII y VIII.

Tabla VI. Valores pico de la corriente (A) en la primera remoción

Tensión (kV)	Nivel de contaminación	Al sacarlo	1 hora	1 día	7 días
7	Sin contaminante	1.29E-05	1.03E-06	2.37E-07	6.58E-07
	Severa	3.33E-07	3.32E-07	3.16E-07	6.05E-07
	Media	3.31E-07	3.56E-07	3.50E-07	6.64E-07
	Ligera	3.65E-07	3.79E-07	3.76E-07	6.36E-07
15	Sin contaminante	4.85E-07	4.84E-07	4.72E-07	1.02E-06
	severa	8.91E-07	1.27E-06	1.41E-06	1.29E-06
	Media	8.66E-07	1.09E-06	1.20E-06	1.50E-06
	Ligera	8.26E-07	9.15E-07	9.17E-07	1.44E-06
23	Sin contaminante	7.01E-07	7.43E-07	7.01E-07	1.67E-06
	severa	1.16E-06	5.48E-05	6.38E-05	3.54E-05
	Media	8.87E-07	2.45E-05	4.10E-05	3.50E-05
	Ligera	1.05E-06	2.65E-05	3.94E-05	3.78E-05

Tabla VII. Valores pico de la corriente (A) en la segunda remoción

Tensión (kV)	Nivel de contaminación	al sacarlo	1 hora	1 día	7 días
7	sin contaminante	4.26E-07	4.76E-07	5.90E-07	7.28E-07
	severa	3.56E-07	3.73E-07	3.47E-07	6.01E-07
	Media	3.31E-07	3.41E-07	3.36E-07	8.07E-07
	Ligera	4.11E-07	4.32E-07	4.32E-07	6.72E-07
15	sin contaminante	5.46E-07	5.34E-07	4.89E-07	1.02E-06
	Severa	7.19E-07	8.41E-07	7.75E-07	2.74E-05
	Media	6.01E-07	6.44E-07	6.23E-07	4.15E-05
	Ligera	7.22E-07	8.03E-07	7.76E-07	1.32E-06
23	sin contaminante	1.01E-06	9.12E-07	8.94E-07	2.90E-05
	Severa	7.89E-06	1.17E-06	1.35E-06	4.05E-05
	Media	7.71E-06	1.04E-06	1.09E-06	4.21E-05
	Ligera	7.13E-06	1.05E-06	1.21E-06	4.37E-05

Tabla VIII. Valores pico de la corriente (A) en la tercera remoción

Tensión (kV)	Nivel de contaminación	al sacarlo	1 hora	1 día	7 días
7	sin contaminante	7.69E-06	1.21E-07	4.04E-07	1.01E-07
	Severa	2.52E-05	3.72E-07	5.07E-07	1.17E-07
	Media	1.96E-05	4.58E-07	1.16E-06	1.27E-07
	Ligera	4.90E-05	4.37E-07	1.01E-06	1.33E-07
15	sin contaminante	1.20E-05	1.49E-07	1.78E-07	6.24E-07
	Severa	1.21E-05	7.19E-07	2.48E-07	1.01E-06
	Media	3.16E-05	8.76E-07	2.76E-07	9.65E-07
	Ligera	3.32E-05	9.78E-07	3.18E-07	1.08E-06
23	sin contaminante	6.21E-06	3.75E-07	3.28E-07	1.06E-06
	Severa	2.73E-05	1.53E-06	6.75E-07	7.69E-07
	Media	8.27E-05	4.65E-07	3.99E-07	1.02E-06
	Ligera	4.73E-05	7.46E-07	5.67E-07	9.99E-07

5.2. *Procesamiento de las Mediciones*

Para la caracterización de la forma de onda de la corriente, se descompuso en términos de Fourier, con lo cual fue posible conseguir el ángulo de desfase entre la componente fundamental de la tensión y la corriente y determinar su tendencia capacitiva o resistiva y las magnitudes de cada componente de la corriente.

5.2.1. Dentro de la cámara

Basado en la fig. 28, donde se presenta la variación de las mediciones, se estudia la distribución logarítmica de los valores obtenidos, siendo la que mejor se adapta al comportamiento de las medidas, ya que varían alrededor de un valor medio.

Para obtener la distribución logarítmica de las corrientes a partir de los resultados obtenidos por cada aislador, se agrupó en un conjunto las medidas de corriente como las presentadas en la fig. 28. Cada grupo de valores (siendo un grupo la combinación de un nivel de tensión con un grado de contaminación, obteniendo en total 12 grupos) se dividió en 10 rangos, a partir de su valor medio y su desviación estándar, cada rango corresponde a una desviación estándar.

Se calculó el logaritmo natural de cada magnitud de corriente (I_p), colocados en el eje x. En el eje y se encuentra el porcentaje respecto al número total, de valores que caen dentro del rango especificados en el eje horizontal.

En la fig. 32 se muestra la distribución logarítmica de la corriente para el aislador de 15 kV con contaminación severa. El patrón mostrado dicha figura coincide con el del resto de los aisladores, por lo que sólo se presenta la gráfica correspondiente a esta muestra.

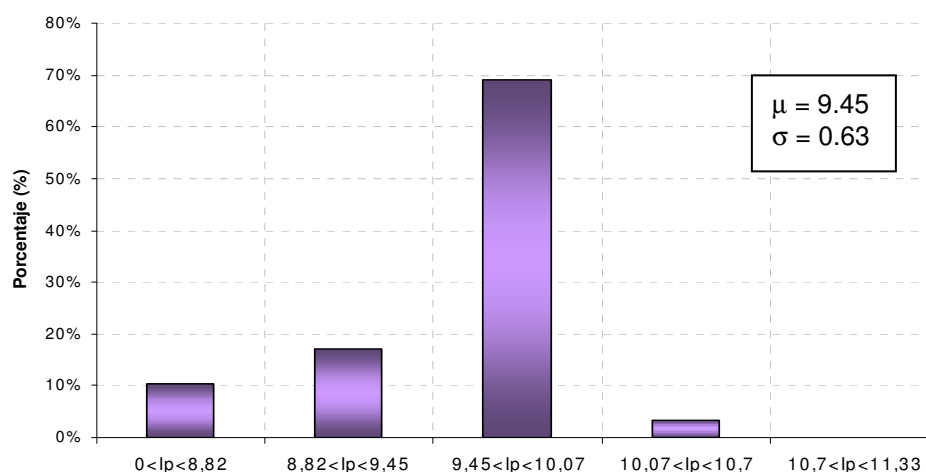


Fig. 32. Distribución logarítmica de la corriente del aislador de 15 kV contaminación severa.

Los valores promedios y varianzas de la distribución logarítmica de las corrientes por nivel de tensión y grado de contaminación para la totalidad de las mediciones durante el estudio se aprecian en la tabla IX.

Tabla IX. Valores promedios y varianzas de la distribución logarítmica de la corriente.

Tensión	Valor	Sin contaminante	Ligera	Media	Severa
23 kV	Varianza	1.54	0.76	1.04	0.55
	Media	10.11	9.13	9.06	9.23
15 kV	Varianza	1.58	0.73	0.39	0.63
	Media	12.95	9.70	9.60	9.45
7 kV	Varianza	1.45	0.31	0.75	0.40
	Media	13.67	9.98	9.94	9.71

Los valores promedios de las corrientes por nivel de tensión y grado de contaminación se aprecia en la tabla X y se muestran en la fig. 33.

Tabla X. Valores promedios de las corrientes.

	sin contaminante	Ligera	Media	Severa
23 kV	4.08E-05	1.08E-04	1.16E-04	9.80E-05
15 kV	2.37E-06	6.10E-05	6.80E-05	7.88E-05
7 kV	1.16E-06	4.64E-05	4.82E-05	6.05E-05

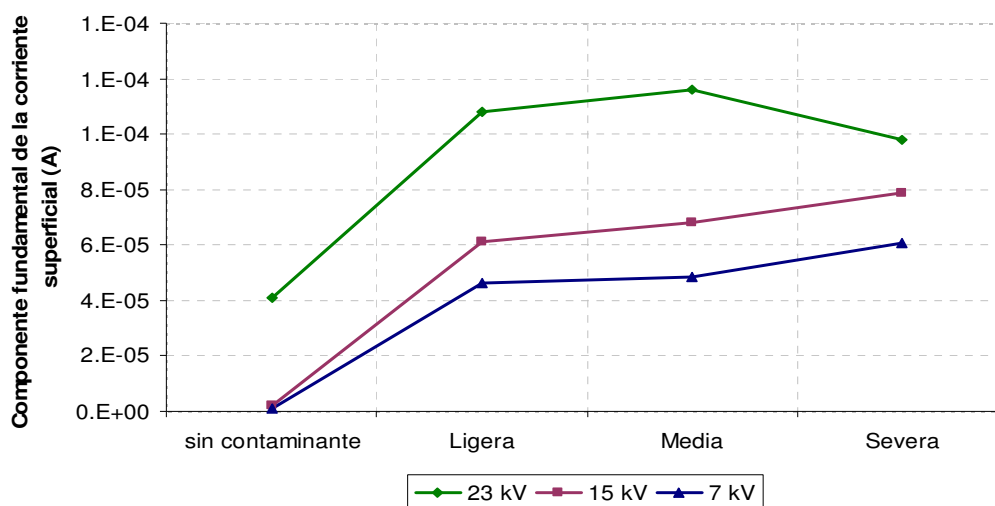


Fig. 33. Corriente promedio por nivel de tensión y grado de contaminación.

Los valores más bajos de corriente se presentan en los aisladores sin contaminación, como se aprecia en la fig. 33.

Puede observarse en la tabla X, que para mayores valores de tensión se obtienen mayores magnitudes de corrientes. Igualmente, la mayor corriente se obtiene para el mayor grado de contaminación en 7 kV y 15 kV. Para 23 kV de tensión aplicada, la mayor magnitud de corriente se registra en los aisladores con contaminación media y ligera y no en aquellos con contaminación severa, como para el resto de los niveles de tensión. Este hecho puede ser consecuencia de la remoción del contaminante por acción de las descargas superficiales y/o recuperación de las propiedades superficiales, aunque, en general oscilan en el mismo orden de magnitud, sin seguir un patrón determinado.

Los aisladores con contaminación ligera y media tienen comportamientos similares para todos los niveles de tensión, manteniéndose la relación de magnitudes de corrientes de aisladores con contaminación media superiores a las de los que tienen contaminación ligera y ambas, superiores a aquellos que no tienen contaminante.

Este comportamiento coincide con el de los aisladores cerámicos, ya que a mayor grado de contaminación más altas son las magnitudes de corrientes registradas, es decir, el parámetro más influyente en esta condición es la conductividad de la superficie determinada por la cantidad de sal de la mezcla contaminante.

La impedancia del aislador se calculó a partir de las componentes fundamentales de corriente y tensión aplicada. Los resultados se aprecian en la tabla XI y la fig. 34.

Tabla XI. Impedancia fundamental en $M\Omega$

	Sin contaminante	Ligera	Media	Severa
23 kV	563.7	213.0	198.3	234.7
15 kV	6329.1	245.9	220.6	190.4
7 kV	6034.5	150.9	145.2	115.7

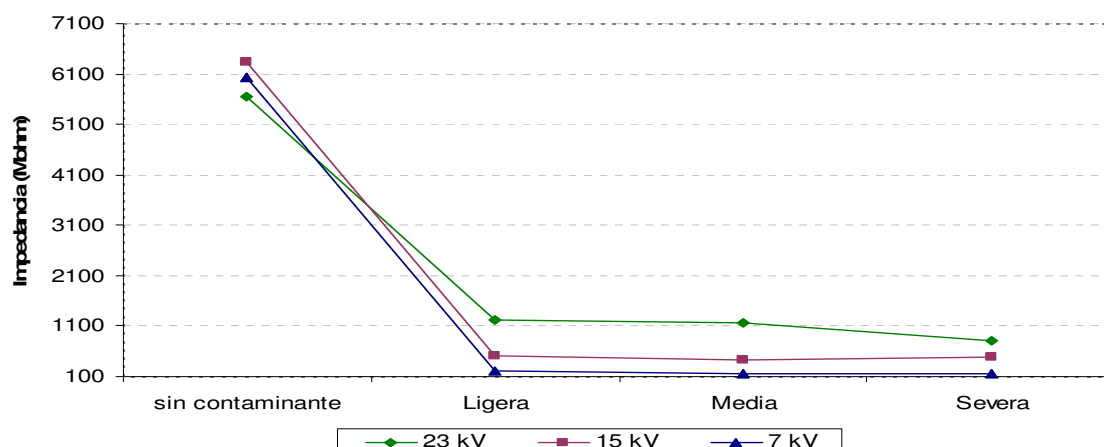


Fig. 34. Impedancia fundamental del aislador

Se estudió la impedancia del aislador por ser la relación entre la tensión aplicada y la corriente. Según los resultados de la tabla XI, la impedancia del aislador sin contaminante es, en promedio, 84% superior a la de los aisladores contaminados, presentando valores que se encuentran en el mismo orden de magnitud, como se muestra en la fig. 34.

La magnitud del ángulo de desfase entre la componente fundamental de la corriente y la tensión aplicada es el que se muestra en la tabla XII y en la fig. 35.

Tabla XII. Desfase tensión corriente en grados.

Tensión/ contaminación	Sin contaminante	Ligera	Media	Severa
7 kV	63.1	17.2	18.4	18.5
15 kV	65.6	29.5	20.8	25.5
23 kV	40.6	23.5	19.6	24.2

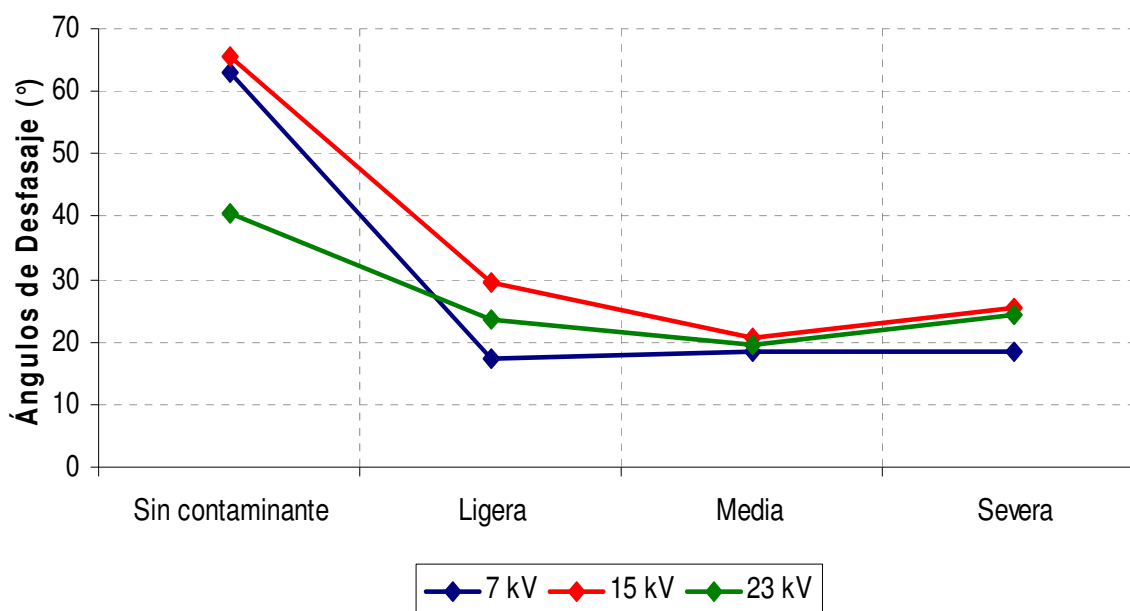


Fig. 35. Desfase entre tensión y corriente fundamental

En general, la tendencia es a que los aisladores sin contaminación son los que presentan los ángulos mayores, lo que se traduce en un comportamiento más capacitivo. Igualmente, los aisladores con contaminación severa, media y ligera, presentan un comportamiento con mayor tendencia resistiva, como se muestra en la tabla XII.

5.2.2. Resultados fuera de la cámara

Con el desfase entre la tensión y la corriente fundamental del aislador se calculó el porcentaje de la corriente capacitiva y resistiva de la misma. Un desfase de 90° entre la tensión y la corriente, representa una corriente 100% capacitiva, mientras que si ambas señales están en fase, la corriente es totalmente resistiva.

En las tablas XIII, XIV y XV, se muestran los porcentajes de corriente capacitiva para todos los aisladores en las tres extracciones en función de la corriente total.

Tabla XIII. Porcentaje de corriente capacitiva (1^{era} extracción)

Nivel de Tensión	Nivel de Contaminación	Al sacarlo	1 hora	1 día	7 días
7 kV	sin contaminante	66.36%	30.74%	48.44%	91.07%
	Severa	85.17%	86.48%	87.73%	96.28%
	Media	67.66%	64.58%	67.28%	93.22%
	Ligera	74.10%	74.18%	77.84%	94.13%
15 kV	sin contaminante	78.19%	82.76%	84.92%	96.80%
	Severa	44.98%	31.49%	30.87%	75.32%
	Media	40.69%	34.42%	34.08%	70.49%
	Ligera	49.62%	56.02%	59.89%	77.93%
23 kV	sin contaminante	63.17%	61.83%	64.67%	94.81%
	Severa	29.36%	20.84%	25.26%	86.32%
	Media	45.46%	62.53%	53.23%	80.82%
	Ligera	43.32%	54.10%	52.20%	81.84%

El comportamiento de la corriente capacitiva de los aisladores sometidos a 7 kV, 15 kV y 23 kV, para la primera extracción se muestra en las fig. 36, 37 y 38. El resto de los aisladores tienen un comportamiento similar.

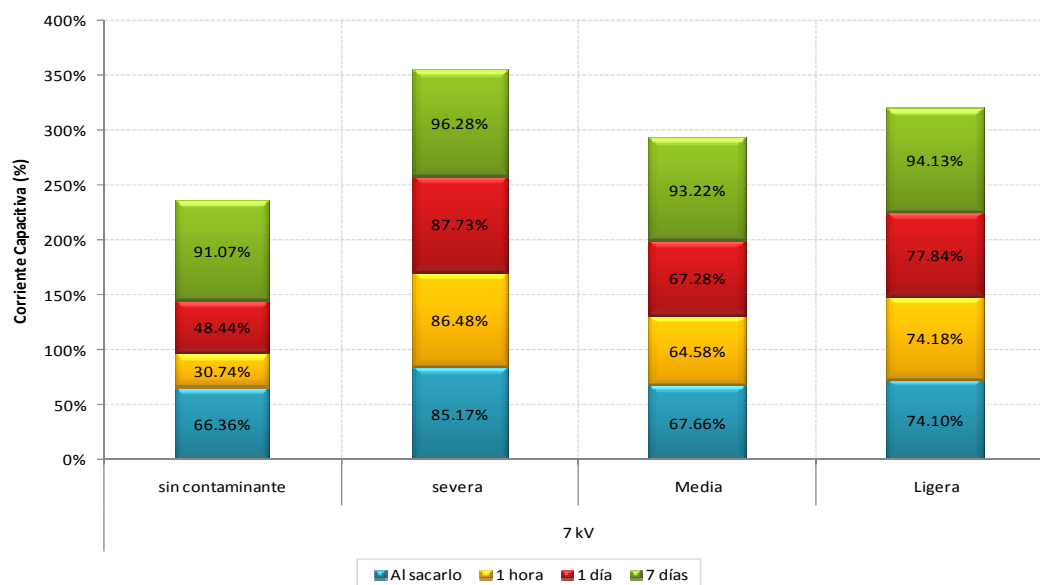


Fig. 36. Porcentaje de Corriente Capacitiva para la primera extracción

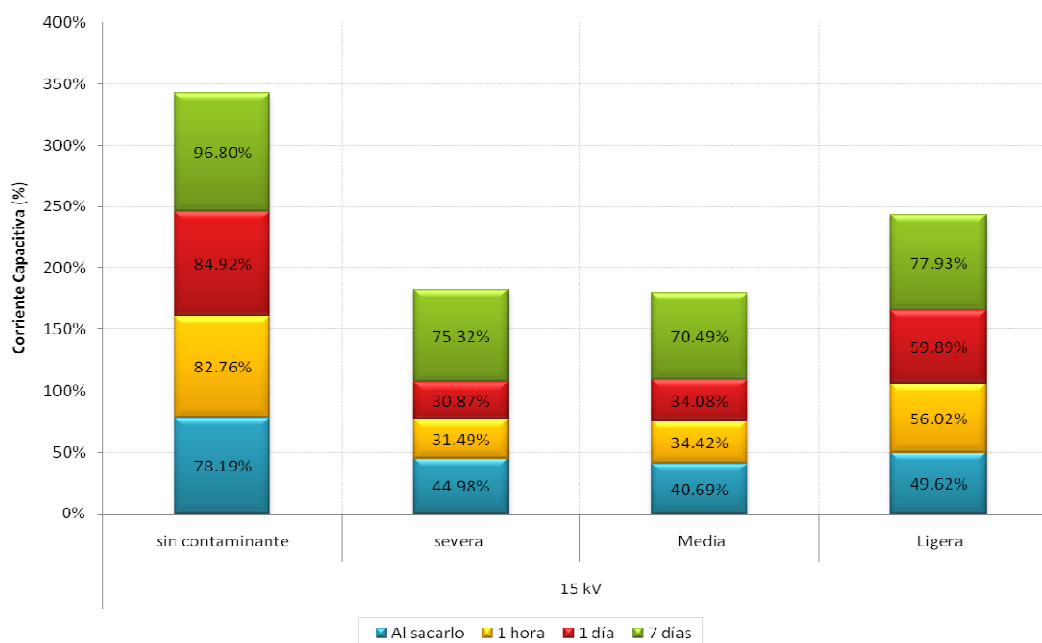


Fig. 37. Porcentaje de Corriente Capacitiva para la primera extracción

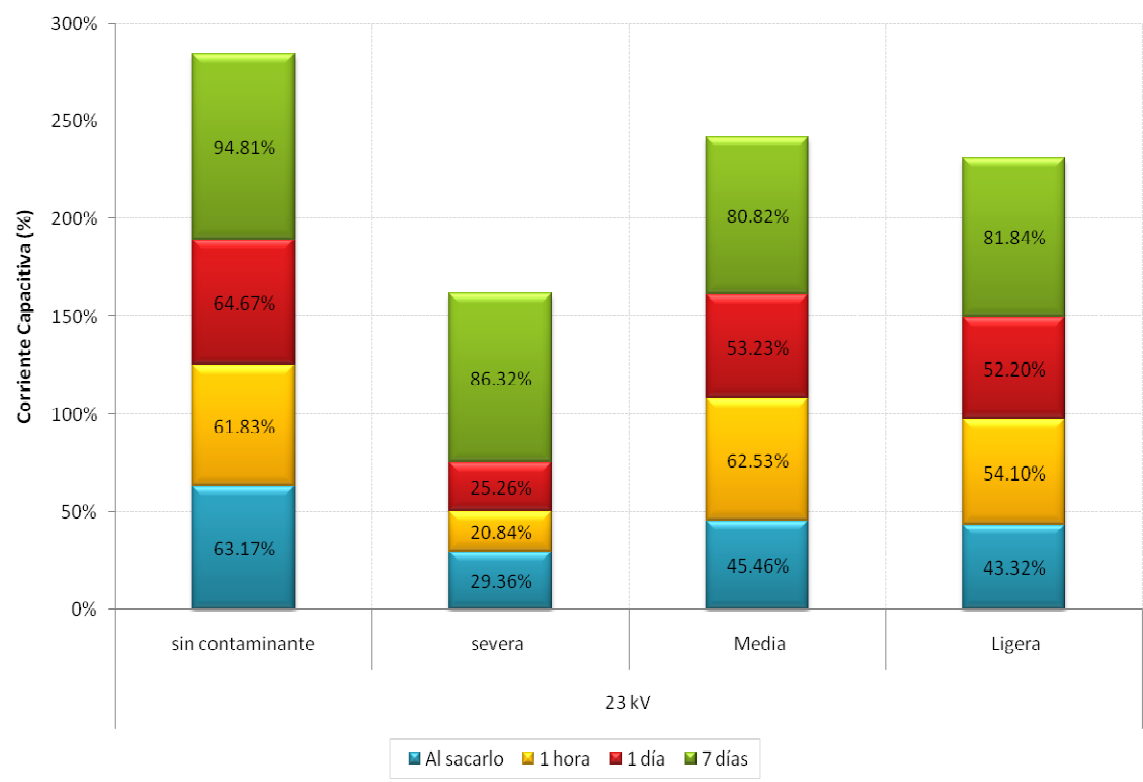


Fig. 38. Porcentaje de Corriente Capacitiva para la primera extracción

El resultado para el resto de las muestras se presenta en el apéndice 8.

