

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA
MECÁNICA Y ELÉCTRICA**

**SECCIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

**Efecto de la altitud y la humedad relativa sobre
las tensiones de flameo en aislamientos
poliméricos sujetos a contaminación**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS
CON ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**



PRESENTA

Alberto Rafael Portillo Méndez

MÉXICO D. F.

2002

CONTENIDO

	Página
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
GLOSARIO	3
LISTA DE SIMBOLOS	4
LISTA DE FIGURAS	5
LISTA DE TABLAS	11
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	12
1.1 Presentación	13
1.2 Organización de la tesis	15
1.3 Objetivos	16
1.4 Justificación	17
1.5 Estado del Arte	18
1.6 Aisladores poliméricos	22
1.6.1 Introducción	22
1.6.2 Revisión de la normatividad internacional	28
1.7 Contribuciones del presente trabajo	35
CAPÍTULO 2 EFECTO DE LA HUMEDAD RELATIVA SOBRE LAS TENSIONES DE FLAMEO	38
2.1 Introducción	39

2.2 Arreglo experimental	41
2.3 Ejecución de las pruebas de laboratorio	44
2.3.1 Acondicionamiento de los aisladores	45
2.4 Medición de la tensión de flameo	47
2.5 Medición de la corriente de fuga	48
2.6 Medición de las condiciones ambientales	50
2.7 Efecto de la humedad relativa sobre las corrientes de fuga y las tensiones de flameo	52
2.8 Análisis de resultados	74
2.9 Efecto del tiempo de recuperación de la hidrofobicidad	75
2.10 Análisis de resultados	95
CAPITULO 3 INFLUENCIA DE LA DENSIDAD RELATIVA DEL AIRE Y LA HIDROFOBICIDAD SUPERFICIAL SOBRE LAS TENSIONES DE FLAMEO	98
3.1 Introducción	99
3.2 Efecto de la densidad relativa del aire sobre las tensiones de flameo	100
3.3 Análisis de resultados	109
3.4 Determinación de la hidrofobicidad superficial en aisladores poliméricos contaminados	110
3.4.1 Medición de la hidrofobicidad mediante la técnica del ángulo de contacto	110
3.5 Análisis de resultados	131

CAPÍTULO 4 DETERMINACIÓN DE LAS CORRIENTES DE FUGA EN PÉRTIGAS PARA TRABAJO EN LÍNEA VIVA	132
4.1 Introducción	133
4.2 Diseño de pruebas experimentales	134
4.3 Corrientes de fuga en pértigas bajo condiciones húmedas	139
4.4 Pruebas en condiciones secas	143
4.5 Corrientes de fuga en pértigas bajo condiciones secas	145
4.6 Análisis de resultados	150
4.7 Conclusiones generales	151
4.8 Recomendaciones para trabajos futuros	153
REFERENCIAS	155
APÉNDICE A	161
APÉNDICE B	162
APÉNDICE C	165

RESUMEN

En esta tesis se presenta un estudio sobre las tensiones de flameo en aisladores poliméricos de EPDM (Monómero Dieno de Etileno Propileno), contaminados con niebla limpia. Se realizaron pruebas experimentales en aisladores de distribución de corriente alterna, clase 15, en una cámara de contaminación artificial, sometidos a diferentes niveles de contaminación. Concretamente, se analizó el efecto de una densidad de aire reducida y del cambio en la humedad relativa. Los resultados obtenidos muestran que el incremento de la humedad en niveles de contaminación ligeros y medios, provoca que la tensión de flameo tienda a disminuir. Sin embargo, cuando la contaminación es alta, los cambios de humedad no afectan a la tensión de flameo. En el análisis de la densidad relativa del aire se encontró que las tensiones de flameo se reducen significativamente cuando se tienen niveles de contaminación medios y pesados, conforme la altitud se incrementa. Asimismo se analizaron los niveles de hidrofobicidad superficial en los aisladores después de su evaluación, encontrándose una reducción en los ángulos de contacto estáticos a medida que los niveles de contaminación se incrementaron. En niveles de contaminación ligeros, el tiempo de recuperación de los aisladores influye en la recuperación de sus propiedades hidrofóbicas. Sin embargo, en contaminaciones medias y altas, el tiempo de recuperación no tiene una influencia significativa. Se realizaron también pruebas de laboratorio en pértigas dieléctricas de resina epóxica y fibra de vidrio empleadas para trabajo en línea viva, de acuerdo a la norma IEC-855. Específicamente se analizaron los niveles de corriente de fuga, encontrándose valores fuera de norma. Todas las pruebas experimentales se realizaron en el laboratorio de Alta Tensión del Instituto Politécnico Nacional, el cual se localiza en la Ciudad de México a 2240 msnm.

ABSTRACT

This thesis contains a survey about the flashover voltages on polymeric insulators of EPDM (ethylene propylene diene monomer), under pollution and clean fog. Experimental tests were made on distribution insulators, type 15, in an artificial pollution chamber of altern current, under several pollution levels. Concretely, the effect of a reduced density of air and the change in the relative humidity was analyzed. The final results show that increase of humidity on light and medium pollution levels provides that flashover voltage trends to diminish. Nevertheless, when the contamination is heavy, which humidity changes do not affect the flashover voltage. The analysis of relative air density demonstrates that the flashover voltages are significantly reduced on medium and heavy levels of contamination, whereas the altitude grows. In the same way, the levels of superficial hydrophobicity on insulators were analyzed after their evaluation. The result was a reduction in static contact angles due to an increase of the pollution levels. In light pollution levels, the time of recovery on insulators influences in the recovery of its hydrophobic properties. Nevertheless, in medium and heavy contaminations, the time of recovery does not have influence. Also, laboratory tests were made in epoxy resin poles and fiberglass used for working in live line, according to IEC-855. Specifically, the leakage current levels were analyzed. The obtained results do not expect in IEC-855. All the experimental tests above were developed in the High Voltage Laboratory from Instituto Politécnico Nacional, which is located in Mexico City at 2240 masl.

GLOSARIO

Tracking. Formación de caminos conductores sobre la superficie de un material aislante

Puncture. Ruptura eléctrica en un aislamiento sólido en forma de perforación

Erosión. Es un proceso de degradación caracterizado por el desprendimiento del material aislante

Hidrofobicidad superficial. Propiedad que inhibe la formación de una película continua de agua sobre una superficie aislante

Corriente de fuga. Corriente que circula sobre la superficie de un aislador cuando se encuentra energizado

Flashover. Descarga disruptiva a través del aire o sobre la superficie de un aislante sólido, entre partes de diferente potencial o polaridad, generada por una tensión eléctrica

Tensión de flameo. Tensión eléctrica necesaria para producir una ruptura lo suficientemente ionizada para mantener un arco eléctrico

Tiempo de secado. Intervalo de tiempo entre la aplicación de la mezcla contaminante y el inicio de la prueba

LISTA DE SIMBOLOS

kV	Kilovolt
mA	Miliampere
μ A	Microampere
mV	Milivolt
m	Metro
$^{\circ}$ C	Grado centígrado
μ s	Microsegundo
S	Siemen
δ	Densidad relativa del aire
h	Humedad relativa
H	Humedad absoluta
CA	Corriente alterna
CD	Corriente directa
DESD	Densidad Equivalente de Sal Depositada
DDNS	Densidad Depositada No Soluble
msnm	Metros sobre el nivel del mar
U_{50}	Tensión con una probabilidad de ruptura del 50%
LMW	Low Molecular Weight
RAD	Relative Air Density
NaCl	Cloruro de sodio

LISTA DE FIGURAS

	<i>Página</i>
Figura 1.1	Mecanismo de flameo en un aislador contaminado 26
Figura 2.1	Arreglo experimental para un arreglo de niebla limpia 41
Figura 2.2	Consola de control de la fuente de CA 42
Figura 2.3	Equipo que forma parte de la fuente de CA: a) Resistencia de 270 k Ω , b) Transformador elevador de alta tensión, c) Potenciómetro de alta tensión 42
Figura 2.4	Cámara de niebla limpia, a) Boquilla 43
Figura 2.5	Sistema de adquisición de datos, a) Vista general, b) Aspecto del offset y del microprocesador 50
Figura 2.6	Polímetro empleado para la medición de la humedad relativa y la temperatura del aire 51
Figura 2.7	a) Flameo en 22.6 kV, a una temperatura de 20°C, una humedad relativa de 56% y una DESD de 0.02 mg/cm ² ; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia 55
Figura 2.8	a) Flameo en 18.6 kV, a una temperatura de 25°C, una humedad relativa de 68% y una DESD de 0.02 mg/cm ² ; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia 56
Figura 2.9	a) Flameo en 16.8 kV, a una temperatura de 22°C, una humedad relativa de 79% y una DESD de 0.02 mg/cm ² ; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia 57
Figura 2.10	a) Flameo en 15.1 kV, a una temperatura de 20°C, una humedad relativa de 86% y una DESD de 0.02 mg/cm ² ; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia 58

Figura 2.11	a) Flameo en 13.8 kV, a una temperatura de 22°C, una humedad relativa de 58% y una DESD de 0.075 mg/cm ² ; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia	60
Figura 2.12	a) Flameo en 13.1 kV, a una temperatura de 20°C, una humedad relativa de 68% y una DESD de 0.075 mg/cm ² ; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia	61
Figura 2.13	a) Flameo en 11.8 kV, a una temperatura de 22°C, una humedad relativa de 76% y una DESD de 0.075 mg/cm ² ; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia	62
Figura 2.14	a) Flameo en 10.6 kV, a una temperatura de 20°C, una humedad relativa de 90% y una DESD de 0.075 mg/cm ² ; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia	63
Figura 2.15	a) Flameo en 9.2 kV, a una temperatura de 20°C, una humedad relativa de 54% y una DESD de 0.25 mg/cm ² ; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia	65
Figura 2.16	a) Flameo en 10.2 kV, a una temperatura de 23°C, una humedad relativa de 68% y una DESD de 0.25 mg/cm ² ; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia	66
Figura 2.17	a) Flameo en 9.2 kV, a una temperatura de 21°C, una humedad relativa de 79% y una DESD de 0.25 mg/cm ² ; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia	67
Figura 2.18	a) Flameo en 9.2 kV, a una temperatura de 23°C, una humedad relativa de 85% y una DESD de 0.25 mg/cm ² ; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia	68
Figura 2.19	a) Flameo en 6.3 kV, a una temperatura de 21°C, una humedad relativa de 53% y una DESD de 0.425 mg/cm ² ; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia	70
Figura 2.20	a) Flameo en 6.3 kV, a una temperatura de 22°C, una humedad relativa de 63% y una DESD de 0.425 mg/cm ² ; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia	71

Figura 2.21	a) Flameo en 6.3 kV, a una temperatura de 23°C, una humedad relativa de 75% y una DESD de 0.425 mg/cm ² ; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia	72
Figura 2.22	a) Flameo en 6.3 kV, a una temperatura de 22°C, una humedad relativa de 87% y una DESD de 0.425 mg/cm ² ; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia	73
Figura 2.23	a) Flameo en 23 kV, a una temperatura de 22°C, una humedad relativa de 59% y una DESD de 0.02 mg/cm ² ; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia	76
Figura 2.24	a) Flameo en 18.6 kV, a una temperatura de 19°C, una humedad relativa de 67% y una DESD de 0.02 mg/cm ² ; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia	77
Figura 2.25	a) Flameo en 16.8 kV, a una temperatura de 20°C, una humedad relativa de 80% y una DESD de 0.02 mg/cm ² ; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia	78
Figura 2.26	a) Flameo en 15.1 kV, a una temperatura de 19°C, una humedad relativa de 90% y una DESD de 0.02 mg/cm ² ; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia	79
Figura 2.27	a) Flameo en 10.6 kV, a una temperatura de 19°C, una humedad relativa de 59% y una DESD de 0.075 mg/cm ² ; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia	81
Figura 2.28	a) Flameo en 9.6 kV, a una temperatura de 21°C, una humedad relativa de 66% y una DESD de 0.075 mg/cm ² ; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia	82
Figura 2.29	a) Flameo en 8.6 kV, a una temperatura de 20°C, una humedad relativa de 78% y una DESD de 0.075 mg/cm ² ; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia	83
Figura 2.30	a) Flameo en 7.8 kV, a una temperatura de 19°C, una humedad relativa de 89% y una DESD de 0.075 mg/cm ² ; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia	84

Figura 2.31	a) Flameo en 6 kV, a una temperatura de 18°C, una humedad relativa de 54% y una DESD de 0.25 mg/cm ² ; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia	86
Figura 2.32	a) Flameo en 5.4 kV, a una temperatura de 18°C, una humedad relativa de 65% y una DESD de 0.25 mg/cm ² ; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia	87
Figura 2.33	a) Flameo en 5.4 kV, a una temperatura de 18°C, una humedad relativa de 75% y una DESD de 0.25 mg/cm ² ; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia	88
Figura 2.34	a) Flameo en 8.3 kV, a una temperatura de 18°C, una humedad relativa de 83% y una DESD de 0.25 mg/cm ² ; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia	89
Figura 2.35	a) Flameo en 5.6 kV, a una temperatura de 18°C, una humedad relativa de 55% y una DESD de 0.425 mg/cm ² ; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia	91
Figura 2.36	a) Flameo en 5.1 kV, a una temperatura de 18°C, una humedad relativa de 66% y una DESD de 0.425 mg/cm ² ; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia	92
Figura 2.37	a) Flameo en 5.6 kV, a una temperatura de 18°C, una humedad relativa de 80% y una DESD de 0.425 mg/cm ² ; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia	93
Figura 2.38	a) Flameo en 7 kV, a una temperatura de 18°C, una humedad relativa de 88% y una DESD de 0.425 mg/cm ² ; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia	94
Figura 2.39	Tensión de flameo VS humedad relativa. Pruebas iniciales	96
Figura 2.40	Tensión de flameo VS humedad relativa. Influencia del tiempo de recuperación	96
Figura 2.41	Corrientes de fuga registradas para una contaminación ligera y una contaminación media	97
Figura 2.42	Corrientes de fuga registradas para una contaminación pesada	97

y una contaminación muy pesada

Figura 3.1	a) Flameo en 18.2 kV, a una temperatura de 21°C, una humedad relativa de 79 y una DESD de 0.075 mg/cm ² ; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia	104
Figura 3.2	a) Flameo en 5.1 kV, a una temperatura de 19°C, una humedad relativa de 90% y una DESD de 0.76 mg/cm ² ; b) forma de onda de la corriente de fuga; c) análisis de frecuencia	105
Figura 3.3	a) Flameo en 7.7 kV, a una temperatura de 19°C, una humedad relativa de 90% y una DESD de 0.84 mg/cm ² ; b) forma de onda de la corriente de fuga; c) análisis de frecuencia	106
Figura 3.4	a) Flameo en 15.1 kV, a una temperatura de 19°C, una humedad relativa de 90% y una DESD de 0.30 mg/cm ² ; b) forma de onda de la corriente de fuga; c) análisis de frecuencia	107
Figura 3.5	a) Flameo en 13.3 kV, a una temperatura de 20°C, una humedad relativa de 88% y una DESD de 0.425 mg/cm ² ; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia	108
Figura 3.6	Ángulo de contacto de una gota de agua sobre una superficie hidrofóbica	111
Figura 3.7	Medición del ángulo de contacto	112
Figura 3.8	Detalle de las mediciones de una gota de agua en el paquete Corel Draw	114
Figura 3.9	Imágenes de las gotas sobre la superficie de un aislador nuevo	115
Figura 3.10	Imágenes de las gotas sobre la superficie del aislador, para una mezcla de 5 gr de NaCl/40 gr de Caolín/1 lt de agua	116
Figura 3.11	Imágenes de las gotas sobre la superficie del aislador, para una mezcla de 20 gr de NaCl/40 gr de Caolín/1 lt de agua	117
Figura 3.12	Imágenes de las gotas sobre la superficie del aislador, para una mezcla de 80 gr de NaCl/40 gr de Caolín/1 lt de agua	118
Figura 3.13	Imágenes de las gotas sobre la superficie del aislador, para	119

una mezcla de 160 gr de NaCl/40 gr de Caolín/1 lt de agua

Figura 3.14	Imágenes de las gotas sobre la superficie del aislador, para una mezcla de 5 gr de NaCl/40 gr de Caolín/1 lt de agua	120
Figura 3.15	Imágenes de las gotas sobre la superficie del aislador, para una mezcla de 20 gr de NaCl/40 gr de Caolín/1 lt de agua	121
Figura 3.16	Imágenes de las gotas sobre la superficie del aislador, para una mezcla de 80 gr de NaCl/40 gr de Caolín/1 lt de agua	122
Figura 3.17	Imágenes de las gotas sobre la superficie del aislador, para una mezcla de 160 gr de NaCl/40 gr de Caolín/1 lt de agua	123
Figura 3.18	Imágenes de las gotas sobre la superficie del aislador, para una mezcla de 50 gr de NaCl/100 gr de Caolín/1 lt de agua	124
Figura 3.19	Imágenes de las gotas sobre la superficie del aislador, para una mezcla de 600 gr de Caolín/200 gr de Sulfato de Calcio/5 gr de NaCl/1 lt de agua	125
Figura 3.20	Imágenes de las gotas sobre la superficie del aislador, para una mezcla de 320 gr de NaCl/40 gr de Caolín/1 lt de agua	126
Figura 3.21	Imágenes de las gotas sobre la superficie del aislador, para una mezcla de 20 gr de NaCl/40 gr de Caolín/1 lt de agua	127
Figura 3.22	Imágenes de las gotas sobre la superficie del aislador, para una mezcla de 160 gr de NaCl/40 gr de Caolín/1 lt de agua	128
Figura 4.1	Arreglo experimental para las pruebas en pértigas húmedas: a) Estructura de pvc, b) pértiga de prueba, c) divisor resistivo	136
Figura 4.2	Pértigas de resina epóxica	137
Figura 4.3	Aspecto de una pértiga de resina epoxy después de haber sido evaluada	138
Figura 4.4	Tracking sobre una pértiga dieléctrica fallada	138
Figura 4.5	Corriente de fuga VS tiempo. Tensión de prueba = 91 kV, temperatura = 26°C y una humedad relativa = 60%	139
Figura 4.6	Corriente de fuga VS tiempo. Tensión de prueba = 91 kV, temperatura = 26°C y una humedad relativa = 58%	140
Figura 4.7	Corriente de fuga VS tiempo. Tensión de prueba = 91 kV,	141

temperatura = 24°C y una humedad relativa = 62%

Figura 4.8	Corriente de fuga VS tiempo. Tensión de prueba = 91 kV, temperatura = 24°C y una humedad relativa = 65%	142
Figura 4.9	Arreglo experimental para las pruebas en pértigas secas	144
Figura 4.10	Oscilograma para una pértiga de fibra de vidrio. Temperatura = 21°C, Humedad relativa = 69%, Corriente = 197 μ A	145
Figura 4.11	Oscilograma para una pértiga de fibra de vidrio. Temperatura = 21°C, Humedad relativa = 70%, Corriente = 145.5 μ A	146
Figura 4.12	Oscilograma para una pértiga de fibra de vidrio. Temperatura = 22°C, Humedad relativa = 71%, Corriente = 93.57 μ A	146
Figura 4.13	Oscilograma para una pértiga de resina epóxica. Temperatura = 21°C, Humedad relativa = 80%, Corriente = 105 μ A	147
Figura 4.14	Oscilograma para una pértiga de resina epóxica. Temperatura = 20.5°C, Humedad relativa = 79%, Corriente = 103 μ A	148
Figura 4.15	Oscilograma para una pértiga de resina epóxica. Temperatura = 20.5°C, Humedad relativa = 79%, Corriente = 144 μ A	148
Figura 4.16	Oscilograma para una pértiga de resina epóxica. Temperatura = 24°C, Humedad relativa = 70%, Corriente = 89.4 μ A	149

LISTA DE TABLAS

		<i>Página</i>
Tabla 1	Valores de tensión reportados para diferentes altitudes	102
Tabla 2	Ángulos de contacto de los aisladores nuevos	113
Tabla 3	Ángulos de contacto en aisladores de EPDM, clase 15, calculados para 4 niveles de contaminación	129
Tabla 4	Ángulos de contacto en aisladores de EPDM, clase 15, calculados para 4 niveles de contaminación. Influencia del tiempo de recuperación	130

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN



1.1 Presentación

Comúnmente en los sistemas eléctricos de transmisión y distribución de la energía eléctrica se tienen fallas en las cadenas de aisladores, sin evidencia alguna de sobretensiones por rayo o por maniobra. Estas fallas se presentan particularmente como flameos y se deben a partículas contaminantes depositadas sobre las superficies de los aisladores, cuando existen condiciones tales como viento, humedad, niebla, rocío o llovizna. Todos estos factores se ven a su vez influenciados por la altitud a la cual se encuentran instalados los aisladores. Las partículas depositadas en los aisladores son de origen natural o bien generadas por industrias, la agricultura o por actividades de construcción. Un depósito natural muy común es la sal marina, la cual provoca una contaminación muy severa en los aisladores instalados en zonas costeras. En áreas industriales o agrícolas, una gran variedad de contaminantes puede reducir la rigidez dieléctrica del aislamiento. Cabe mencionar que estos depósitos no disminuyen la rigidez cuando los aisladores están secos; la pérdida se origina por la combinación de dos factores principalmente: el contaminante y la humedad. En realidad, la humedad es siempre necesaria para producir una capa conductiva en la superficie del aislador, provocando un incremento en la corriente de fuga.

De acuerdo con la Comisión Federal de Electricidad, la contaminación de los aisladores está catalogada como la segunda causa de fallas en las líneas de transmisión y distribución, ocasionando la salida de las mismas, e interrumpiendo así la continuidad del sistema [1]. Para las líneas de 400 kV, las fallas que repercutieron en los aisladores, en el año 2000, fueron las siguientes: Por descargas atmosféricas se tuvo un porcentaje del 41.82%, por contaminación del 7.88%, por fracturas mecánicas del 2.42%, por la quema de vegetación un 24.24% y por otras causas un 23.64%. Para las líneas de 230 kV, los porcentajes fueron: Por descargas atmosféricas del 41.41%, por contaminación del 26.56%, por fracturas mecánicas

del 1.17%, por la quema de vegetación un 13.67% y por otras causas un 17.19%. Finalmente para 161-115 kV los porcentajes fueron: por descargas atmosféricas un 82.63%, por contaminación un 5.39%, por fracturas mecánicas un 0.60%, por la quema de vegetación un 0.56% y por otras causas un 10.82%.

A su vez, se han identificado tres condiciones típicas de contaminación ambiental: La contaminación marina, la contaminación industrial y la contaminación desértica; y desde el punto de vista de solubilidad, en contaminación por materiales solubles (tales como cloruro de sodio, sulfato de sodio, cloruro de magnesio, siendo el más común el cloruro de sodio) y contaminación por materiales insolubles (como arcillas, silicatos, cementos y algunos desechos industriales).

Un punto importante se refiere a la altitud del lugar donde se instalan los aisladores. Se sabe que la tensión de ruptura de un aislador difiere con la altitud. A mayores altitudes, las conductancias superficiales disminuyen, las corrientes de fuga crecen en magnitud y las tensiones decrecen, esto es, la tensión de ruptura varía en proporción directa con la variación de la densidad del aire [2]. Sin duda, investigar el efecto que la altitud tiene sobre el mecanismo de flameo en los aisladores, resulta útil para incrementar el conocimiento que se tiene de este fenómeno dadas las características de operación de los sistemas de transmisión y distribución en el país. La necesidad de contar con aisladores de mejores características, tanto eléctricas como mecánicas para las líneas de transmisión y distribución, trae como consecuencia el desarrollo de los aisladores poliméricos. Las características de estos materiales resultan atractivas para resolver problemas en aquellas zonas donde se tienen altos niveles de contaminación y vandalismo, en donde los aisladores cerámicos presentan problemas de operación. Particularmente, este trabajo de investigación está enfocado en las tensiones de ruptura en aisladores poliméricos ya que la instalación de éstos representa una buena manera de combatir los problemas por contaminación, además de las ventajas que tienen sobre los cerámicos.

Asimismo, se vienen instalando en México con mayor frecuencia, ya que han reportado buenos resultados dentro del marco costo-beneficio y desde el punto de vista técnico. Por todo esto, el estudio de este tipo de aisladores reviste de importancia, dado el auge que están teniendo actualmente.

En este trabajo se presenta una investigación sobre la influencia de la altitud y la humedad, en la tensión de flameo, de aisladores poliméricos de corriente alterna, evaluados en una cámara de contaminación artificial y sometidos a diferentes niveles de contaminación, bajo una densidad de aire diferente a la correspondiente al nivel del mar. Las pruebas se realizaron en el Laboratorio de Alta Tensión de la ESIME-Zacatenco del IPN, que se encuentra a una altitud de 2240 msnm, siendo la presión atmosférica de 580 mmHg y la densidad relativa del aire promedio $\delta=0.77$. Asimismo, se presenta un estudio experimental sobre pértigas dieléctricas empleadas para maniobras en líneas vivas de alta tensión. Específicamente se analizan los niveles de corriente de fuga. La medición de la corriente de fuga se llevó a cabo en condiciones húmedas y en condiciones secas, según la norma IEC-855 [3]. Se propuso una técnica de medición la cual arrojó resultados originales. Las pértigas están fabricadas de resina epóxica y de fibra de vidrio, y se emplean en la conexión y desconexión de fusibles para líneas de 115 kV.

1.2 Organización de la tesis

En el capítulo 1 se presenta una introducción general, la justificación de la tesis, los objetivos y los antecedentes de este tipo de estudios. Asimismo se realiza una revisión teórica sobre los aisladores poliméricos y las normas empleadas para su evaluación en laboratorio. El capítulo 2 describe el método de contaminación empleado y el arreglo experimental. Hace referencia a la ejecución de las pruebas y a las mediciones de los parámetros eléctricos. Se describe también el comportamiento de la corriente de fuga y la tensión de flameo bajo la influencia de

la contaminación y la humedad relativa. En el capítulo 3 se presentan y analizan los resultados obtenidos de la influencia de la densidad relativa del aire y la hidrofobicidad superficial sobre las tensiones de flameo. Finalmente, el capítulo 4 contiene el análisis de las mediciones de corriente de fuga en las pértigas dieléctricas para trabajo en línea viva, así como las conclusiones generales de esta tesis y algunas recomendaciones para trabajos futuros.

1.3 Objetivos

Objetivo general:

Investigar experimentalmente el efecto de una densidad de aire reducida y los cambios en la humedad relativa, sobre la tensión de flameo, en aisladores poliméricos evaluados en cámaras de contaminación artificial, pero empleando una técnica de acondicionamiento de aisladores y mediciones de tensiones de flameo no convencionales

Objetivos particulares:

- Analizar la variación de la tensión de flameo en aisladores de EPDM contaminados, en el nivel de distribución en corriente alterna, empleando niebla limpia. Asimismo, determinar los niveles de hidrofobicidad de los aisladores
- Determinar el efecto de la humedad relativa y la densidad del aire sobre las tensiones de ruptura y las corrientes de fuga, en aisladores poliméricos contaminados
- Conocer los niveles de corriente de fuga en pértigas dieléctricas de resina epóxica y de fibra de vidrio, en condiciones secas y de alta humedad

1.4 Justificación

El problema de la contaminación en aisladores expuestos al medio ambiente provoca fallas en las líneas de transmisión y distribución, afectando la continuidad del servicio de energía eléctrica. Este tipo de fallas se presentan generalmente como rupturas dieléctricas. El proceso de ruptura dieléctrica o flameo, por contaminación, difiere entre los aisladores convencionales y los poliméricos, dada la naturaleza hidrofóbica de estos últimos.

En México, las líneas de transmisión y distribución pasan por zonas de gran altitud (entre 1800 y 2500 msnm), zonas desérticas o zonas de alta humedad, en donde se tienen diferentes niveles de contaminación y diferentes condiciones ambientales. Conocer el efecto que tienen dichas condiciones atmosféricas en una densidad relativa de aire reducida ($\delta=0.77$ en nuestro país comparada con $\delta=1$ al nivel del mar) sobre las tensiones disruptivas en corriente alterna, es un aporte al conocimiento que se tiene de los materiales poliméricos como aislantes.

El fenómeno de la contaminación en aisladores es un problema bastante complejo. De ahí la importancia de conocer aún más este mecanismo; para mejorar el diseño de los aisladores, su comportamiento en campo, etc. Para un buen diseño se requiere entonces profundizar en el conocimiento del aislamiento externo bajo contaminación.

Asimismo, en nuestro país se vienen instalando aisladores poliméricos con mayor frecuencia, y por tanto se requiere de un mayor conocimiento sobre el proceso de selección para una aplicación en particular, los mecanismos de falla y las técnicas de evaluación que permitan incrementar su aplicación.

Hasta el momento, en nuestro país no se cuenta con información sobre las corrientes de fuga en pértigas de resina epóxica y fibra de vidrio empleadas en alta tensión, por lo que resulta de interés estudiar este fenómeno a fin de conocer los niveles de corriente que se presentan al trabajar en línea viva, y que sirvan de referencia para análisis posteriores.

1.5 Estado del arte

La rigidez dieléctrica del aire disminuye a medida que se incrementa la altitud. Esto se debe a que, como el aire está compuesto de moléculas y dado que la trayectoria libre promedio (λ) depende de la presión, a mayor presión existirá menor trayectoria libre promedio. Ahora bien, a mayor altitud habrá menor presión, por lo que las moléculas pueden adquirir suficiente energía para ionizar las partículas del gas. Esto ocasiona que la tensión de ruptura en los aislamientos eléctricos externos sea menor conforme aumenta la altitud.

La densidad relativa del aire (RAD, en inglés) se define como:

$$\text{RAD} = \delta = (p/p_0)(273+t_0)/(273+t) \quad (1.1)$$

Siendo

p = presión de prueba

p_0 = presión al nivel del mar, 760 mm de Hg

t = temperatura de prueba

t_0 = 20°C

En general, la tensión de flameo en aisladores eléctricos cerámicos a grandes altitudes, varía no linealmente con la presión a estas altitudes de acuerdo a:

$$V/V_0 = (p/p_0)^n \quad (1.2)$$

Donde V es la tensión de flameo a la presión reducida p , V_0 es la tensión de flameo a la presión al nivel del mar. El exponente n varía de acuerdo al tipo de aislador, p.ej., el perfil, el tipo de tensión empleada, etc., y es un parámetro adimensional.

El efecto de la presión atmosférica en las tensiones de flameo es importante para los laboratorios de contaminación a gran altitud [4]. Se han realizado diversas investigaciones, pero con aisladores convencionales.

El trabajo de Phillips et al. [5], es pionero en cuanto al estudio de la altitud en las líneas de transmisión se refiere. En 1967, analizaron la influencia de la densidad relativa del aire sobre las tensiones de flameo en cadenas de aisladores convencionales. Realizaron pruebas de impulso por rayo y por maniobra, tanto para polaridad positiva como para polaridad negativa, encontrando factores de corrección aplicables para líneas de transmisión. Dichos factores estuvieron en función de la temperatura, la humedad y de la RAD. Las pruebas mostraron que las tensiones de flameo en polaridad negativa fueron mayores que en polaridad positiva.

En 1982, Kawamura et al. [6], encontraron que la dependencia de la tensión de flameo en CD con la presión, en aisladores cerámicos contaminados, se reduce de manera no lineal cuando disminuye la altitud; sin embargo, la reducción de la tensión de flameo debido a la contaminación fue menor que la calculada por la densidad relativa del aire. Asimismo analizaron la influencia de la polaridad en la tensión de flameo encontrando que en polaridad positiva la tensión fue mayor que en polaridad negativa.

Rudakova y Tikhodeev [7], en 1989, realizaron pruebas de campo, de laboratorio y con cámaras de presión variable, tanto para CA como para CD, y determinaron que los resultados de prueba obtenidos se ajustan a la fórmula empírica

$$U_p = U_{p_0} (P/P_0)^n \quad \text{con} \quad P_0 = 101.33 \text{ kilopascales} \quad (1.3)$$

Siendo U_p la tensión de flameo a una baja presión, P ; U_{p_0} es la tensión de flameo a la presión estándar, P_0 ; n es un parámetro indicativo adimensional que varía con el tipo de aislador, el perfil y el tipo de tensión.

Para estos investigadores, los valores de n variaron de 0.45 a 0.55. Determinaron que la conductancia superficial decrece con la altura, entre 2.0-3 μS sobre todo en las áreas montañosas. Asimismo encontraron que el perfil del aislador influye en el comportamiento de las tensiones de flameo, y también con la altitud. Realizaron las pruebas para una altura $H_0 = 3.2 \text{ km}$ y otra $H'_0 = 0.8 \text{ km}$ encontrándose una disminución del 17% en la tensión de flameo con la altitud H_0 .

Sin embargo, en su artículo no presentan la descripción de las pruebas en los diferentes laboratorios y en campo; tampoco hacen mención de los niveles de tensión de las fuentes de alimentación, ni mencionan los perfiles de los aisladores empleados.

En 1989, Mercure [8] analizó los resultados de prueba de diversas investigaciones sobre la dependencia de la tensión de flameo de aisladores de suspensión y de aguja, con la presión atmosférica, y sugirió una relación $(p/p_0)^m$ de sus propios resultados y los de Kawamura et al. [10]; siendo $m = 0.35$ para polaridad negativa en CD, $m = 0.40$ para polaridad positiva en CD y de $m = 0.5$ para CA.

En 1996, Sundararajan y Nowlin [9], mediante un modelo computacional, investigaron el comportamiento de la tensión de flameo en aisladores convencionales de CA, sujetos a contaminación, en función de la densidad relativa del aire. Siempre que fue posible compararon los resultados del modelo con los reportados experimentalmente. Los resultados obtenidos tuvieron muy poca diferencia, alrededor del 1.8%. Obtuvieron un valor de $n = 0.5$ para aisladores convencionales de suspensión y de aguja. Actualmente, están incorporando su modelo computacional a los aisladores poliméricos, pero aún no han presentado algún artículo.

En 1997, Risk y Rezazada [10] propusieron un modelo matemático que tomaba en cuenta el efecto de una densidad reducida de aire sobre la tensión de flameo. Dicho modelo introducía el efecto de la presión ambiente sobre el parámetro físico de la ecuación de recuperación dieléctrica de los aisladores convencionales. Risk y Rezazada compararon los resultados de modelo con resultados obtenidos de laboratorio y encontraron una aceptable correlación.

Hoch y Swift [11], investigaron el efecto de la densidad relativa del aire para tensiones de CA, CD y de impulso por rayo, involucrando factores de escala en función del proceso de flameo. Dichos factores correlacionaron la ruptura entre los faldones del aislador y el nivel de contaminación.

Matsui et al. [12], en 1997, analizaron la relación entre la descarga corona y el efecto de la presión atmosférica en aisladores de suspensión de porcelana revestidos de una capa de vidrio semiconductor, y encontraron que esta capa reduce la tensión corona alrededor de un 30% para altitudes de 3000 msnm; asimismo propusieron su uso en líneas de transmisión en zonas de contaminación situadas a gran altitud.

A diferencia de los estudios relacionados de la altitud sobre las tensiones de flameo, no se conocen trabajos que investiguen el efecto combinado de presión y humedad, ya sea absoluta o relativa, sobre las tensiones de flameo, por lo que hasta ahora es poco conocido el comportamiento de la tensión en tales condiciones.

Las investigaciones actuales en el campo de los aisladores poliméricos siguen varias vertientes: el desarrollo e implementación de una guía de laboratorio, confiable y segura, que permita evaluar aisladores simulando las condiciones reales de servicio, el desarrollo de modelos computacionales, el conocimiento de los efectos que producen los cambios en las condiciones del ambiente (condiciones reales de operación), tales como la temperatura, la presión atmosférica, la contaminación, etc., entre otros. Esta tesis forma parte de esta última línea de investigación ya que se investiga el efecto de la humedad relativa en una densidad de aire reducida.

En nuestro país no se cuenta con información sobre mediciones de corriente de fuga en pértigas dieléctricas de alta tensión, por lo que hasta el momento no se conoce su efecto. La metodología de prueba para llevar a cabo dichas mediciones se basa en la norma IEC-855 [3], la cual entra en concordancia con la norma ASTM F711-89 [13]. En esta investigación, es la primera vez que se evalúan en laboratorio pértigas dieléctricas en nuestro país, empleando dicha normatividad.

1.6 Aisladores poliméricos

1.6.1 Introducción

La experiencia operativa con el uso de aislamientos convencionales (vidrio y porcelana) data más de 100 años. Sin embargo, estos presentan fallas cuando operan en zonas de alta contaminación, elevada humedad y vandalismo [14].

Para contrarrestar esta deficiencia, el uso de materiales poliméricos en aislamientos externos, se ha visto incrementado en los últimos años. Actualmente se emplean en terminaciones de cables de energía, apartarrayos, aisladores, en buses (barras), en boquillas, entre otros. Si bien el uso de este tipo de materiales ha sido evaluado extensivamente [15], aun se tienen algunas dudas en cuanto a su funcionamiento en campo. Por otro lado, los métodos de evaluación, en las pruebas de laboratorio, son los mismos que los empleados para aisladores convencionales, y en algunos casos, se usa una metodología diferente debido a las propiedades intrínsecas del material [16].

El funcionamiento de los materiales poliméricos, en aisladores, es el resultado de la interacción de un material polimérico (formulación de una base polimérica y aditivos), y el diseño del aislador (perfil, geometría, diámetro, distancia de fuga, etc.) cuando se somete a condiciones de proceso óptimas durante su manufactura [17].

Los aisladores poliméricos, también llamados no cerámicos o sintéticos, ofrecen numerosas ventajas, en comparación con los convencionales. Las más importantes son:

- *Peso ligero.* Se tienen menores costos de construcción y de transporte.
- *Mejores geometrías.* Mayor distancia de fuga, faldones alternantes, etc.
- *Mejor funcionamiento en ambientes contaminados.* Debido a la *hidrofobicidad superficial*, propiedad que inhibe la formación de una película de agua continua, evitando así la formación de bandas secas que anteceden al flameo.

- *Alta resistencia mecánica en relación con el peso*
- *Permiten claros mayores y torres menos costosas*
- *Mejor estética de la línea de transmisión*
- *Mayor resistencia al vandalismo*
- *Proceso de manufactura. Se fabrican en menor tiempo que los cerámicos.*
- *Nuevos diseños de líneas compactas con niveles reducidos de campos electromagnéticos*

Las desventajas que presentan estos aisladores son:

- *Degradación por el efecto combinado de la temperatura, humedad y radiación ultravioleta*
- *Envejecimiento por la presencia de descargas superficiales y de corona por el efecto de la contaminación*
- *La formulación polimérica puede sufrir corrosión o fractura por esfuerzos eléctricos*

Se sabe que el aislador cerámico tipo *long rod* es el antecesor de los aisladores no cerámicos [14]. Un aislador no cerámico, al igual que uno convencional, consta de: núcleo, faldones y herrajes acoplados a ambos extremos. Los herrajes se sujetan al núcleo en diferentes formas a fin de tener la resistencia

mecánica requerida. El núcleo se forma de fibras de vidrio alineadas axialmente y unidas por medio de una resina orgánica. Sin protección, el núcleo por si solo no es adecuado para la aplicación a la intemperie en alta tensión, ya que la humedad, la contaminación y la tensión conducen al desarrollo de pistas conductoras (*tracking*). Debido a esto, el núcleo requiere de una cubierta y faldones elaborados de algún material no cerámico diseñado para usos eléctricos, a fin de proteger y proporcionar el máximo aislamiento eléctrico entre terminales. Existe una gran diversidad de construcciones posibles, por lo que el comportamiento de los aisladores no cerámicos dependerá de la selección de los materiales, del diseño y de la construcción del aislador [14].

De la amplia gama de aisladores no cerámicos, los que han demostrado tener un mejor comportamiento al *tracking*, a la *erosión* y al *envejecimiento*, en condiciones de contaminación, son los de hule silicón y los de EPDM (Monómero Dieno de Etileno Propileno). La principal diferencia entre estos dos tipos de material es que el hule silicón mantiene su *hidrofobicidad* aún después de un largo tiempo de servicio [18].

El hule silicón contiene partículas de aceite de silicón de bajo peso molecular (LMW, en inglés), las cuales emigran hacia la superficie y forman una capa fina [19]. Las descargas superficiales destruyen esta película y la superficie se vuelve hidrofílica temporalmente. De nueva cuenta, las partículas de aceite emigran hacia la superficie volviéndola hidrofóbica, en un proceso repetitivo. La superficie de un faldón de EPDM se vuelve hidrofílica después de un periodo de tiempo expuesto a condiciones de contaminación y humedad, y se ha identificado que el mecanismo de flameo de los aisladores de EPDM es muy parecido al de los aisladores de porcelana.

Mecanismo de flameo en aisladores

En la figura 1.1 se muestran las principales etapas del proceso de flameo en un aislador contaminado.

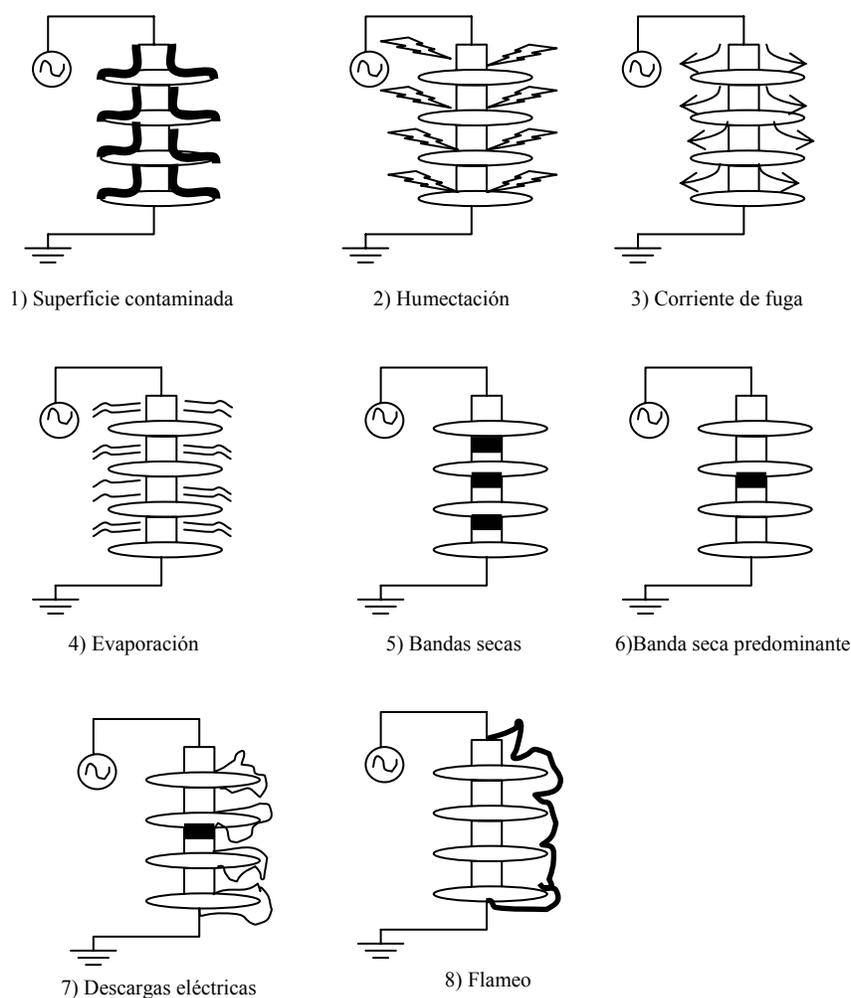


Figura 1.1 Mecanismo de flameo en un aislador contaminado

Se han realizado numerosas investigaciones sobre el proceso de flameo (ruptura dieléctrica) por contaminación, en aisladores expuestos al medio ambiente. Básicamente el flameo es un proceso dinámico multietapas [14], las cuales se presentan a continuación: 1) Sobre la superficie del aislador energizado se depositan

sustancias contaminantes, debido generalmente a los vientos, formándose una capa de contaminación no homogénea, 2) en condiciones secas, la capa no causa mayores problemas, pero en presencia de niebla, lluvia o rocío, la capa contaminante se humedece, 3) empieza a circular una pequeña corriente eléctrica sobre la capa húmeda, cuya magnitud depende de la conductividad del contaminante húmedo, 4) esta corriente evapora la capa debido al efecto Joule, siendo la evaporación mayor en donde la densidad de corriente es más grande, 5) se forman bandas secas de alta resistencia sobre la superficie del aislador, 6) la tensión en los extremos del aislador se desplaza a los extremos de las bandas secas, causando elevados gradientes de tensión, 7) se generan pequeñas descargas eléctricas en las zonas secas, las cuales provocan a su vez la formación de otras bandas secas, en donde también se presentan descargas superficiales, 8) estas descargas se concatenan provocando finalmente el flameo, causando así la salida de las líneas.

Este proceso es muy complejo y su mecanismo aún no ha sido bien identificado, ya que difiere del tipo de aisladores empleados, de sus perfiles y de las condiciones del lugar donde se instalan [20].

La propiedad más importante de los aisladores poliméricos es la *hidrofobicidad superficial*, medible mediante la determinación del ángulo de contacto de una gota de agua sobre la superficie del aislador, o bien por la obtención de la tensión de humectación o tensión crítica.

En una superficie hidrofóbica se forman gotas de agua inhibiendo así, la formación de una capa continua contaminante. Esta superficie presenta una alta resistencia al flujo de la corriente de fuga reduciendo la energía de disipación que conduce al flameo [21]. Esta es la razón de porqué las tensiones de flameo en aisladores poliméricos contaminados son mayores que las de los aisladores cerámicos, bajo condiciones similares de contaminación. Las descargas superficiales

y las descargas corona pueden destruir la hidrofobicidad superficial. De hecho se ha encontrado que la descarga corona es el principal agente eléctrico de *envejecimiento* en los aisladores poliméricos [22]. Estudios experimentales [23] indican que una contaminación alta y un humedecimiento simultáneo producen descargas superficiales, las cuales destruyen la hidrofobicidad e incrementan la corriente de fuga.

Ante una situación de pérdida total de la hidrofobicidad, la resistencia a la erosión o al tracking dependerá básicamente del material usado como relleno, alumina trihidratada (ATH), la cual se utiliza principalmente en los aisladores de EPDM. Este aditivo trabaja por descomposición térmica y se consume durante la actividad eléctrica superficial. La retención de la hidrofobicidad es altamente deseada, aunque si esta propiedad se pierde o se reduce, la formulación del material no cerámico deberá tener una alta resistencia a la *erosión* o a la *carbonización*.

1.6.2 Revisión de la normatividad internacional

Los aisladores convencionales se evalúan empleando guías normalizadas, principalmente la IEC-507 [24] y la IEC-815 [25]. Existen dos métodos normalizados para las pruebas de contaminación artificial en corriente alterna, indicados dentro de la norma IEC-507, para aisladores cerámicos y de vidrio: El método de niebla salina y el método de niebla limpia.

En el *método de niebla salina*, el aislador bajo prueba debe primero de lavarse y limpiarse, después se coloca verticalmente dentro de la cámara de contaminación, donde se le aplica la tensión de prueba y unos minutos después se somete a la niebla salina durante una hora.

La niebla salina se produce con nebulizadores, los cuales atomizan la solución salina por la acción de aire comprimido.

La solución salina se prepara con cierta cantidad de NaCl por cada litro de agua desmineralizada; la cantidad de sal depende del grado de salinidad requerida.

El resultado de cada prueba en una hora es aguante o flameo. Se hacen cuatro pruebas para cada valor de salinidad y estas pruebas se continúan hasta encontrar la más alta salinidad para que al menos tres pruebas de cuatro resulten en aguante. A esta salinidad se le denomina *salinidad de aguante*, expresada en kg/m^3 . Entre pruebas sucesivas, el objeto bajo prueba se lava completamente con agua limpia.

Este método simula la contaminación de áreas costeras o de zonas cercanas a la costa.

Para realizar las pruebas con niebla salina, se requiere de una cámara resistente a la corrosión, por ejemplo una cámara de plástico. Dentro de la cámara se colocan verticalmente dos cabezales diagonalmente opuestos que contienen a los nebulizadores, con una distancia al objeto bajo prueba de 3 m.

El aislador se coloca al centro de la cámara colgado de la parte superior, dejando una distancia de 2 m, como mínimo del extremo final de la cadena al piso.

Las dimensiones de la cámara dependen de la longitud de la cadena y de la tensión de prueba.

Para la preparación de la solución se requieren de dos tanques resistentes a la corrosión; en un tanque se hace la mezcla y se agita hasta que la sal esté disuelta. En el otro tanque se tiene la solución preparada para la prueba; mediante un sistema de

bombeo se envía la solución salina del tanque a los nebulizadores. El gasto se regula mediante las válvulas localizadas en el centro de control. El aire comprimido debe tener una presión de 7 kg/cm^2 a la salida de los nebulizadores, el cual se controla con los manómetros respectivos. El sistema de aire comprimido está formado por compresores, tableros y mangueras.

La medición de la tensión de prueba se hace con un divisor de tensión y un osciloscopio. La medición de corriente de fuga requiere de un derivador (*shunt*) y un registrador gráfico. Se hacen otras mediciones como conductividad, salinidad, etc.

Método de niebla limpia

El aislador se lava y se limpia de manera que no quede grasa o cualquier sustancia extraña. Posteriormente, el aislador completamente seco se sumerge en la solución contaminante hasta lograr una capa uniforme. La solución se prepara con 40 gr de Caolín (o Tonoko) por cada litro de agua y cloruro de sodio, hasta lograr la DESD (Densidad Equivalente de Sal Depositada, expresada en mg/cm^2) requerida en el aislador.

Se contamina adicionalmente un aislador con propósitos de medir la DESD. Una vez contaminado el aislador se deja secar unos 30 minutos, como mínimo, antes de pasar a la cámara de prueba.

Se aplica a los aisladores una tensión de CA, antes de generar la niebla limpia y se mantiene constante durante toda la prueba hasta que ocurre el flameo, o en el caso de aguante, dos veces el tiempo necesario para alcanzar la humectación máxima del aislador, determinada por una prueba de corriente de fuga a baja tensión.

La generación de la niebla puede hacerse por diferentes medios, ya sea por un generador de vapor comercial o mediante recipientes abiertos con resistencias calefactoras que evaporan el agua.

La generación de vapor deberá estar dentro del intervalo del 0.3 a 0.1 kg/hr por m³ del volumen de la cámara, con el fin de lograr que la rapidez de humidificación del aislador sea máxima.

Para establecer el nivel crítico de flameo de los aisladores se usa el método de arriba abajo (*Up and Down*) con pasos del 5 al 10% de la U_{50} estimada. Se deben realizar de 20 a 30 pruebas, para tener una estimación exacta de la tensión de flameo U_{50} .