Tabla XIV. Porcentaje de corriente resistiva y capacitiva (2^{da} extracción)

Nivel de Tensión	Nivel de Contaminación	Al sacarlo	1 hora	1 día	7 días
7 kV	Sin contaminante	73.67%	87.40%	86.66%	96.38%
	Severa	83.74%	70.71%	71.68%	74.74%
	Media	51.53%	74.17%	74.98%	81.32%
	Ligera	43.09%	75.62%	75.93%	86.64%
15 kV	Sin contaminante	75.99%	88.69%	88.86%	96.47%
	Severa	41.63%	44.40%	49.09%	57.53%
	Media	56.97%	52.58%	55.12%	57.24%
	Ligera	46.34%	55.39%	56.64%	70.46%
23 kV	Sin contaminante	61.89%	63.00%	59.73%	98.57%
	Severa	36.36%	29.67%	31.28%	57.61%
	Media	26.64%	34.19%	32.99%	62.92%
	Ligera	17.86%	38.98%	32.81%	72.11%

Tabla XV. Porcentaje de corriente resistiva y capacitiva (3^{era} extracción)

Nivel de Tensión	Nivel de Contaminación	Al sacarlo	1 hora	1 día	7 días
7 kV	Sin contaminante	84.08%	74.41%	86.94%	99.61%
	Severa	52.76%	49.34%	65.89%	87.08%
	Media	58.48%	49.93%	63.29%	83.88%
	Ligera	44.32%	65.24%	60.64%	90.48%
15 kV	Sin contaminante	81.16%	86.78%	98.22%	85.01%
	Severa	53.16%	27.92%	49.31%	38.86%
	Media	40.12%	39.14%	79.59%	47.88%
	Ligera	36.83%	36.10%	75.41%	49.20%
23 kV	Sin contaminante	81.41%	56.42%	76.12%	64.42%
	Severa	56.54%	0.00%	32.98%	71.29%
	Media	27.80%	28.06%	70.09%	61.30%
	Ligera	32.08%	26.66%	53.70%	35.50%

Según se aprecia en las tablas XIII, XIV y XV, el porcentaje de la corriente capacitiva tiende a aumentar. El porcentaje de corriente resistiva, por ende, tiende a disminuir. Los valores más bajos de corriente resistiva se tienen en los aisladores sin contaminación.

5.3. Evaluación de Resultados

5.3.1. Dentro de la cámara

Las corrientes presentan un comportamiento aleatorio, lo que no permite hacer una caracterización certera de la misma. Las diferencias entre un aislador y otro no son significativas, por lo que los resultados no son concluyentes, debido adicionalmente a que, como se discutirá más adelante, los aisladores no se degradaron.

En los aisladores sin contaminación, donde la humedad es el factor determinante para las descargas superficiales, el tamaño de las gotas y la distribución sobre la superficie afecta la actividad eléctrica superficial. Si las gotas son de mayor tamaño, la vibración o desplazamiento de las mismas es importante durante el proceso. En la literatura se ha

estudiado la forma en la que la deformación de las gotas de agua contribuye a la deformación de la corriente de fuga y cómo influye el tamaño y la distribución de las gotas [18,42,52]. El proceso de ruptura en un aislador sin contaminación se muestra en la tabla XVI.

Tabla XVI. Proceso de ruptura en el aislador.

Descripción	
Las gotas se forman aleatoriamente y en forma esférica por la hidrofobicidad del material	
Por acción del campo eléctrico las gotas evaporan o se dilatan disminuyendo la distancia entre ellas.	
La polarización del agua hace que ocurran micro descargas entre gotas, provocando que se unan formando una película sobre la superficie del polímero.	
La película de agua facilita la circulación de corrientes superficiales que producen la pérdida temporal de hidrofobicidad superficial.	

En el comportamiento mostrado en la tabla XVI, la tensión aplicada es un factor determinante para la aparición de arcos eléctricos en condiciones de humedad aún sin contaminación.

En superficies hidrófobas los arcos eléctricos aparecen debido a la ruptura de la rigidez dieléctrica entre gotas, o arcos parciales, lo que también conduce a la formación de superficies hidrofílicas, donde el arqueo es consecuencia de las películas de agua sobre la superficie.

En general, la corriente tiende a ser capacitiva en condiciones secas, aún cuando el aislador está contaminado. En condiciones de humedad, la tendencia resistiva o capacitiva de la corriente dependerá si la superficie está hidrofílica o hidrófoba. En el último caso, la corriente será predominantemente capacitiva.

En las condiciones de humedad, contaminación y tensión aplicada, tienen lugar pérdidas temporales de las propiedades de la superficie modificando el comportamiento capacitivo de la corriente del aislador, agregando una componente resistiva con características no lineales.

Por otra parte, las formas de onda típicas para distintos grados de contaminación contienen armónicos impares, como se puede apreciar en la tabla I y II, del capítulo II, tanto en aisladores cerámicos como en poliméricos. La presencia de estos armónicos, así como la deformación de la onda es similar al comportamiento registrado en aisladores cerámicos [13,17]. Este comportamiento también ha sido reportado en aisladores poliméricos [5,50,51], asociando la composición armónica con los eventos que tienen lugar en la superficie e incluso con degradación.

Según los resultados obtenidos, no existe una relación entre el grado de contaminación y la corriente en condiciones de humedad. El grado de contaminación no es un factor que determina la magnitud de la corriente o su composición armónica en los aisladores bajo prueba, posiblemente porque no se alcanzó la degradación.

Otros parámetros como la impedancia del aislador y su tendencia capacitiva o resistiva fueron estudiados, presentando valores similares.

5.3.2. Fuera de la cámara

La pérdida y recuperación de las propiedades superficiales no responde a un proceso lineal, razón por la cual su influencia no ha sido cuantificada. Los tiempos de degradación dependen de la capacidad de recuperación del aislador y de los factores ambientales, y por ende son variables.

Los aisladores cuyo nivel de contaminación era severa presentaban una recuperación más rápida que el resto. Esto puede ser atribuible al hecho de que están sometidos en mayor medida a los agentes degradantes, lo que acelera el proceso de recuperación, que a la larga es equivalente a la degradación por la pérdida de elementos de bajo peso molecular [2,8,21,37].

El aislador estará degradado cuando no es capaz de recuperar sus propiedades en un lapso determinado, ya que esto es evidencia de que los elementos de bajo peso molecular han dejado de migrar a la superficie, ya sea por agotamiento de los mismos o por saturación del material.

Si se define un coeficiente de recuperación como la relación entre la diferencia de corriente capacitiva en función del tiempo, se puede obtener información acerca de la velocidad de migración de los elementos de bajo peso molecular y por ende del estado de degradación de la superficie. A continuación se describe dicho coeficiente.

5.3.2.1. Coeficiente de Degradación

Para calcular este coeficiente se toma el valor de la corriente en ambos extremos del período de estudio, para la misma tensión aplicada. Para el caso puntual de este trabajo, el período

de estudio fue de siete días. Se tomó el valor de la corriente inmediatamente después de sacar el aislador de las condiciones dentro de la cámara de simulación y el valor siete días después. Con dichos valores es posible construir una recta, cuya pendiente será el coeficiente de degradación. Un valor negativo del coeficiente o cero indica degradación en el aislador. Una medición alternativa puede ser el grado de hidrofobicidad, midiendo cuantos estados ha evolucionado en un periodo de tiempo establecido.

La diferencia de los coeficientes entre las remociones es poca, lo que puede ser interpretado como que los aisladores no se han degradado, siendo esto consistente con los resultados obtenidos. Sobre la base de los porcentajes de la corriente capacitiva, mostrados en las tablas XIII, XIV y XV, se construyeron rectas de porcentaje de corriente capacitiva vs. Tiempo. Se tomó la componente capacitiva inmediatamente después de sacar el aislador de la cámara y el correspondiente a la componente medida siete días después, con los cuales fueron construidas las rectas para cada aislador y cada extracción. En la fig. 39 se muestran los resultados para el aislador de 15 kV con contaminación severa para las tres extracciones. El resto de los aisladores presenta la misma tendencia.

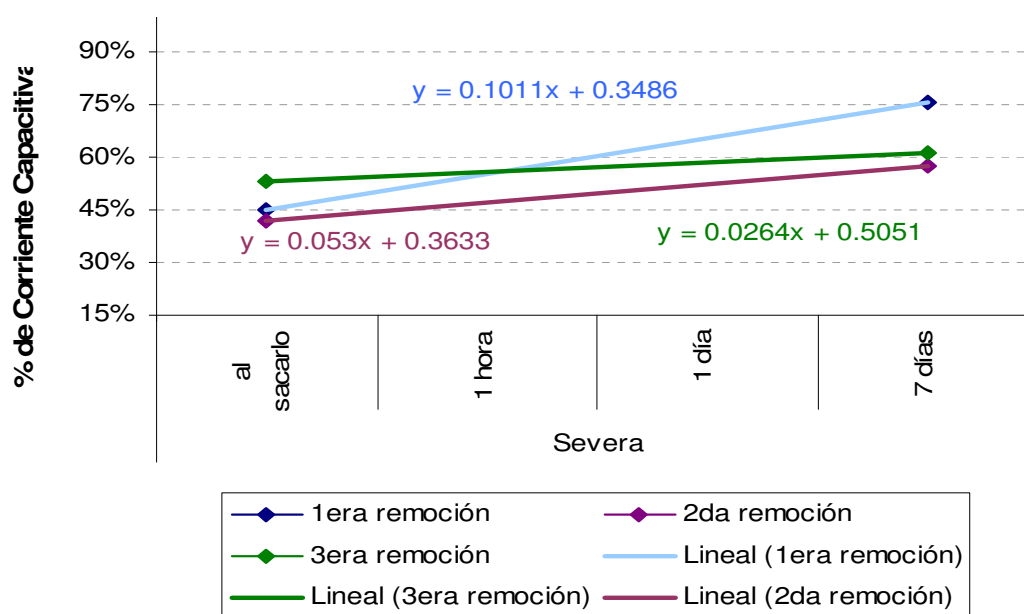


Fig. 39. Rectas de porcentaje de corriente capacitiva vs. Tiempo.

Las pendientes de las rectas de porcentaje de corriente capacitiva en función del tiempo se muestran en la tabla XVII.

Tabla XVII. Pendiente de la curva

	Remoción	1era	2da	3era
7 kV	Nuevo	0.082	0.004	0.082
	Ligera	0.067	0.145	0.154
	Media	0.085	0.099	0.085
	Severa	0.037	0.042	0.114
15 kV	Nuevo	0.062	0.068	0.013
	Ligera	0.094	0.080	0.041
	Media	0.099	0.001	0.026
	Severa	0.101	0.053	0.026
23 kV	Nuevo	0.106	0.122	0.010
	Ligera	0.128	0.181	0.011
	Media	0.118	0.121	0.112
	Severa	0.190	0.071	0.049

No hay una tendencia clara del coeficiente con el grado de contaminación o el nivel de tensión. En general, los valores del coeficiente de la última remoción son los más bajos porque los aisladores han estado más tiempo en operación y aquellos aisladores sometidos a condiciones más pronunciadas de degradación tienden a recuperarse más rápido.

Todos los aisladores recuperaban sus propiedades al ser extraídos de la cámara. La componente capacitiva de la corriente aumenta, ya que todos los coeficientes de recuperación son positivos.

Por otra parte, se realizaron pruebas sobre los aisladores para determinar su estado de degradación, los resultados se muestran en el apéndice 3. Las cuales son:

- Inspección Visual

- RIV
- Tensión de Ruptura a baja frecuencia en condiciones secas.
- Tensión de Ruptura a baja frecuencia en Condiciones Húmedas.
- Medición de la Resistencia Superficial.

Luego de cuatro meses de operación de la cámara no se encontraron en los aisladores rastros que evidenciaran degradación eléctrica. No estaba claro si este hecho se debía a las características de la prueba o a las características de los materiales utilizados en la contaminación.

El uso del Caolín, es un factor cuya influencia no estaba establecida. Los ensayos de tensión de ruptura a baja frecuencia que se presentan en el apéndice 3, en conjunto con el hecho de que no todos los autores hacen uso de este, creaban la duda de si las evaluaciones realizadas eran consecuencia del comportamiento superficial del polímero o del Caolín.

En función de determinar si el método utilizado (con Caolín en la mezcla contaminante) para la contaminación de los aisladores era el responsable de que no se alcanzara la degradación, se decidió eliminar el Caolín de la mezcla contaminante en ocho de los aisladores que quedaban dentro de la cámara el último período de estudio. Se aplicó la mezcla sólo con sal en las mismas proporciones especificadas inicialmente para la prueba para conseguir los grados de contaminación ligera, media y severa.

Al mismo tiempo, los otros ocho aisladores se contaminaron con el método y forma planteados al principio del estudio, para tener un patrón de comparación.

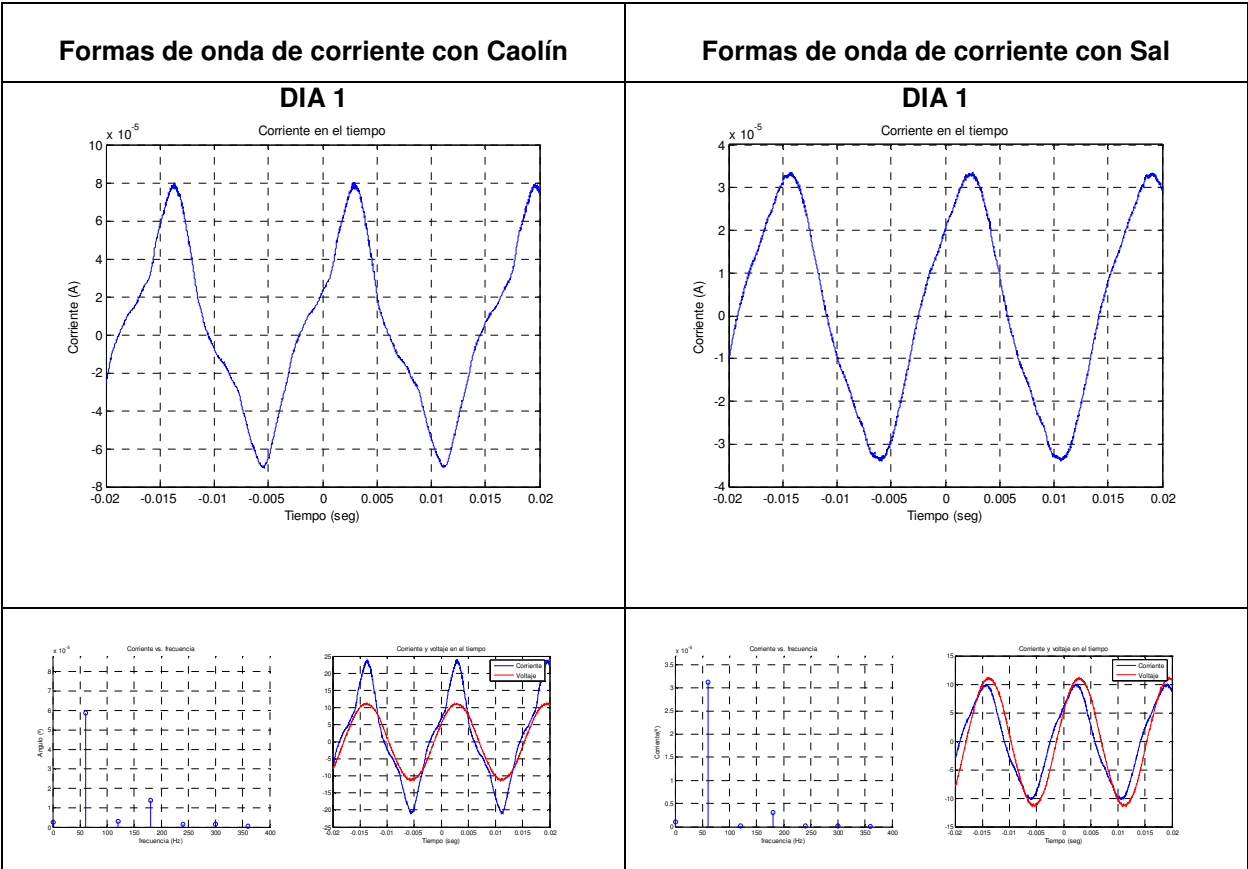
5.4. Aisladores Contaminados con Sal

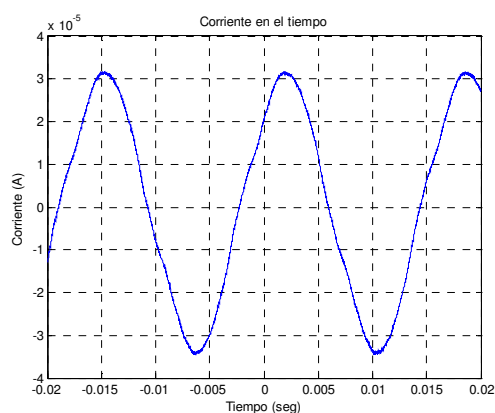
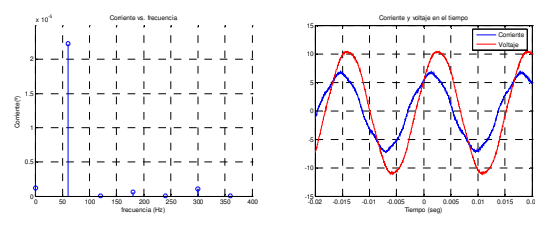
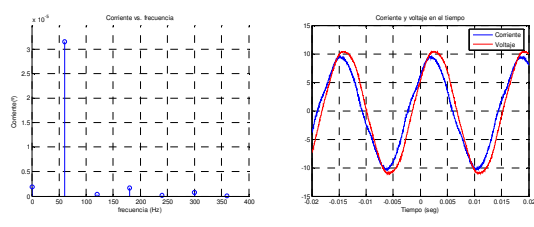
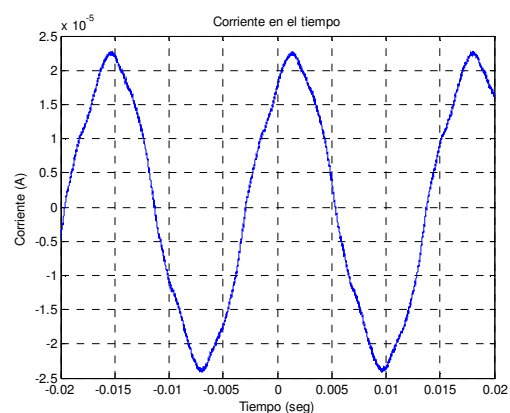
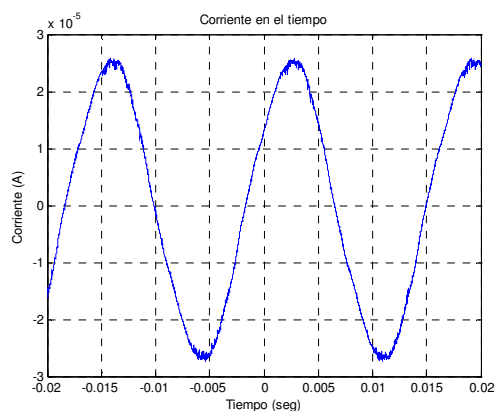
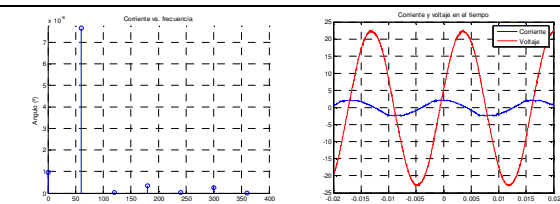
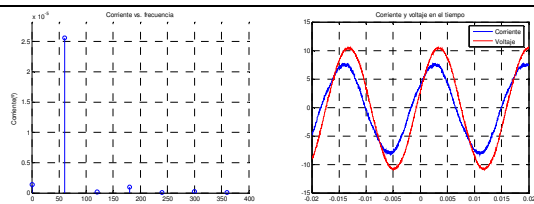
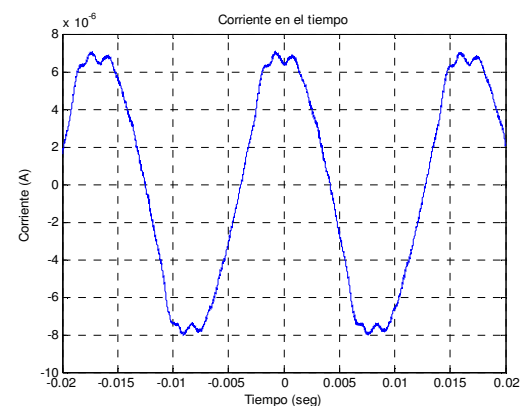
5.4.1. Resultados Obtenidos

Las corrientes medidas en los aisladores contaminados con sal se procesaron como se describe en el capítulo IV, de la misma forma que los contaminados con Caolín.

En la tabla XVIII se muestra la corriente típica en los aisladores contaminados con sal y con Caolín, y su descomposición armónica, en días consecutivos. Esta tabla sirve para comparar las corrientes, día a día, del segundo ciclo de los aisladores contaminados sólo con sal.

Tabla XVIII. Componente fundamental de la corriente de los aisladores contaminados sólo con sal - Formas de onda de corriente con Caolín - Formas de onda de corriente con Sal



DIA 2**DIA 2****DIA 3****DIA 3**

La componente fundamental promedio de la corriente de los aisladores para el período del ciclo con humedad y contaminados sólo con sal, en todo el tiempo de estudio, es la que se muestra en la fig. 40.

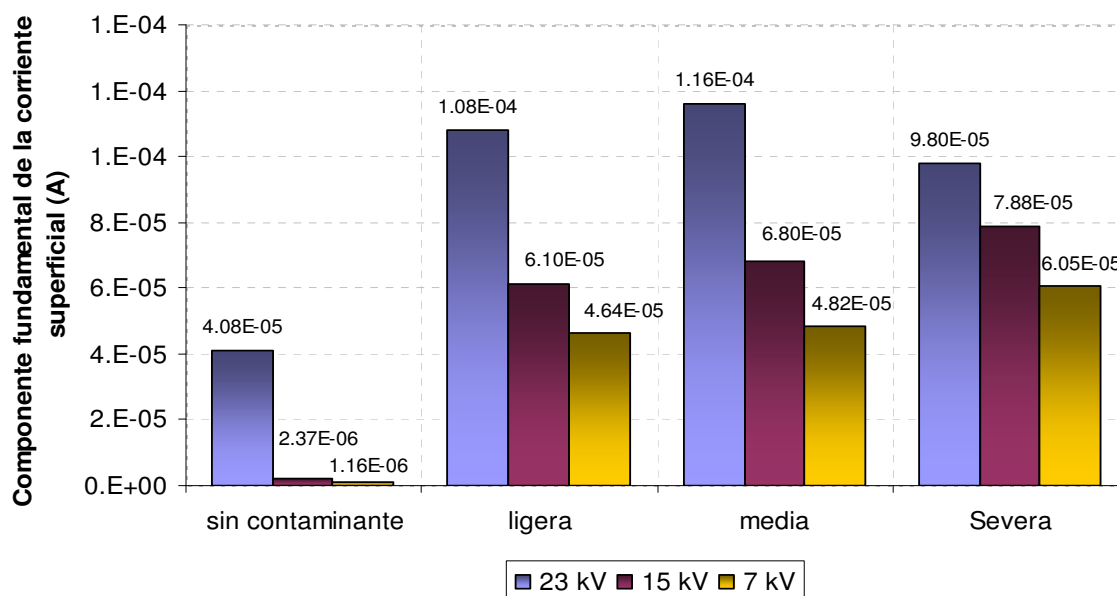


Fig. 40. Componente fundamental de la corriente de los aisladores contaminados sólo con sal

Las diferencias porcentuales entre las corrientes de los aisladores contaminados con Caolín y los que se contaminaron sólo con sal, referidos a los contaminados con Caolín se muestran en la tabla XIX.

Tabla XIX. Diferencia entre las magnitudes de corrientes fundamentales en los aisladores con Caolín y con sal.

	Ligera	Media	Severa
7 kV	83%	83%	71%
15 kV	50%	49%	60%
23 kV	30%	-2%	22%

Los ángulos de desfase entre la componente fundamental de la corriente de los aisladores contaminados sólo con sal y la tensión aplicada es el que se muestra en la fig. 41. La diferencia entre el ángulo de los que la mezcla contenía caolín y la que tenía sal, referidos a los contaminados con Caolín, se muestra en la tabla XX. Un valor negativo implica que el ángulo de desfase entre voltaje y corriente en los aisladores contaminados con sal es

mayor en ese porcentaje al obtenido en los mismos aisladores contaminados con sal y Caolín.

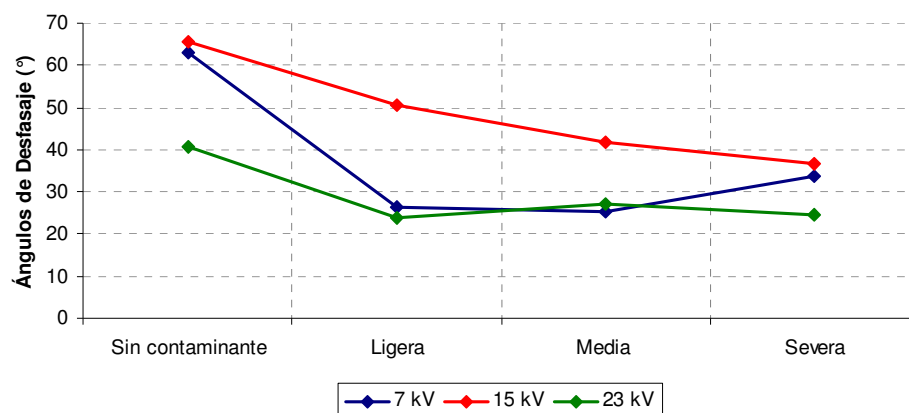


Fig. 41. Ángulo de desfase tensión corriente

Tabla XX. Diferencia porcentual entre los ángulos de los aisladores contaminados con caolín y con sal

Tensión	Ligera	Media	Severa
7 kV	-54%	-38%	-82%
15 kV	-71%	-101%	-43%
23 kV	-2%	-38%	-2%

Se puede apreciar en la tabla XIX, que las corrientes más altas tienen lugar en los aisladores contaminados con Caolín. La mayor diferencia porcentual se aprecia en los aisladores sometidos al menor nivel de tensión, alcanzando 83% para los aisladores contaminados con grados ligero y medio, sin presentar un patrón que permita concluir algo a partir de estos resultados.

Al utilizar sólo sal, la contaminación es menos uniforme que al utilizar Caolín, como se aprecia visualmente en la fig. 42. Es más fácil que se forme una película de agua con la utilización de este último.



Fig. 42. Aislador con sal (izquierda) y aislador con Caolín (derecha)

Según la tabla XX y la fig. 42, los ángulos de desfase entre tensión y corriente en los aisladores contaminados con sal son menores comparados con los obtenidos en los aisladores contaminados con Caolín, mostrando una tendencia más capacitiva.

Las menores diferencias porcentuales entre los ángulos de desfase tensión-corriente entre los aisladores con Caolín y los que sólo contienen sólo sal, tienen lugar al mayor tensión de prueba, con valores inferiores en 2% para contaminación ligera y severa.

Adicionalmente, las formas de onda mostradas en la tabla XVIII, son más distorsionadas el primer día en los aisladores contaminados con el primer método, mientras que la distorsión aparece por lo menos un día después en el otro caso.

5.4.2. Influencia del Modo de Contaminación.

La diferencia entre usar Caolín en el método de contaminación radica fundamentalmente en que la resistencia del aislador contaminado con Caolín decae más rápidamente al iniciarse la niebla dentro de la cámara y crece gradualmente, según se puede observar en la tabla XIX, en comparación con los aisladores que sólo fueron contaminados con sal. Un resultado similar se reporta en [53].

Como se observa en la fig. 42, es más fácil que se forme una película de agua con Caolín que sin él, lo que conduce a la formación de caminos de menor impedancia más rápidamente.

Con ninguno de los métodos utilizados se logra la uniformidad del contaminante sobre la superficie por la característica hidrofóbica del polímero. En la literatura se propone el uso de otros agentes para destruir la hidrofobicidad de las faldas antes de aplicar la capa de contaminación o métodos que incluyen la hidratación y secado de la superficie con Caolín para distribuir el contaminante [34].

Con base en los resultados obtenidos, el Caolín es capaz de absorber las gotas de agua (higroscópico), que en conjunto con la sal forma un camino conductor que facilita la formación de arco eléctrico y facilita la formación de bandas secas, mas con los resultados obtenidos no es posible concluir si este es el método de contaminación adecuado para la degradación.

En aisladores poliméricos, se observaron deformaciones de corriente similares a las correspondientes en cerámicos. Siendo así, este comportamiento puede ser asociado a las bandas secas en dichos aisladores, tanto en los contaminados usando el Caolín como en los

que sólo se utilizó sal y en los que no tenían contaminación, en las mismas condiciones de humedad.

Adicionalmente, es posible que la presencia del Caolín intensifique el campo eléctrico dentro del polímero, por poseer una permitividad relativa diferente y más alta que la de este último, lo que contribuiría al deterioro del material polimérico.

En aisladores contaminados sólo con sal, se observa la presencia de erosión como consecuencia de las descargas entre gotas, siendo este un fenómeno que contribuye a la degradación del material.

CAPITULO VI.

6. MODELO ELÉCTRICO DEL AISLADOR

En este capítulo se describen los parámetros del modelo propuesto del aislador polimérico basado en las mediciones experimentales de la corriente de fuga, así como los valores obtenidos a partir del modelo presentado.

Inicialmente, se describe el modelo del aislador cerámico, dado que este servirá como referencia para el modelo del aislador polimérico. Seguidamente, se mencionan algunos modelos que han sido propuestos en la literatura para aisladores poliméricos basados en la medición de la corriente entre otros parámetros, como antecedentes para el modelo que se propone.

6.1. Modelo del Aislador Cerámico.

La magnitud y las particularidades de la corriente que circula por los aisladores dependen de las características físicas propias de los materiales, las dimensiones del material (geometría) y la tensión aplicada. Esta corriente está formada por una componente volumétrica y una superficial. La corriente volumétrica circula por el interior del dieléctrico y depende de las características físico-químicas del material aislante [55].

La corriente superficial es la que circula por el contorno del material aislante y depende de la geometría, las imperfecciones, impurezas (contaminación) y/o humedad en su superficie. En

la misma influyen la distancia entre los electrodos a través de la superficie del material (distancia de fuga) y las condiciones de la superficie: impurezas (contaminación) y humedad. La contaminación crea un camino conductivo en los aisladores cerámicos. En condiciones de humedad, la corriente tiene la tendencia que se aprecia en la tabla I, en el capítulo II.

En este proceso, las descargas no son lineales, el nivel de contaminación no es uniforme y tampoco la densidad de corriente. La formación de los arcos parciales y su posición son al azar. En zonas de elevada densidad de corriente, ya sea por concentrarse allí la contaminación, la humedad o por la configuración geométrica del elemento, la capa depositada sufre un mayor calentamiento que el resto del aislador. En condiciones de humedad, bien sea de lluvia, rocío, niebla, etc., las gotas de agua depositadas sobre la superficie del aislador se evaporan dando origen a una zona denominada zona seca con una elevada resistividad específica, las cuales crecen hasta formar bandas secas. El gradiente eléctrico alcanza valores muy elevados en las zonas secas pudiendo vencer la rigidez dieléctrica del aire. Este proceso se observa en la fig. 43 [55].

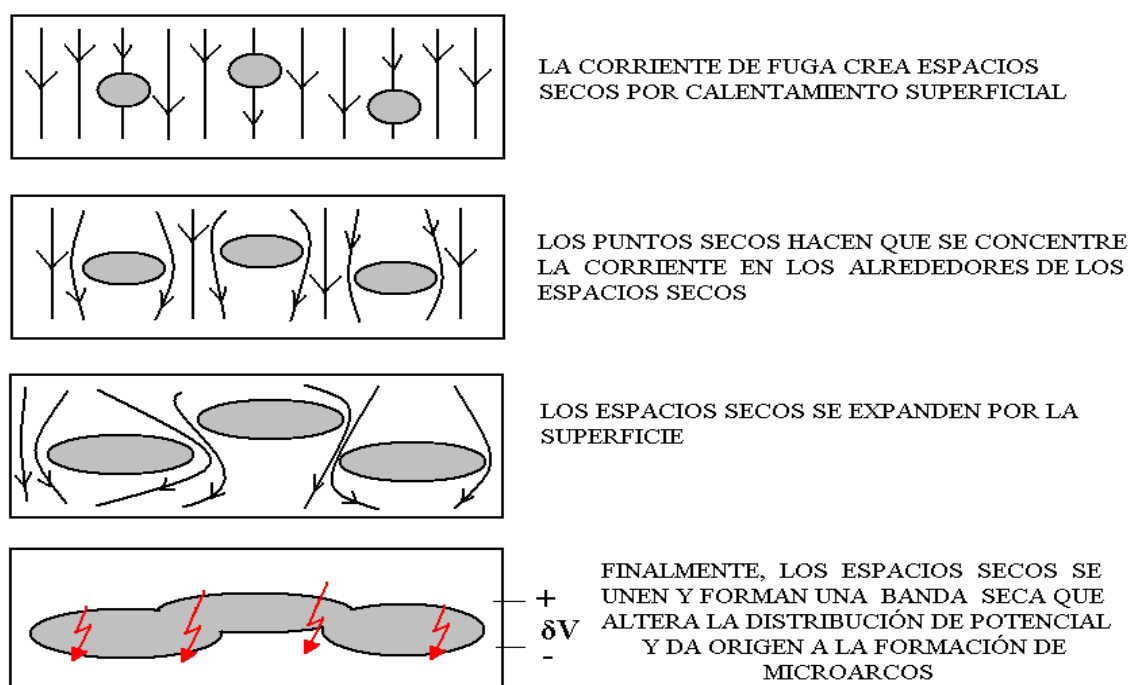


Fig. 43. Proceso de Formación de Bandas Secas [55]

Previo a la ruptura se observa la presencia de arcos eléctricos parciales.

En general, los aisladores utilizados en el sistema eléctrico se modelan como capacitancias entre el punto energizado y tierra. Este modelo se ve modificado en condiciones de contaminación y humedad, ya que el depósito de partículas produce el paso de una mayor densidad de corriente. Este fenómeno se modela con la colocación de una resistencia en paralelo al capacitor, que tiene un comportamiento lineal cuando la tensión se encuentra por debajo de un valor umbral a partir del cual comienza el proceso de formación de la banda seca: el calentamiento de la superficie y la aparición de arcos eléctricos, y la misma se torna no lineal debido a la naturaleza del proceso de conducción y banda seca y a la recuperación de las propiedades del medio aislante.

La forma en la que la corriente se distorsiona se muestra en la tabla I, para aisladores cerámicos. El modelo se muestra en la fig. 44.

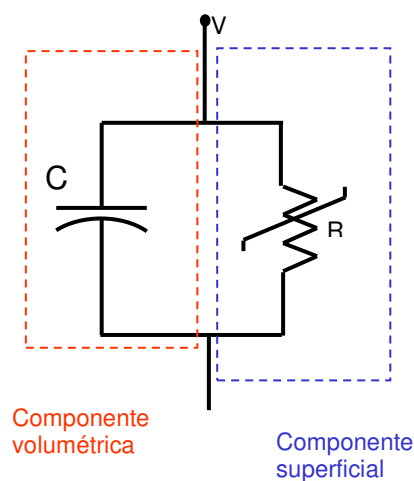


Fig. 44. Modelo eléctrico del aislador.

El modelo del aislador polimérico se describe a continuación.

6.2. Modelo del Aislador Polimérico

6.2.2. Antecedentes

Hasta ahora, en función de definir el comportamiento de los aisladores poliméricos, se han estudiado las características de la corriente de fuga. Muchos autores la han caracterizado a partir de su composición armónica, tanto en aisladores cerámicos como poliméricos, relacionando las componentes con los fenómenos que tienen lugar en la superficie: corona, arcos superficiales y bandas secas [5,12-18].

Igualmente, en la literatura consultada se proponen dos modelos de aisladores poliméricos. Uno de ellos se presenta en [56]. Dicho modelo utiliza un algoritmo exponencial dependiente de variables locales medidas con un sensor superficial, tales como la velocidad del viento, humedad, temperatura, presión, radiación solar y conductividad inicial, difíciles de medir en condiciones de operación. Adicionalmente, siendo el modelo una ecuación, no tiene sentido físico.

La expresión que describe conductividad de la superficie es la siguiente:

$$y = x_1^{c1} x_2^{c2} x_3^{c3} \dots \quad (1)$$

Donde:

x_1 conductividad de referencia registrada, con un sensor de conductividad.

x_2 humedad

x_3 presión

x_4 radiación solar UV-B

x_5 temperatura

x_6 velocidad de viento norte

x_7 velocidad de viento sur

x_8 velocidad de viento este

x_9 velocidad de viento oeste

Otro modelo reportado en la literatura se describe en [5]. El mismo se basa en mediciones de corriente de fuga. El autor deduce una expresión matemática de la corriente de fuga utilizando técnicas de optimización lineal a partir de las mediciones experimentales y propone un modelo eléctrico para representar la banda seca y la deformación de las gotas de agua. Este modelo se muestra en la fig. 45.

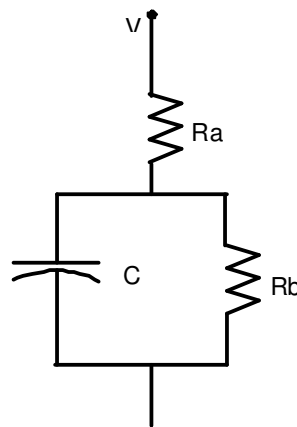


Fig. 45. Modelo eléctrico del aislador propuesto [5].

Como se aprecia en la fig. 45, este modelo consta de una resistencia que representa la gota de agua en serie (R_a) con un paralelo de resistencia (R_b) y capacitancia que representa las bandas secas.

El enfoque de este modelo está más orientado hacia la determinación de la expresión de corriente, para la obtención de las formas de onda de la misma, que hacia el análisis de los parámetros del modelo. El trabajo se limita al estudio de la formación de bandas secas en superficies hidrofóbicas e hidrofílicas, sin tomar en cuenta la influencia de los grados de contaminación, los niveles de tensión y la posibilidad de recuperación de las propiedades superficiales.

El modelo propuesto en este trabajo se basa en las mediciones de la corriente de fuga y está compuesto por parámetros físicos (capacitancia y resistencia) que describen el comportamiento del mismo y son estimados a partir de dichas mediciones.

Los parámetros del modelo son estimados a partir de la medición continua de la corriente. Por la densidad de medidas es posible establecer un comportamiento tendencial de los parámetros bajo las condiciones de prueba, así como modelar la respuesta obtenida de una medición puntual.

Con el cálculo de los parámetros para la obtención del modelo se hallan las tendencias de comportamiento del aislador y la explicación, mediante parámetros eléctricos, de los fenómenos físicos que tienen lugar en la superficie, para los diferentes grados de contaminación simulados en la cámara de envejecimiento.

6.2.3. Modelo Eléctrico Propuesto.

El modelo propuesto es similar al aplicado a aisladores cerámicos, mas en los primeros existe un fenómeno físico adicional, por la naturaleza orgánica del polímero, relacionada con la recuperación y perdidas de las propiedades superficiales del material y las condiciones hidrofóbicas del mismo.

Según las mediciones experimentales, en aisladores poliméricos también se detectó la presencia de arcos parciales, lo que hace inferir la aparición de bandas secas. En los que están contaminados, la presencia del Caolín facilita la formación de una película de agua que conlleva a la formación de las bandas secas, por su naturaleza higroscópica.

En aisladores nuevos, o contaminados sólo con sal, el proceso de ruptura es diferente. Inicialmente, consecuencia de la hidrofobicidad de la superficie, se forman gotas aisladas, dejando zonas secas entre las gotas que pueden ser interpretadas como bandas secas, exceptuando que su formación no responde al calentamiento de la superficie y evaporación de la humedad, como en aisladores cerámicos, sino a la naturaleza del polímero y al depósito de humedad en la superficie [5,52].

Las gotas de agua al ser sometidas al campo eléctrico se polarizan. Dependiendo de la distancia y el desplazamiento de éstas, la rigidez dieléctrica del aire puede ser superada dando lugar a arcos parciales con posible erosión superficial. Esto a su vez, contribuye con la pérdida de hidrofobicidad local y sobre la superficie del aislador se formará una capa húmeda que se evapora debido al paso de corriente a través de ella, teniendo lugar bandas secas en la superficie, como se describen en aisladores cerámicos [5,42,52]. El proceso de formación de bandas secas es el que se muestra en la fig. 46.

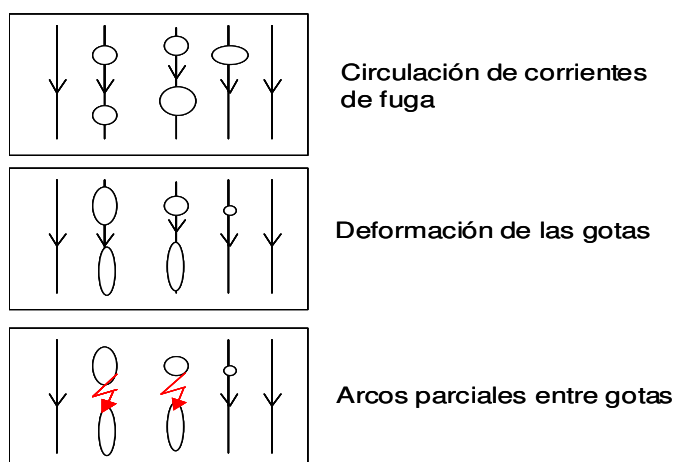


Fig. 46. Formación de arcos parciales en superficies poliméricas

El modelo que se propone se basa en las características de la corriente de fuga del aislador polimérico. Consiste en la combinación de parámetros eléctricos según el fenómeno observado. El modelo se muestra en la Fig. 47.

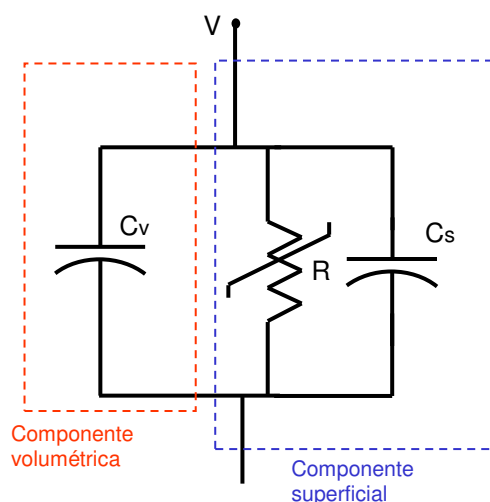


Fig. 47. Modelo eléctrico propuesto

Consta de dos capacitancias fijas, una volumétrica y otra superficial y una resistencia no lineal. La deducción matemática de los parámetros se describe a continuación.

6.2.3.1. Interpretación de los Parámetros del Modelo Propuesto

La capacitancia tiene dos componentes: una capacitancia volumétrica dependiente sólo de las características del aislador y otra asociada a los elementos de la superficie, que pueden polarizarse y almacenar carga, estando íntimamente ligada a la contaminación aplicada y la humedad reinante.

El aislador posee una resistencia propia total alrededor de los $G\Omega$. En condiciones de contaminación, el depósito de contaminantes en la superficie influye sobre la resistencia superficial, disminuyendo su valor. El calentamiento de la superficie por la circulación de corriente, los arcos eléctricos, la ionización del aire son factores que contribuyen a la reducción de la resistencia y al comportamiento no lineal de la corriente superficial.

Las variables del modelo dependerán del tipo de contaminación aplicada sobre los mismos. A continuación se describen los parámetros para cada condición.

6.2.3.1.1. Aislador sin contaminación

En los aisladores sin contaminación los parámetros superficiales dependerán de la humedad depositada en la superficie en forma de gotas y de la tensión aplicada.

En superficies hidrofílicas, el comportamiento es similar al reportado en aisladores cerámicos y podría ser usado el modelo tradicional. En superficies hidrófobas, la resistencia representa el calentamiento de la superficie y la aparición de arcos eléctricos entre las gotas de agua, que está considerado en el cálculo de la resistencia no lineal. La capacitancia representa el equivalente de las gotas de agua, por su característica polar, como se muestra en la fig. 48.

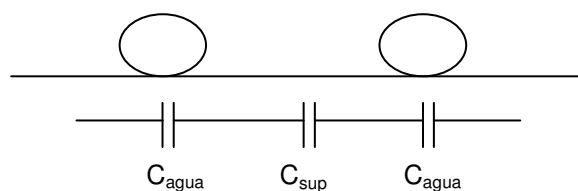


Fig. 48. Superficie hidrófoba del aislador

Para corroborar esto, se tomaron las medidas de tensión y corriente sobre muestras poliméricas con gotas de agua de diferente volumen, como se describe en el apéndice 6. En la fig. 49, se muestra la tensión en por unidad y las tres corrientes medidas para tres condiciones: medidas sin agua, y con gotas de 0.05 ml y 0.5 ml sobre la superficie, donde se puede apreciar la variación en el desfase entre la tensión y la corriente medida, mientras que en la fig. 50 se muestra la capacitancia, resistencia e impedancia de las muestras.

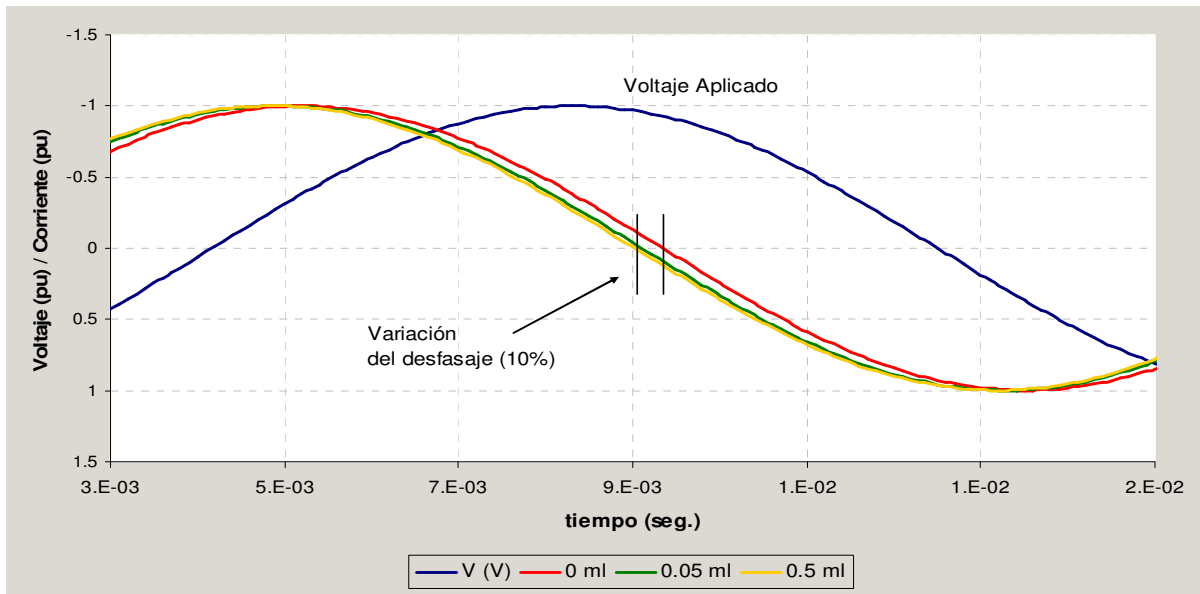


Fig. 49. Superficie hidrófoba del aislador

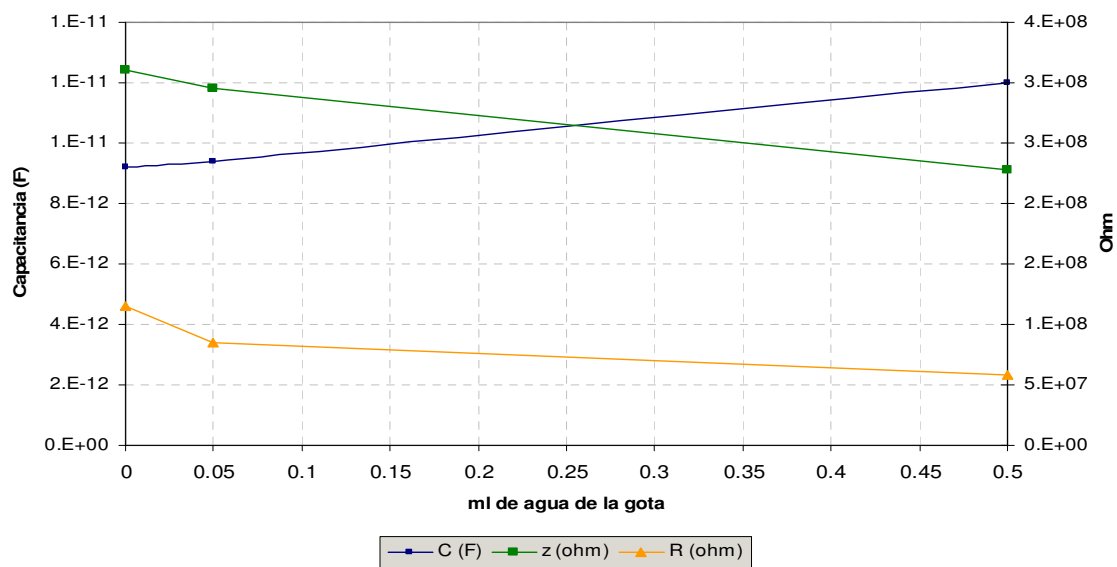


Fig. 50. Capacitancia superficial del material

Se puede apreciar de las figuras 49 y 50, que mientras mayor sea el volumen de agua depositado sobre la superficie del aislador, mayor es el valor de la capacitancia y menor el de la resistencia, demostrando que existe una relación entre la humedad en la superficie y los parámetros del modelo.