La instalación para usar este método es más sencilla que para la niebla salina y sin problemas de corrosión. Básicamente se requiere de una cámara de plástico cuyas dimensiones se definen en función del tamaño del objeto bajo prueba y la tensión máxima de prueba.

Las características de las fuentes de alimentación y de medición son iguales a las requeridas con niebla salina.

El método de niebla limpia simula la contaminación en zonas urbanas y de alta densidad industrial.

Cabe señalar que ambos métodos consumen tiempo y en ocasiones llegan a ser costosos. Para reducir el tiempo de prueba se introdujeron los métodos de prueba de flameo rápido en niebla limpia (RFOCF, en inglés) y el de flameo rápido en niebla salina (QFOSF, en inglés) [26]. En los dos métodos los aisladores se energizan al 90% de la tensión de flameo estimada y entonces se les aplica la niebla.

Cuando el aislador está húmedo, se incrementa la tensión gradualmente. La tensión de flameo promedio es el resultado de promediar de 5 a 10 flameos en ciclos repetidos. En el caso del RFOCF, los incrementos de tensión son del 4% cada tres minutos. En el método del QFOSF, el incremento de tensión es del 3% cada 5 minutos.

Relevancia de la norma IEC-815

La norma IEC-815 es de origen francés y se basa en la experiencia de las líneas de Francia y el método de contaminación artificial de niebla salina, para aisladores de porcelana y de vidrio. Esta norma contiene una descripción cualitativa del medio ambiente contaminado considerando los diferentes tipos de contaminación (salina, industrial y rural), en función de la distancia de la fuente contaminante y de la densidad de industrias y centros urbanos. La Comisión Federal de Electricidad emplea esta norma. Se está efectuando una revisión para que la norma IEC-815 se pueda aplicar en las siguientes áreas:

- Diseño de aisladores poliméricos
- Orientación del aislador
- Extensión de aplicación para tensiones arriba de 525 kV
- Diseño para la aplicación en CD
- Aisladores con semiconductores de vidrio
- Diseño de apartarrayos, particularmente con referencia a materiales poliméricos

- Radio interferencia, televisión interferencia y ruido audible en aisladores contaminados
- Efecto de la altitud

Esta revisión empezó en 1998 y está proyectada para ser terminada a finales del año 2005 [27].

Evaluación de aisladores no cerámicos

El uso potencial de aisladores no cerámicos y la reducción esperada en los costos de construcción de las líneas de transmisión y distribución, promovió una cooperación internacional entre los grupos de trabajo de la CIGRE y del IEEE.

Dentro del IEEE la actividad se lleva a cabo en dos grupos de trabajo: *pruebas y aplicación de aisladores no cerámicos y contaminación de aisladores*.

En CIGRE WG-33.04 (*Contaminación de aisladores*), se investigan diferentes aspectos del comportamiento de aisladores no cerámicos relacionados al fenómeno de la contaminación. El objetivo principal de este grupo de trabajo es desarrollar un método de *envejecimiento* apropiado que prediga la vida útil de los aisladores y permita una evaluación del comportamiento de éstos, en áreas contaminadas. Un problema adicional consiste en la evaluación de la severidad de la contaminación del lugar y el desarrollo de un método de prueba confiable para laboratorio.

Típicamente, la evaluación de la severidad de la contaminación del aislador se determina por la medición de la DESD, que es la cantidad de sal referida a NaCl, sobre la superficie de un aislador, en miligramos por centímetro cuadrado, que se

requiere para producir una conductividad similar a la contaminación realmente depositada y disuelta en la misma cantidad de agua. El contaminante se remueve de la superficie del aislador con agua destilada, se mide la resistividad de ésta y se calcula el monto equivalente de sal por centímetro cuadrado. Este método está normalizado e incluido en la norma IEC-507. No obstante, se cuestiona su aplicabilidad en aisladores no cerámicos, dado que la hidrofobicidad superficial previene la completa humectación del contaminante y, por tanto, la remoción de todo el contaminante durante las mediciones arroja malos resultados en la determinación de la severidad de la contaminación.

Otra norma empleada, para aisladores no cerámicos, es la IEC-1109 [28]. Esta norma establece dos procedimientos de prueba de envejecimiento para reproducir los efectos de localidades con condiciones severas de operación.

El primero considera la aplicación de esfuerzos cíclicos (temperatura, lluvia, luz ultravioleta, tensión, niebla salina) por un periodo de 5000 horas, en el cual se han basado prácticamente todos los fabricantes de aisladores sintéticos. El segundo se basa en la aplicación de tensión constante y niebla salina (10 kg/m^3) por un periodo de 5000 horas, el cual los fabricantes no efectúan por considerar que es muy severo en adición a que no representa las condiciones operativas [14].

Actualmente no se cuenta con una guía de evaluación estandarizada para realizar pruebas de contaminación artificial a aisladores poliméricos. Los grupos de investigación en todo el mundo pretenden crear una guía que ayude y sea confiable para las pruebas de laboratorio. Algunos de los trabajos reportados sobre materiales poliméricos toman en consideración las normas que se aplican a los aisladores convencionales, pero dadas las características que estos poseen, los resultados de las pruebas no son del todo confiables. En México, tanto la CFE como Luz y Fuerza usan aislamiento con recubrimiento de silicón RTV (vulcanizado a temperatura

ambiente) y de aislamiento de EPDM en algunas líneas de transmisión y distribución [29], con muy altos niveles de contaminación, por lo que resulta importante seguir con las investigaciones de este tipo de materiales.

1.7 Contribuciones del presente trabajo

La contaminación en aisladores poliméricos es un problema complejo y aún no es bien entendido. Este trabajo ayuda a conocer el comportamiento de la tensión de flameo de aisladores de EPDM en ambientes contaminados, con el cambio en las condiciones atmosféricas, siendo estas la densidad del aire y la humedad. Se realizaron pruebas experimentales en una cámara de niebla, construida para tal propósito. A continuación se resumen aspectos importantes y las contribuciones de esta investigación:

- Se analiza el efecto combinado de la humedad relativa y una densidad de aire reducida sobre las tensiones de flameo en aisladores de EPDM, sujetos a diferentes niveles de contaminación. Se presentan gráficas de corriente de fuga en función de la humedad y el tipo de contaminación. Los resultados obtenidos muestran que el incremento de la humedad en niveles de contaminación ligeros y medios provocan que la tensión de flameo tienda a disminuir, alrededor de un 10%. Sin embargo, cuando la contaminación es alta o muy alta, los cambios de humedad no afectan a la tensión de flameo. Solamente cuando el rango de humedad relativa es muy alto, alrededor del 90%, la tensión de flameo tiende a ser irregular.
- La tesis muestra que los cambios en la densidad del aire provocan cambios significativos en las tensiones de flameo. Para niveles de contaminación ligeros, los valores de tensión obtenidos en el laboratorio de la Cd. de México son mayores a los reportados por Montesinos et al. [29] en el laboratorio del IIE, en

Cuernavaca, Morelos. Sin embargo para contaminaciones altas las tensiones de flameo son significativamente menores a las reportadas. En general, la formulación del material, en este caso, EPDM no tuvo una influencia significativa en el comportamiento de la tensión disruptiva, ya que su desempeño fue menor a lo esperado. En condiciones de alta contaminación y gran altitud, los aisladores de EPDM poseen un rendimiento similar a los aisladores convencionales.

- La propiedad más importante de los aisladores polimericos es su hidrofobicidad superficial. En este trabajo se encontró que los ángulos de contacto en las superficies del aislador disminuyeron a medida que el nivel de contaminación aumentó. Una reducción significativa de la hidrofobicidad superficial propicia que las tensiones de flameo sean menores. En niveles de contaminación ligeros y cuando el tiempo de recuperación de los aisladores es mayor, después de haber sido evaluados en laboratorio, éstos tienden a recuperar sus propiedades hidrofóbicas. Sin embargo, en contaminaciones medias y altas, el tiempo de recuperación no influye en la recuperación de la hidrofobicidad.

En el análisis de las pértigas se puede mencionar lo siguiente:

- Es la primera vez que se evalúan en un laboratorio nacional, pértigas dieléctricas usadas para trabajo en línea viva. La norma que se empleó fue la IEC-855 la cual entra en concordancia con la norma ASTM F711-89. Específicamente se analizaron las corrientes de fuga en condiciones secas y en condiciones húmedas.
- El método de medición de las corrientes de fuga en pértigas de resina epóxica y de fibra de vidrio arrojó resultados originales. Para las pruebas en condiciones húmedas, se obtuvieron únicamente valores de corriente de fuga para las pértigas de resina epóxica. El examen visual al final de la evaluación reveló la ausencia

de decoloramiento o degradación superficial. El desempeño de las pértigas de fibra de vidrio en estas condiciones fue pobre, ya que se presentó degradación superficial (*tracking* y *puncture*) en una etapa incipiente de las pruebas.

- Para los dos tipos de ensayos, el ruido electromagnético generado por las corrientes inducidas se redujo empleando un blindaje electrostático, tanto en el circuito de medición como en los cables de conexión. No obstante, se registraron niveles de corriente de fuga para los dos tipos de pértigas evaluadas, mayores a los indicados en la normatividad internacional. De esto se concluye que estos materiales no cumplen satisfactoriamente con lo requerido en la norma.

CAPÍTULO 2

EFECTO DE LA HUMEDAD RELATIVA SOBRE LAS TENSIONES DE FLAMEO



2.1 Introducción

La selección de aisladores eléctricos para aplicaciones externas en alta tensión, está determinada principalmente por el comportamiento de éstos bajo condiciones de contaminación.

La evaluación de aisladores eléctricos, tanto cerámicos como poliméricos, se lleva a cabo en laboratorios de prueba y tiene como objetivo simular las condiciones reales de servicio. Durante una prueba de contaminación artificial se tienen 3 condiciones importantes: temperatura, presión y niebla. Las pruebas estandarizadas tienen que cumplir con los requisitos de representatividad, repetibilidad y reproducibilidad. La representatividad se refiere a la capacidad del método de prueba para representar las condiciones reales de servicio. La repetibilidad indica la medida en que una prueba produce los mismos resultados cuando se repite en el mismo laboratorio y la reproducibilidad se refiere a la capacidad del método para obtener los mismos resultados en diferentes laboratorios [4].

Asimismo, las pruebas de laboratorio se realizan con el fin de evaluar el diseño de nuevos aisladores con materiales nuevos, para establecer niveles de aislamiento en las nuevas líneas y para modificarlo en las ya existentes, según se requiera.

Como se mencionó en el capítulo 1, existen guías normalizadas para evaluar aisladores convencionales en pruebas de laboratorio. La norma más empleada es la IEC-507. En ella se encuentran dos métodos de prueba: el método de niebla limpia y el método de niebla salina.

Eléctricamente, la funcionalidad de estos aisladores se ha evaluado en la cámara de niebla salina. Las pruebas en estas cámaras están orientadas a estimar la

resistencia al envejecimiento del aislamiento, esto es, su vida útil. Dichas pruebas no resultan adecuadas para determinar la tensión de flameo del aislamiento que ha sido instalado en campo sujeto a contaminación, o cuando se necesita investigar en laboratorio el comportamiento de aisladores que van a instalarse en zonas alejadas de las costas.

Por otro lado, la evaluación de aisladores en cámaras de niebla limpia proporciona información sobre el comportamiento de un aislador precontaminado que se humedece en forma gradual y uniformemente por condensación. Esta prueba es más representativa del comportamiento de un aislador en servicio que la de niebla salina.

En el caso de aisladores no cerámicos, no existe una guía estandarizada para su evaluación en laboratorio y, consecuentemente, se emplean los mismos métodos que en los convencionales.

Las pruebas de laboratorio contenidas dentro de la norma IEC-1109 han sido empleadas en aisladores poliméricos y pretenden mejorar su diseño. Sin embargo, dichas pruebas no garantizan una alta confiabilidad, sobre todo si los aisladores han sido expuestos en altos niveles de contaminación.

Debido a esto y dada la ausencia de una mejor prueba, el método de niebla limpia está siendo usado en la evaluación de aisladores sintéticos. En esta investigación, se evaluaron aisladores poliméricos sujetos a contaminación y niebla limpia, pero empleando una técnica de acondicionamiento de aisladores y mediciones de tensiones de flameo no convencionales.

2.2 Arreglo experimental

El diagrama esquemático del arreglo para la prueba de niebla limpia se muestra a continuación.

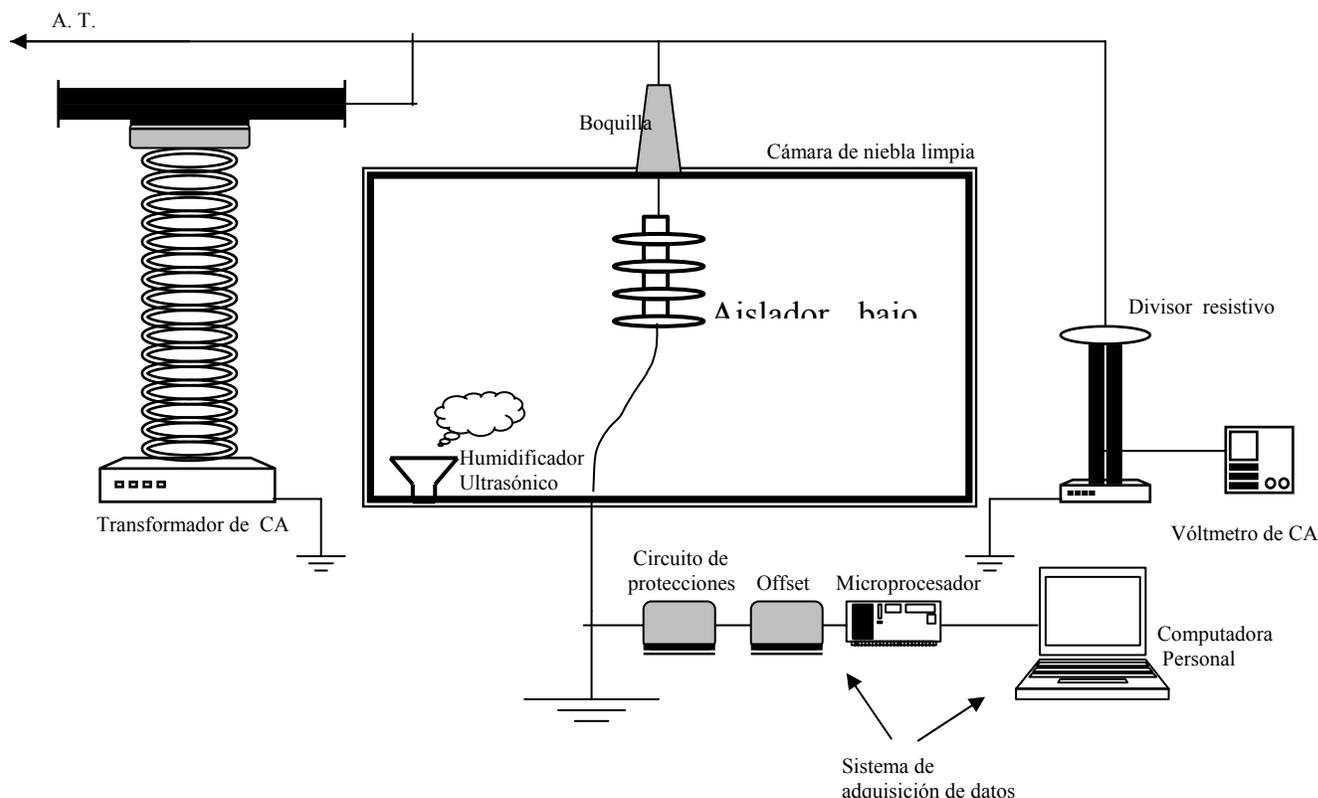


Figura 2.1 Arreglo experimental para una prueba de niebla limpia

Las características del equipo que constituye el arreglo experimental son las siguientes: Se empleó una fuente de corriente alterna del tipo PRAV 25 Walter, la cual se alimenta con una tensión de 220 V y trabaja a una frecuencia de 50 a 60 Hz. La fuente consta de una consola de control en donde se encuentran los interruptores de paro y arranque, un regulador de tensión y las diferentes escalas de trabajo, siendo estas de 25, 50 y 100 kV, según se muestra en la figura 2.2.



Figura 2.2 Consola de control de la fuente de CA

La fuente cuenta además con una resistencia limitadora de corriente de $270\text{ k}\Omega$, un transformador elevador de tensión y un potenciómetro de alta tensión. Este equipo se muestra en la figura 2.3.

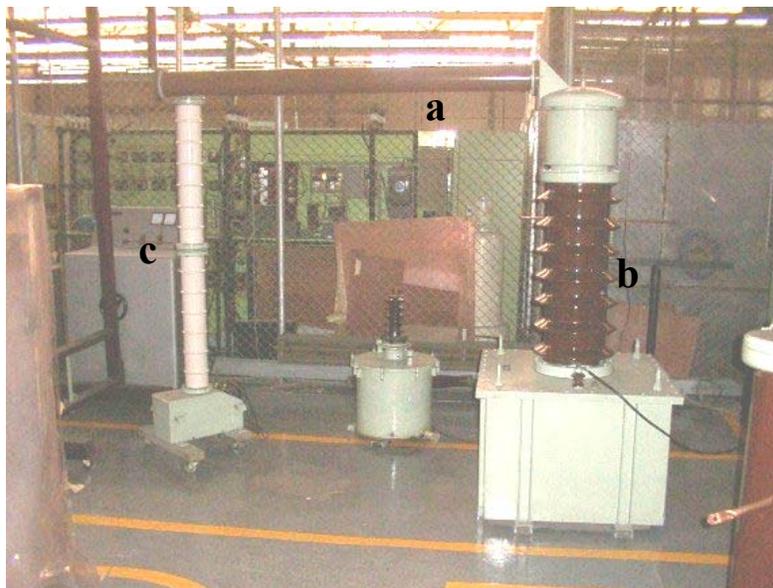


Figura 2.3 Equipo que forma parte de la fuente de CA: a) Resistencia de $270\text{ k}\Omega$, b) Transformador elevador de alta tensión, c) Potenciómetro de alta tensión

La cámara de niebla empleada se muestra en la figura 2.4. El volumen de la cámara es de 3.375 m^3 ($1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$), siendo del tipo medio [30] y está revestida herméticamente con plástico. En la parte superior se encuentra una boquilla, a la cual se conecta el conductor de alta tensión.



Figura 2.4 a) Cámara de niebla limpia, b) Boquilla

Se utilizó un divisor de tensión resistivo (*high voltage divider*) marca Bertan Associates Inc. siendo sus características: 60 kV máximo y una relación de transformación 10,000:1. Este divisor se empleó en la medición de la tensión de flameo de los aisladores.

La generación de la niebla puede hacerse por diferentes medios, ya sea por un generador de vapor comercial o mediante recipientes abiertos con resistencias calefactoras que evaporan el agua. Para la realización de las pruebas se utilizó un humidificador ultrasónico cuyas características son las siguientes: Tensión nominal

127 V, 60 Hz, 45 W, capacidad de 5.7 litros, tiempo continuo de uso de 15.5 h, rango de control de humedad 30-80% y un consumo de agua de 0.4 l/h \pm 10%. La velocidad de entrada de vapor (VEV) a la cámara se calcula tomando en cuenta el volumen de ésta y el consumo de agua en el humidificador de acuerdo a la relación

$$VEV = \frac{4kg/h}{3.375m^3} = 118.5 gr/m^3/l \quad (2.1)$$

El valor normalizado es de 50 gr/m³/l, sin embargo, estudios recientes [31,32] recomiendan una velocidad de entrada mayor, para el caso de aisladores poliméricos, a fin de obtener una humectación máxima de la capa contaminante en un periodo corto de tiempo.

2.3 Ejecución de las pruebas de laboratorio

Las pruebas de contaminación artificial se realizaron en la cámara de niebla limpia, la cual estuvo conectada al equipo de alta tensión, a un sistema de adquisición de datos (SAD) y a un equipo de medición.

Los aisladores a evaluar fueron de EPDM para un sistema de 15 kV, en el nivel de distribución (aisladores tipo suspensión). Las características de los aisladores se muestran en el apéndice A.

Como se trata de materiales hidrofóbicos, se empleó un método de contaminación *no convencional* que ha resultado satisfactorio en pruebas anteriores, en lo que a los requisitos de representatividad, repetibilidad y reproducibilidad se refiere [31].

2.3.1 Acondicionamiento de los aisladores

En el caso de los aisladores poliméricos, la capa de contaminación que se obtiene al contaminarlos según el procedimiento de la IEC-507, empleando el método de niebla limpia, es no uniforme debido a la hidrofobicidad de estos materiales. Sin embargo, uno de los requisitos que se deben de cumplir para realizar las pruebas en la cámara de niebla limpia, es que dicha capa tenga un cierto grado de uniformidad. Por tanto, los materiales poliméricos tienen que someterse a un acondicionamiento previo de tal forma que su superficie se vuelva hidrofílica, pero sin alterar las propiedades intrínsecas del material.

Recientemente ha sido ensayada una nueva forma de acondicionamiento previo [31]. Esta técnica fue la que se utilizó para el acondicionamiento de los aisladores ya que es fácil de llevarse a cabo, no es costosa, no consume mucho tiempo y es confiable. El método consistió en los siguientes pasos:

- Se aplicó con un algodón una capa ligera de caolín (igual al que se utiliza para preparar las mezclas contaminantes) sobre toda la superficie del aislador, el cual había sido previamente lavado con agua para remover residuos de grasa o polvo. La aplicación del caolín provee una interfase para obtener una capa de contaminación uniforme, sin cambiar las características del material
- Inmediatamente, el aislador se expuso a un chorro de agua para remover los excesos de caolín
- Se aplicó la mezcla de caolín/sal sobre el aislador, según lo indica la IEC-507, procurando obtener una capa lo más uniforme posible. La mezcla se preparó con 40 gr de caolín por cada litro de agua destilada y una cantidad de sal (NaCl) para obtener la DESD deseada. La DESD (densidad equivalente de sal depositada, en

mg/cm²) y la DDNS (densidad depositada no soluble, en mg/cm²) son parámetros que caracterizan la severidad de la contaminación. Se manejaron 4 niveles de contaminación, de acuerdo a la norma IEC-507: a) Contaminación ligera, b) contaminación media, c) contaminación pesada o alta y d) contaminación muy pesada o muy alta.

a) Para la contaminación ligera se mezclaron 40 gr de caolín con 5 gr de NaCl por un litro de agua desmineralizada. Con esta mezcla se obtuvo una DESD de 0.02 mg/cm² y una conductividad volumétrica de 0.8341 S/m.

b) Para la contaminación media se mezcló 40 gr de caolín y 20 gr de NaCl por un litro de agua tratada. La conductividad de esta mezcla fue de 3.0 S/m y la DESD de 0.075 mg/cm².

c) La contaminación pesada se obtuvo con la mezcla de 40 gr de caolín, 80 gr de NaCl y un litro de agua desmineralizada. La DESD obtenida fue de 0.25 mg/cm² y la conductividad volumétrica de 10 S/m.

d) La mezcla de 40 gr de caolín y 160 gr de NaCl en un litro de agua tratada representó una contaminación muy pesada, siendo la conductividad de esta mezcla de 17 S/m y la DESD de 0.425 mg/cm².

En los 4 casos, la DDNS fue de 0.1 mg/cm² [33]. Como se sabe, la DDNS está en función del material no soluble, en este caso el caolín. Los principales minerales constituyentes del caolín son la caolinita (Al₂Si₂O₅(OH)₄) y el cuarzo. El grupo hidroxilo en la caolinita vuelve al caolín hidrofílico, con lo que la mezcla contaminante sobre la superficie del aislador se vuelve más uniforme y más conductiva cuando está sujeta a contaminación. Otro material insoluble empleado en pruebas de laboratorio, el tonoko, ocasiona que la capa contaminante en el aislador

sea más dispersa dadas las características hidrofóbicas que este presenta. No obstante, esto puede evitarse si se aplica a la mezcla un agente de dispersión, como el ácido pirofosfórico (AP), con lo que la mezcla se vuelve hidrofílica.

2.4 Medición de la tensión de flameo

Se trata de un método diferente al normalizado y con el cual se han obtenido resultados satisfactorios [31].

La medición de la tensión de flameo se llevó a cabo de la siguiente manera:

1. El aislador, previamente contaminado, se colocó en posición vertical y al centro de la cámara

2. Se comenzó a generar la niebla limpia y se aplicó una tensión inicial de aproximadamente el 80% de la tensión de flameo esperada (de acuerdo a pruebas anteriores) [34]. El tiempo de duración de esta tensión dependió de la velocidad de entrada del vapor, la cual, como ya se mencionó, se calculó dividiendo la cantidad de agua convertida en vapor, por unidad de tiempo, entre el volumen de la cámara

3. Se incrementó la tensión inicial en un 5%. Si el flameo no ocurría dentro de los dos minutos siguientes, se repetía este paso

4. Después que el flameo ocurrió, se energizó con una tensión 10% menor que la tensión de flameo. Si el flameo ocurría dentro de los dos minutos siguientes se repetía este paso

5. Se repitió el paso tres hasta que ocurría otro flameo. El valor más bajo de la tensión de flameo fue registrado como la primera medición válida. Una buena

indicación para saber cuándo detener la prueba fue mediante la inspección visual de la superficie del aislador, la cual indicaba si el aislador había sido lo suficientemente limpiado como para permitir otro flameo.

La tensión de flameo se registró con un multímetro digital conectado a través de un cable coaxial a la salida del divisor resistivo.