6.2.3.1.2. Aislador contaminado con la solución salina

El comportamiento es similar al de los aisladores sin contaminación descrito anteriormente, en superficies hidrófobas se forman gotas aisladas debido a que la sal no se adhiere de forma inmediata. La resistencia y la capacitancia se interpretan de la misma forma que en 6.2.3.1.1.

La diferencia fundamental es que la conductividad de las gotas es mayor por la presencia de la sal, por lo que los parámetros tendrán valores diferentes.

6.2.3.1.3. Aislador Contaminado con Sal y Caolín

En la superficie contaminada con caolín la formación de la banda seca es similar a la de los aisladores cerámicos. Las características del caolín permiten la formación de una película de agua sobre la superficie, la cual se calienta por acción de la circulación de la corriente, consecuencia de la tensión aplicada, dando lugar a la aparición de las zonas secas.

El valor de la capacitancia superficial dependerá de la cantidad de contaminante, la humedad y la tensión aplicada principalmente.

Tanto el Caolín como la sal son elementos de enlace iónico, lo que le permite formar dipolos en presencia del campo eléctrico al estar sometidos a tensión aplicada, modificando la capacitancia superficial. Este parámetro es relevante en el modelo del aislador polimérico porque la permitividad del caolín es superior a la del material polimérico, a diferencia de los aisladores cerámicos, creando un gradiente de campo eléctrico superior en la frontera.

Finalmente, el modelo aquí presentada también puede ser aplicada a aisladores cerámicos, haciendo la salvedad de que en dichos aisladores, la capacitancia superficial tendrá un menor impacto sobre el modelo por las características hidrofílicas de la superficie.

6.2.3.2. Formulación Matemática

El modelo tiene por objeto describir el comportamiento físico del elemento más que la obtención de una descripción matemática de los fenómenos de la superficie.

La tensión aplicada a los aisladores se escribe como sigue:

$$v = V_1 \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (2)$$

Donde

V_1 es el valor pico de la tensión aplicada.

ω frecuencia fundamental.

t tiempo

La corriente medida corresponde con la corriente total, contemplando tanto la parte superficial como la volumétrica. La construcción del modelo requiere separar estas componentes.

La componente volumétrica puede calcularse como en (3).

$$i_{vol} = V_1 \cdot \omega \cdot C_{vol} \cdot \cos\left(\omega \cdot t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (3)$$

Donde:

C_{vol} es la capacitancia volumétrica, propia del material

i_{vol} corriente volumétrica

La capacitancia volumétrica fue medida con el montaje experimental mostrado en la fig. 51. El valor obtenido fue de 1.10^{-14} F.

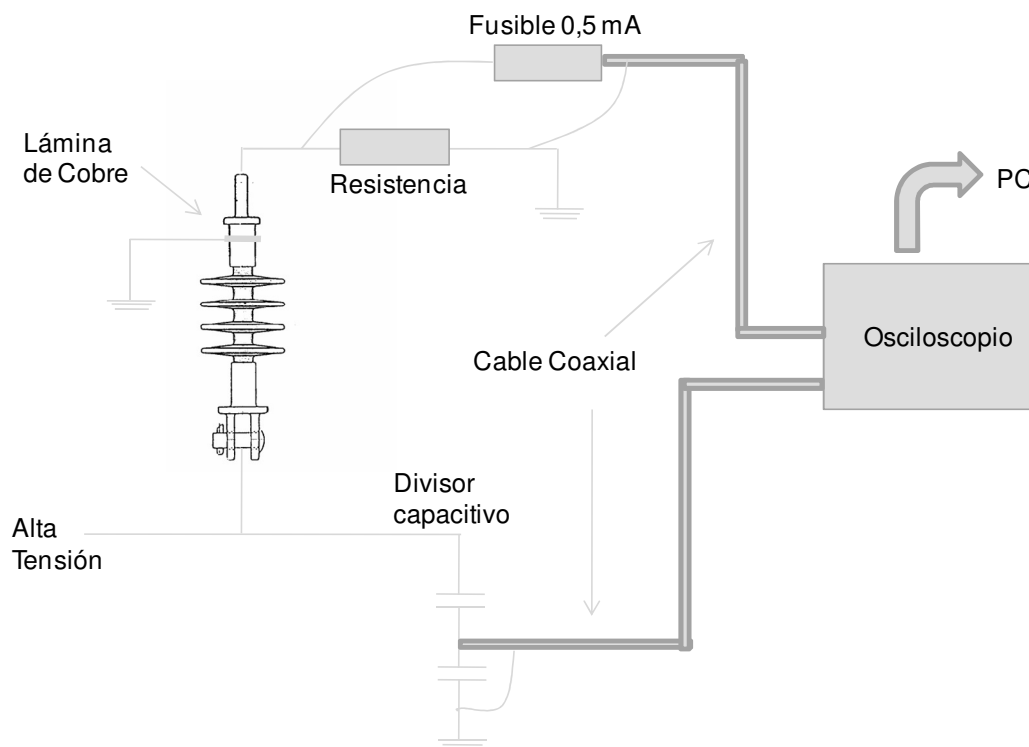


Fig. 51. Montaje para la medición de la capacitancia del aislador

Se asume como premisa que la capacitancia volumétrica sólo tiene componente capacitiva fundamental y es lineal.

Para calcular los parámetros del modelo es necesario hacer la medición de la corriente volumétrica según el voltaje que se muestra en la fig. 51, donde se separan las componentes volumétrica y superficial. Con la componente volumétrica de la corriente, aún en condiciones de degradación, se obtiene la capacitancia volumétrica según (3).

Cambios en las magnitudes de dicha capacitancia están asociados con cambios internos del material y, por ende, con la degradación del mismo, ya que la misma se puede ver afectada por la inserción dentro del material de contaminante como resultado de la migración de los elementos de bajo peso molecular o rotura de las cadenas poliméricas.

La corriente superficial se calcula como la diferencia (4):

$$i_{\text{sup}} = i_{\text{total}} - i_{\text{vol}} \quad (4)$$

i_{total} corriente total medida

i_{sup} corriente superficial

La corriente total, a su vez, puede expresarse en términos de Fourier, donde n representa el armónico.

$$i_{\text{total}} = I_1 \cdot \cos(\omega \cdot t + \phi_1) + \sum_{n=1} I_n \cdot \cos(n \cdot \omega \cdot t + \phi_n) \quad (5)$$

Donde:

I_n Componente n-ésimo de la corriente.

ϕ_n Desfasaje n-ésimo entre tensión y corriente. La tensión es la referencia angular.

Por lo tanto, la corriente superficial puede escribirse en términos de Fourier, como se muestra en (6).

$$i_{sup} = I_1 \cdot \cos(\omega \cdot t + \phi_1) - I_{vol} \cdot \cos\left(\omega \cdot t + \frac{\pi}{2}\right) + \sum_{n=2} I_n \cdot \cos(n \cdot \omega \cdot t + \phi_n) \quad (6)$$

Reordenando los términos, la corriente superficial se puede escribir como un término fundamental y la sumatoria del resto de las componentes, según (7).

$$i_{sup} = I_{sup} \cdot \cos(\omega \cdot t + \phi_{sup}) + \sum_{n=2} I_n \cdot \cos(n \cdot \omega \cdot t + \phi_n) \quad (7)$$

La componente fundamental de la corriente superficial I_{sup} , depende de la diferencia de los términos de (5), que no son más la agrupación de las componentes fundamentales de (7).

$$I_{sup} = I_1 \cdot \cos(\omega \cdot t + \phi_1) - I_{vol} \cdot \cos\left(\omega \cdot t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (8)$$

Reordenando los términos en función de su parte real e imaginaria, (7) queda:

$$I_{\text{sup}} = I_1 \cdot \cos(\phi_1) + j \cdot I_1 \cdot \text{sen}(\phi_1) - \left(I_{\text{vol}} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) + j \cdot I_{\text{vol}} \cdot \text{sen}\left(\frac{\pi}{2}\right) \right) \quad (9)$$

Aplicando propiedades trigonométricas, se obtiene (10) y (11):

$$\text{Re}(I_{\text{sup}}) = I_{\text{vol}} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) = 0 \quad (10)$$

$$\text{Im}(I_{\text{sup}}) = I_{\text{vol}} \cdot \text{sen}\left(\frac{\pi}{2}\right) = I_{\text{vol}} \quad (11)$$

Por lo tanto, la parte real de la ecuación es:

$$I_1 \cdot \cos(\phi_1) \quad (12)$$

La parte imaginaria, se escribe en (13)

$$I_1 \cdot \text{sen}(\phi_1) - I_{\text{vol}} \quad (13)$$

La magnitud de la componente fundamental de la corriente superficial, se calcula según (14), mientras que el ángulo de desfase entre la tensión y la corriente de dicha componente, se puede escribir según (14)

$$I_{\text{sup}} = \sqrt{(I_1 \cdot \cos \phi_1)^2 + (I_1 \cdot \text{sen} \phi_1 - I_{\text{vol}})^2} \quad (14)$$

$$\phi_{sup} = \tan^{-1} \left(\frac{I_1 \cdot \sin \phi_1 + I_{vol}}{I_1 \cdot \cos \phi_1} \right) \quad (15)$$

La capacitancia del material es proporcional a la permitividad del mismo y sólo tiene lugar a frecuencia fundamental, tanto para la componente superficial como para la volumétrica. Esta afirmación responde al hecho de que la fuente de tensión opera a frecuencia fundamental, por lo cual la energía sólo puede ser almacenada a esta frecuencia.

Adicionalmente, la capacitancia volumétrica se considera constante, debido a que no hubo síntomas de degradación y por lo tanto, no hubo variación en la permitividad del material. Por su parte, la capacitancia superficial se calcula según (16)

$$C_{sup} = \frac{I_{sup} \cdot \sin(\phi_{sup})}{\omega \cdot V_1} \quad (16)$$

Con C_{sup} como la capacitancia superficial.

Por su parte, la resistencia tiene una componente a 60 Hz, relacionada con el fenómeno de conducción, y otra componente no lineal, compuesta por el resto de las componentes armónicas de la corriente, que representa el calentamiento de la superficie, la deformación de las gotas de agua y la aparición de arcos eléctricos, eventos de naturaleza predominantemente resistiva.

Para calcular la resistencia equivalente del modelo, debido al comportamiento no lineal de la misma, se construyen curvas de corriente superficial en función de la tensión aplicada sobre

la resistencia en un cuarto de ciclo de la onda. De dichas curvas se tomaron cinco (5) puntos representativos para calcular el valor de la resistencia como la relación entre los mismo.

En la fig. 52 se muestra la corriente superficial del aislador de 15 kV, con contaminación severa, y su resistencia resultante en función de la tensión.

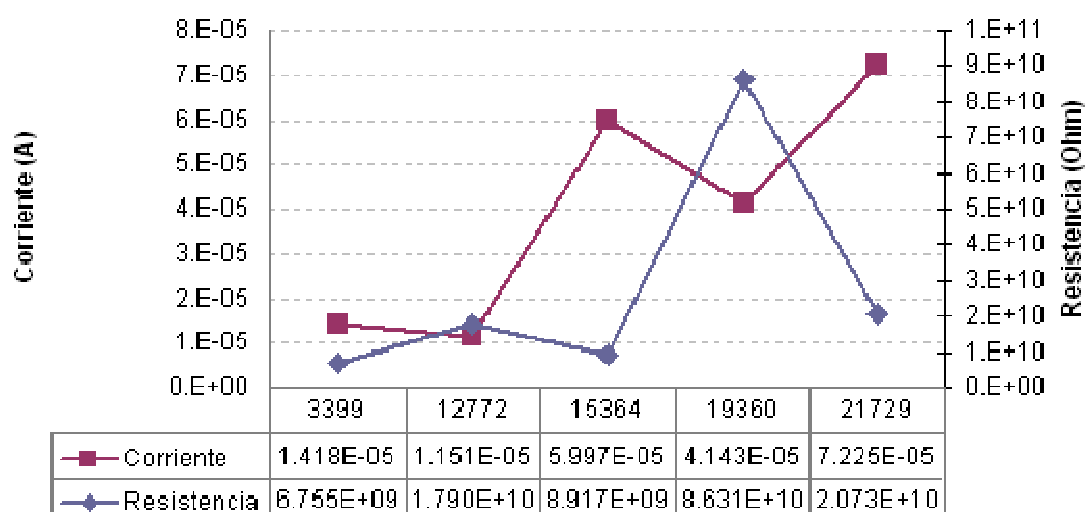


Fig.52. Corriente y resistencia en función del voltaje – Aislador 15 kV/Contaminación Severa

6.2.3.3. Cálculo de los Parámetros Modelados

Dada la densidad de mediciones se utilizaron los valores promedio de las distribuciones logarítmicas de los parámetros calculados.

La capacitancia volumétrica tiene un valor fijo y conocido de 0.01 pF (ver apéndice 5). La capacitancia superficial se cálculo para cada día según (16), para los tres niveles de tensión y los tres grados de contaminación y el aislador sin contaminante.

Los valores de capacitancia oscilan alrededor de un valor promedio. La distribución logarítmica de la capacitancia del aislador con contaminación media sometido a 15 kV es la que se muestra en la fig. 53, la misma fue calculada de la misma forma que la distribución de la corriente (el resto de los resultados se presentan en el apéndice 7).

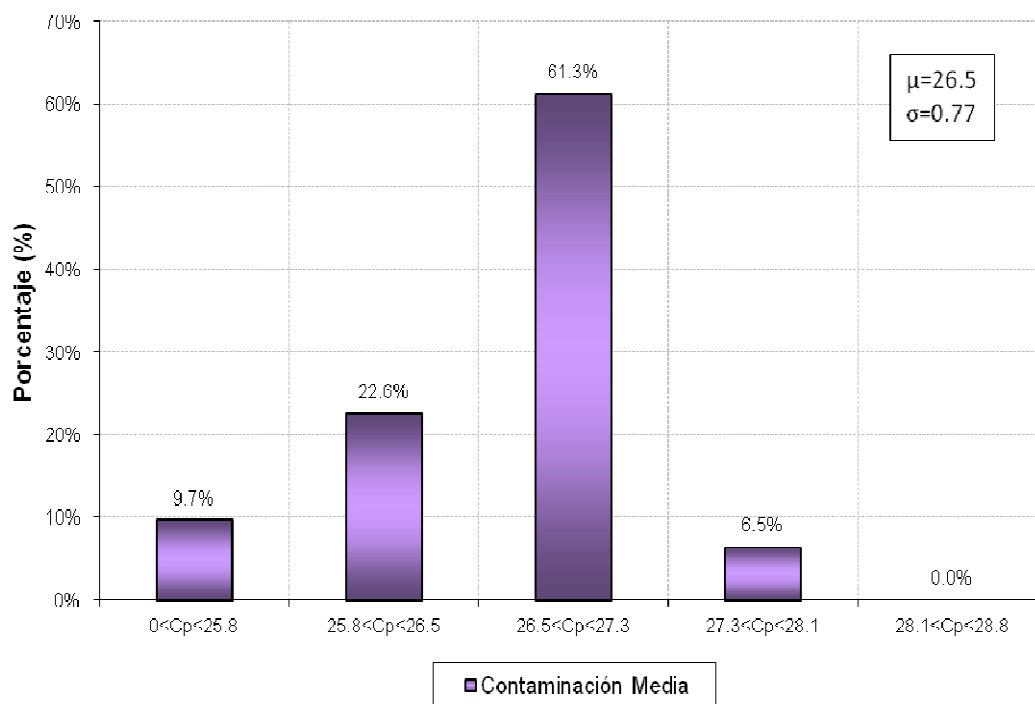


Fig. 53. Distribución logarítmica de la capacitancia – 15 kV, contaminación media

En la fig. 54 y 55 se aprecian los valores promedios de la distribución logarítmica de la capacitancia de los aisladores contaminados con Caolín y sólo con sal.

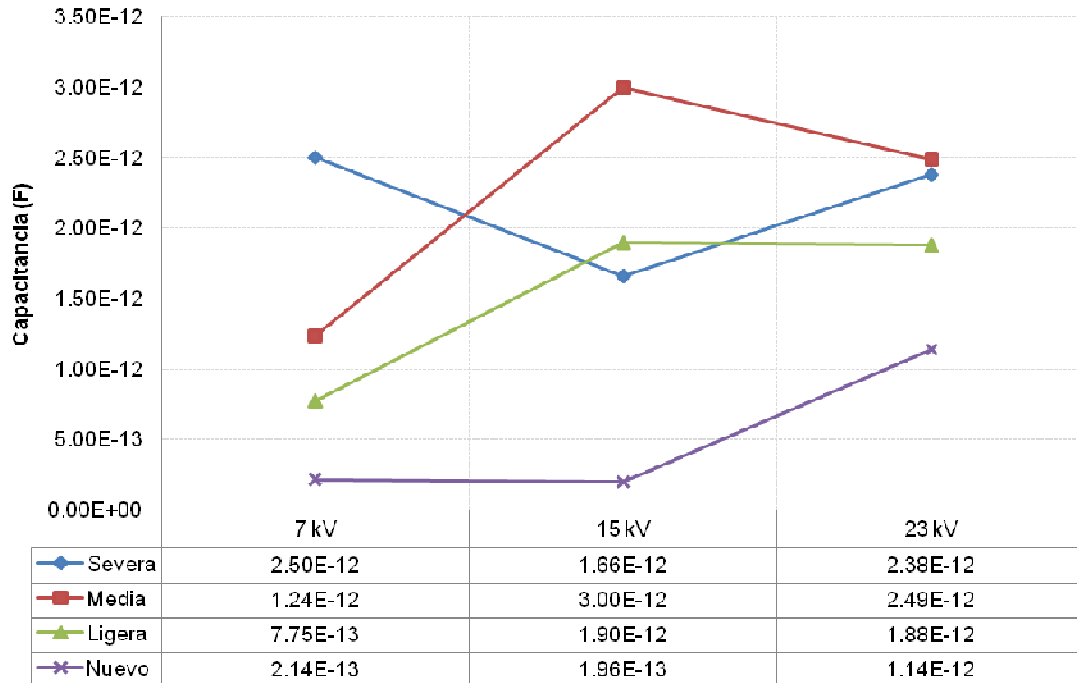


Fig. 54. Capacitancia superficial en aisladores contaminados con caolín

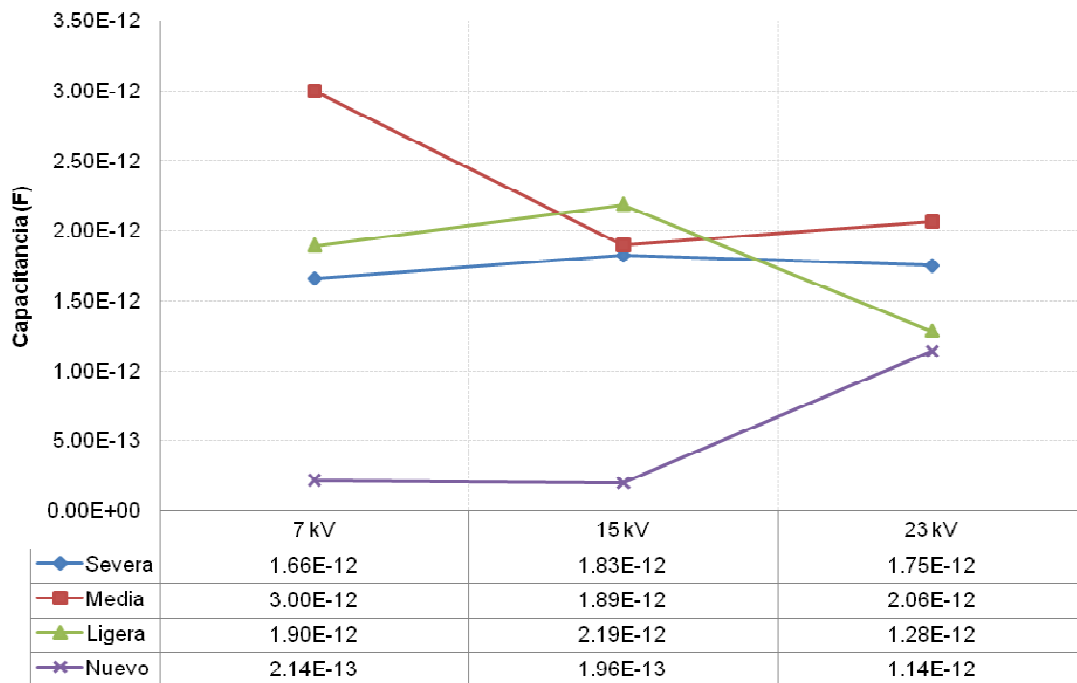


Fig. 55. Capacitancia superficial en aisladores contaminados con sal

Los menores valores de capacitancia tienen lugar en los aisladores sin contaminante. La diferencia entre un aislador sin contaminación y otro será la humedad depositada en la superficie.

Los resultados obtenidos no son concluyentes, dado que no se define un patrón claro de comportamiento, como el que se presume tendría lugar en presencia de degradación del material polimérico.

En cuanto a la resistencia superficial, los valores de la misma, calculada para cada aislador, oscilaban alrededor de un valor medio, por lo que se aplicó una distribución logarítmica para el análisis de los valores. Los valores promedios de la resistencia se muestran en las fig. 56, 57, 58 y 59.