2.5 Medición de la corriente de fuga

Los principales factores que influyen en el comportamiento de los aisladores poliméricos son la pérdida de la hidrofobicidad y el envejecimiento del material bajo esfuerzos ambientales y eléctricos en condiciones naturales. Especialmente cuando los esfuerzos interactúan juntos, el proceso de degradación puede desarrollarse significativamente sobre las superficies de los aisladores, debido a la aparición de corrientes de fuga y descargas eléctricas (corona, descargas en las bandas secas y flameos).

Por esta razón, las mediciones de dichas corrientes de fuga son realizadas para evaluar el funcionamiento y grado de envejecimiento de superficies poliméricas, en campo y en los laboratorios de prueba. La corriente de fuga durante una prueba de contaminación da información sobre el desarrollo de un arco sobre la superficie del aislador. La máxima corriente de fuga durante una prueba de aguante es, por tanto, un valor característico para un aislador en particular en una severidad dada y en una distancia de fuga específica. Asimismo, la corriente de fuga durante una prueba de contaminación pasa por varias etapas. Cuando el aislador aún posee sus propiedades hidrofóbicas, esto es, al inicio de la prueba, la corriente de fuga es senoidal y capacitiva. Cuando la superficie del aislador se humecta completamente, la corriente tiende a ser senoidal, pero altamente resistiva. Toda vez que la superficie del aislador comienza a perder su hidrofobicidad, debido a las descargas en las

bandas secas que se forman, la corriente se vuelve resistiva y no lineal. Finalmente, la corriente de fuga durante el flameo se mantiene no lineal, pero altamente resistiva [35].

La corriente de fuga no es continua y tiene componentes de alta frecuencia (armónicos). Para la medición de la corriente de fuga en las pruebas de laboratorio, se utilizó un sistema de adquisición de datos (SAD) [34]. El sistema de adquisición de datos constó de un circuito derivador, un circuito de protección, un circuito offset, un microprocesador y una computadora personal. Los valores de la resistencia en el circuito derivador fueron del orden de 2.5-3.0 Ω . A la salida del derivador (*shunt*) se conectó un circuito de protección. Este circuito constó de tres etapas: en la primera, se conectó un supresor de gas. En la segunda etapa se conectó en paralelo un diodo zener. En la tercera, un amplificador protegió también contra picos de sobrecorrientes que pudieran presentarse. La señal registrada durante las pruebas tomó valores positivos y negativos. Debido a que el microprocesador sólo acepta valores positivos, y menores a 5 V, a la salida del circuito de protección se conectó un circuito offset, el cual, mediante un convertidor, logró que la señal tomara únicamente valores positivos, y dentro de los valores de tensión permitidos. El offset se conectó a un microprocesador 68HC11. El sensor del procesador es de 16 bits, por lo que se tuvo un registro de la señal de 16 puntos por ciclo. Esto es, 960 puntos por segundo.

El microprocesador envió los datos a una computadora, y mediante un software comercial (Origin 6.0) se graficaron los valores de corriente de fuga contra el tiempo. Con este paquete se obtuvieron también los espectros de frecuencia de las corrientes. Para mayor información sobre esta paquetería, dirigirse a la dirección electrónica <http://www.microcal.com> y a la dirección <http://www.originlab.com>

El sistema de adquisición de datos se muestra en la figura 2.5.



b)

Figura 2.5 Sistema de adquisición de datos, a) *Vista general*, b) *Aspecto del offset y del microprocesador*

2.6 Medición de las condiciones ambientales

Humedad relativa y humedad absoluta

El aire contiene una cantidad de agua en forma de vapor. El vapor causa una cierta presión, conocida como presión de vapor. La capacidad del aire para mezclarse es limitada, de ahí que exista una presión máxima, llamada presión de vapor de saturación. La humedad relativa (h) se define como la relación entre la presión de vapor presente en el gas y la presión de vapor de saturación, mientras que la humedad absoluta (H) es el contenido de la mezcla en gramos por metro cúbico de aire [36].

En este trabajo el grado de contenido de agua en el aire se especifica por la humedad relativa. La medición de la humedad se realizó empleando un polímetro marca Casella London, según se ilustra en la figura 2.6. El polímetro consta de un higrómetro y un termómetro para medir la humedad relativa (en porcentaje, de 0-100%) y la temperatura del aire respectivamente (de 0-30° C).

Para determinar el comportamiento de la tensión de flameo con el cambio de la humedad, se reguló la entrada de vapor a la cámara de niebla limpia manipulando la perilla del humidificador, a fin de controlar la humedad relativa en ciertos intervalos (entre 50-60%, 60-70%, 70-80% y 80-90%)



Figura 2.6 Polímetro empleado para la medición de la humedad relativa y la temperatura del aire

Presión atmosférica y densidad relativa del aire

En esta investigación, la densidad relativa del aire (δ) durante las pruebas de laboratorio se mantuvo alrededor de 0.77 (585 mmHg), siendo un 23% menor que la densidad relativa al nivel el mar ($\delta=1$, 760 mmHg).

2.7 Efecto de la humedad relativa sobre las corrientes de fuga y las tensiones de flameo

Aunque muchos factores están involucrados en el comportamiento eléctrico de los materiales no cerámicos, la humedad y la contaminación juegan los papeles más importantes. En condiciones secas y ambientes sin contaminación, los aisladores no cerámicos poseen un buen comportamiento y una larga vida útil. La humedad y la contaminación provocan un incremento en la corriente de fuga sobre la superficie del aislador. La corriente de fuga indica la pérdida de la hidrofobicidad de los faldones y la cubierta y si esta corriente es suficientemente alta, puede generar la formación de arcos en bandas secas. El calor producido por las descargas causa *erosión* y degradación superficial, causando la ruptura dieléctrica en el aislador.

Bajo condiciones severas de operación, los aisladores de EPDM pueden deteriorarse rápidamente. El calentamiento superficial dada la disipación de energía durante las descargas está en función de las propiedades del material, EPDM en este caso, esto explica las diferencias de los flameos (*flashovers*) entre distintos materiales poliméricos.

Con el propósito de conocer el efecto de la humedad relativa sobre las corrientes de fuga y las tensiones de flameo, se llevaron a cabo pruebas de laboratorio de acuerdo a la siguiente metodología: se evaluaron 4 aisladores nuevos de EPDM, clase 15, contaminados con los 4 niveles de contaminación descritos en el capítulo 2. Cada aislador se evaluó con un solo nivel de contaminación. La evaluación se llevó a cabo con el fin de encontrar los valores de tensión de flameo y de corrientes de fuga, para cada nivel de contaminación, en diferentes intervalos de humedad.

Las pruebas se realizaron empleando niebla limpia en los aisladores uniformemente contaminados. Los resultados en cada una de las etapas representan las condiciones más severas debido a que no se permitió *tiempo de secado* entre la aplicación de las mezclas contaminantes y el inicio de las pruebas. Esto representa el peor escenario posible para el comportamiento del flameo en condiciones reales de operación.

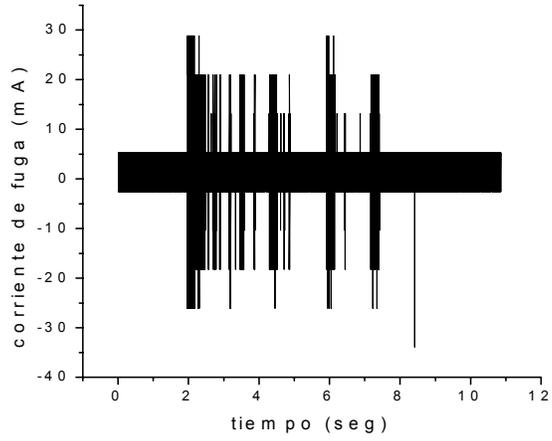
La metodología de las pruebas fue la siguiente: Primero, se acondicionó la cámara de niebla limpia a fin de obtener un valor de humedad, dentro de la cámara, en el intervalo de 50-60% de humedad relativa. Se colocó el aislador a evaluar al centro de la cámara y se comenzó con la prueba, hasta que este flameara. Una vez que el aislador flameó, se limpió con agua para remover los residuos de la mezcla contaminante. Una vez limpio y seco, se contaminó nuevamente con el mismo nivel de contaminación, se colocó en la cámara y se procedió a realizar la prueba, sólo que ahora la humedad se mantuvo entre 60-70%. Se llevó el aislador al flameo. De nueva cuenta, el aislador se limpió, se contaminó y se probó, pero ahora con una humedad comprendida entre 70-80%. Finalmente, el aislador se sometió a este mismo proceso, pero con el intervalo de humedad de 80-90%. Este procedimiento se realizó sobre los tres aisladores restantes, para los otros tres niveles de contaminación. En cada una de las pruebas, se registraron los valores de tensión de flameo y de corrientes de fuga. Se analizaron también los espectros de corriente y se midieron las hidrofobicidades al final de las evaluaciones. En el apéndice C se muestran imágenes del flameo del aislador.

Asimismo se realizó una observación visual de los aisladores al final de las pruebas, con el fin de determinar sobre cuales faldones se habían generado más bandas secas.

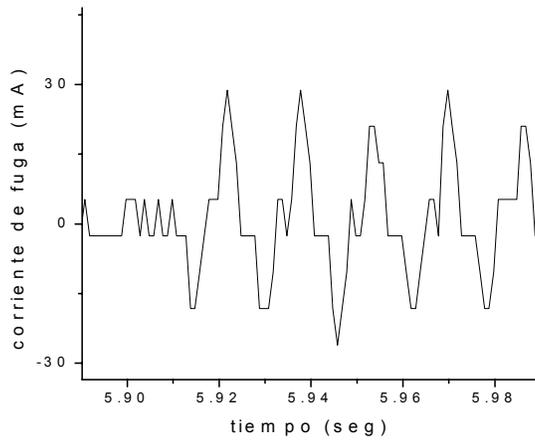
Una segunda fase de las pruebas de laboratorio consistió en lo siguiente: Se evaluaron nuevamente los mismos aisladores, en los diferentes intervalos de humedad relativa, pero ahora permitiendo un *tiempo de recuperación* de sus propiedades hidrofóbicas. El tiempo de recuperación fue de 384 horas para los aisladores evaluados con contaminación ligera y media, y de 504 horas para los que se probaron con una contaminación pesada y muy pesada.

Cabe señalar que en cada una de las etapas, la temperatura de la cámara se mantuvo en el intervalo de 19-23°C. Como se aprecia, la temperatura no varió significativamente, por lo que la influencia que ésta tiene sobre las tensiones de flameo y las corrientes de fuga no fue analizada.

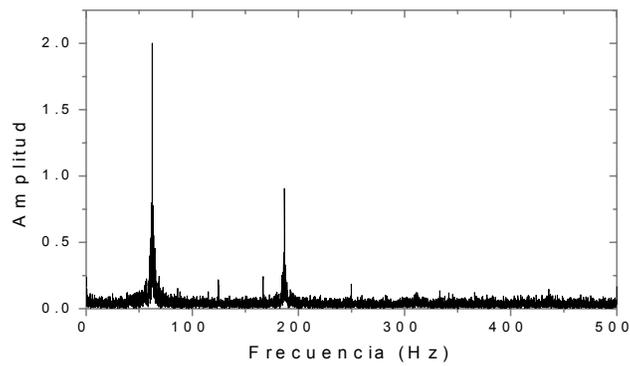
A continuación se muestran las gráficas de las corrientes de fuga obtenidas durante el desarrollo de las pruebas. También aparecen los espectros de frecuencia.



a)

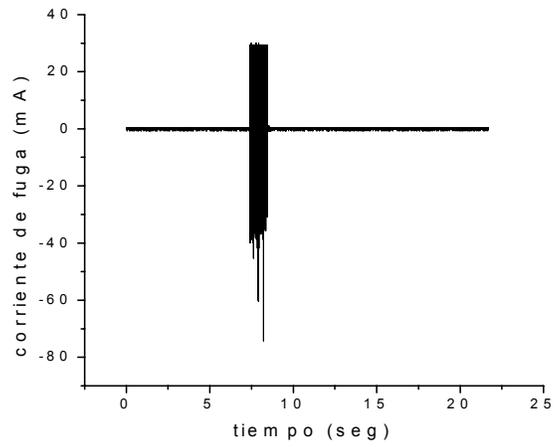


b)

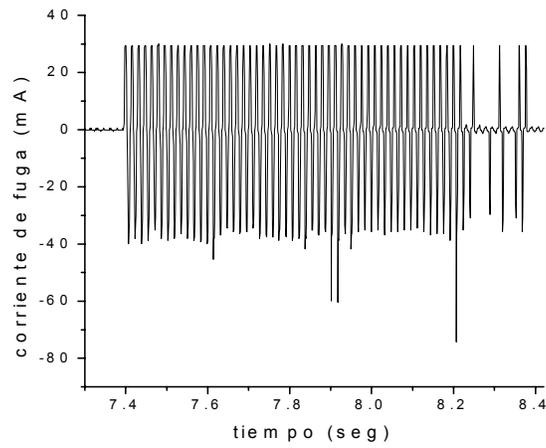


c)

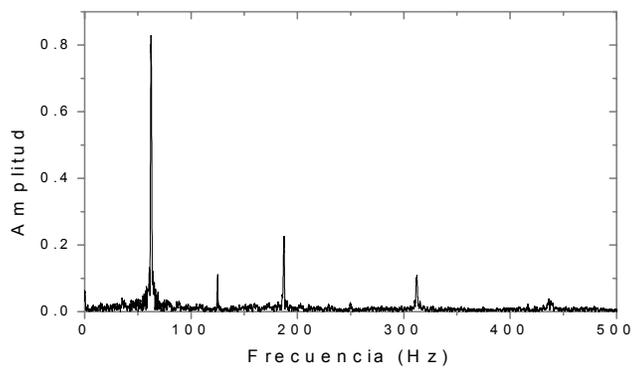
Figura 2.7 a) Flameo en 22.6 kV, a una temperatura de 20°C, una humedad relativa de 56% y una DESD de 0.02 mg/cm²; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia



a)

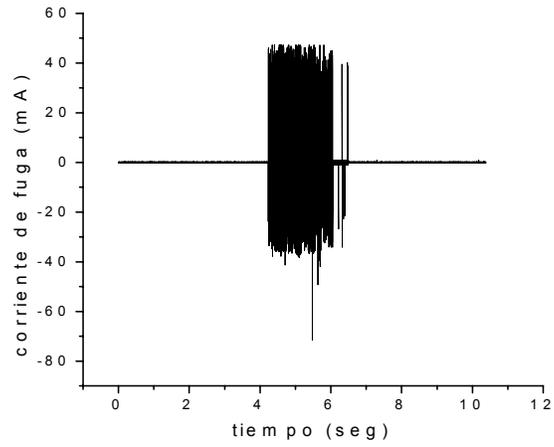


b)

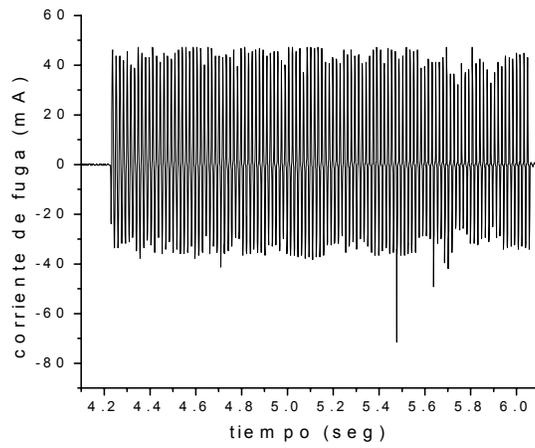


c)

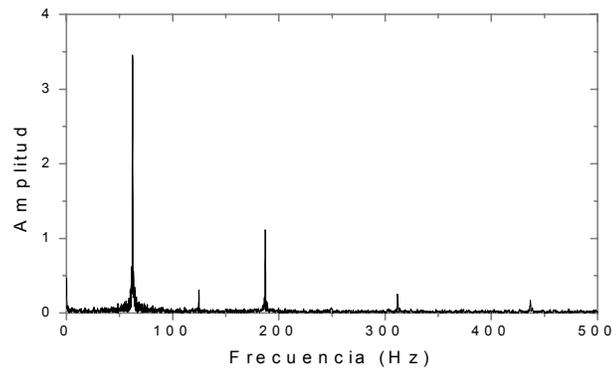
Figura 2.8 a) Flameo en 18.6 kV, a una temperatura de 23°C, una humedad relativa de 68% y una DESD de 0.02 mg/cm²; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia



a)

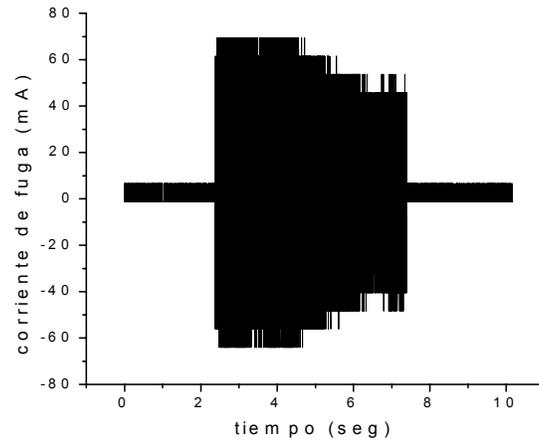


b)

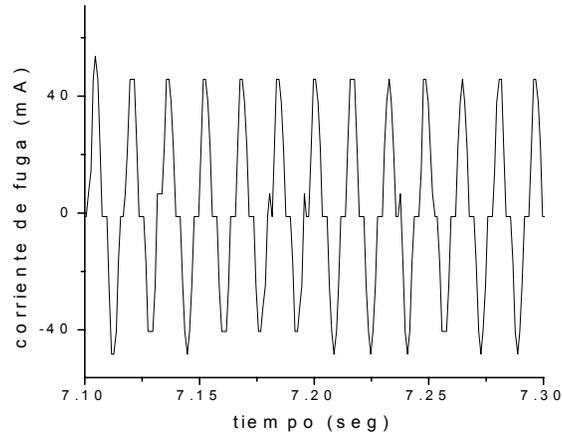


c)

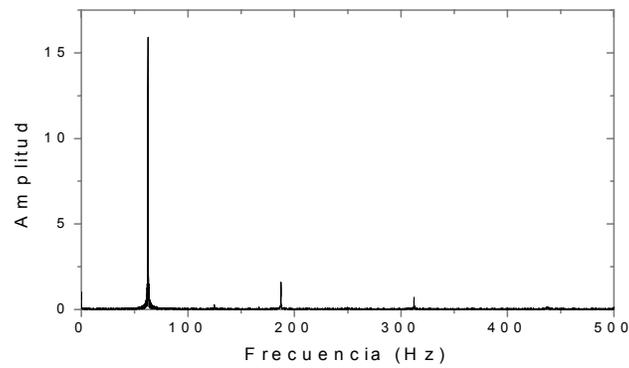
Figura 2.9 a) Flameo en 16.8 kV, a una temperatura de 22°C, una humedad relativa de 79% y una DESD de 0.02 mg/cm²; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia



a)



b)



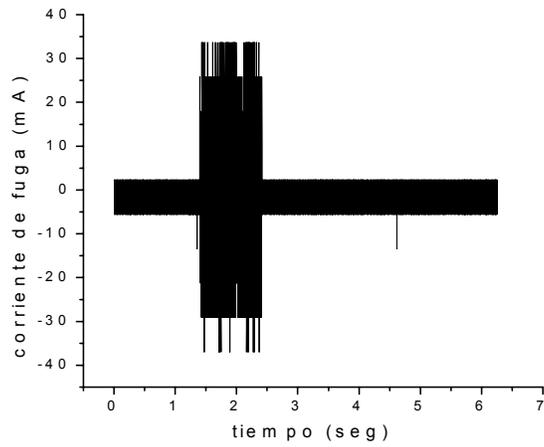
c)

Figura 2.10 a) Flameo en 15.1 kV, a una temperatura de 20°C, una humedad relativa de 86% y una DESD de 0.02 mg/cm²; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia

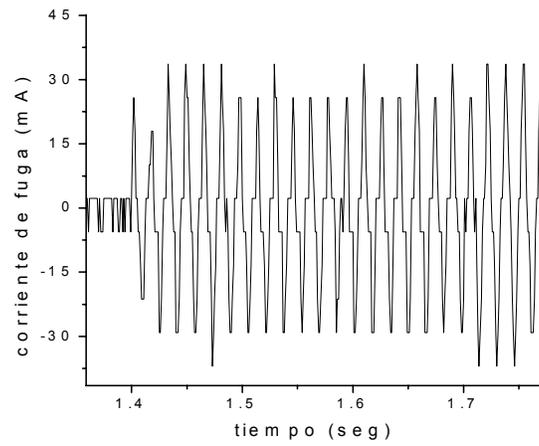
Las gráficas de las figuras 2.7, 2.8, 2.9 y 2.10 corresponden a las pruebas para una contaminación ligera. En 56% de humedad relativa, la corriente de fuga se mantuvo entre 20-30 mA y la tensión de flameo fue de 22.6 kV. En 68% la corriente aumento a valores comprendidos entre 20-40 mA, aunque se alcanzaron picos de mayor magnitud, y la tensión disminuyó un 17.6% del valor obtenido previamente, llegando a los 18.6 kV. Cuando se probó el aislador con 79% de humedad, la tensión de flameo fue de 16.8 kV, decreciendo un 9.6%. La corriente se mantuvo en un intervalo de entre 40-50 mA, y se presentó un pico de 70 mA. Finalmente, en 86% la corriente estuvo entre 40-70 mA, y la tensión disminuyo 10.11%, siendo de 15.1 kV. Se observó que a medida que se incrementó la humedad, la tensión de flameo tendió a decrecer, y las corrientes de fuga aumentaron. Esto concuerda con lo reportado en la literatura [27].

Las gráficas de las figuras 2.11, 2.12, 2.13 y 2.14 corresponden a las pruebas para una contaminación media. Se observó también que la tensión de flameo disminuyó conforme la humedad se incrementó. En 58% de humedad relativa, el aislador flameó en 13.8 kV, siendo la corriente de fuga del orden de 20-35 mA. Cuando la humedad subió a 68%, la tensión disminuyó a 13.1 kV. Esta disminución fue del 5%. El valor de la corriente de fuga fue de 20-40 mA. En 76% de humedad, el flameo se presentó en 11.8 kV, disminuyendo 9.9% del valor obtenido con la humedad anterior. El valor de corriente se mantuvo entre 30-45 mA. Por último, en 90% de humedad, la corriente fue del orden de 40-50 mA y la tensión disminuyó 10.1%, llegando a los 10.6 kV.

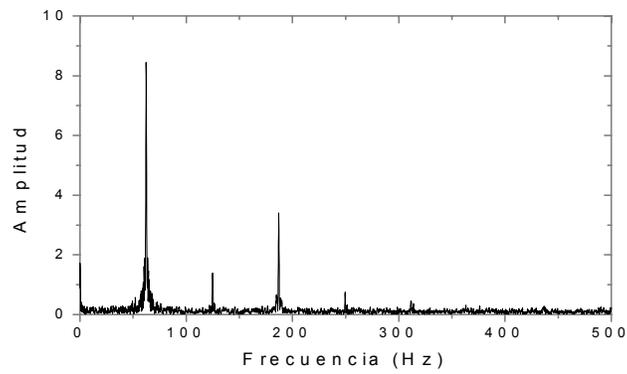
Las gráficas de la corriente de fuga para este nivel de contaminación se muestran a continuación.



a)

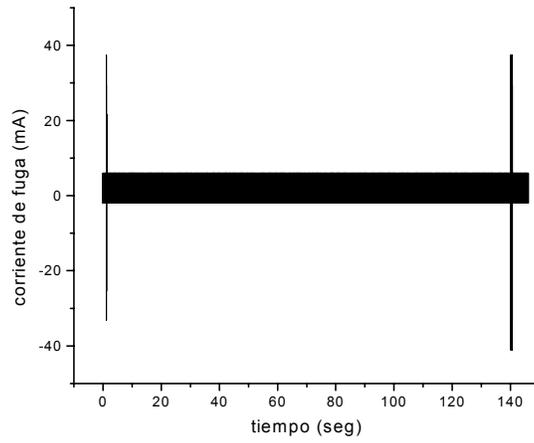


b)

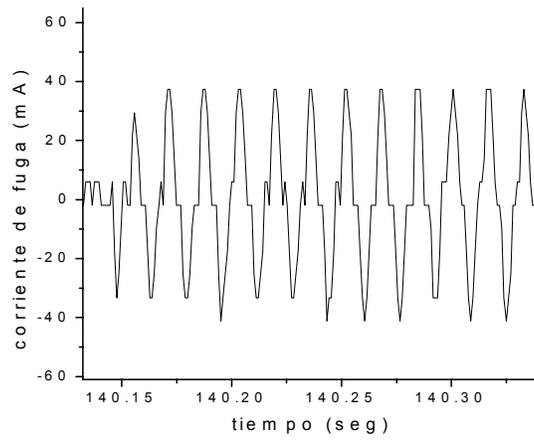


c)

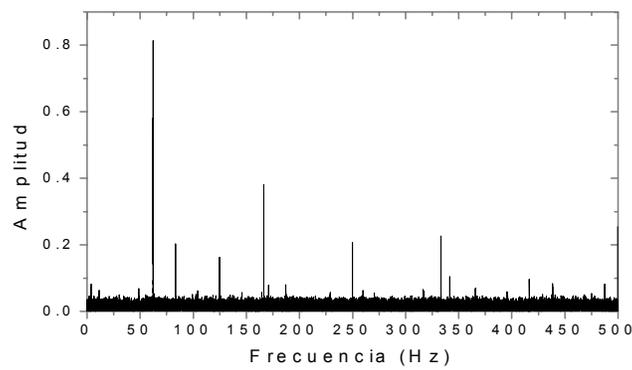
Figura 2.11 a) Flameo en 13.8 kV, a una temperatura de 22°C, una humedad relativa de 58% y una DESD de 0.075 mg/cm²; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia



a)

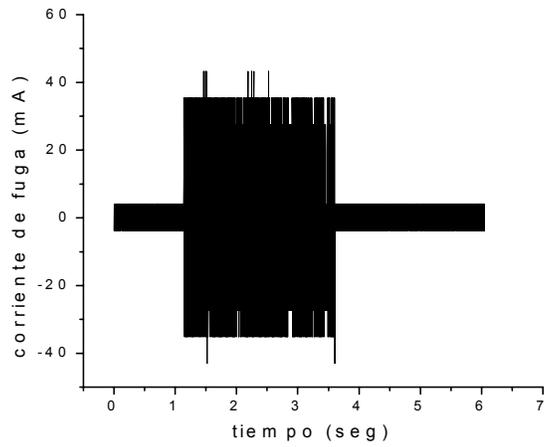


b)

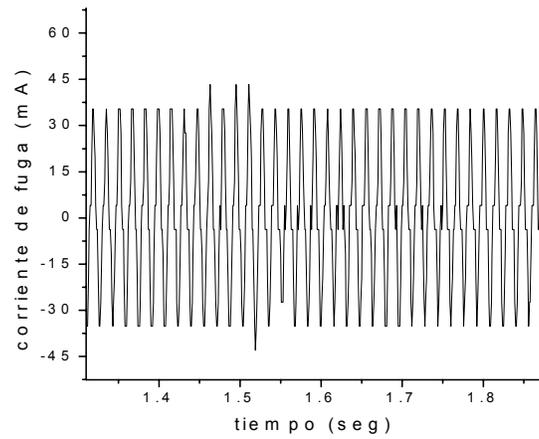


c)

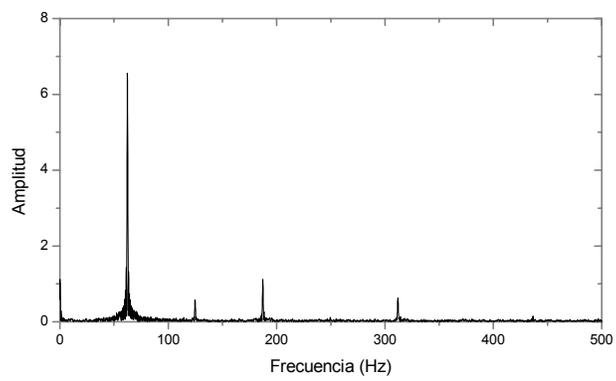
Figura 2.12 a) Flameo en 13.1 kV, a una temperatura de 20°C, una humedad relativa de 68% y una DESD de 0.075 mg/cm²; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia



a)

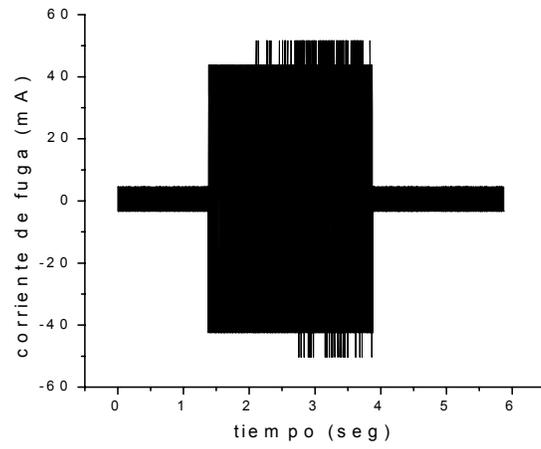


b)

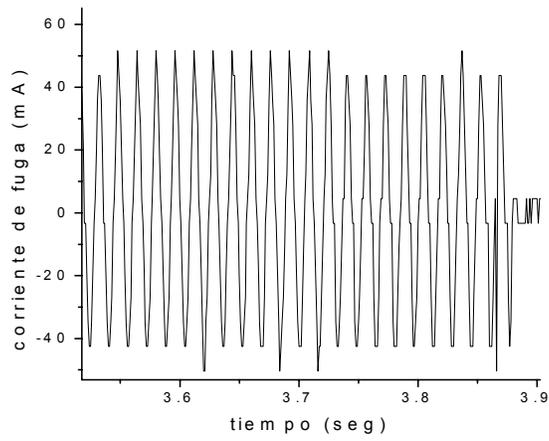


c)

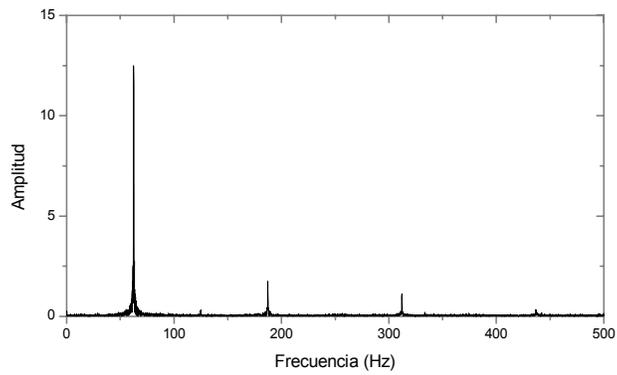
Figura 2.13 a) Flameo en 11.8 kV, a una temperatura de 22°C, una humedad relativa de 76% y una DESD de 0.075 mg/cm²; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia



a)



b)

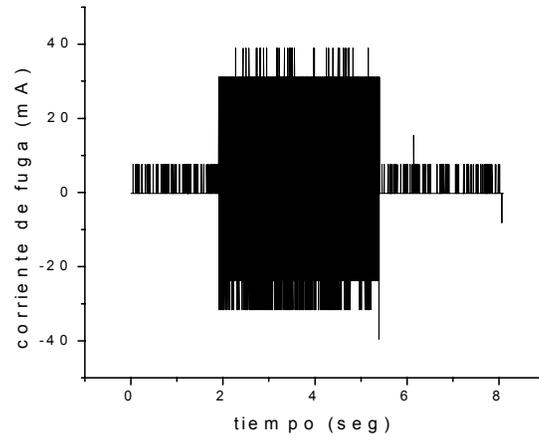


c)

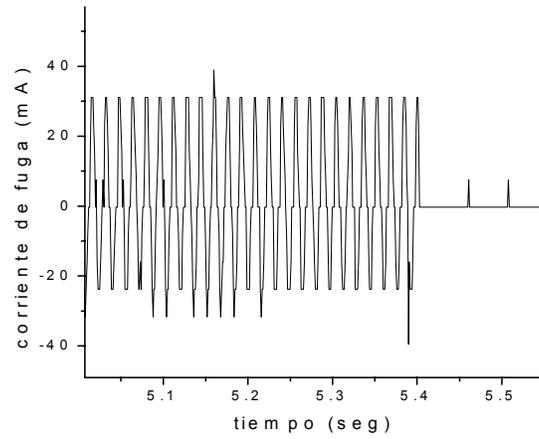
Figura 2.14 a) Flameo en 10.6 kV, a una temperatura de 20°C, una humedad relativa de 90% y una DESD de 0.075 mg/cm²; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia

Para las pruebas con una contaminación pesada y una contaminación muy pesada, se observó que la tensión de flameo prácticamente no cambió y se mantuvo en un valor constante, en los diferentes rangos de humedad. Para la contaminación pesada, la tensión de flameo fue de 9.2, 10.2, 9.2 y 12.3 kV en 54, 68, 79 y 85% de humedad, respectivamente. Como se observa, en este último intervalo de humedad, la tensión de ruptura fue mayor. Para corroborar este valor, la prueba se repitió dos veces más, obteniéndose resultados similares en ambos casos. Esto coincide con lo reportado por Fernando y Gubanski [35]. En su artículo señalan que en presencia de una alta conductividad, generada por una contaminación alta o pesada, y una alta humedad, la tensión de flameo tiende a ser irregular. Asimismo, las corrientes de fuga, según las figuras 2.15, 2.16, 2.17 y 2.18 se mantuvieron entre 20-40, 30-40 y 40-45 mA para los tres primeros intervalos de humedad y del orden de 50 mA, con picos cercanos a los 200 mA, para la humedad más alta.

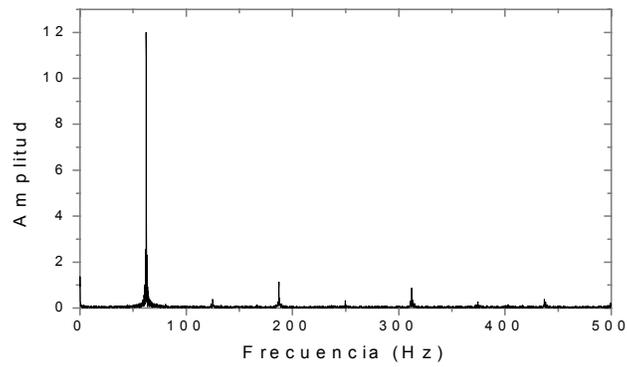
Las gráficas de la corriente de fuga para este nivel de contaminación se muestran a continuación.



a)

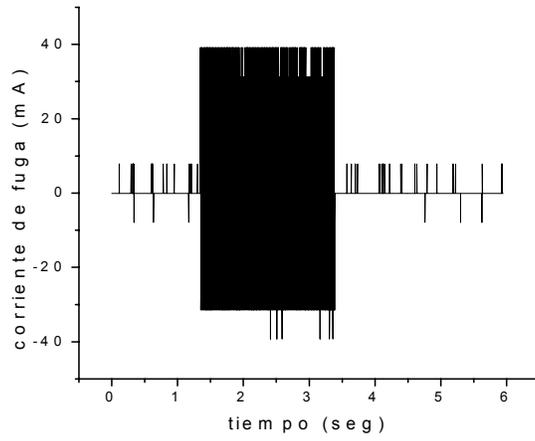


b)

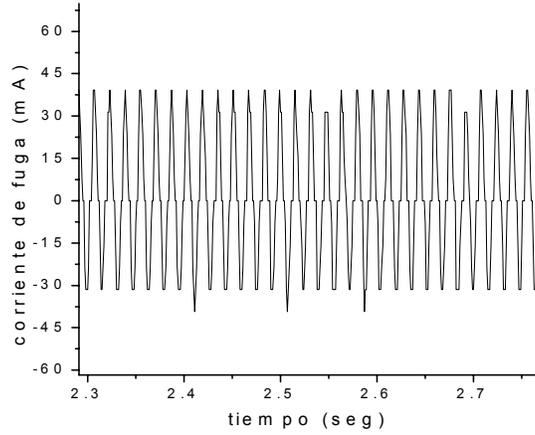


c)

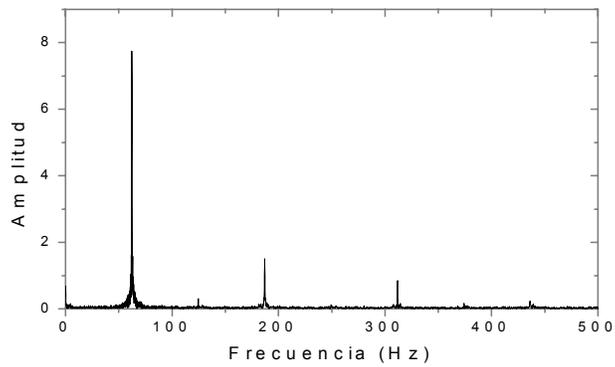
Figura 2.15 a) Flameo en 9.2 kV, a una temperatura de 20°C, una humedad relativa de 54% y una DESD de 0.25 mg/cm²; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia



a)

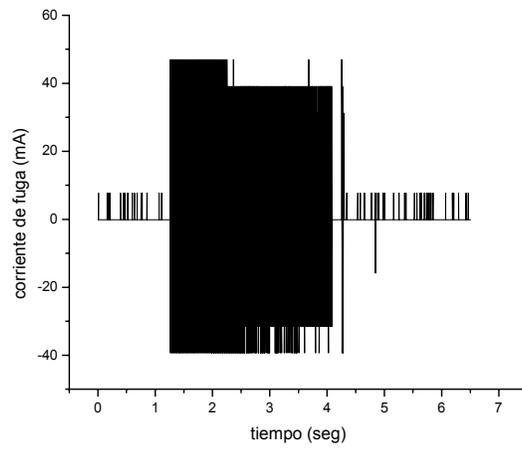


b)

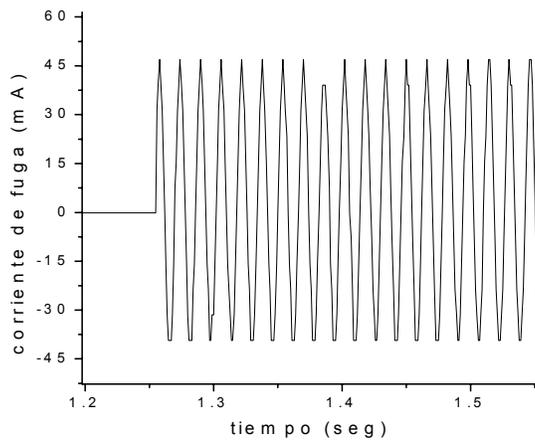


c)

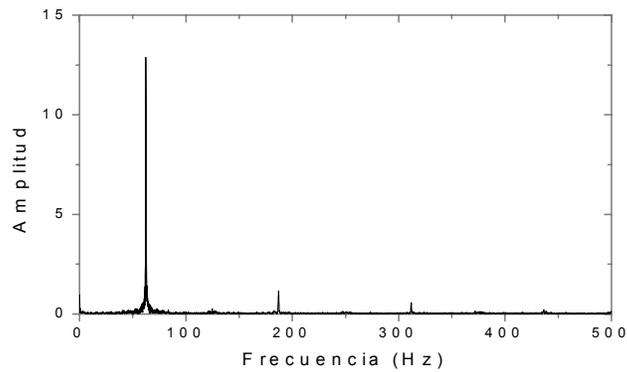
Figura 2.16 a) Flameo en 10.2 kV, a una temperatura de 23°C, una humedad relativa de 68% y una DESD de 0.25 mg/cm²; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia



a)

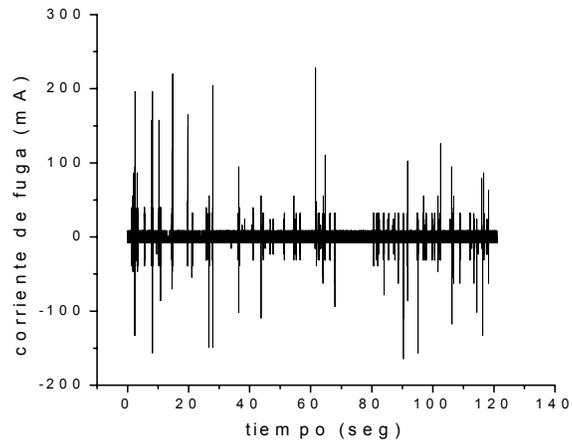


b)

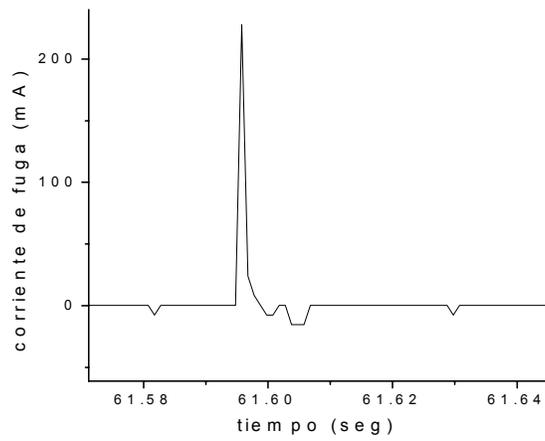


c)

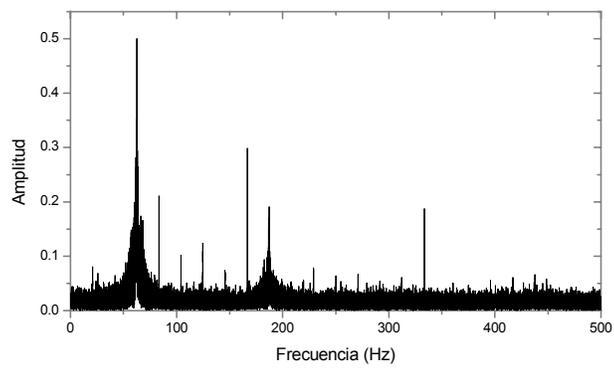
Figura 2.17 a) Flameo en 9.2 kV, a una temperatura de 21°C, una humedad relativa de 79% y una DESD de 0.25 mg/cm²; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia



a)



b)

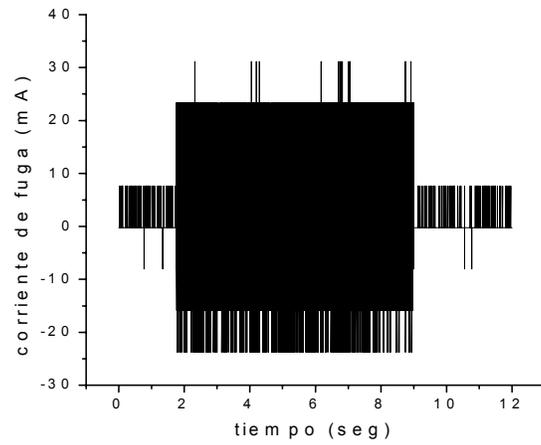


c)

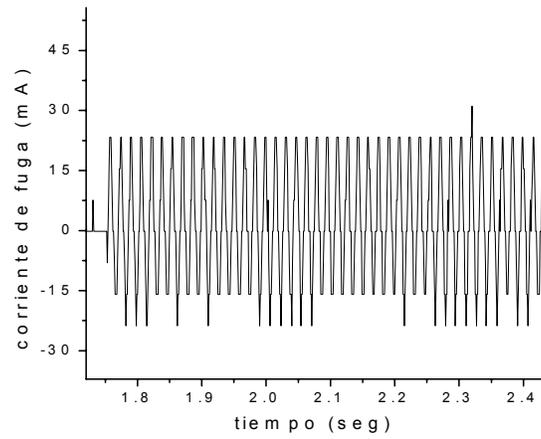
Figura 2.18 a) Flameo en 12.3 kV, a una temperatura de 23°C, una humedad relativa de 85% y una DESD de 0.25 mg/cm²; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia

En la evaluación con una contaminación muy pesada, el flameo del aislador se presentó en 6.3 kV, en los intervalos de humedad de 53, 63, y 75%; sólo en 87%, la tensión fue de 8.5 kV. Nuevamente, y como se mencionó en el párrafo anterior, el comportamiento de la tensión se vuelve irregular cuando se tienen condiciones de alta contaminación y una alta humedad. La corriente de fuga se mantuvo entre 20-35 mA, sólo en 63% se presentó un pico de casi 80 mA, en 75% un pico cercano a los 60 mA y en 87% se presentaron algunos pulsos de corriente entre 60-120 mA. Ver figuras 2.19, 2.20, 2.21 y 2.22.

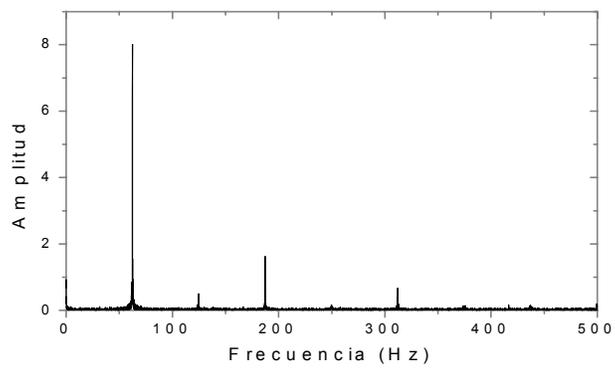
Como se aprecia, la tensión de flameo disminuyó significativamente para los niveles de contaminación pesada y muy pesada. Como el espacio entre los faldones del aislador es menor en comparación con los cerámicos, se identificó como un factor que podría influir en que se presentaran arcos entre los faldones al inicio de las pruebas. Esto aunado a que los niveles de contaminación son altos, provoca un flameo en un valor de tensión bajo. Se ha demostrado de las pruebas de contaminación estándar que la variación en la tensión de flameo con la distancia de fuga es lineal [32]. Sin embargo, cuando ocurren descargas entre los faldones en una etapa temprana de las pruebas, esta relación ya no es válida. La teoría clásica del *flashover* por contaminación asume que las descargas se concatenan a lo largo de la superficie del aislador, hasta que se produce un arco entre los electrodos. Los resultados obtenidos en esta etapa de las pruebas refuerzan esta consideración.



a)

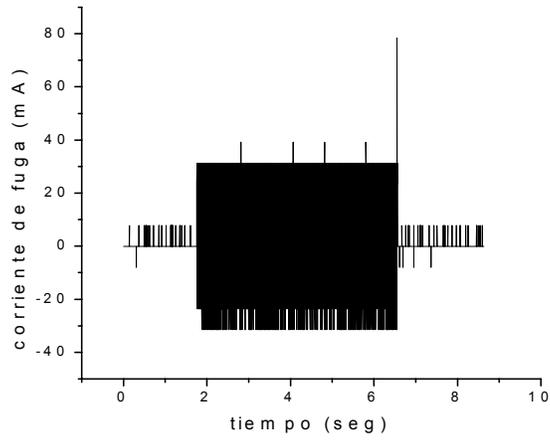


b)

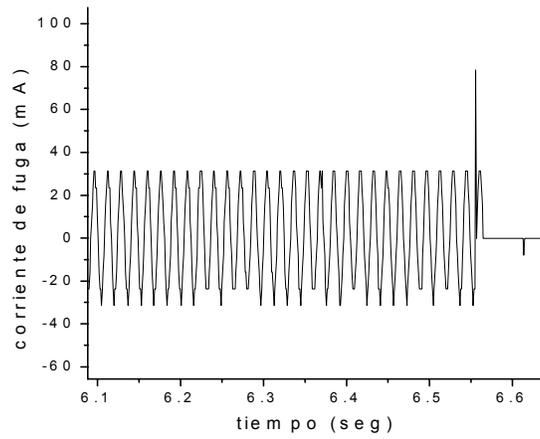


c)

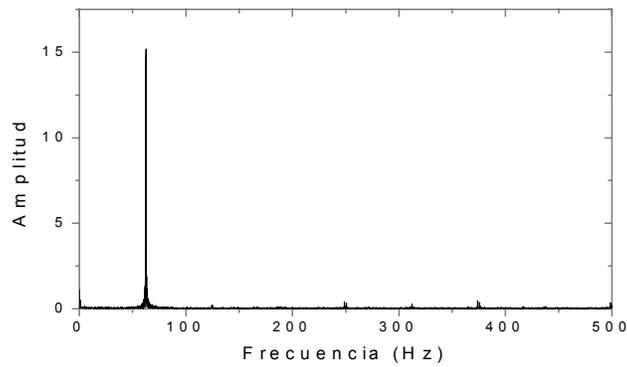
Figura 2.19 a) Flameo en 6.3 kV, a una temperatura de 21°C, una humedad relativa de 53% y una DESD de 0.425 mg/cm²; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia



a)

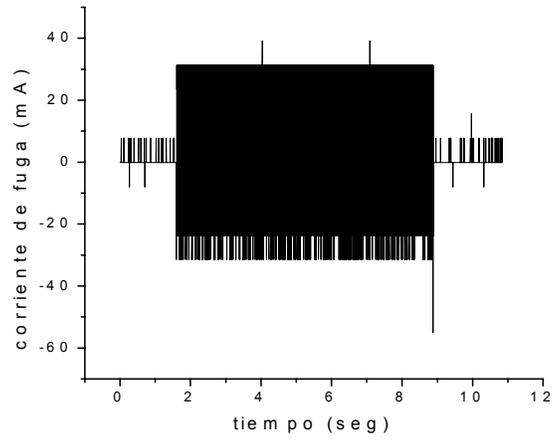


b)

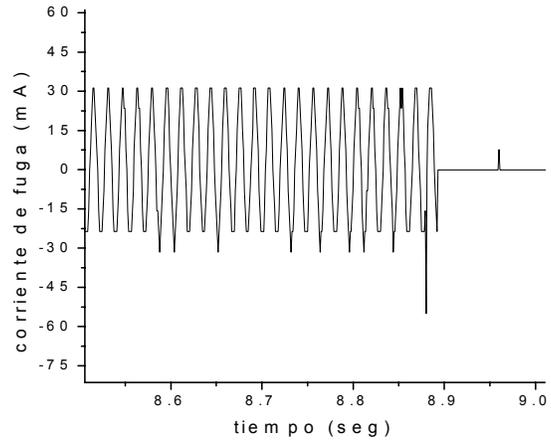


c)

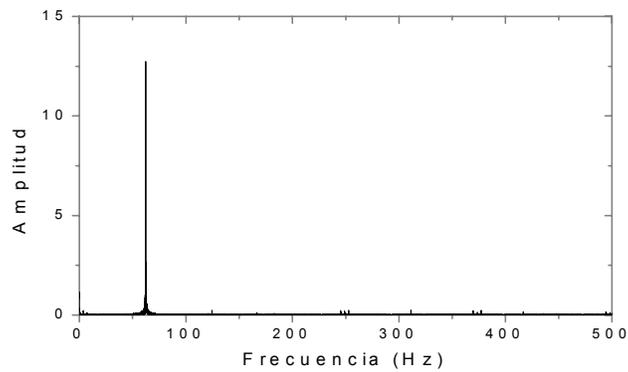
Figura 2.20 a) Flameo en 6.3 kV, a una temperatura de 22°C, una humedad relativa de 63% y una DESD de 0.425 mg/cm²; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia



a)

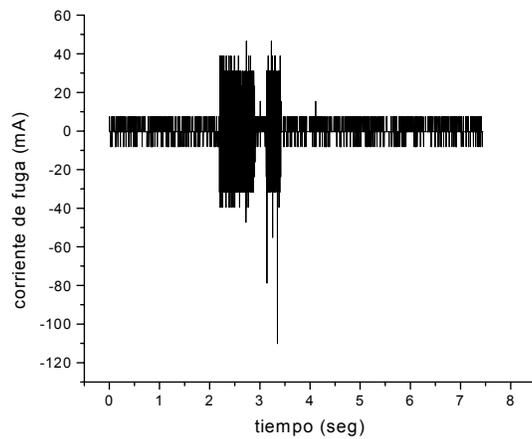


b)

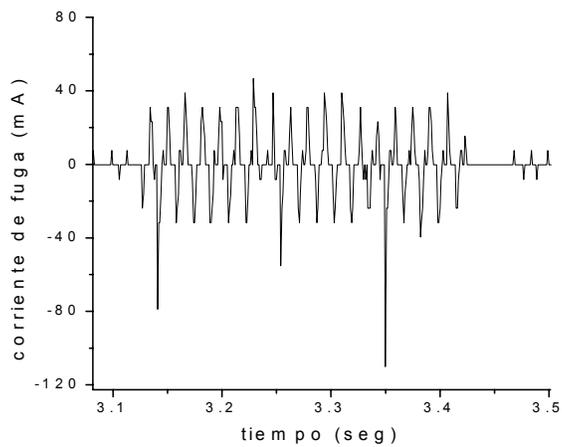


c)

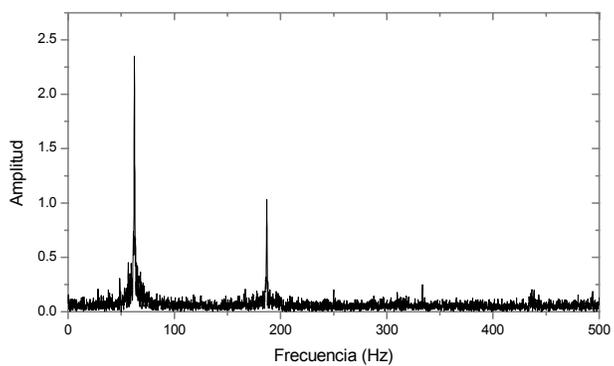
Figura 2.21 a) Flameo en 6.3 kV, a una temperatura de 23°C, una humedad relativa de 75% y una DESD de 0.425 mg/cm²; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia



a)



b)



c)

Figura 2.22 a) Flameo en 8.5 kV, a una temperatura de 22°C, una humedad relativa de 87% y una DESD de 0.425 mg/cm²; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia

2.8 Análisis de resultados

Dado que la capa contaminante tiene un coeficiente térmico negativo, la resistencia superficial decreció lentamente debido al calentamiento por el efecto Joule; simultáneamente el secamiento y la pérdida de la humedad sobre la superficie del aislador incrementaron la resistencia superficial. Estos dos fenómenos buscaron el equilibrio en un nivel bajo de corriente de fuga, lo cual puede apreciarse en los valores obtenidos de las graficas anteriores.