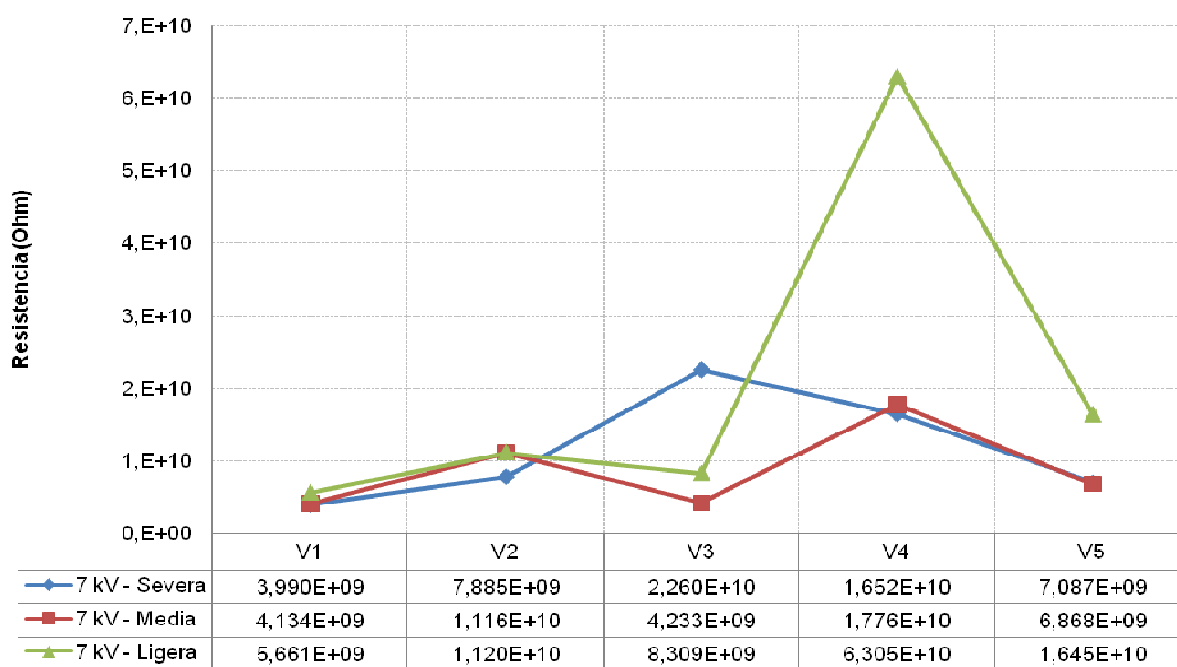


Fig. 56. Resistencia superficial en aisladores a 7 kV

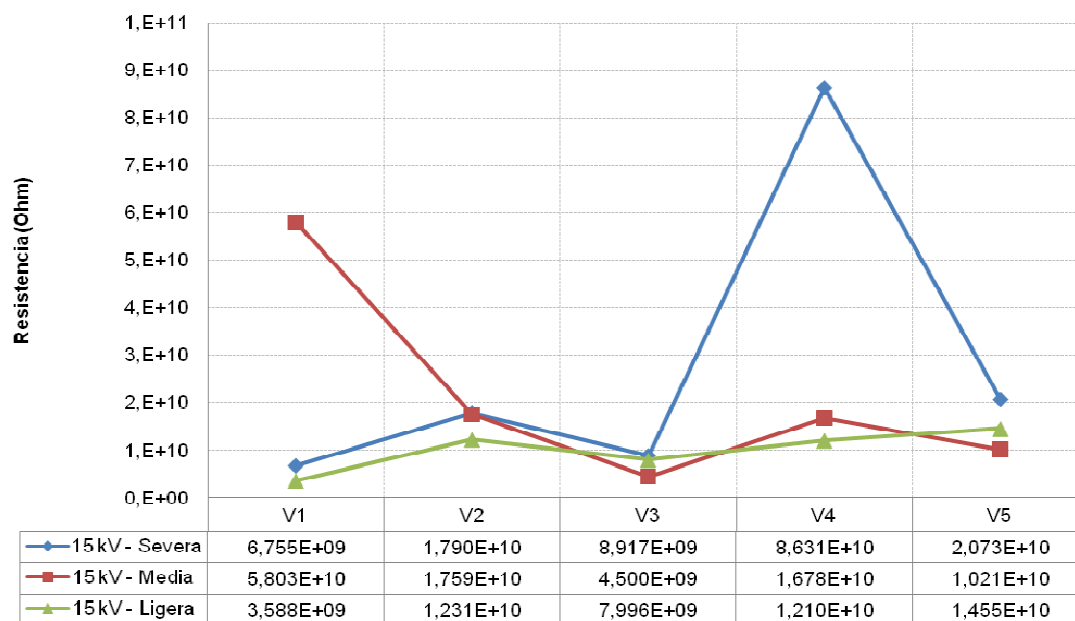


Fig. 57. Resistencia superficial en aisladores a 15 kV

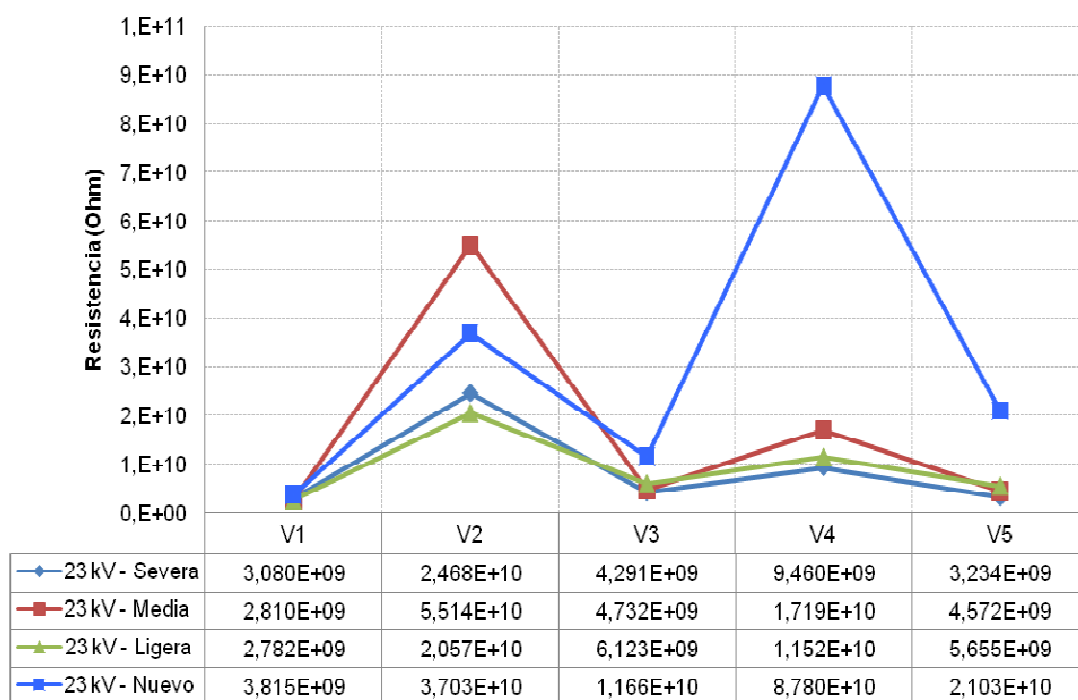


Fig. 58. Resistencia superficial en aisladores a 23 kV

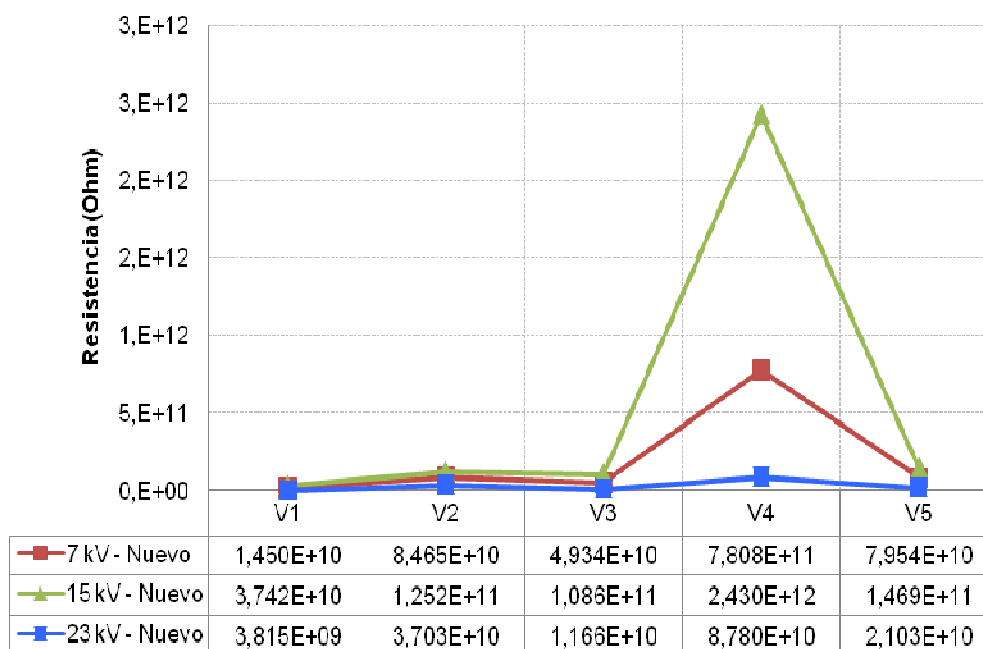


Fig. 59. Resistencia superficial en aisladores sin contaminación

Según las figuras anteriores, no puede definirse una tendencia de comportamiento de la resistencia. Se evidencia la ocurrencia de cambios en la superficie que facilitan la mayor circulación de corriente, generando una disminución en el valor de la resistencia, que pueden ser: calentamiento de la superficie, desplazamiento y/o evaporación de las gotas de agua o ionización del aire circundante.

Durante ciertos períodos, la resistencia tiende a aumentar, lo que puede deberse a la formación zonas de mayor impedancia que impiden el aumento de la corriente, cuya rigidez es superada para un nivel de tensión a partir del cual la corriente aumenta y, en consecuencia, la resistencia disminuye, provocando incluso la pérdida de las propiedades de la superficie.

Estas zonas de mayor impedancia, pueden ser zonas secas, gotas de mayor tamaño que no se evaporaron por el paso de corriente y sólo se polarizaron, desprendimiento de contaminante, o incluso, saturación en la superficie, debido al proceso de ionización del aire.

Finalmente, los resultados mostrados son tendencias en el comportamiento de la superficie del aislador. La variación de los parámetros es aleatoria y no responde, como se mencionó anteriormente, de la misma forma aún en las mismas condiciones de simulación.

Para estudiar la aplicabilidad del modelo, se calcularon los parámetros correspondientes y se utilizó la herramienta ATP/EMTP para hacer la simulación. Los resultados se muestran a continuación.

6.2.3.3. Aplicación del Modelo

Con las mediciones obtenidas durante el período de estudio de los aisladores se calcularon los parámetros del modelo equivalente según las premisas descritas anteriormente, y se realizaron simulaciones en ATP/EMTP. El código puede ser consultado en el apéndice 7.

Se hicieron múltiples simulaciones para comprobar la veracidad del modelo, que resultaron satisfactorias. Para ejemplificar los resultados, se tomó el aislador que estuvo sometido a 23 kV con contaminación severa el día 20. Los parámetros correspondientes a dicho aislador calculados a partir del modelo propuesto son los que se muestran en la tabla XXI.

Tabla XXI. Valores de Resistencia superficial no lineal

Tensión Aplicada (V)	Corriente (uA)
10	0.005
6660	8.19
13320	19.99
19980	41.90
26640	69.14
29970	87.05
33300	100.60

Graficando los valores de la tabla XXI (ver fig. 60), se puede ver el comportamiento no lineal de la corriente de fuga, y la resistencia como resultado del cociente voltaje- corriente.

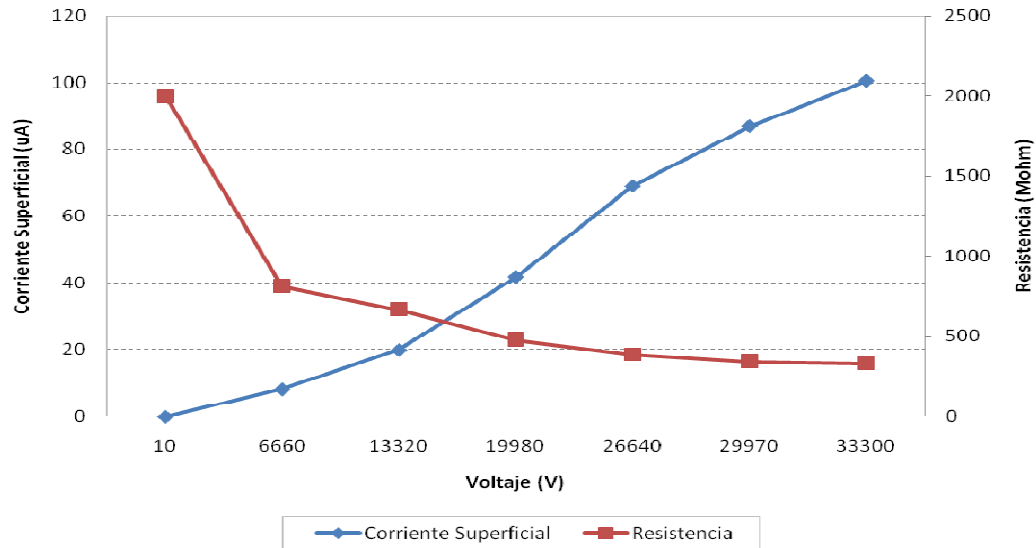


Fig. 60. Resistencia y Corriente en función de la tensión

La capacitancia superficial es de 1.6 pF. En la fig. 61 se aprecia tanto la corriente medida como la obtenida a partir del modelo.

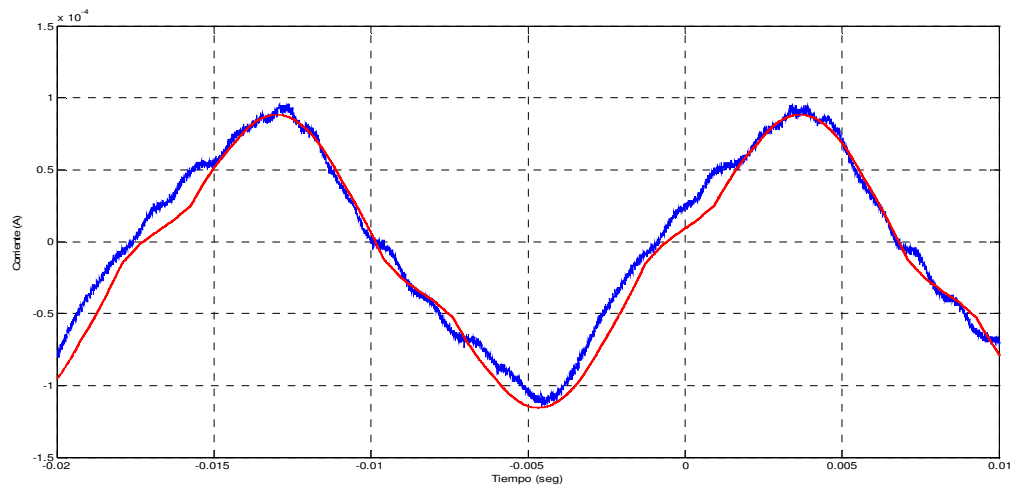


Fig. 61. Resultados de la simulación – Corriente en función del tiempo
(azul: corriente medida – Rojo: corriente simulada)

Otra simulación, es con el aislador que estuvo sometido a 15 kV con contaminación severa el día 20. Los parámetros correspondientes a dicho aislador calculados a partir del modelo propuesto son los que se muestran en la tabla XXII, mientras que el comportamiento de la corriente y la resistencia se muestra en la fig. 62.

TABLA II. Valores de Resistencia superficial no lineal

Voltaje aplicado (V)	I(A)
1891	2.60E-08
6548	3.63E-08
12650	9.31E-09
17890	1.23E-08
21910	3.74E-08

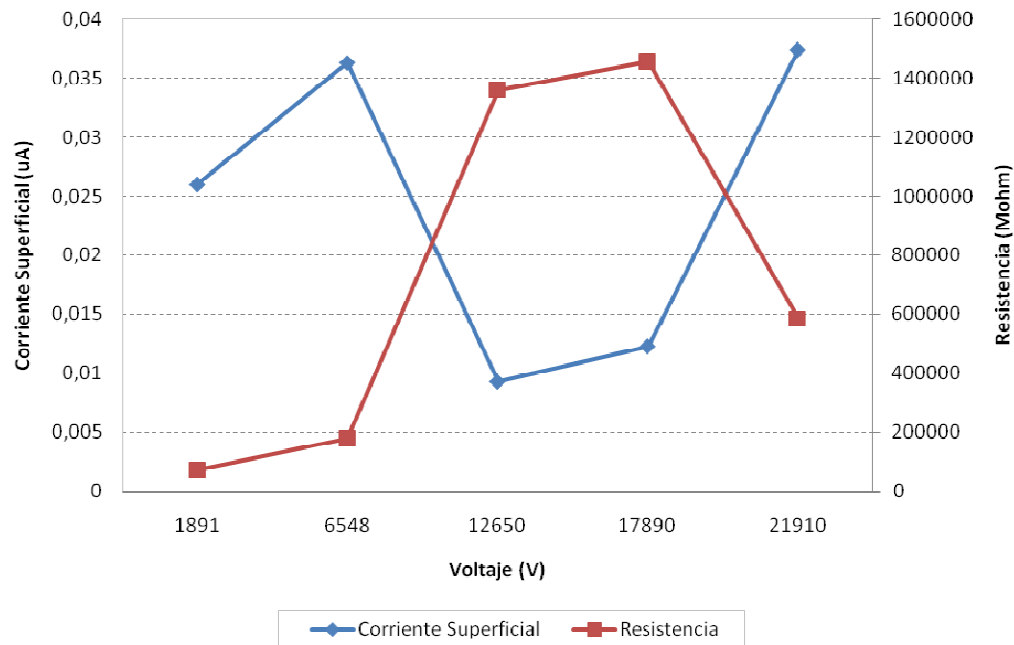
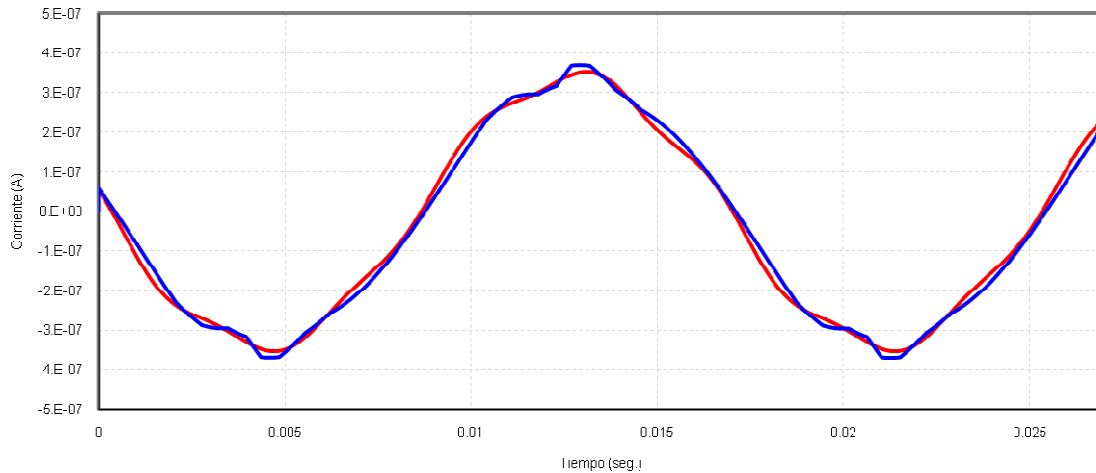


Fig. 62. Resistencia y Corriente en función de la tensión

La capacitancia superficial es de 0.0348 pF. En la fig. 63 se aprecia tanto la corriente medida como la obtenida a partir del modelo.



*Fig. 63. Resultados de la simulación – Corriente en función del tiempo
(azul: corriente medida – Rojo: corriente simulada)*

El modelo propuesto consigue representar las corrientes medidas. En condiciones de degradación, que no se lograron en este estudio, las tendencias de las corrientes pueden presentar una directriz más definida.

Los períodos de recuperación no son una variable del modelo. A partir de las mediciones de corriente en esta condición, es posible calcular los parámetros asociados y compararlos con valores de referencia, como aisladores nuevos, por ejemplo. Para incluir este parámetro en el modelo es necesario que existan síntomas de degradación, de forma que la misma pueda ser contabilizada. En este estudio no se alcanzó la condición de degradación, por eso, a pesar de que se tienen las mediciones en períodos de recuperación, no se incluyó en el modelo.

CAPÍTULO VII.

7. CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrolló un modelo eléctrico que representa al aislador polimérico estudiado sometido a condiciones de contaminación, tensión aplicada y humedad, a partir de la medición de la corriente de fuga, con la cual fue posible caracterizar los fenómenos que tienen lugar en la superficie. Adicionalmente, el modelo está compuesto por parámetros eléctricos, lo que hace más sencillo su entendimiento e implementación, permitiendo además compararlo con aisladores cerámicos de los cuales existe hoy en día una vasta experiencia.

Para conseguir someter a los aisladores a las condiciones antes mencionadas, se construyó una cámara de degradación artificial según las normas para aisladores cerámicos disponibles. Se aplicó tensión de forma continua, con breves lapsos de reposo para la aplicación del contaminante.

Hasta ahora, no se ha definido un criterio que unifique las metodologías en un solo procedimiento que señale como deben ser estas cámaras de degradación, por la variabilidad del proceso regenerativo. Esto último es evidente cuando se estudian los tiempos de degradación, ya que dependen de la capacidad de recuperación del aislador y de los factores ambientales, que son variables difíciles de medir.

Parte del procedimiento de degradación artificial contempla la utilización de una metodología para la contaminación, el que fue utilizado se basa en la norma IEC 60507, que propone el

método de niebla limpia y el de niebla salina. Los resultados obtenidos de corriente y los parámetros del modelo con ambos métodos de contaminación, presentan comportamientos diferentes. Los aisladores contaminados sólo con sal presentan la misma tendencia de los aisladores sin contaminación sometidos a condiciones de humedad, diferenciándose por poseer resistencias superficiales más elevadas.

La formación de arcos parciales, por su parte, tiene lugar tanto en aisladores sin contaminación como en aquellos que contienen sal y sal y caolín, como resultado de la interacción entre las gotas de agua en el primer caso, y en el segundo, similar a lo que ocurre en aisladores cerámicos.

A pesar de que la relación entre la corriente de fuga y los principales factores de degradación aún no han sido completamente determinados, las variaciones en las magnitudes de la misma sólo pueden ser consecuencia de cambios en la superficie. Las mediciones realizadas demuestran que la corriente de fuga contiene información importante acerca de la superficie del aislador.

Una alternativa para hacer uso de la corriente de fuga como método de diagnóstico, además de las mediciones mencionadas, es la realizada entre lapsos de tiempo en reposo. El crecimiento de la componente capacitiva de la corriente (o decrecimiento de la resistiva), aunque este en el mismo orden de magnitud, es un síntoma de que la superficie es capaz de recuperar sus propiedades. La velocidad con la que este proceso ocurre (la pendiente de la recta que une las dos corrientes) está determinado por la capacidad de recuperación.

Las mediciones se realizaron de forma continua durante el período de estudio arrojando una gran cantidad de medidas que debieron ser tratadas de forma estocástica, por lo que los parámetros del modelo son tendencias y pueden alcanzar un rango de valores.

La corriente de fuga depende de variables aleatorias como calentamiento local de la superficie, distribución y tamaño de las gotas de agua depositadas consecuencia de la humedad, distribución de los arcos eléctricos superficiales, deposito del contaminante, parámetros que son a su vez producto de numerosas cantidades aleatorias.

El modelo propuesto consigue representar las corrientes medidas, pudiendo ser aplicado igualmente a aisladores cerámicos. En condiciones de degradación, que no se lograron en este estudio, las tendencias de las corrientes pueden presentar una directriz más definida, lo que permitiría hacer ajustes más certeros de los parámetros de la superficie del aislador.

En función de obtener un modelo que se ajuste al comportamiento del aislador en condiciones de degradación, se recomienda realizar mediciones experimentales hasta alcanzar el deterioro del aislador, así como, aplicar técnicas de análisis de los datos como algoritmos genéticos en función de conseguir un modelo más preciso o valores más certeros de los parámetros.

Igualmente, es conveniente evaluar las tendencias del coeficiente de degradación con el objeto de determinar hasta donde llega su aplicabilidad y aplicar el modelo propuesto y determinar que parámetros se modifican con la degradación para determinar su aplicabilidad como técnica de diagnostico o incluso, determinar la expectativa de vida útil.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation
H. Janssen, J. M. Seifert, H. C. Karner
Interfacial Phenomena in Composite High Voltage Insulation
Vol. 6 No. 5, October 1999, pp 651

- [2] Tesis para el grado de Doctor en Filosofía
Tomas G. Gustavsson
Silicone Rubber Insulators – Impacts of Material Formulation on Coastal Environments
Chalmers University of Technology, Sweden, April 2002.

- [3] Fierro Chávez, José Luis.
Aisladores no cerámicos para líneas de transmisión. Parte I
Boletín IIE. Marzo/Abril 1999

- [4] Lacurti C, Francisco A., Lazzari L., Armando
Factores que Influyen en la Degradación de Aisladores Poliméricos
Tesis USB, Marzo 1994.

- [5] Fernando, Manjula.
Performance of Non-ceramic Insulators in Tropical Environments
Tesis de Doctorado, Chalmers University of Technology.
Göteborg, Sweden 1999

- [6] IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation
Reuben Hackam.
Outdoor HV Composite Polymeric Insulation
Vol. 6, N°5, October 1999, pp 557

[7] Maglen González y Yelisce Ortiz
 Aplicación de Técnicas de Diagnóstico a Probetas de goma de Silicona degradadas artificialmente
 Tesis USB, 1997

[8] IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation
 Reynders, J., Jandrell, I, Reynders, S.
 Review of Aging and Recovery of Silicone Rubber Insulation for Outdoor Use.
 Vol 6, N°5, October 1999, pp 620

[9] Informe de Evaluación de los Aisladores de Edelca Maracaibo
 Evaluación De Las Cadenas De Aisladores Poliméricos, 400 kV, empleadas en la línea El Tablazo – Cuatricentenario. (Clase 160 Kn) Marca Sediver

[10] ANSI C29.13-2000 American National Standard for Composite Suspension Insulators for Overheat Transmission Lines Test.

[11] Comisión de Integración Energética Regional
 TcT en Líneas de AT con Aisladores Poliméricos
 Neira

[12] XIIIth International Symposium on High Voltage Energy, 2003

[13] IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation
 Suda, T.
 Frequency Characteristics of Leakage Current Waveforms of an Artificially Polluted Suspension Insulator
 Vol.8, N°4, August 2001, 705-709fu

[14] IEEE Transaction on Power Delivery
 Amarth, F., Karady, G., Sundararajan, R.
 Linear Stochastic Analysis of Polluted Insulator Leakage Current.
 Vol. 17, N°4, October 2002

[15] IEEE Transaction on Dielectric and Electrical Insulation
 Fernando, M., Gubanski, S.
 Leakage Current Patterns on Contaminated Polymeric Surfaces.
 Vol. 6, N° 5, October 1999, pp 660-667

[16] IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation.
 S. Kumagai, N. Yoshimura
 Leakage Current Characterization for Estimating the Conditions of Ceramic and Polymeric
 Insulating Surfaces
 Vol. 11, N° 4, February 2004, pp 681.

[17] IEEE Transactions on Power Delivery
 Suda, T.
 Frequency characteristics of leakage current waveforms of a string of suspension insulators
 Vol. 20 N° 1 Jan 2005 , pp. 481- 487

[18] IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation
 Zhu, Y., Otsubo, M., Honda, C.
 Mechanism for changes in Leakage Current Waveform on Wet Silicone Rubber Surface – A
 Study using a Dynamic 3-D Model.
 Vol. 12 N° 3 June 2005 , pp. 556- 564

[19] IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation
 Gubansky, S.
 Leakage Current and Flashover of Field-aged Polymeric Insulators
 Vol. 6 N° 5 Oct 1999 , pp. 774- 753

[20] IEC 61109 Composite Insulator for Overheat Lines With Nominal Voltage Greater than
 1000V-Definitions, Test Method and Acceptance Criterion

[21] IEEE Std 987-2001 Guide for application of Composite Insulators.

[22] IEEE 1024: For Specifying Distribution Composite Insulators (suspension type and dead-
 end type)

[23] ANSI C29.13: Insulators – Composite distribution dead-end type

[24] IEC 61466: Composite string insulator units for overhead lines with a nominal voltage greater than 1000 V.

[25] ASTM D2240: Standard test method for rubber property – durometer hardness.

[26] STRI Guide 1, 92/1
Hydrophobicity Classification Guide

[27] STRI. Guide 8, 2002/1
Guidelines for inspection and analysis of silicone grease on high voltage insulators

[28] STRI Guide 5, 2005
Guide for Visual Identification of Deterioration & Damages on Suspension Composite Insulators.

[29] Multistress Aging of Polymeric Insulators
Raji Sundararajan, Chad Pelletier, Roger Chapman.
<http://poly.asu.edu/technology/multistress/Papers/2000CEIDP.pdf>

[30] IEC 60507: Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on A.C. systems.

[31] PE-094-PWRD-0-01-1997
Sörqvist, T; Vlastós, A.
Performance and Ageing of Polymeric Insulators

[32] IEEE Transaction on Power Delivery
[32] Karady, G., Shah, M.
Flashover Mechanism of Silicone Rubber Insulators used for Outdoor Insulation - I
Vol. 10, Nº 4, October 1995. pp 1965-1971

- [33] IEEE Transaction on Power Delivery
Karady, G., Shah, M.
Flashover Mechanism of Silicone Rubber Insulators used for Outdoor Insulation - II
Vol. 10, N° 4, October 1995. pp 1972-1978
- [34] IEEE Transaction on Power Delivery
Matsuoka, R., Shinokubo, H.
Assessment of Basic Contamination Withstand Voltage Characteristics of Polymer Insulators
Vol. 11, N° 4, October 1996. pp 1895-1900
- [35] IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation
Venkataraman, S., Gorur, R.
Prediction of Flashover Voltage of Non-Ceramic Insulators under Contaminated Conditions
Vol. 13 N° 4 Aug 2006, pp. 862 - 869
- [36] Vincens, José A.
Influencia de la Radiación Ultravioleta en la degradación de los aisladores poliméricos.
Tesis USB, Mayo 1995
- [37] IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation.
Tanaka, T.
Aging of Polymeric and Composite Insulating Materials
Vol. 9, N° 5, October 2002
- [38] IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation
Sebo, S., Zhao, T.
Utilization of Fog Chambers for Non-ceramic Outdoor Insulator Evaluation
Vol. 6, N°5, October 1999, pp 676-687
- [39] <http://www.ewh.ieee.org/r9/panama/pesaltae2005/>
El Proceso de Contaminación del Aislamiento Externo
Carolina Blanco

[40] IEEE Transaction on Power Delivery
 Masuoka, R.; Shinokubo, H.; Kondo, H.
 Assessment of Basic Contamination Winstand Voltage Characteristic of Polymer Insulation
 Vol. 11, Nº4, October 1996, pp 1895-1900

[41] IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation
 Sebo, S., Zhao, T.
 Electrical Performance of Non-ceramic Insulators in Artificial Contamination Tests Role of Resting Time
 Vol. 3, Nº 6, October 1996, pp 827-835

[42] CIGRE. Session 2002
 Wang, S., Liang, X., Cheng, Z., Wang, X., Li, Z., Zhou, Y., Yin, Y., Wang, L., Guan Z.
 Hydrophobicity Changing Of Silicone Rubber Insulators In Service
 21, rue d'Artois, F-75008 Paris

[43] Silicone Compounds for High-Voltage Insulators: HPS Testing of Silicone Compounds.
 R. Allen Bernstorf, Principal Engineer, Insulators
 David Ryan, Polymer Chemist Hubbell Power Systems, Inc.

[44] IEEE Transaction on Power Delivery
 Richards, C., Benner, C., Butler-Purry, K., Don Russell, B.
 Electrical Behavior of Contaminated Distribution Insulators Exposed to Natural Wetting
 Vol. 18, Nº 2, April 2003, pp 551-558

[45] IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation
 Williams, D. L., Haddad, A. , Rowlands, A. R., Young, H. M., Waters, R. T.
 Formation and Characterization of Dry Bands in Clean Fog on Polluted Insulators
 Vol. 6, Nº 5, October 1999, pp 724-731

[46] http://redescolar.ilce.edu.mx/redescolar/publicaciones/publi_rocas/caolin.htm

[47] http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leip/campos_o_a/capitulo4.pdf

- [48] Polymer Compounds used in High voltage insulators
OHIO BRASS/Hubbel
http://www.hubbellpowersystems.com/POWERTEST/literature_library/pdfs4lib/OB/EU1407.pdf
- [49] ASTM D750-1985, Recommended Practice for Operating Light and Weather Exposure Apparatus (Carbon Arc Type) for Artificial Weather Testing Rubber compounds
- [50] IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation
Suda, T.
Fundamental and Low Frequency Harmonics Components of Leakage Current as Diagnostic Tool to Study Aging of RTV and HTV Silicone Rubber in Salt Fog
Vol.10, Nº1, February 2003, pp 128-136
- [51] XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering
Takenouchi, O., Otsubo, M., Anami, N., Honda, C., Hashimoto, Y.
Evaluation of Cumulative Charge of Dry Band Arc by Using the Differential Technique and the Emission Observation in Salt Fog Test
Netherlands, 2003
- [52] IEEE Transactions on Power Delivery
Guan, Z., Wang, L., Yang, B., Liang, X., Li, Z.
Electric Filed Analysis of Water Drop Corona
Vol.20, Nº2, April 2005, pp 964-969
- [53] IEEE Transactions on Power Delivery
Matsuoka, R., Kondo, K., Naito, K., Ishii, M.
Influence of Nonsoluble Contaminants on the Flashover Voltages of Artificially Contaminated Insulators
Vol. 11, Nº 1, January 1996, pp 420-426
- [54] IEC 60815 Guide for the selection of insulators in respect of polluted conditions.
- [55] Notas de clases – Instalaciones de Alta Tensión. Pos grado. Juan Rodríguez.

[56] Modelo Predictivo para la determinación de la contaminación salina en aisladores eléctricos.

Carmelo Quintana Suárez, Miguel Martínez Melgarejo, Jesús Romero Mayoral, Miguel A. Quintana Suárez, Felipe Díaz Reyes, Javier Cruz Norro.

<http://www.aedie.org/9CHLIE-paper-send/300-QUINTANA.pdf>

[57] Comisión de Integración Energética Regional
TcT en Líneas de AT con Aisladores Poliméricos

[57] CISPR – Publication 16 “CISPR Specification for Radio Interference Measuring Apparatus and Measurements Methods”

[57] NEMA – Publication 107. “Specifications for Electromagnetic Noise and Field Strength Instrumentations, 10 kHz to 1 GHz”

[60] IEEE Std. 4. “IEEE Standard Techniques for High Voltage Testing”

APÉNDICE 1. AMPLIFICADOR DE CORRIENTE

En vista de que las corrientes a medir están entre los mili y los pico amperios, es necesario implementar un circuito cuya función sea amplificar la magnitud de la corriente medida para llevarla a una escala apreciable sin distorsión. Se propone un circuito sencillo constituido por amplificadores operacionales y resistencias, que se muestra en la fig. 64. y se conecta como se muestra en la fig. 65.

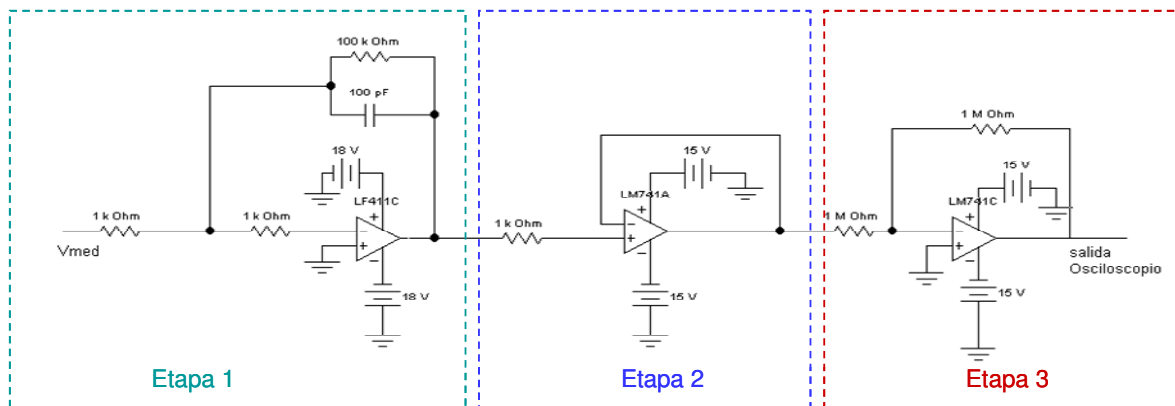


Fig. 64. Circuito de amplificación.

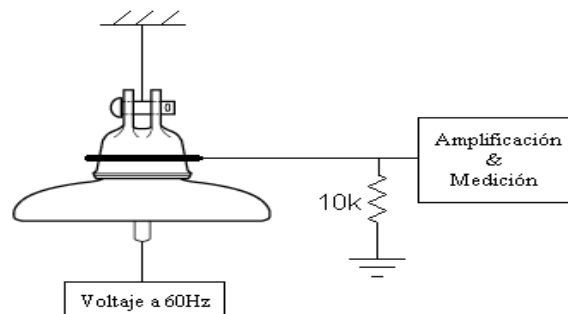


Fig. 65. Conexión del circuito de amplificación y medición

Al aislador se le coloca una lámina de cobre para recoger la corriente superficial. También se recomienda utilizar cinta semi-conductiva para asegurar un buen contacto entre el cobre y la superficie.

El amplificador consta de tres etapas, que se describen a continuación.

A.1.1. Etapa I. Amplificación

En esta etapa se hace la medición de la corriente y su amplificación. En la fig. 66. se muestra el diagrama circuital.

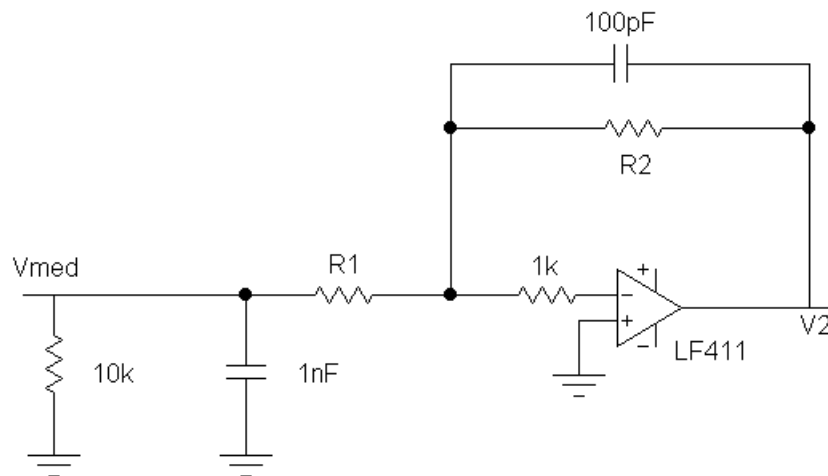


Fig. 66. Diagrama circuital de la Etapa I del amplificador de corriente

La corriente superficial del aislador se hace circular por la resistencia de $10\text{ k}\Omega$ del circuito, de forma que la tensión sobre la resistencia es proporcional en magnitud a la corriente de fuga y tienen la misma forma.

La tensión sobre la resistencia de medición es amplificada un valor variable según sea la magnitud de la corriente a medir.

Los capacitores se colocan como filtros de alta frecuencia para disminuir el nivel de ruido en la onda medida. La resistencia de $1\text{ k}\Omega$ en la entrada inversora se utiliza como estabilizador. La ganancia del circuito está determinada por (17), y se ajusta según el rango de corriente que se desea medir, ya que para ciertos valores de ganancia se tienen mediciones en pequeña escala que no pueden apreciarse y para otros puede saturarse el amplificador arrojando mediciones erróneas. En la fig. 67 se muestra la medición con la saturación del amplificador.

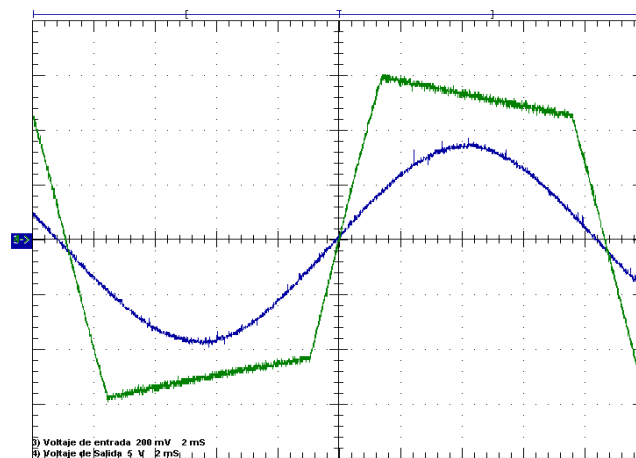


Fig. 67. Tensión de entrada (azul) y tensión a la salida (verde) del amplificador con saturación

Por comodidad, la resistencia R_2 es la que se varía, se disminuye para medir corrientes altas y se aumenta para medir corrientes pequeñas, manteniendo constante el valor de R_1 , por ejemplo, para las mediciones realizadas, el valor de R_1 se fijó en $1\text{ k}\Omega$ y R_2 en $1\text{ M}\Omega$ para medir nanoamperios.

$$V_2 = -\frac{R_2}{R_1} \cdot V_{\text{med}} \quad (17)$$

Por la forma en que esté conectado el amplificador, la señal a la salida está en contrafase respecto a la señal de entrada, razón por la cual es necesario invertir la fase.

A.1.2. Etapa II. Inversión de Fase

En vista de que la señal amplificada, obtenida en la etapa anterior, está desfasada 180° con la señal medida, se coloca un circuito inversor de ganancia 1, como el que se muestra en la fig. 68, con lo cual se obtiene a la salida del conjunto (ambas etapas conectadas en serie) la señal que se quiere medir amplificada un factor.

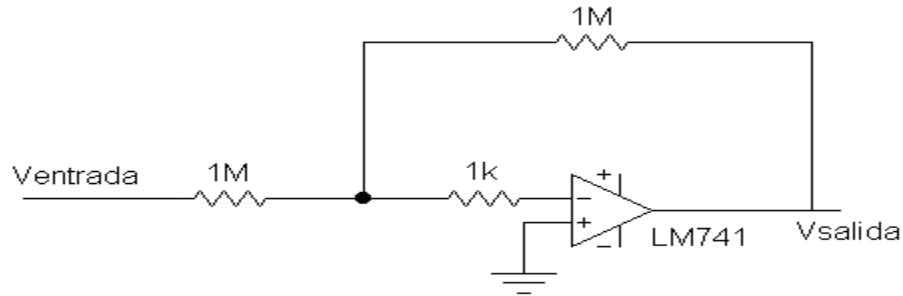


Fig. 68. Diagrama circuital de la Etapa II del amplificador de corriente

A.1.3. Etapa III. Alta Impedancia de Entrada

Por último se coloca un circuito seguidor (buffer) para proporcionarle al circuito una alta impedancia de entrada que permite, en primer lugar, evitar daños al osciloscopio además de garantizar que toda la corriente de fuga circulará por la resistencia de 10k. El esquema circuital de esta etapa se muestra en la fig. 69.

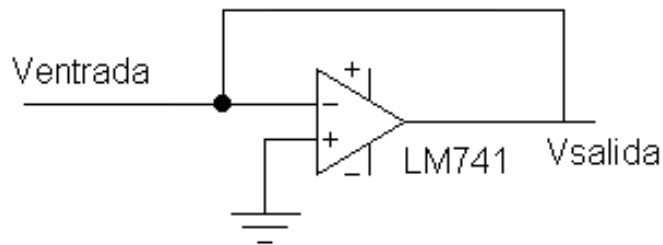


Fig. 69. Diagrama circuital de la Etapa III del amplificador de corriente

Con esto, se construye el amplificador de corriente. Sólo falta implementar un circuito de protección que evite daños en el circuito de medición durante la ruptura del medio dieléctrico.

APENDICE 3. ESTADO DE LOS AISLADORES

Los aisladores fueron sometidos a pruebas de diagnostico para determinar su estado de degradación al sacarlos de la cámara. En total se evalúan tres remociones, distanciadas un promedio de 40 días entre una y otra.

Se realizaron sobre los aisladores las siguientes pruebas:

- Inspección Visual
- RIV
- Tensión de Ruptura a baja frecuencia en condiciones secas.
- Tensión de Ruptura a baja frecuencia en Condiciones Húmedas.
- Medición de la Resistencia Superficial.

Los resultados obtenidos demuestran que los aisladores no se degradaron. Las mediciones de RIV, realizadas con el procedimiento que se describe en los estándares CISPR (Publicación 16) [58] y NEMA (Publicación 107) [59]. Los microvoltios (mV) resultantes de radio interferencia a

una frecuencia de 1 MHz, cuando la muestra se ve sometida a una tensión de prueba no fue representativo. El montaje implementado se muestra en la fig. 70.

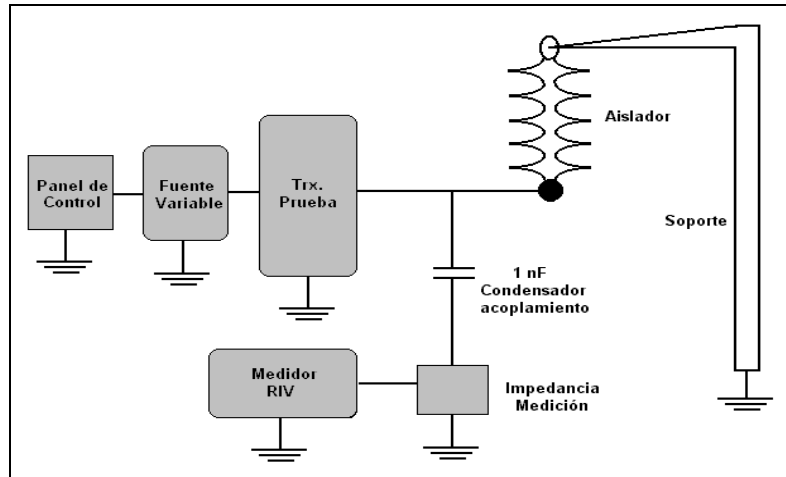


Fig. 70. Esquema experimental de la prueba de RIV [9]

Con la inspección visual según la norma STRI, se determinó que todas las superficies estaban hidrofóbicas después de uno o dos días de haberlos retirado de la cámara. Los aisladores tenían depositado el caolín, mas el mismo podía ser removido sin que el aislador presentara evidencias de degradación. En la fig. 71 se muestran tres aisladores.



Fig. 71. Inspección Visual

A.3.1. Tensión de Ruptura a Baja Frecuencia

Se midió la tensión de soporte a 60 Hz en condiciones secas y de humedad a los aisladores que fueron sacados de la cámara de degradación según el Std. 4 [60]

Se aumentó la tensión gradualmente a frecuencia industrial hasta obtener ruptura tres veces para cada aislador, siendo la tensión de ruptura el promedio de los tres valores obtenidos. Se corrigieron los valores con los coeficientes de humedad, presión y temperatura, para llevarlos a condiciones normalizadas.

Los resultados en condiciones secas son los que se muestran en la fig. 72.

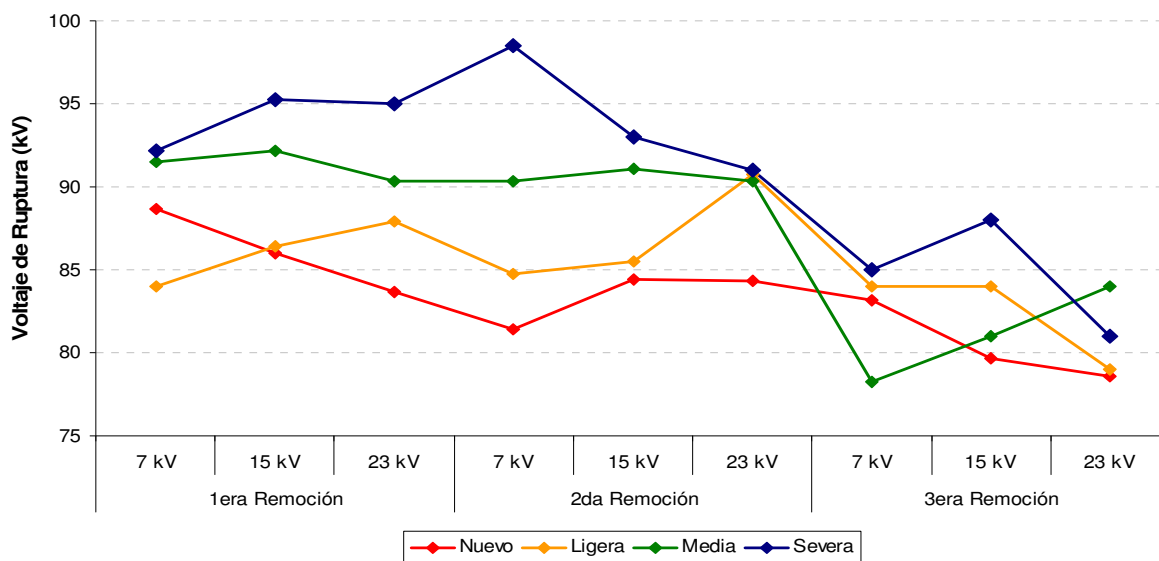


Fig. 72. Tensión de ruptura en seco

Los resultados en condiciones de humedad son los que se muestran en la fig. 73.