Una observación visual después de las pruebas reveló bandas secas grandes en el núcleo y entre los tres primeros faldones de los aisladores. Se demostró que la hidrofobicidad no fue siempre la misma en diferentes regiones del aislador, con una reducida hidrofobicidad cerca de las terminales y en las partes superiores de los faldones. La pérdida de la hidrofobicidad en estas regiones se atribuyó a la descarga corona dado un intenso campo eléctrico y a una mayor acumulación de contaminantes. El campo eléctrico fue mayor en los finales del aislador que en el medio. El depósito de contaminantes fue mayor también en las terminales que en el medio. Aunque en el preacondicionamiento la contaminación fue distribuida uniformemente sobre la superficie del aislador, al término de la prueba la cantidad de contaminante fue diferente en la parte superior y en la parte inferior de los faldones. También diferentes cantidades de contaminante se alojaron sobre el núcleo del aislador. Esto podría indicar que sólo ciertas regiones en el aislador necesitan ser hidrofílicas y contaminadas para que el flameo ocurra.

En cada prueba se analizó el espectro de las corrientes de fuga en el dominio de la frecuencia, encontrándose distintas etapas en el desarrollo del arco eléctrico. Los armónicos que aparecieron durante esta etapa de las pruebas fueron básicamente el tercero, el cuarto y el quinto, aunque estos dos últimos de magnitud muy pequeña.

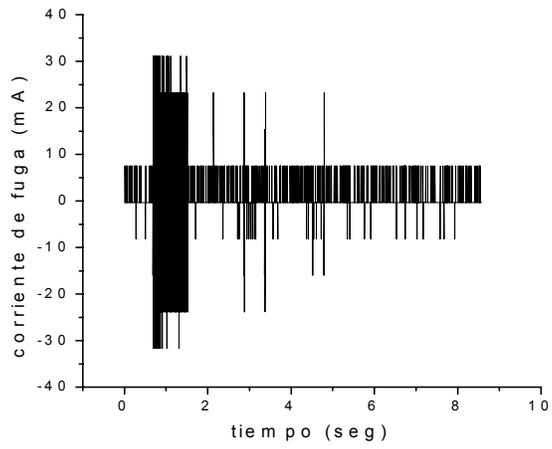
2.9 Efecto del tiempo de recuperación de la hidrofobicidad

Esta fase de las pruebas de laboratorio consistió en evaluar los aisladores, probados previamente, pero permitiendo un tiempo de recuperación de sus propiedades hidrofóbicas. Para las pruebas con contaminación ligera y media, el tiempo de recuperación fue de 384 horas (16 días). Para las pruebas con contaminación pesada y muy pesada fue de 504 horas (21 días). La metodología fue la misma que se empleó anteriormente. Se registró la corriente de fuga y la tensión de flameo y al final de las pruebas, se midió la hidrofobicidad en cada uno de los faldones. Asimismo, se realizó un examen visual de la superficie de los aisladores.

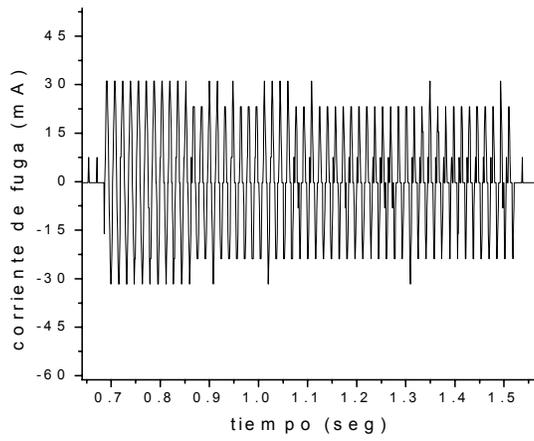
Como en la fase anterior, se registró el espectro de las corrientes para conocer los armónicos que aparecieron durante el flameo del aislador.

Antes de iniciar las pruebas, se midieron los ángulos de contacto en cada uno de los faldones de los aisladores, a fin de corroborar que grado de hidrofobicidad habían recuperado. Los de 384 horas recuperaron parcialmente su hidrofobicidad, esto es, aquellos que habían sido sometidos a niveles de contaminación ligeros y medios. Aquellos que se evaluaron con contaminaciones pesadas, y a los cuales se les permitió 504 horas de recuperación no mostraron un aumento en sus propiedades hidrofóbicas.

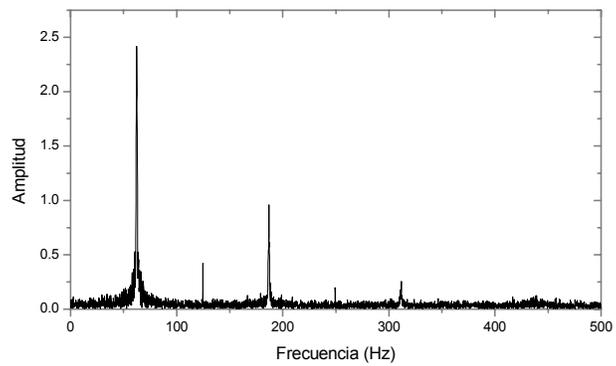
A continuación se muestran las graficas de las corrientes de fuga y los espectros de frecuencia para cada una de las pruebas.



a)

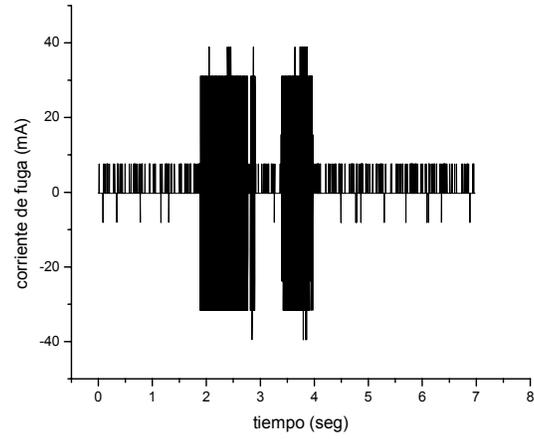


b)

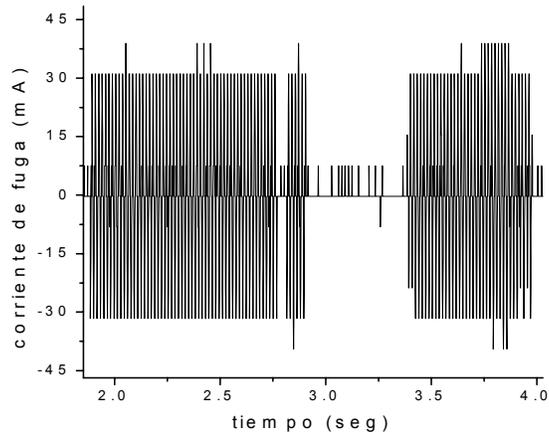


c)

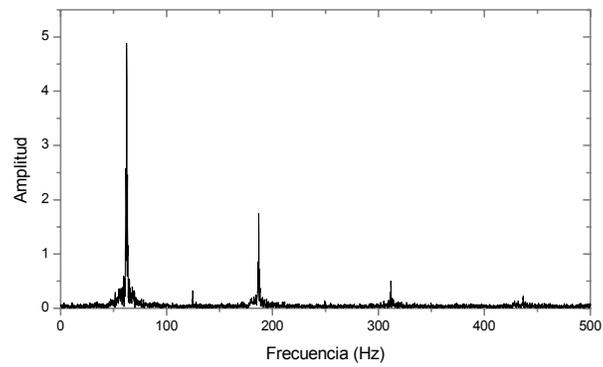
Figura 2.23 a) Flameo en 23 kV, a una temperatura de 22°C, una humedad relativa de 59% y una DESD de 0.02 mg/cm²; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia



a)

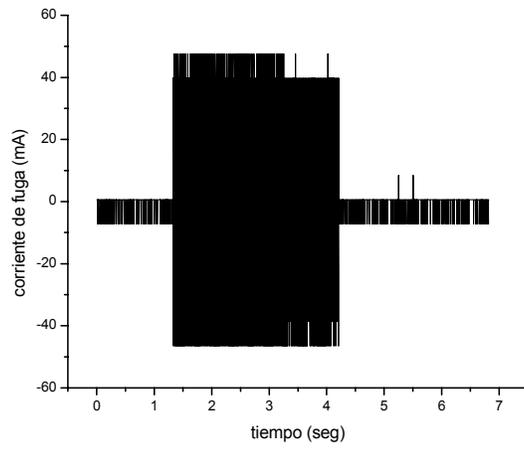


b)

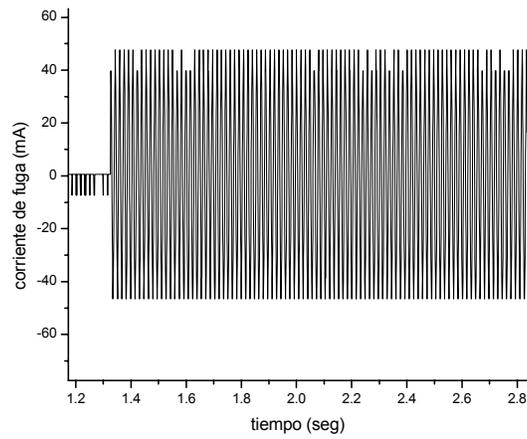


c)

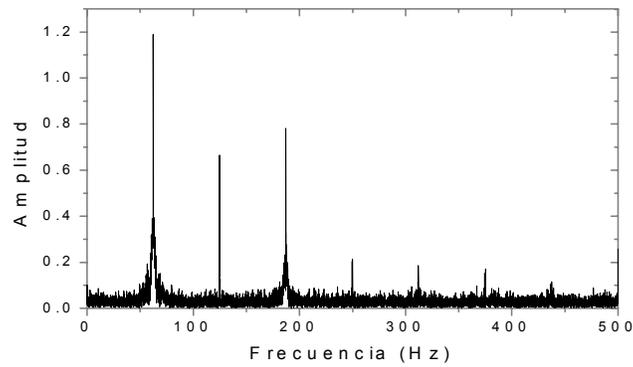
Figura 2.24 a) Flameo en 18.6 kV, a una temperatura de 19°C, una humedad relativa de 67% y una DESD de 0.02 mg/cm²; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia



a)

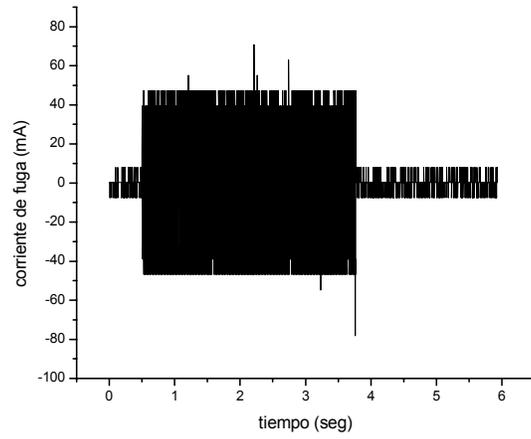


b)

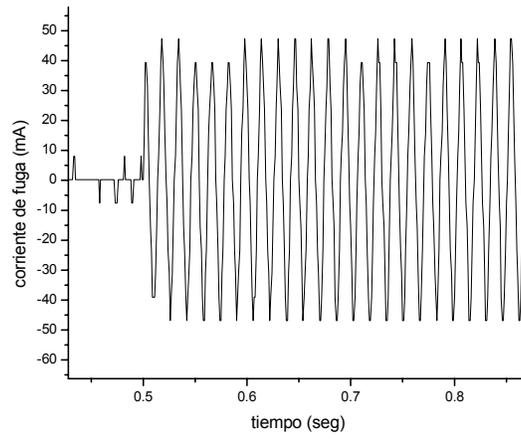


c)

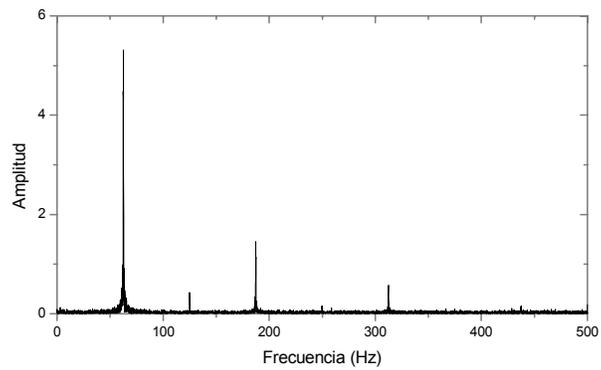
Figura 2.25 a) Flameo en 16.8 kV, a una temperatura de 20°C, una humedad relativa de 80% y una DESD de 0.02 mg/cm²; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia



a)



b)



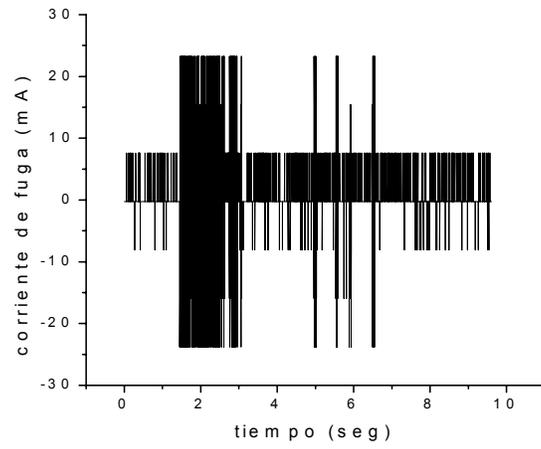
c)

Figura 2.26 a) Flameo en 15.1 kV, a una temperatura de 19°C, una humedad relativa de 90% y una DESD de 0.02 mg/cm²; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia

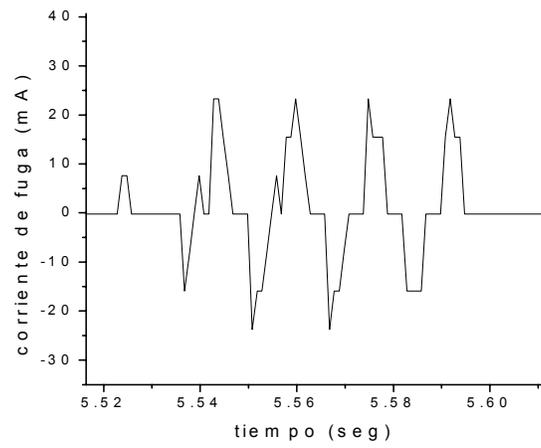
Las gráficas de las figuras 2.23, 2.24, 2.25 y 2.26 corresponden a las pruebas con una contaminación ligera. Se observó que las tensiones de flameo no difieren su valor comparándolas con las obtenidas durante la primera fase de las pruebas. En 59% de humedad relativa, la tensión de flameo fue de 23 kV y la corriente de fuga del orden de 20-30 mA. En 67% la corriente fue del orden de 30-40 mA y la tensión de 18.6 kV, es decir, la misma que se obtuvo para la fase anterior. En 80 y 90% de humedad, la tensión fue de 16.8 y 15.1 kV respectivamente, y la corriente en ambos intervalos se mantuvo entre 40-50 mA.

Las gráficas de las figuras 2.27, 2.28, 2.29 y 2.30 corresponden a las pruebas con una contaminación media. Se observó que en el intervalo de 50-60%, la tensión de flameo disminuyó 23% del valor obtenido previamente, siendo la tensión de 10.6 kV y la corriente del orden de 20-25 mA. Cuando el aislador se sometió a una humedad del 60-70% la tensión de flameo disminuyó un 26%, llegando a los 9.6 kV. La corriente se mantuvo entre 20-30 mA. En la prueba de 70-80% la tensión fue de 8.6 kV, decreciendo un 27% y la corriente fue de 30-35 mA. Finalmente, durante la prueba en el intervalo de 80-90%, la tensión disminuyó un 26% (7.8 kV) del valor reportado anteriormente. La corriente se mantuvo entre 30-40 mA.

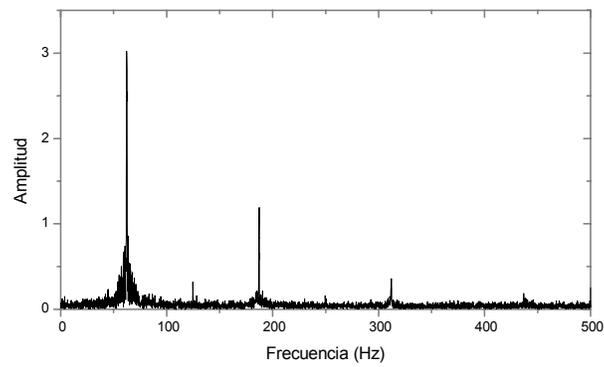
A continuación se muestran las gráficas de la corriente de fuga registradas para este nivel de contaminación.



a)

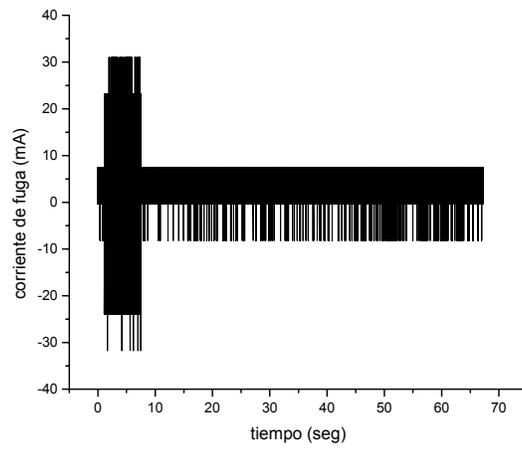


b)

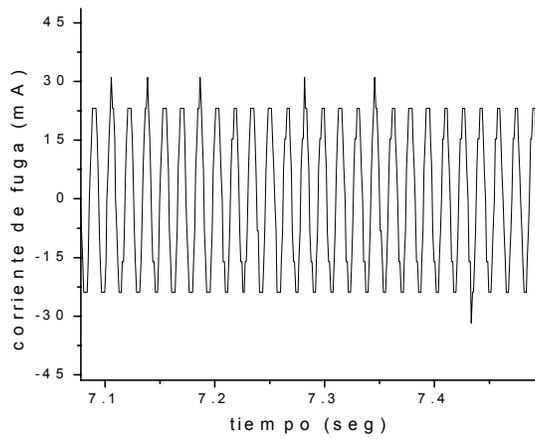


c)

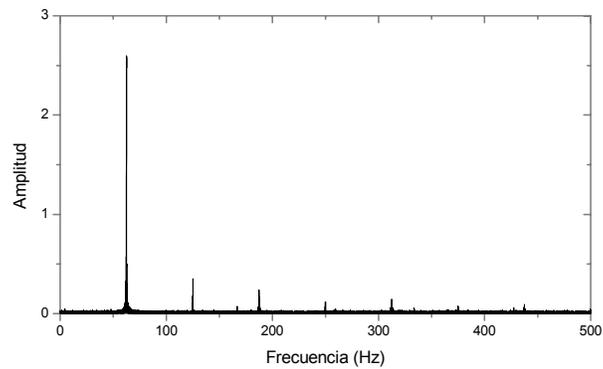
Figura 2.27 a) Flameo en 10.6 kV, a una temperatura de 19°C, una humedad relativa de 59% y una DESD de 0.075 mg/cm²; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia



a)

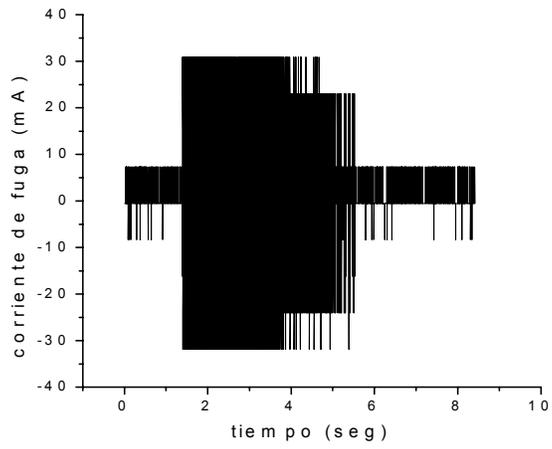


b)

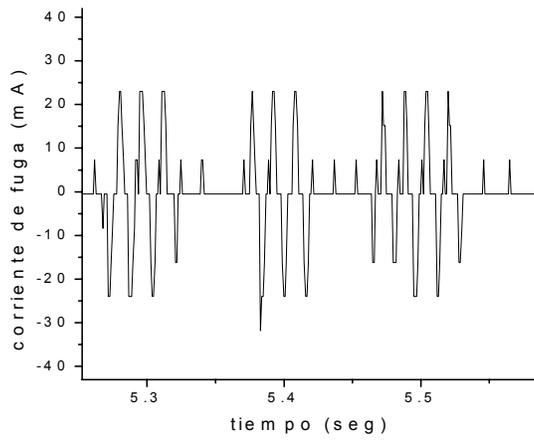


c)

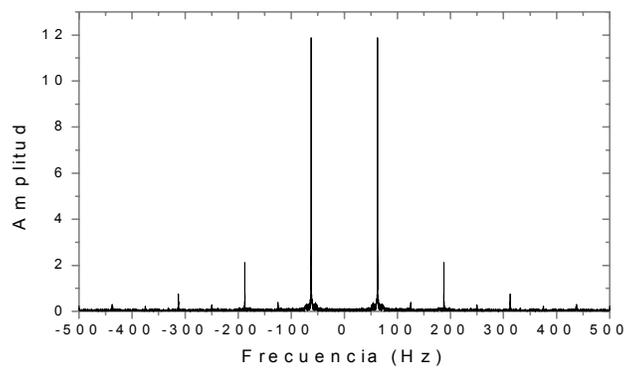
Figura 2.28 a) Flameo en 9.6 kV, a una temperatura de 21°C, una humedad relativa de 66% y una DESD de 0.075 mg/cm²; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia



a)

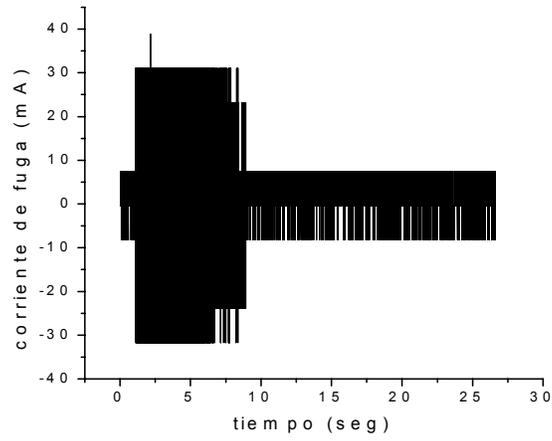


b)

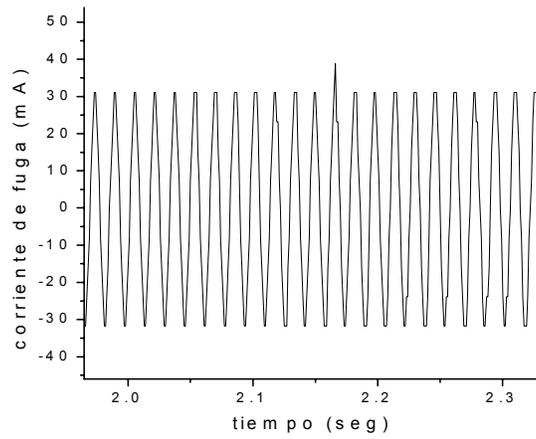


c)

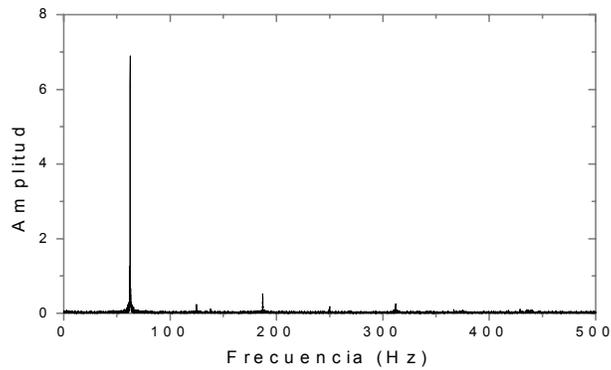
Figura 2.29 a) Flameo en 8.6 kV, a una temperatura de 20°C, una humedad relativa de 78% y una DESD de 0.075 mg/cm²; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia



a)



b)

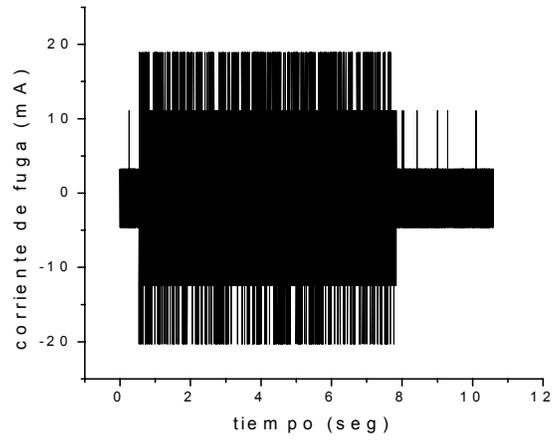


c)

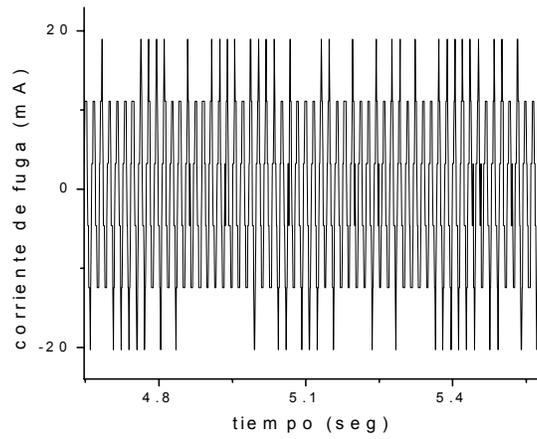
Figura 2.30 a) Flameo en 7.8 kV, a una temperatura de 19°C, una humedad relativa de 89% y una DESD de 0.075 mg/cm²; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia

Cuando el aislador se sometió a una contaminación pesada y una humedad relativa del 54%, la tensión de flameo decreció un 34% del valor registrado previamente. La tensión fue de 6 kV y la corriente del orden de 10-20 mA, según se ilustra en la figura 2.31. Cuando la humedad subió a 65%, la corriente se mantuvo entre 15-25 mA y la tensión registrada fue de 5.4 kV, cayendo un 47%. Ver figura 2.32. Con una humedad de 75%, la tensión cayó de 9.2 kV a 5.4 kV, siendo este decrecimiento del 41%. El nivel de corriente, según la gráfica de la figura 2.33, fue del orden de 20-25 mA. Después de realizada esta prueba se procedió a la evaluación del aislador en un intervalo de humedad comprendido entre 80-90% de humedad relativa. Cuando la humedad llegó a 83%, la corriente tuvo una magnitud de entre 20-35 mA, según se ilustra en la figura 2.34, y la tensión de flameo aumentó. De 5.4 kV obtenidos con 75%, se registró un valor de 8.3 kV. Para corroborar este valor, la prueba se repitió dos veces más, obteniéndose el mismo valor en ambos casos. Esto coincide con lo reportado anteriormente [35].

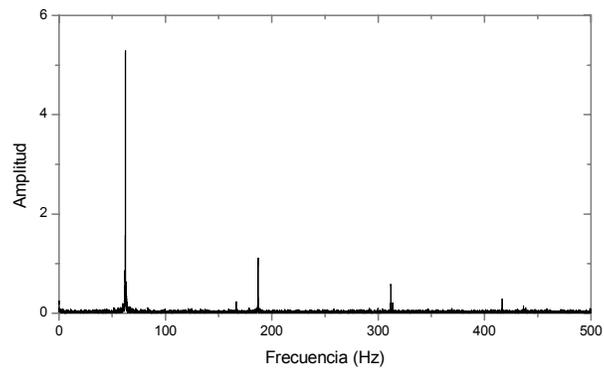
Las gráficas de la corriente de fuga registradas para este nivel de contaminación se muestran a continuación.



a)

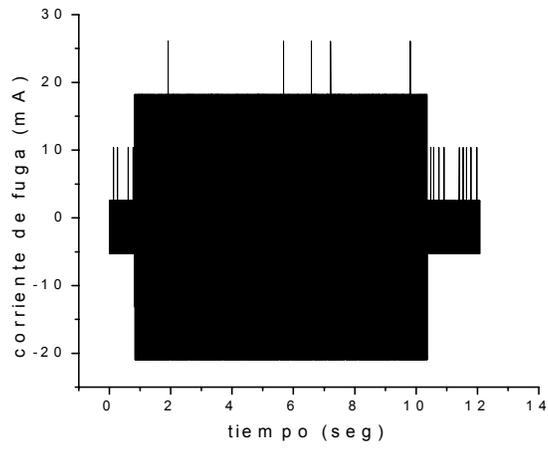


b)

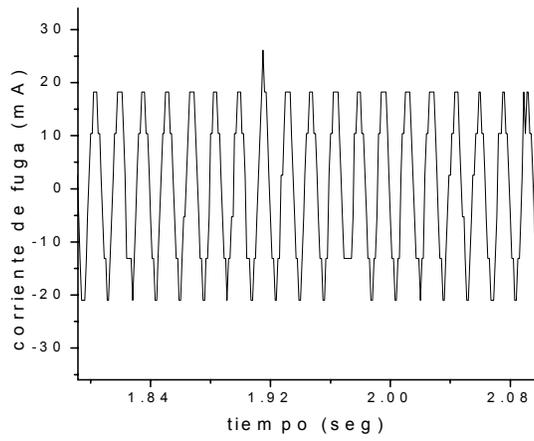


c)

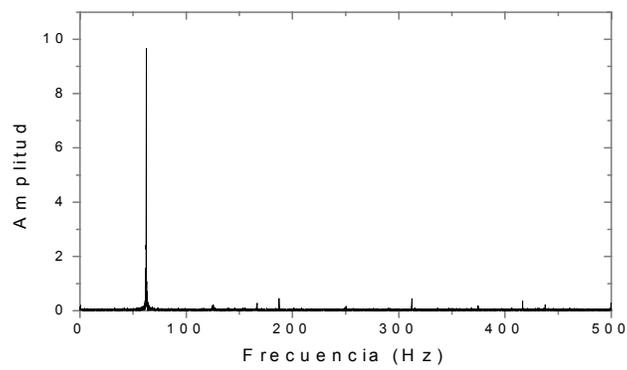
Figura 2.31 a) Flameo en 6 kV, a una temperatura de 19°C, una humedad relativa de 54% y una DESD de 0.25 mg/cm²; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia



a)

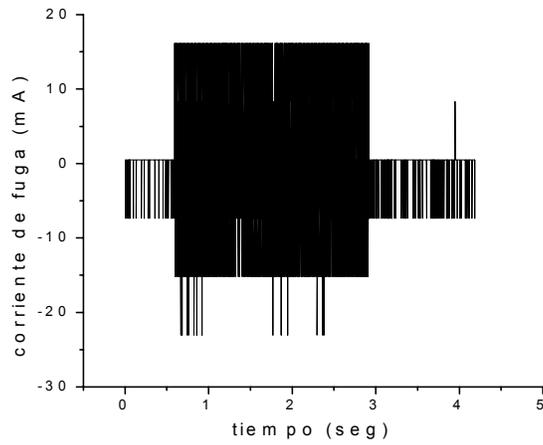


b)

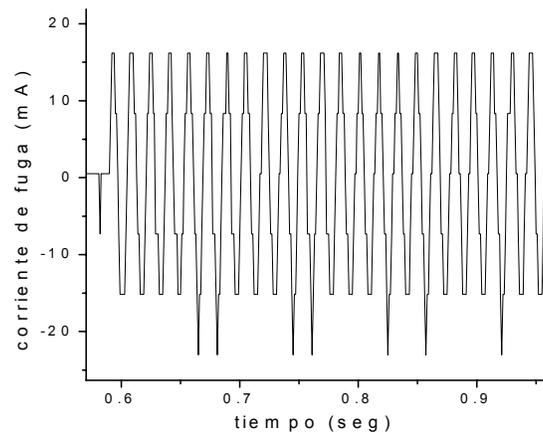


c)

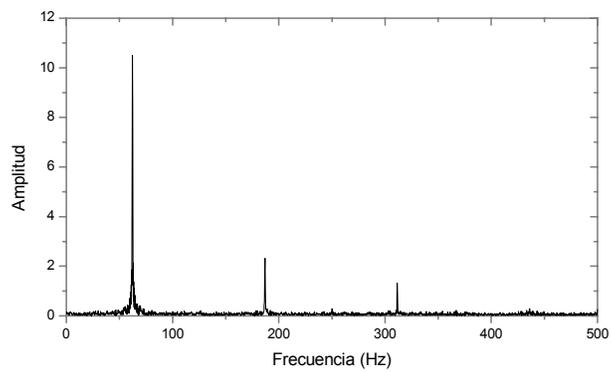
Figura 2.32 a) Flameo en 5.4 kV, a una temperatura de 19°C, una humedad relativa de 65% y una DESD de 0.25 mg/cm²; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia



a)

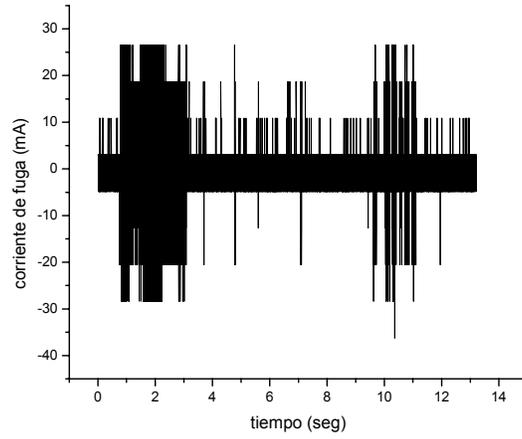


b)

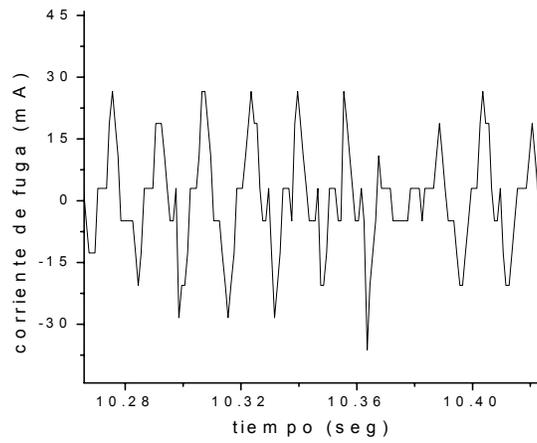


c)

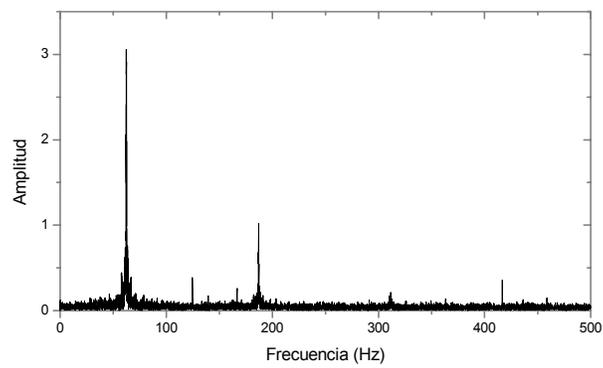
Figura 2.33 a) Flameo en 5.4 kV, a una temperatura de 19°C, una humedad relativa de 75% y una DESD de 0.25 mg/cm²; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia



a)



b)

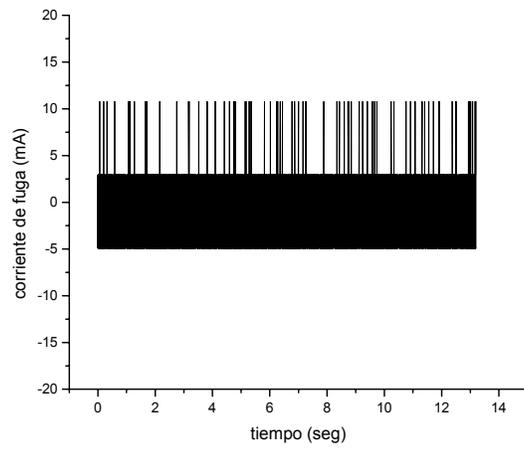


c)

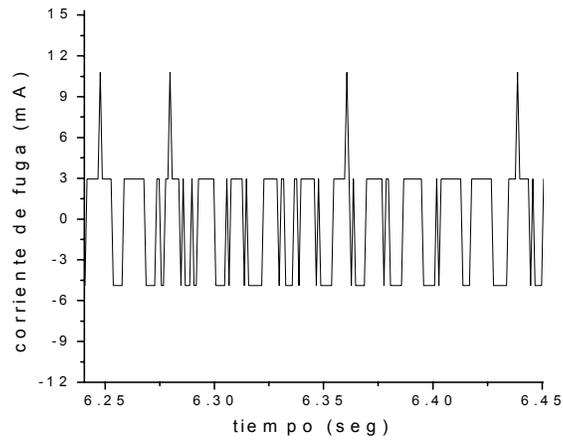
Figura 2.34 a) Flameo en 8.3 kV, a una temperatura de 19°C, una humedad relativa de 83% y una DESD de 0.25 mg/cm²; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia

Para la prueba con una contaminación muy pesada y una humedad del 55%, la tensión de flameo disminuyó en un 11% del valor obtenido en la primera fase, siendo ahora de 5.6 kV y la corriente del orden de 10-15 mA. Ver figura 2.35. En 66% de humedad, la tensión cayó un 19%, registrándose una tensión de 5.1 kV y una corriente de magnitud de entre 10-20 mA, según se aprecia en la figura 2.36. Cuando la humedad estuvo en 80%, la tensión disminuyó un 11%, siendo de 5.6 kV. La corriente de fuga, en la figura 2.37, se mantuvo entre 20-25 mA. Finalmente, en el último intervalo de humedad se registró un aumento en el valor de la tensión. De 5.6 kV registrados previamente con una humedad de 80%, en 88% la tensión llegó a los 7 kV y la corriente fue del orden de 20-30 mA, según se observa en la figura 2.38. Como se ha mencionado, el comportamiento de la tensión se vuelve irregular cuando se tienen condiciones de alta contaminación y una alta humedad.

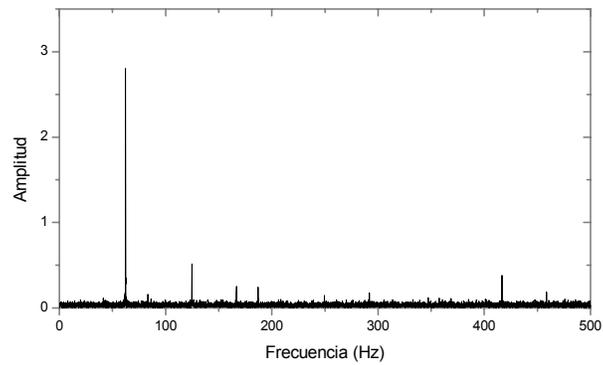
Las gráficas de la corriente de fuga para este nivel de contaminación se muestran a continuación.



a)

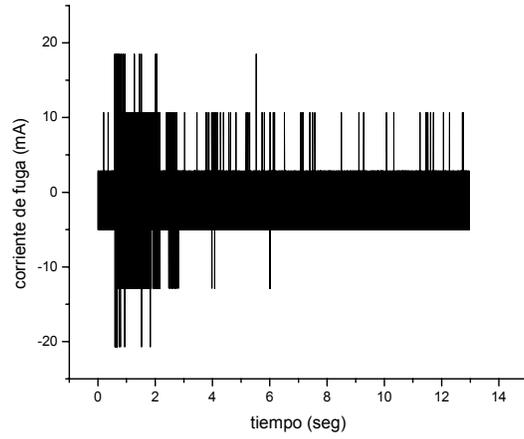


b)

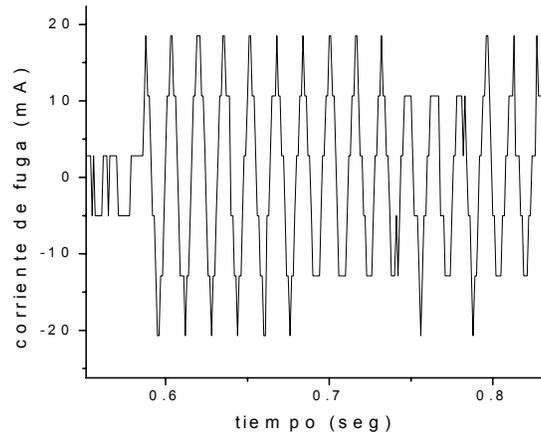


c)

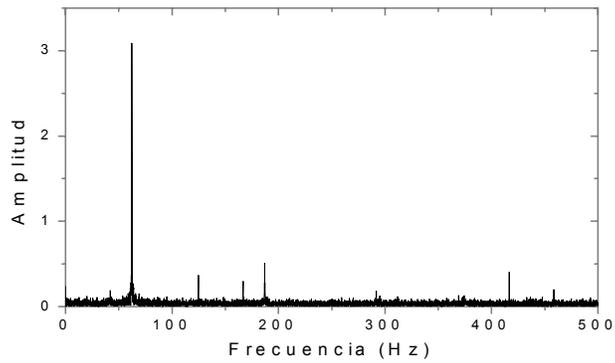
Figura 2.35 a) Flameo en 5.6 kV, a una temperatura de 19°C, una humedad relativa de 55% y una DESD de 0.425 mg/cm²; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia



a)

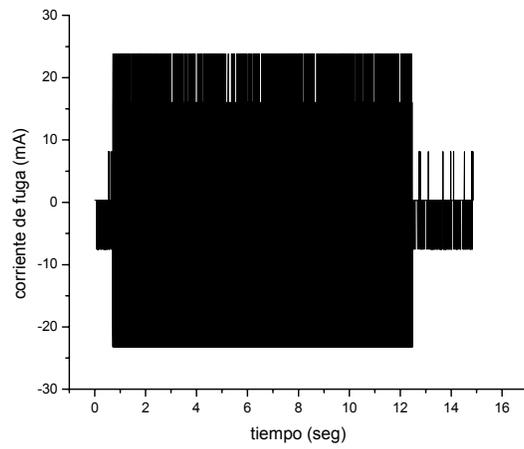


b)

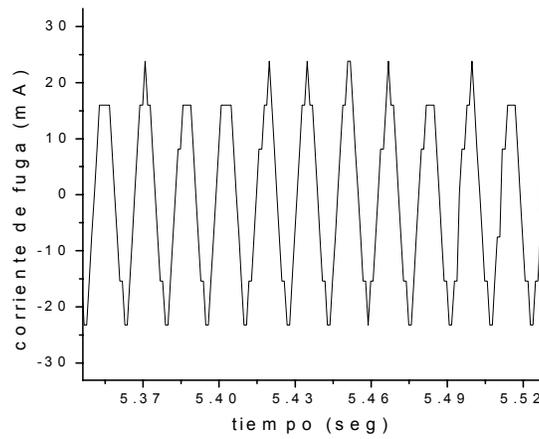


c)

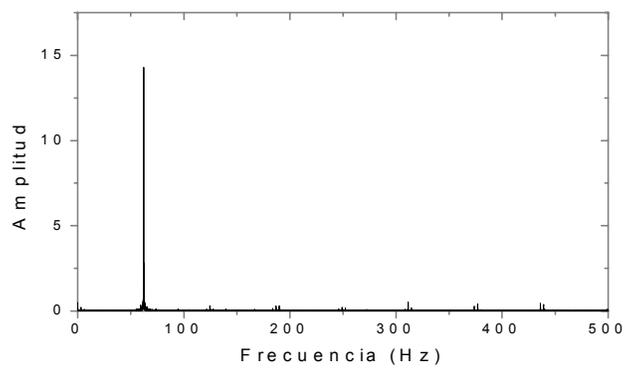
Figura 2.36 a) Flameo en 5.1 kV, a una temperatura de 19°C, una humedad relativa de 66% y una DESD de 0.425 mg/cm²; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia



a)

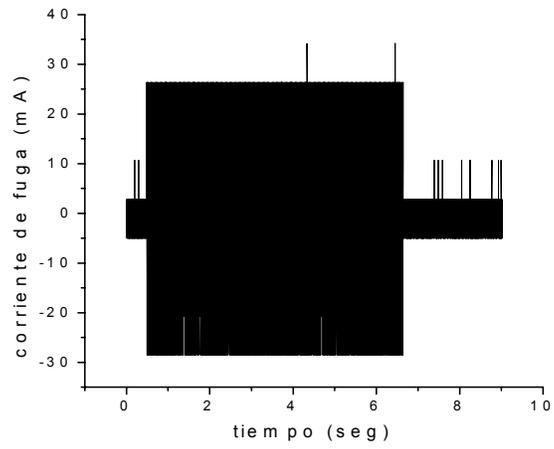


b)

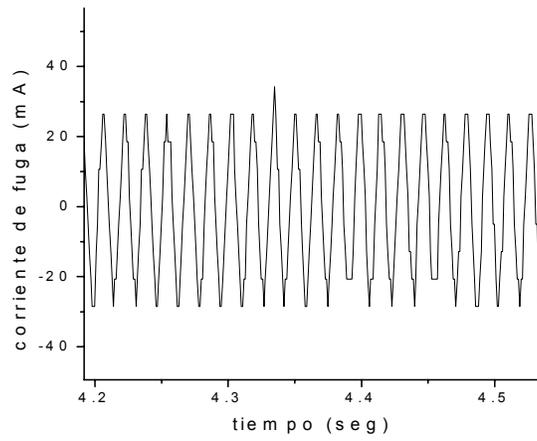


c)

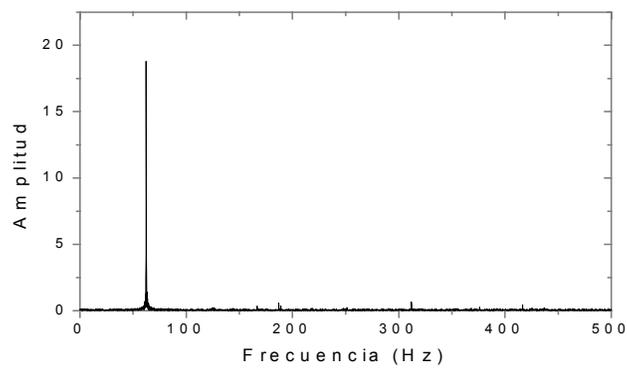
Figura 2.37 a) Flameo en 5.6 kV, a una temperatura de 19°C, una humedad relativa de 80% y una DESD de 0.425 mg/cm²; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia



a)



b)



c)

Figura 2.38 a) Flameo en 7 kV, a una temperatura de 19°C, una humedad relativa de 88% y una DESD de 0.425 mg/cm²; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia

2.10 Análisis de resultados

Para las pruebas con una contaminación ligera, el lapso de recuperación de 16 días, permitió que el aislador recuperara sus propiedades hidrofóbicas, ya que aunque los valores de tensión de flameo fueron prácticamente los mismos, no se registraron tensiones menores. Un análisis de la hidrofobicidad reveló que el aislador recuperó parcialmente su hidrofobicidad, en comparación con la obtenida al final de la primera evaluación. No ocurrió lo mismo para la prueba con contaminación media, ya que la hidrofobicidad se vio reducida al final de las pruebas. En la evaluación con la contaminación pesada y muy pesada, la hidrofobicidad se vio drásticamente reducida. Esto trajo como consecuencia que los valores de tensión de flameo se redujeran significativamente.