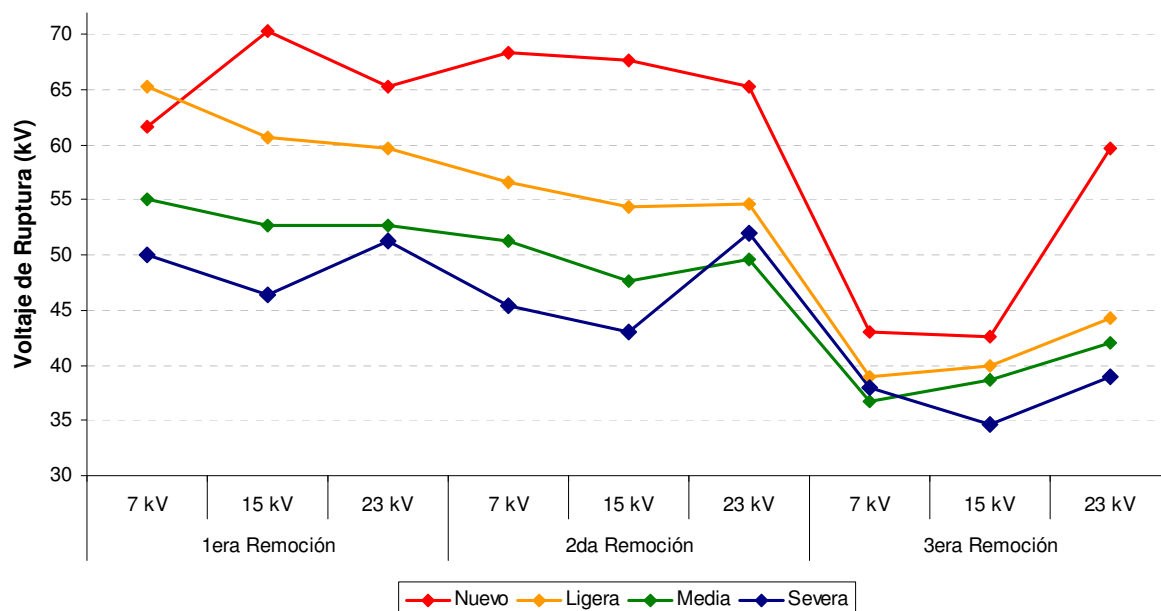


Fig. 73. Tensión de ruptura en condiciones húmedas.

En condiciones secas los aisladores contaminados reportaron mayores tensiones de ruptura que los del aislador nuevo, como se muestra en la fig. 73. Esto es debido a la mezcla contaminante y no a las propiedades del polímero.

Para corroborar que efectivamente la tensión de ruptura a 60 Hz obtenido corresponde a la mezcla del caolín y la sal, más que a las propiedades del aislador polimérico, se tomó el aislador que estuvo sometido a 23 kV con contaminación severa y se removió la capa contaminante para repetirlo el procedimiento antes descrito, para evaluar cuanto afecta la capa de caolín en la tensión de ruptura.

La remoción del caolín disminuyó en un 11% la tensión de soporte a 60 Hz, obteniendo un valor muy similar (2.4% inferior) al del aislador nuevo.

A pesar de la presencia del caolín las tensiones disminuyeron en presencia de humedad, como se aprecia en la fig. 49, dado que en esta condición la capa contaminante es una cubierta conductiva sobre la superficie del aislador por la disociación de la sal.

Cuando la conductividad de la capa de la superficie es establecida por la humedad en la cual los contaminantes sólidos son disueltos, comienza a fluir una corriente superficial a tierra. La magnitud de estas corrientes depende del grado de contaminación.

Todas las tensiones medidas son inferiores al del aislador nuevo, cuya tensión de ruptura medida a condiciones normalizadas alcanza el valor de 71 kV. Las tensiones de ruptura medidas son muy similares entre sí para las tres remociones estudiadas, lo que evidencia que no ha habido una degradación importante desde el punto de vista eléctrico del aislador en las condiciones en las que se encuentra.

En general, la tendencia es a que los que tienen mayor contaminación son los que tienen la menor tensión de ruptura, debido a que tienen mayor cantidad de sal depositada, independientemente de la tensión a la que estaban operando dentro de la cámara.

A.3.2. Resistencia Superficial

Pruebas sobre una cadena en etapa incipiente de degradación que estuvo en servicio [9], demostraron que la resistencia superficial se reduce a medida que se deteriora el aislador, por lo cual se aplicó a los aisladores en estudio.

El montaje experimental es el que se muestra en la fig. 74.

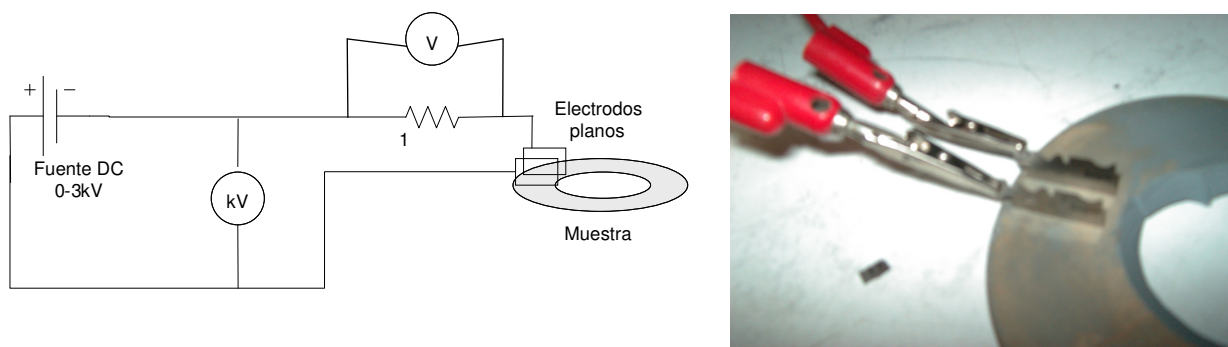


Fig. 74. Montaje experimental para medir Resistencia Superficial

La cadena degradada naturalmente se evaluó en tres ubicaciones, ya que la distribución de la capa contaminante es aleatoria y dependerá de las fuerzas gravitacionales, del viento y electrostática [39]. Se tomó una falda de la parte de la cadena más cercana al punto energizado, y otra, en el centro de la cadena. Adicionalmente, se realizaron pruebas sobre el mismo tipo de cadena nueva. Los resultados se muestran en la fig. 75.

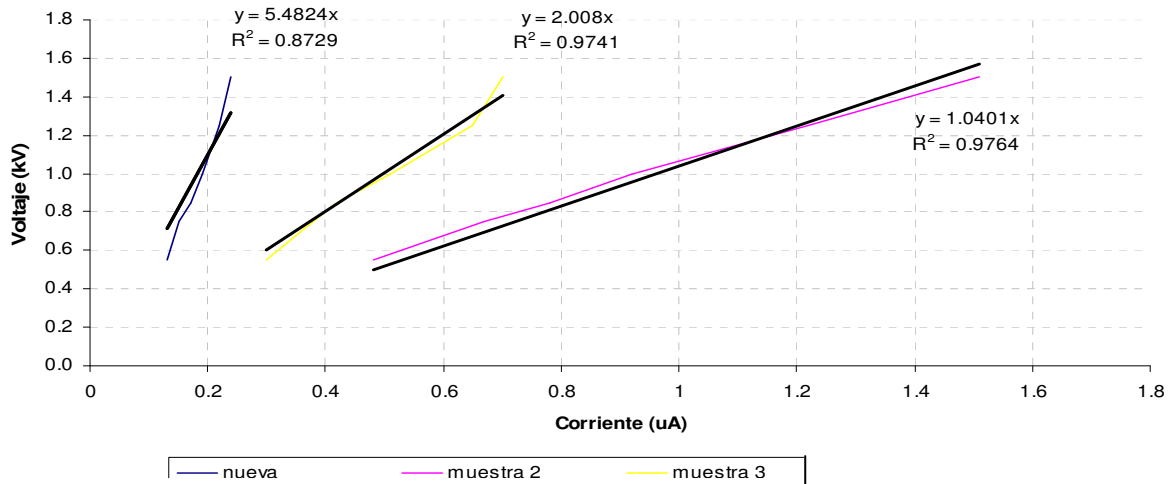


Fig. 75. Resistencia superficial de la cadena degradada

Las resistencias están en el mismo orden de magnitud, sin ser constante en todo el aislador. La muestra nueva tiene la mayor resistencia y las faldas más cercanas al conductor tienen el menor valor, es decir, el mayor deterioro está en las faldas más cercanas al aislador, como lo muestran estudios previos [9]. Este procedimiento se aplicó sobre los aisladores que estuvieron dentro de la cámara. Los resultados se muestran en la tabla XXII, donde se puede observar que no hay una tendencia definida en cuanto al comportamiento de la resistencia y el nivel de tensión para las diferentes mediciones.

Tabla XXII. Resistencia superficial en Ω

Remoción		1	2	3
7 kV	Ligera	5,45E+10	5,71E+10	2,43E+08
	Media	1,96E+09	5,58E+10	8,53E+07
	Severa	1,91E+09	3,87E+09	3,74E+07
15 kV	Ligera	3,01E+08	2,79E+09	3,55E+09
	Media	1,46E+08	6,61E+09	1,09E+08
	Severa	1,37E+08	4,52E+09	6,78E+07
23 kV	Ligera	1,95E+08	3,40E+09	6,45E+09
	Media	1,92E+09	1,91E+09	7,03E+09
	Severa	6,06E+10	6,71E+10	1,05E+09

APENDICE 4. PARÁMETROS EN AISLADORES SIN CONTAMINACIÓN

Se realizaron mediciones de la forma de onda de la corriente y de la tensión sobre pequeñas muestras de aislador polimérico, para estudiar la influencia de la humedad sobre la corriente superficial y por ende, su resistencia y capacitancia.

El montaje experimental consta de dos placas separadas 1 cm energizadas con tensión AC, colocadas sobre la muestra de polímero. Se registró la forma de onda de tensión y corriente. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla XXIII:

Tabla XXIII. Resistencia superficial

ml de agua	V	I (A)	tita (°)	tita (rad)	z (ohm)	C (F)
0,00	172	5,54E-07	-68,13	-1,1891	3,10E+08	9,2E-12
0,05	93,99	3,19E-07	-73,37	-1,28055	2,95E+08	9,4E-12
0,50	64,63	2,84E-07	-75,12	-1,31109	2,28E+08	1,2E-11

Es importante acotar que las formas de onda eran senoidales en todos los casos.

Se tomó como referencia los parámetros calculados sin agua depositada en la superficie. Al colocar una gota de agua con 0.05 ml de volumen, los resultados obtenidos tienden a parecerse a los resultados sin humedad, observando una diferencia de 5.1% en la resistencia, cuyo valor disminuye y de 2.1% en aumento en la capacitancia.

Al aumentar el volumen de agua a 0.5 ml, la diferencia aumenta. La resistencia obtenida es 26.7% inferior que en la muestra de referencia y la capacitancia aumenta en un 31% respecto a esta última.

Estos resultados muestran como la variación de la humedad depositada en la superficie modifica los parámetros de capacitancia y resistencia superficial sin necesidad de que ocurra modificación en las propiedades superficiales del polímero.

APENDICE 5. CÓDIGO EN ATP EMTP – AISLADOR 15 kV CONTAMINACIÓN SEVERA

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -Delt><--tmax><--xopt><--copt>
  5.0E-8 0.032 0.0 0.0
C <lout><lplot><ldoubl><Kssout><Maxout><lpun--><Memsav><lcat--><Nererg><lprsup>
  9999 1 0 0 1 0 1 2 0 0
C
C //////////////////////////////////COMPONENTE SUPERFICIAL DE LA CORRIENTE////////////////////////////////////
C **** Resistencia no lineal ****
c
C <TRAN><RECP> <--R-><--L-><--C-><Dist>
92nodo1 nodo3 4444. 1
          -1.
          5.059e-8 10.
          8.189e-6 6660.
          1.999e-5 13320.
          4.190E-5 19980.
          6.914e-5 26640.
          8.705e-5 29970.
          1.006e-4 33300.
9999
c
C **** capacitancia superficial ****
C <TRAN><RECP> <--R-><--L-><--C-><Dist>
nodo1 nodo3 1.6e-6 1
C
C //////////////////////////////////COMPONENTE VOLUMETRICA DE LA CORRIENTE////////////////////////////////////
C **** capacitancia fija ****
c
C <TRAN><RECP> <--R-><--L-><--C-><Dist>
nodo1 nodo3 1.E-8 1
C
c **** resistencia para ver i total *****
C <TRAN><RECP> <--R-><--L-><--C-><Dist>
nodo3 1.e-6 1
c
BLANK CARD, ramas
BLANK CARD, switches
C
C **** Fuentes ****
CC
C <NOMB> T<--AMPL--><--FREC--><--FASE--><-----><-----><Tstart--><Tstop-->
14nodo1 1 33300.0 60.00 0.0 -1.00
C
BLANK CARD, Fuentes
C
1
BLANK CARD, Tensiones
BLANK CARD, Caso
BEGIN NEW DATA CASE

```

APENDICE 6. CARACTERISTICAS DE LOS AISLADORES



MACLEAN
POWER
SYSTEMS

Distribution Deadend Insulators

Rev: A2, Date: 07/2004

MPS Distribution Deadend Insulator Differentiation

CR E-Glass Core – MPS uses "Boron Free" Corrosion Resistant E-Glass on all its insulators for its high electrical integrity & high resistance to acid corrosion. The boron free formulation of the fiberglass core makes it resistant to nitric acid attacks. CR E-Glass allows MPS to claim a truly

BRITTLE FRACTURE FREE INSULATORS.

Silicone Rubber – MPS uses a Silicone formulation that is unchanged since the early 80's.

The **Si-O** molecular bonds (Inorganic backbone of Silicone) are very stable and have bond strengths higher than sunlight, making the silicone resistant to UV degradation. In addition to providing protection against ultraviolet radiation, electrical aging, and corona effect, silicone exhibits hydrophobic properties; which provide excellent recovery characteristics to control leakage currents in highly polluted or coastal environments.

MPS silicone rubber formulation has consistently outperformed other silicone formulations in its hydrophobicity, its hydrophobicity recovery rate, and enhanced electrical properties in contaminated environments.

DS-M Series Distribution Deadends

- Conventional design deadend insulator
- Silicone shed housing is injection molded onto and bonded to the CR rod core.
- Ductile iron end fittings are crimped to the fiberglass core in a tightly controlled process that ensures predictable tensile strength.
- Unique multi level sealing process.

FIBERLINK Distribution Deadends

- "Wound Fiberglass Core" and metal eyelets make up the basic structure of this new and unique insulator.
- Silicone rubber is molded onto the wound core. The lack of metal end fittings result in a greater dry arc distance, which increases electrical performance.
- Light weight insulator.

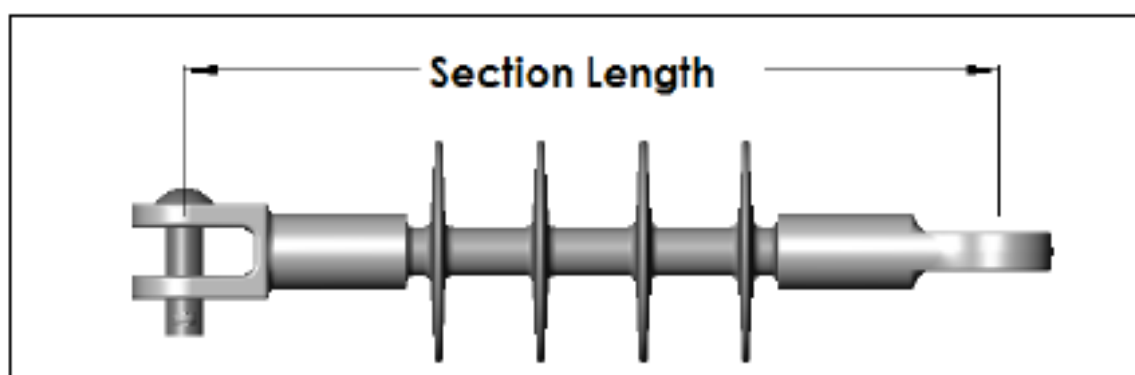


Distribution Deadend Insulators

Rev: A2, Date: 07/2004

DS-M Series

15kV – 28kV



Typical Line Voltage kV	Catalog No.	Section Length In [mm]	Dry Arc In [mm]	Leakage In [mm]	Electrical Flashover (kV)				Weight	
					60 Hz		CIFO			
					Dry	Wet	Pos	Neg	lbs.	kg.
15	DS-15M	13.0 [330]	7.6 [192]	15.8 [401]	90	85	140	145	2.8	1.18
28	DS-28M	17.0 [430]	11.6 [294]	24.7 [628]	130	100	190	220	2.9	1.32

Notes:

- SML = 15,000 lbs [66.7 kN]
- RTL = 7,500 lbs [33.4 kN]
- All ratings meet or exceed the requirements of ANSI C29.13 (2000) and LWTWG-01 (96)
- Corrosion Resistant Fiberglass Core / Silicone Housing
- RUS Accepted



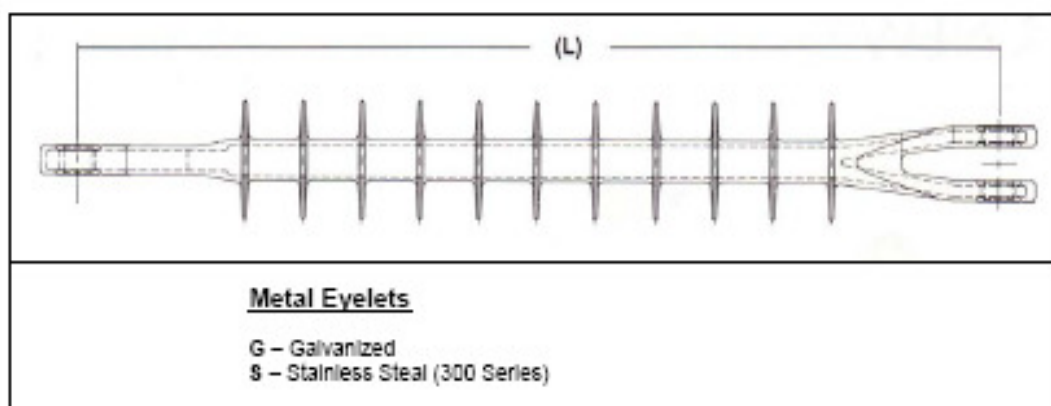
MACLEAN
POWER
SYSTEMS

Distribution Deadend Insulators

Rev: A2, Date: 07/2004

FIBERLINK

15kV – 35kV



Typical Line Voltage kV	Catalog No.	Section Length In [mm]	Leakage In [mm]	Electrical Flashover (kV)				Weight		Quantity	
				60 Hz		CIFO		lbs.	kg.	CTN	Pallet
				Dry	Wet	Pos	Neg				
15	DS-15G	12.50 [318]	15.0 [381]	133	112	202	225	1.2	.54	18	540
	DS-15S										
28	DS-28G	17.78 [451]	26.0 [660]	177	157	286	357	1.6	.73	18	486
	DS-28S										
35	DS-35G	22.55 [572]	34.8 [884]	222	199	325	401	2.0	.91	18	342
	DS-35S										

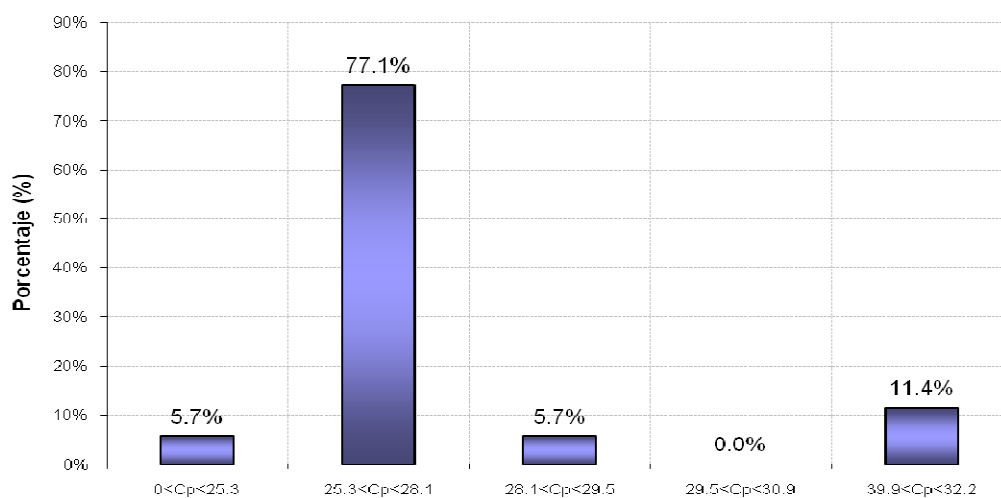
Notes:

- SML = 15,000 lbs [66.7 kN]
- RTL = 7,500 lbs [33.4 kN]

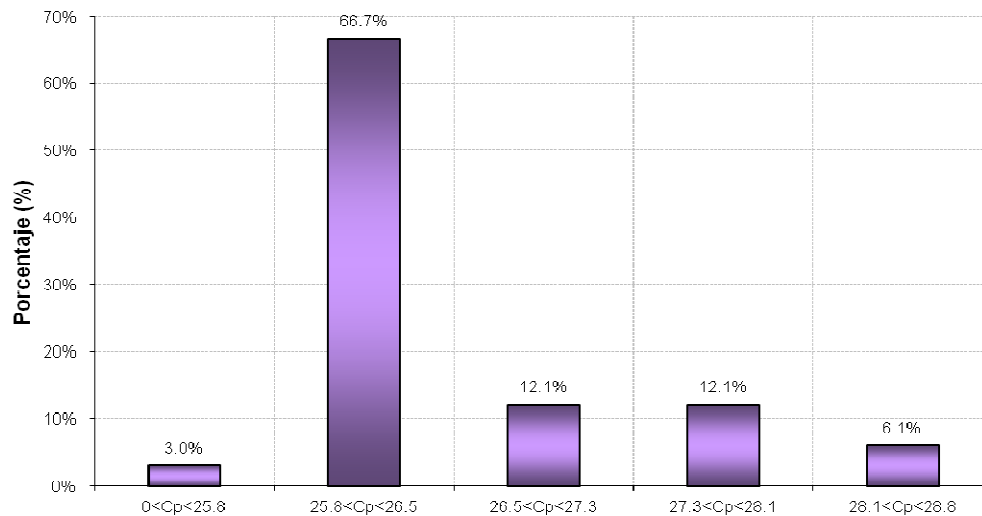
APENDICE 7. DISTRIBUCIÓN LOGARITMICA DE CAPACITANCIA

7 kV –Caolín

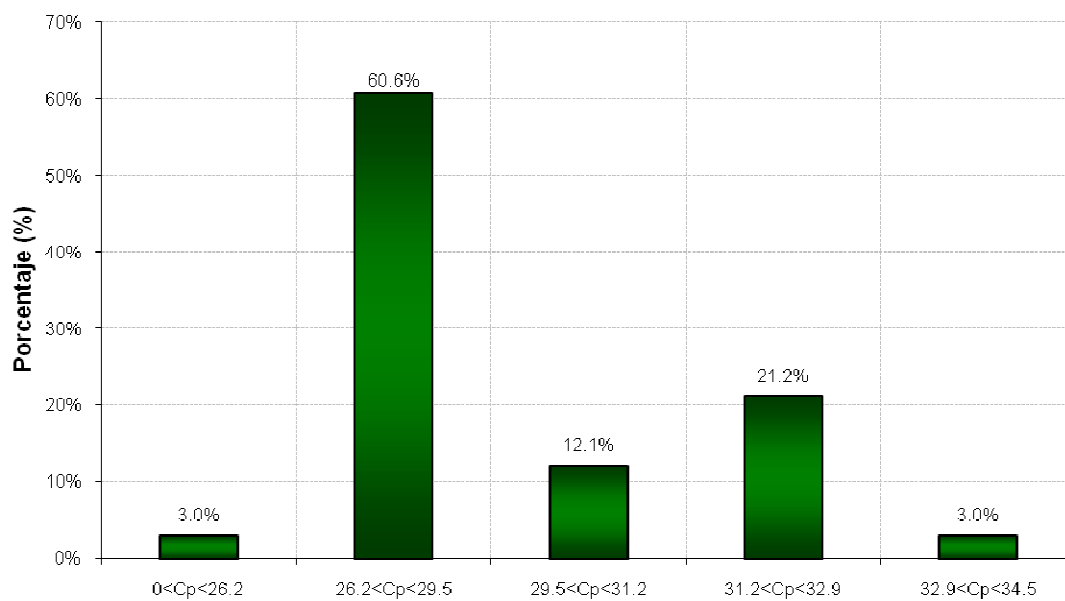
SEVERA



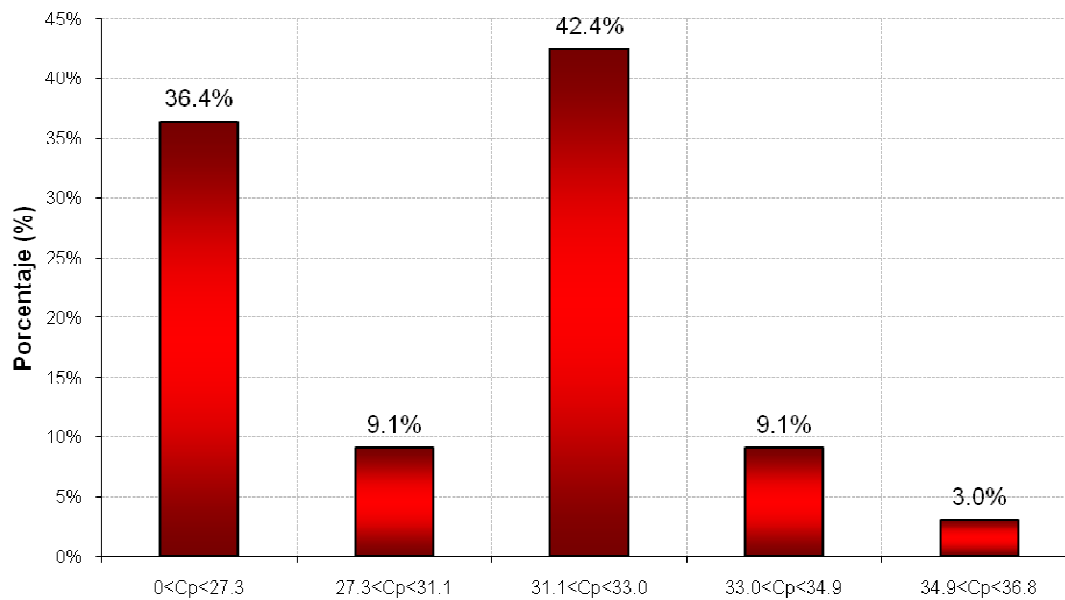
MEDIA



LIGERA

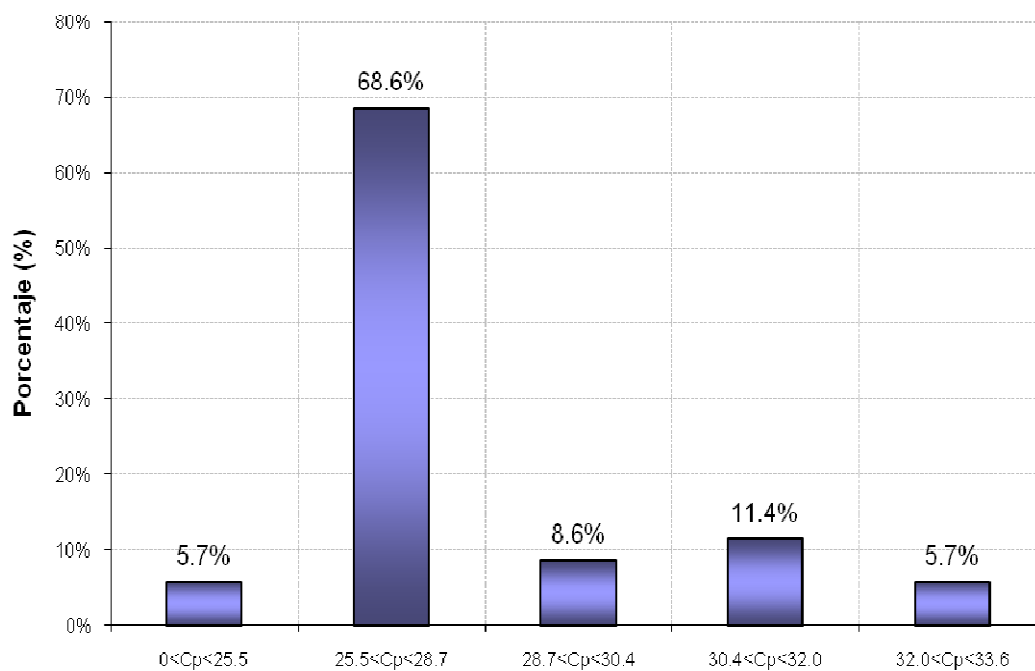


SIN CONTAMINANTE

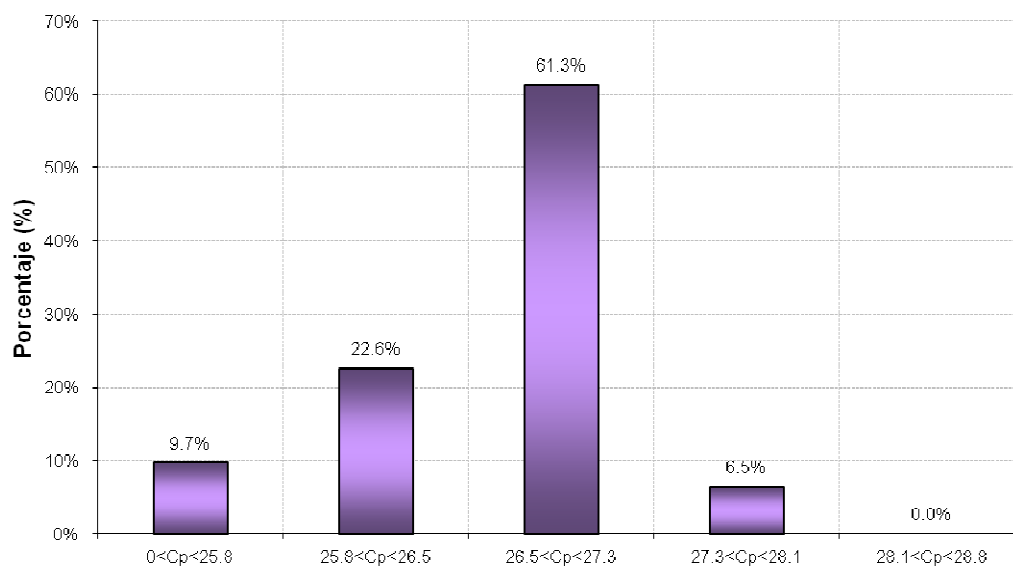


15 kV –Caolín

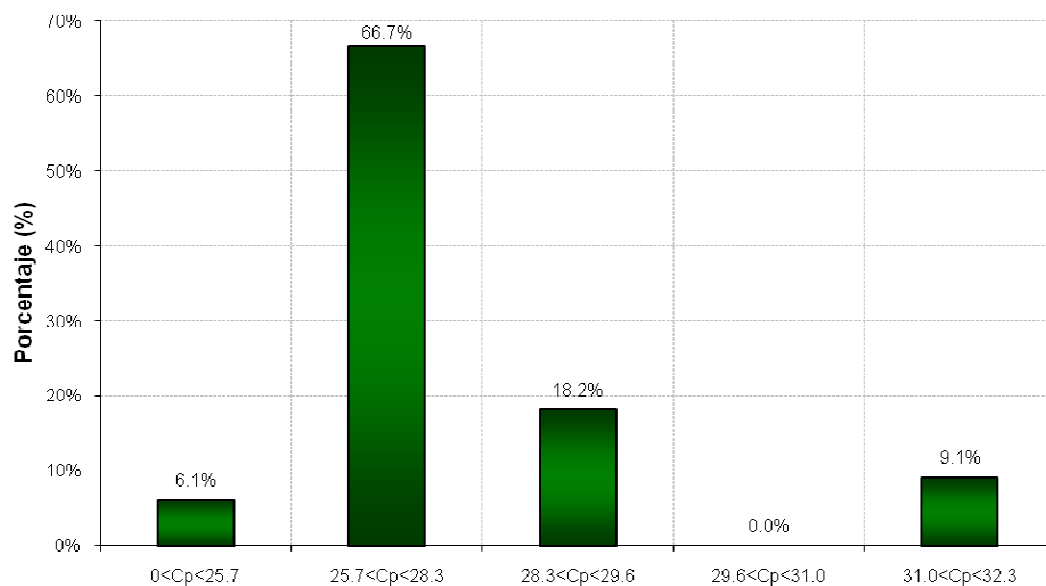
SEVERA



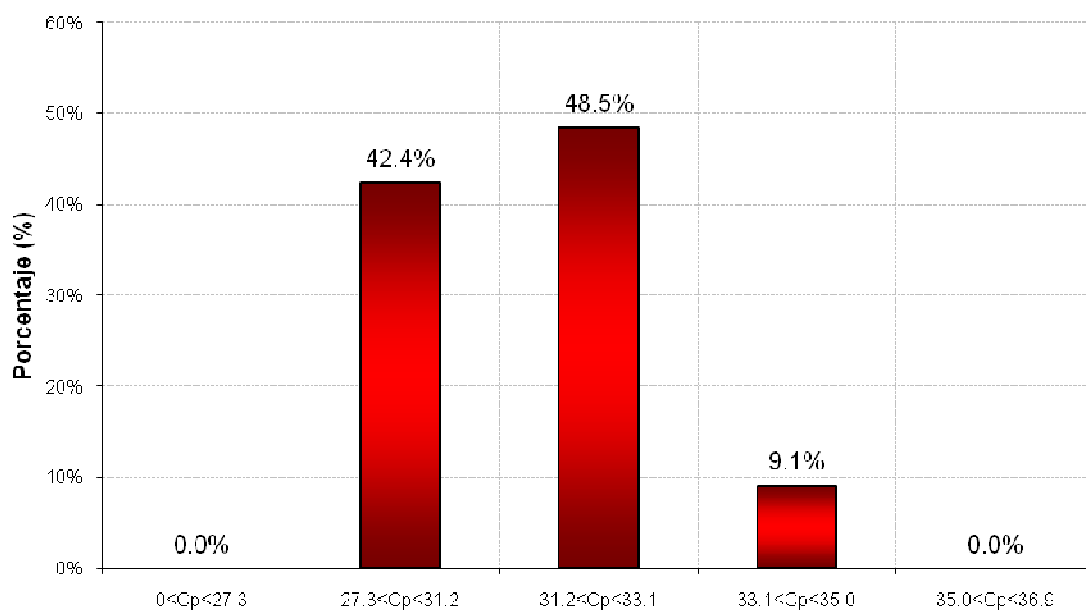
MEDIA



LIGERA

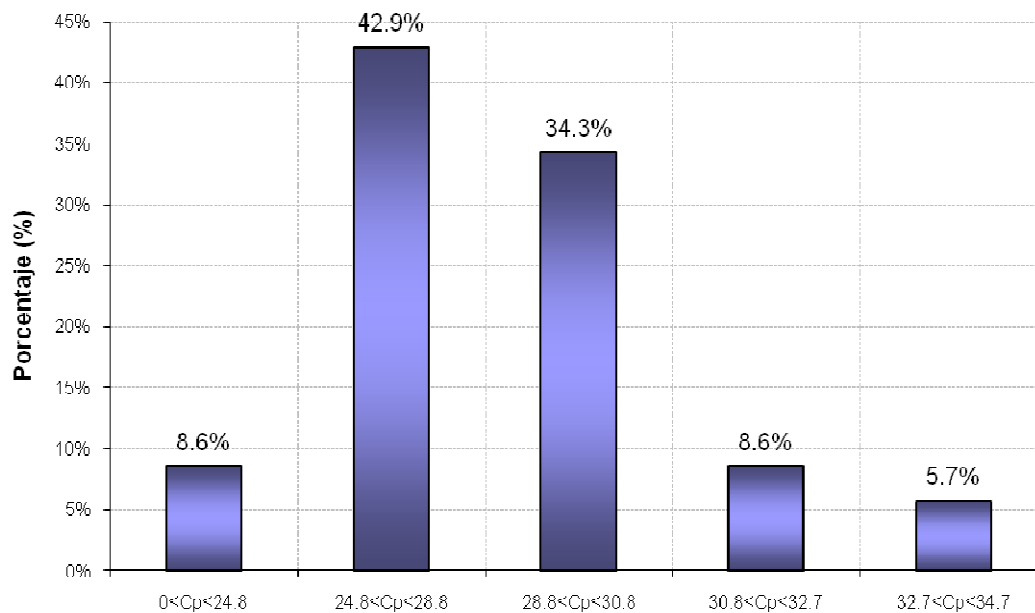


SIN CONTAMINANTE

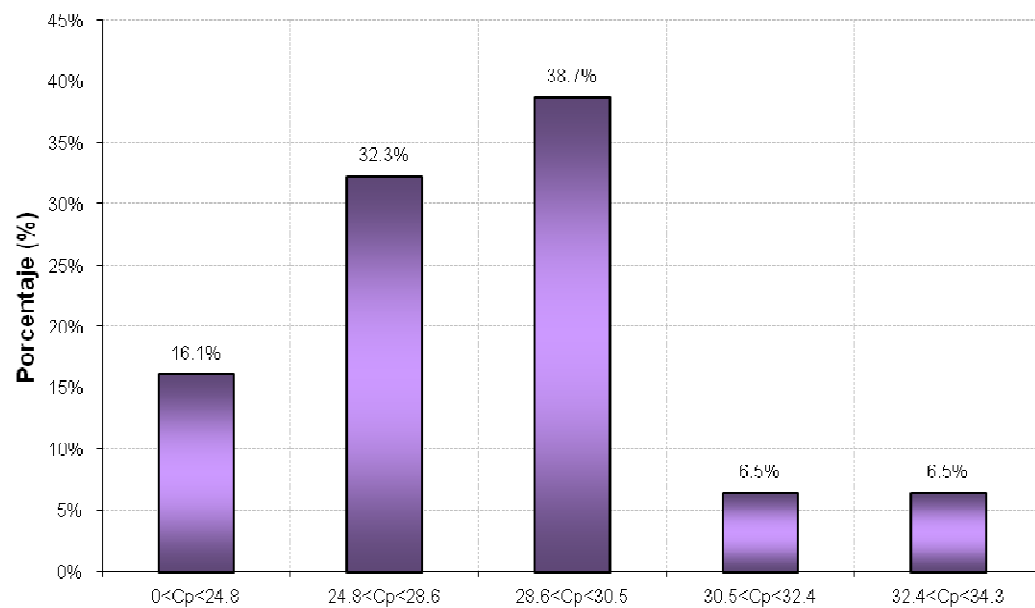


23 kV – Caolín

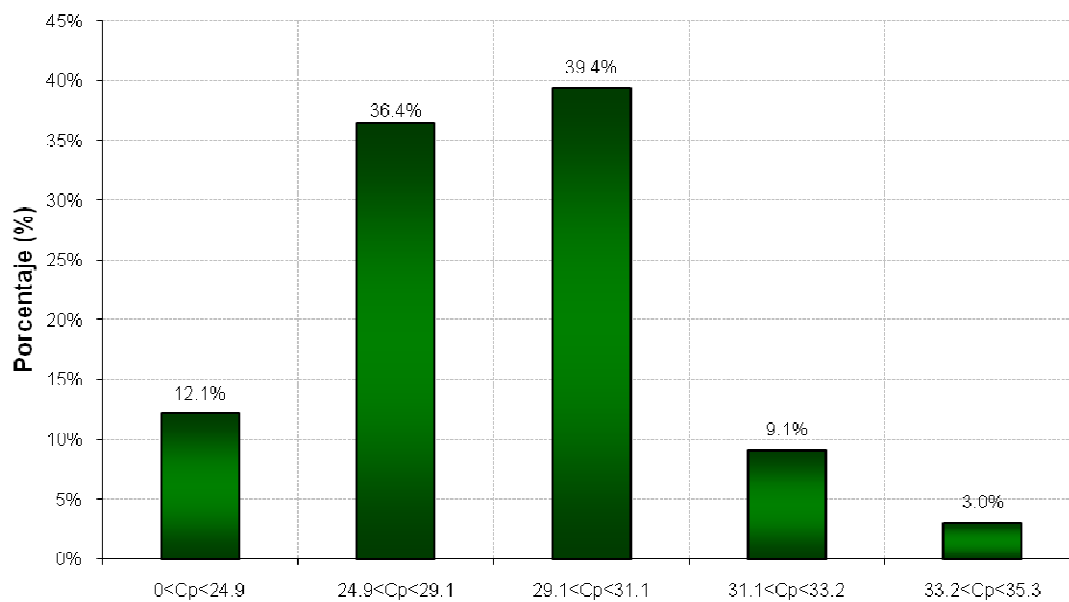
SEVERA



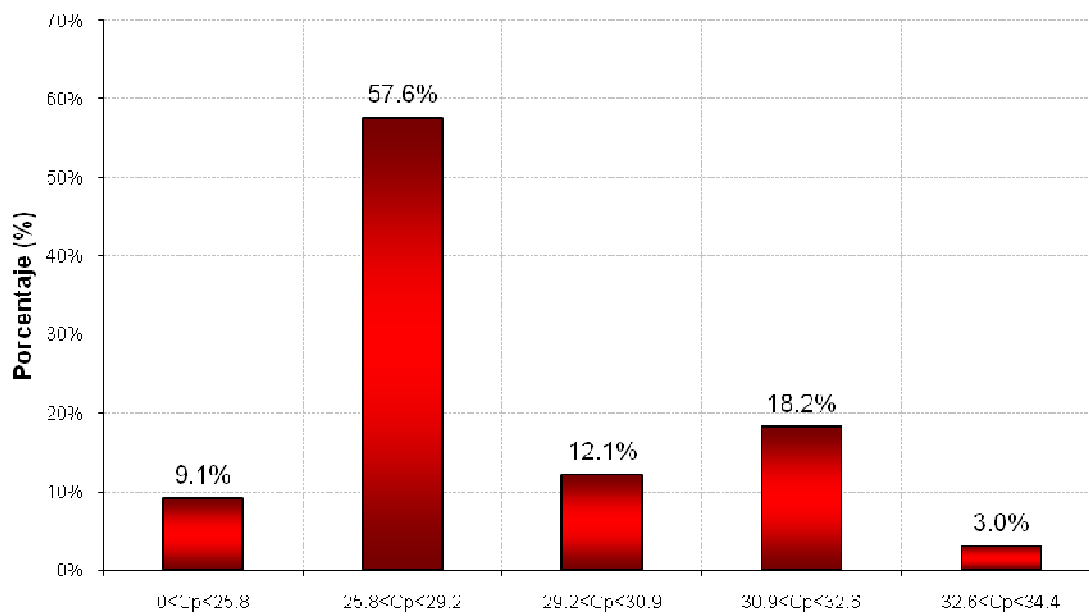
MEDIA



LIGERA

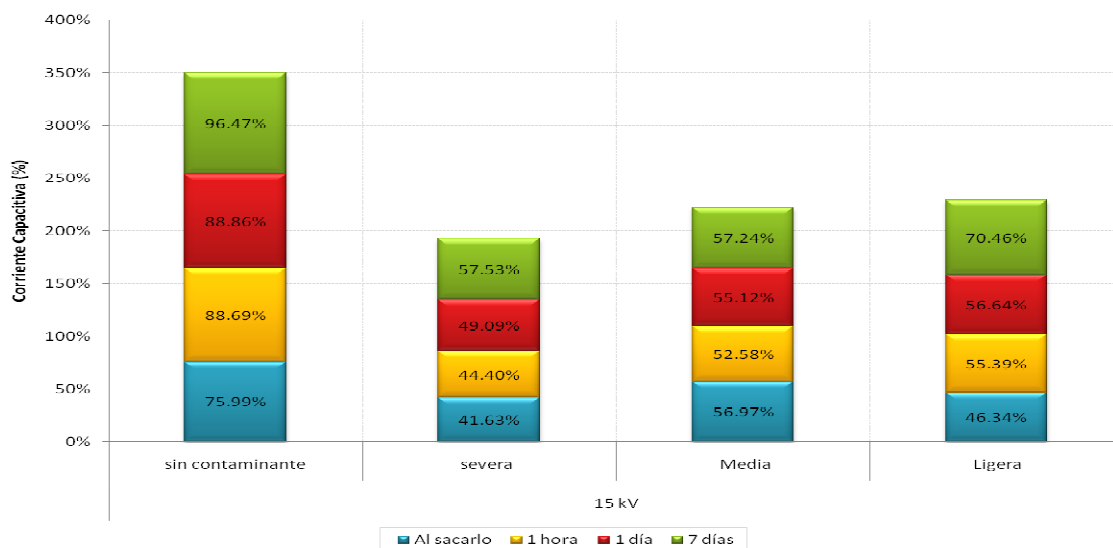
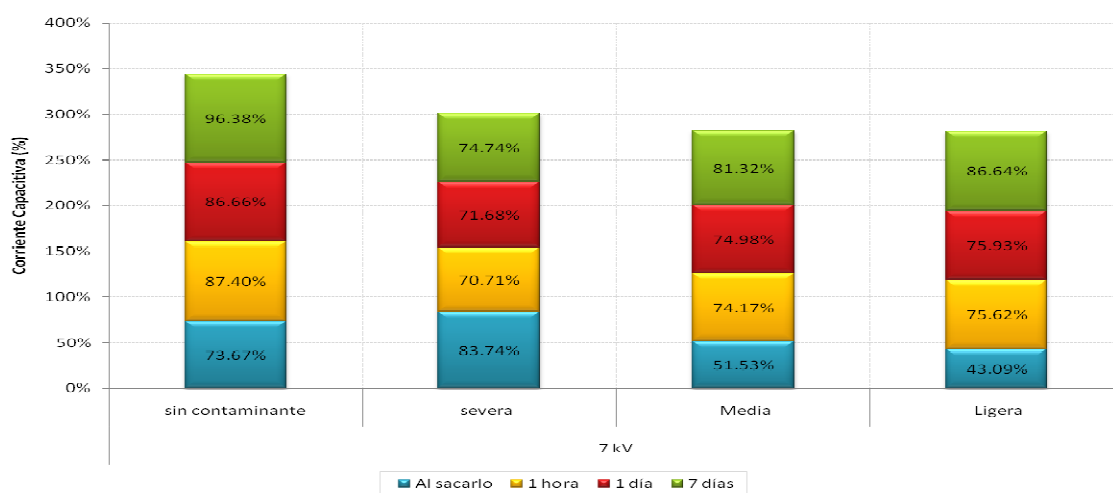


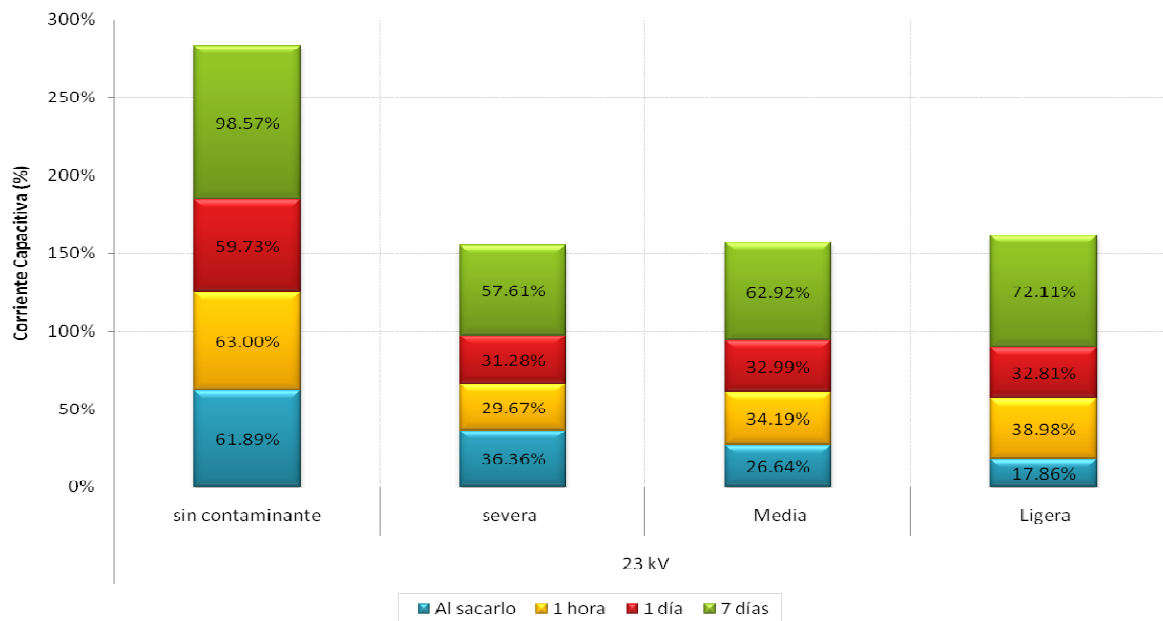
SIN CONTAMINANTE



APENDICE 8. CORRIENTE CAPACITIVA PARA LA SEGUNDA Y TERCERA REMOCION

SEGUNDA REMOCIÓN





TERCERA REMOCIÓN