El examen visual de los aisladores al final de las pruebas mostró la parte superior de los dos primeros dos faldones secos completamente. La mayor parte del núcleo se encontró seco, entre los primeros tres faldones. Al llevar a cabo las mediciones de hidrofobicidad, en estas partes el grado de hidrofobicidad fue muy bajo.

El armónico que apareció con mayor frecuencia durante el flameo, fue el tercero, y en algunos casos el cuarto y el quinto, siendo estos de magnitud pequeña.

Las gráficas de la figuras 2.39 y 2.40 muestran, de manera resumida, las tensiones de flameo para los distintos niveles de contaminación, en los diferentes rangos de humedad.

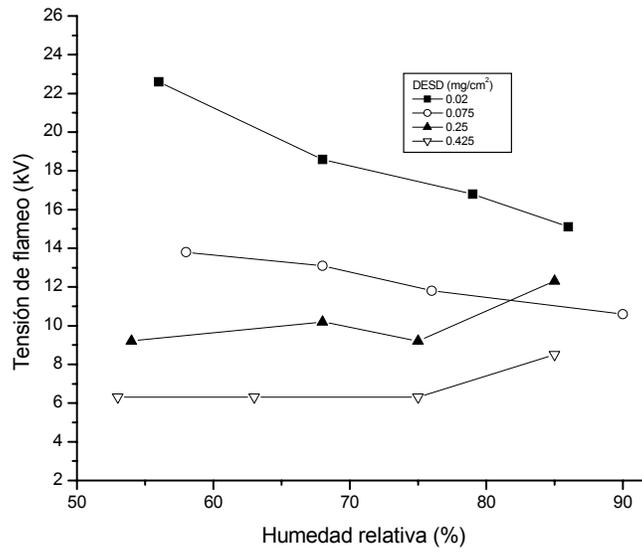


Figura 2.39 Tensión de flameo VS humedad relativa. Pruebas iniciales

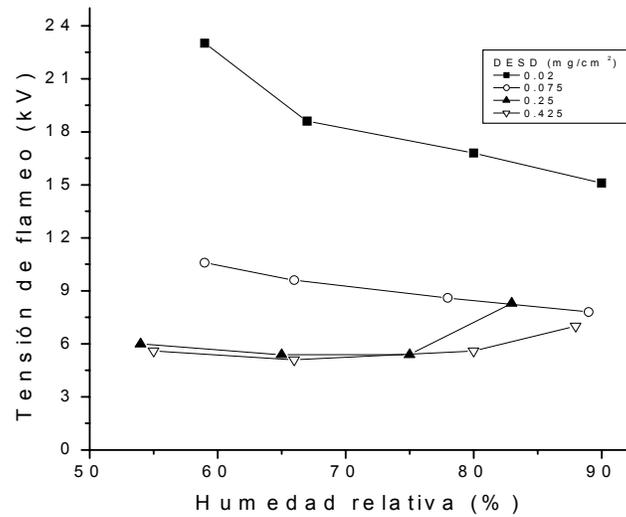


Figura 2.40 Tensión de flameo VS humedad relativa. Influencia del tiempo de recuperación

Las magnitudes de las corrientes de fuga se muestran, de manera resumida, en las figuras 2.41 y 2.42.

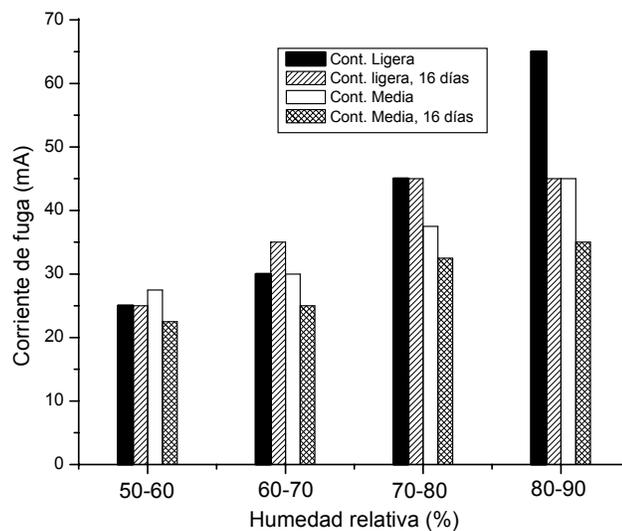


Figura 2.41 Corrientes de fuga registradas para una contaminación ligera y una contaminación media

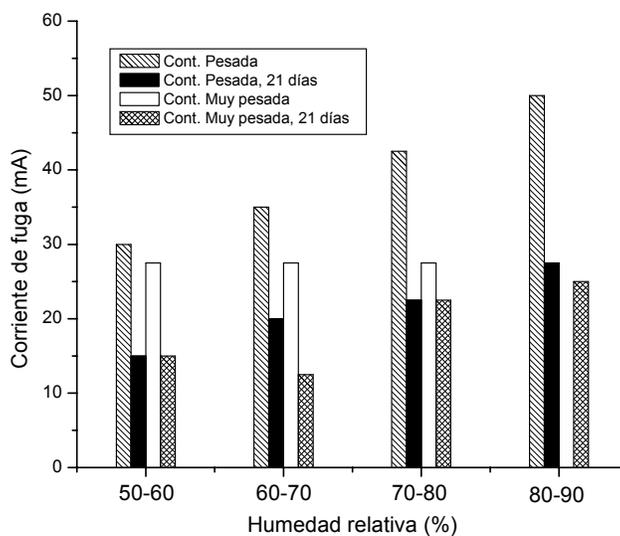


Figura 2.42 Corrientes de fuga registradas para una contaminación pesada y una contaminación muy pesada

CAPÍTULO 3

INFLUENCIA DE LA DENSIDAD RELATIVA DEL AIRE Y LA HIDROFOBICIDAD SUPERFICIAL SOBRE LAS TENSIONES DE FLAMEO

3.1 Introducción

El desempeño de los aisladores para uso externo en las líneas de distribución, se ve afectada por las condiciones atmosféricas prevalecientes en el lugar de operación. La temperatura del medio ambiente así como la humedad en éste reduce la tensión de aguante de los aisladores mencionados, ya sea en forma individual o combinada.

Sin embargo, la mayor afectación de la tensión de flameo está dada por la variación de la densidad relativa del aire en el lugar de instalación. La disminución de la densidad relativa del aire se debe a los cambios de temperatura que ocurren a través de las diferentes estaciones del año o a las variaciones entre el día y la noche. Esta disminución es de orden menor y se hace más evidente conforme se incrementa la altitud sobre el nivel del mar [37].

El cambio en la presión atmosférica está asociado con la altura sobre el nivel del mar. A mayor altitud habrá menor presión y consecuentemente una menor tensión de flameo. Trabajo experimental [6-9,11,12] demuestra que conforme la presión decrece, las tensiones de flameo tienden a disminuir. Si un aislador se encuentra operando al nivel del mar, la tensión de ruptura será mayor si el mismo aislador se encuentra a una altitud por encima de los 0 msnm y viceversa.

Actualmente se manejan dos tipos de correcciones por condiciones atmosféricas [38,39]. Dichas correcciones toman en cuenta de manera integral la temperatura, la presión atmosférica, la humedad, la distancia del arco del aislamiento y el nivel de tensión que se va a emplear.

Estos métodos de corrección determinan de manera exacta que factor de corrección usar y son ampliamente usados en los laboratorios de prueba.

En campo se puede determinar de manera aproximada cual es el factor de corrección por densidad relativa del aire, conociendo la altura de la instalación sobre el nivel del mar, sin tomar en cuenta la temperatura, por medio de la siguiente expresión:

$$K_d = e^{-H/8150} \quad (3.1)$$

Donde,

K_d es el factor de corrección por densidad relativa del aire,

H es la altura de la instalación sobre el nivel del mar

De esta forma se puede conocer cual es la reducción de las características aislantes del aislamiento externo en el lugar donde se desee instalar. Esto ha sido válido para los aisladores cerámicos convencionales, ya sea de vidrio o de porcelana.

Sin embargo, hasta el presente no se cuenta con información que relacione el efecto de la altitud sobre las tensiones disruptivas en aisladores no cerámicos, por lo que en esta investigación se realizaron pruebas experimentales con aisladores de EPDM, contaminados con diferentes niveles de contaminación y con niebla limpia, en un laboratorio situado a una gran altitud.

3.2 Efecto de la densidad relativa del aire sobre las tensiones de flameo

Con el propósito de analizar la influencia de la altitud sobre las tensiones de flameo en aisladores poliméricos contaminados, a continuación se muestra una comparación entre los resultados obtenidos en las pruebas realizadas en la Cd. de

México situada a 2240 msnm ($\delta=0.77$), y los valores reportados por Montesinos et al.[29] cuyas pruebas se realizaron en el Instituto de Investigaciones eléctricas (IIE) en la ciudad de Cuernavaca, Morelos situada a 1234 msnm, siendo la densidad relativa del aire promedio, δ , de 0.85.

Las pruebas de contaminación en el IIE se realizaron en una cámara de niebla limpia. Los aisladores evaluados fueron de EPDM, clase 15, de iguales características a los evaluados en el laboratorio del IPN, y de vidrio con recubrimiento de silicón RTV. Las mezclas contaminantes fueron las siguientes: 40 gr de caolín y 30 gr de NaCl por un litro de agua, 40 gr de caolín y 320 gr de NaCl por un litro de agua, 100 gr de caolín y 50 gr de NaCl por un litro de agua y de 600 gr de caolín, 200 gramos de NaCl y 5 gr de sulfato de calcio por un litro de agua desmineralizada. La medición de la tensión de flameo se realizó de acuerdo al método de Flameo Rápido Controlado, similar al empleado en las pruebas realizadas en la Cd. de México.

Por otro lado, Corona et al. [40] evaluó en el mismo laboratorio del IIE, un aislador híbrido, clase 15, con un perfil de características óptimas para funcionar bajo contaminación, el cual fue el resultado de la evaluación de aisladores con diferente perfil, mediante un programa computacional.

La prueba de este aislador se realizó empleando el método de niebla limpia recomendado en la IEC-507. La mezcla de contaminación fue de 40 gr de caolín y 110 gr de NaCl por un litro de agua desmineralizada. El DESD obtenido para esta mezcla fue de 0.41 mg/cm^2 , correspondiente a un nivel de contaminación muy pesado. La técnica aplicada para determinar la tensión de flameo fue el método de flameo rápido controlado.

En la tabla 1 se presentan los resultados obtenidos en ambos laboratorios.

Tabla 1 Valores de tensión reportados para diferentes altitudes

<i>Tipo de aislador</i>	<i>Mezcla contaminante</i>	<i>DESD</i> <i>(mg/cm²)</i>	<i>Tensión de flameo (kV)</i>
3 STD [29]	40/30	0.07	14.65 *
3 STD [29]	40/320	0.84	7.51 *
4 STD [29]	600/200Y/5	1.54	5.86 *
4 STD SIL [29]	600/200Y/5	1.67	6.22 *
1 EPDM 15 [29]	600/200Y/5	0.76	14.71 *
1 EPDM 15 [29]	100/50	0.30	23.45 *
1 HIB 15 [40]	40/110	0.41	18.5 *
1 EPDM 15	40/320	0.84	7.7 **
1 EPDM 15	600/200Y/5	0.76	5.1 **
1 EPDM 15	100/50	0.30	15.1 **
1 EPDM 15	40/20	0.075	18.2 **
1 EPDM 15	40/160	0.425	13.3 **

STD: estándar de vidrio, SIL: Silicón RTV, HIB: Híbrido

* $\delta = 0.85$

** $\delta = 0.77$

De los resultados mostrados en la tabla anterior se puede deducir lo siguientes: Cuando el nivel de contaminación fue de 0.07 mg/cm^2 , la tensión de flameo registrada en el laboratorio del IPN fue mayor a la obtenida en el laboratorio del IIE, siendo este aumento del 24.23%. Como el aislador evaluado en el IIE fue de vidrio, la tensión de flameo fue menor que con el de EPDM, lo cual corrobora lo reportado en la literatura.

Con la DESD de 0.30 mg/cm^2 , la tensión se redujo significativamente. El valor obtenido fue de 15.1 kV, disminuyendo 35.6% del valor registrado en el IIE.

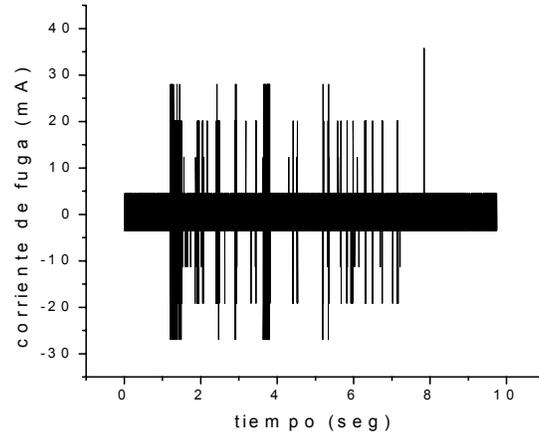
En este caso, los aisladores evaluados en ambos laboratorios fueron de EPDM, por lo que sí se notó una influencia significativa de la altitud.

Para el aislador híbrido, la DESD reportada fue de 0.41 mg/cm^2 . Se realizó la comparación con la DESD de 0.425 mg/cm^2 reportada en este estudio y se encontró una disminución del 28% de la tensión de flameo obtenida en el laboratorio de Cuernavaca. De nueva cuenta, la altitud a la cual se sitúa el laboratorio del IPN afectó la tensión de flameo.

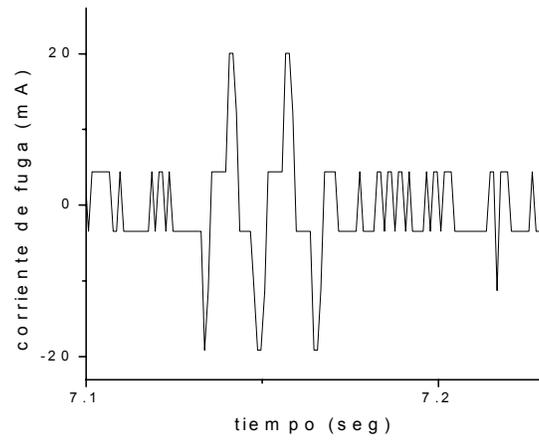
Con la mezcla de 40 gr de Caolín/320 gr de NaCl por un litro de agua, se registró una tensión de flameo de 7.7 kV. Este valor fue muy similar para el aislador evaluado en el IIE (7.51 kV). La disminución de la tensión fue del 2.5%. El aislador evaluado en el IPN fue de EPDM, y el del IIE fue de vidrio, por lo que para este nivel de contaminación la formulación del material no tuvo una influencia significativa.

Con la mezcla de 600/200Y/5 la tensión de flameo registrada fue de 5.1 kV. Para el IIE se obtuvieron tres valores distintos, según el tipo de aislador. Realizando la comparación con el aislador de vidrio, la reducción de la tensión fue del 12 %; para el aislador con recubrimiento de silicón fue del 17.7% y con el de EPDM la reducción fue más drástica, siendo ésta del 65%. Como se aprecia, el comportamiento del aislador de EPDM evaluado en el IPN fue muy pobre, incluso comparado con el aislador de vidrio. De aquí se desprende que el tipo de material, para el caso de aisladores sintéticos, en ambientes con una contaminación severa y situados a una gran altitud, no ejerce una influencia favorable en el comportamiento de las tensiones de flameo.

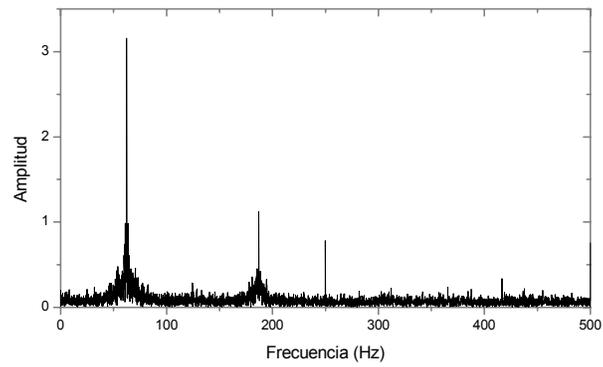
A continuación se muestran las gráficas de las corrientes de fuga y los espectros de frecuencia, obtenidos en la evaluación de los aisladores, para una DESD de 0.075, 0.76, 0.84, 0.30 y 0.425 mg/cm^2 , respectivamente.



a)

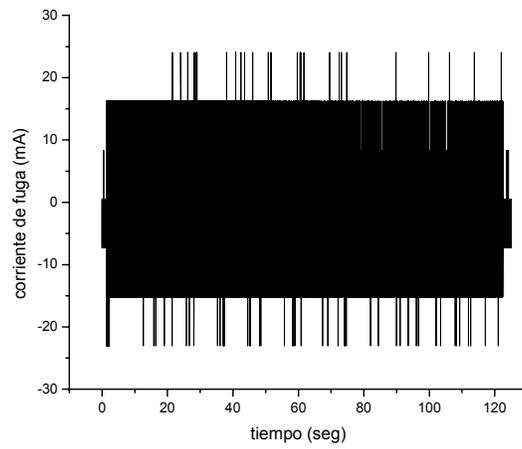


b)

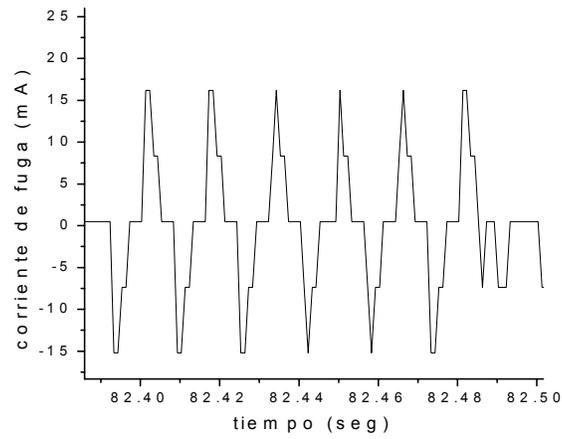


c)

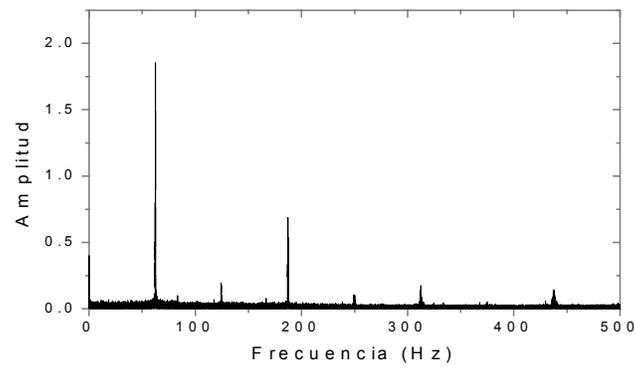
Figura 3.1 a) Flameo en 18,2 kV, a una temperatura de 21°C, una humedad relativa de 79% y una DESD de 0.075 mg/cm²; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia



a)

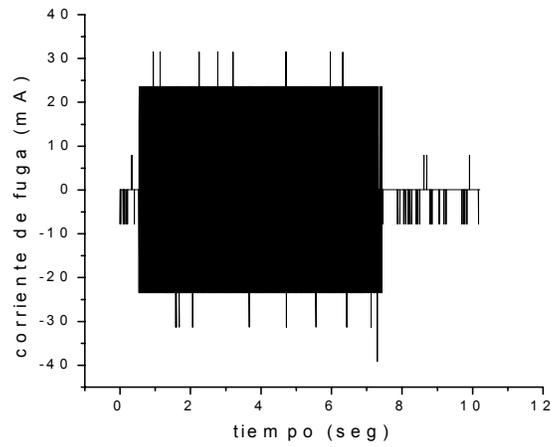


b)

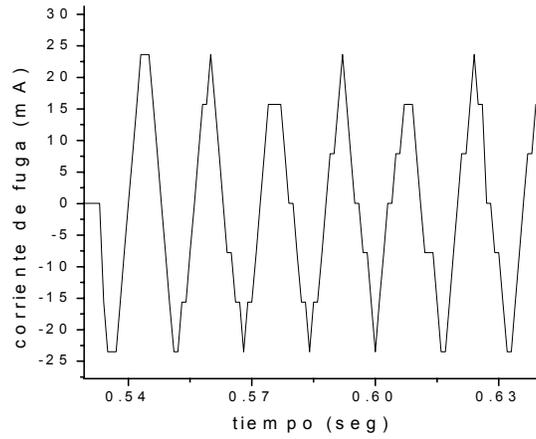


c)

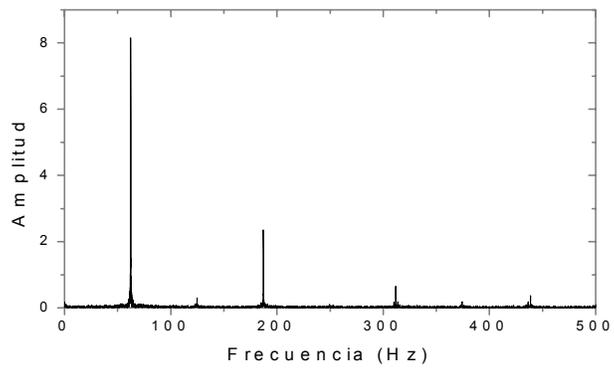
Figura 3.2 a) Flameo en 5.1 kV, a una temperatura de 19°C, una humedad relativa de 90% y una DESD de 0.76 mg/cm²; b) forma de onda de la corriente de fuga; c) análisis de frecuencia



a)

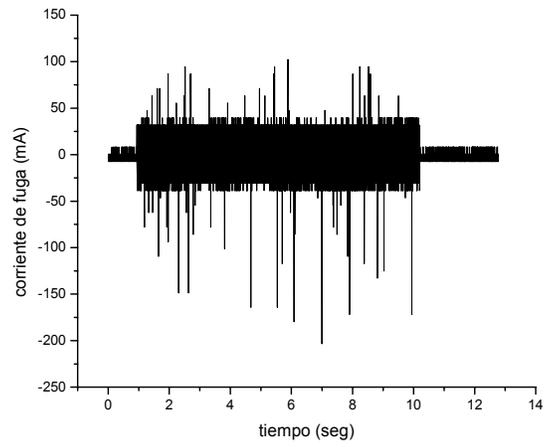


b)

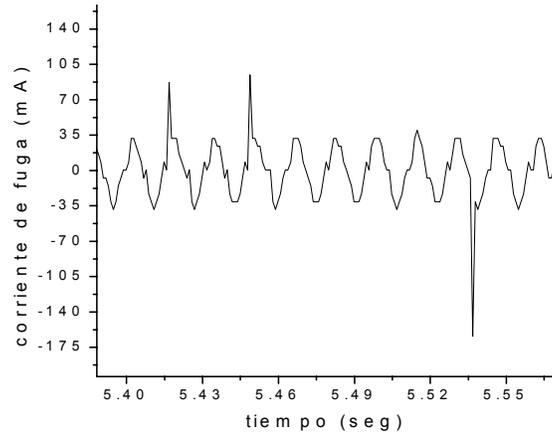


c)

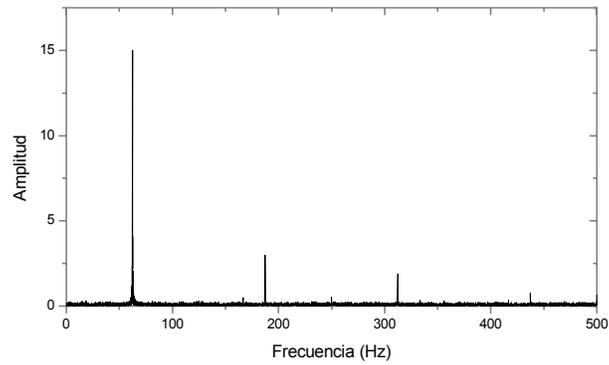
Figura 3.3 a) Flameo en 7.7 kV, a una temperatura de 19°C, una humedad relativa de 90% y una DESD de 0.84 mg/cm²; b) forma de onda de la corriente de fuga; c) análisis de frecuencia



a)

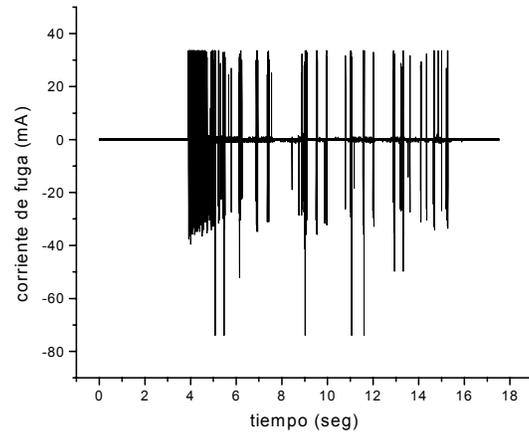


b)

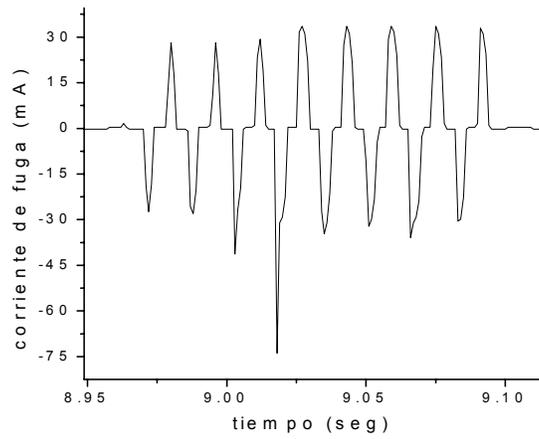


c)

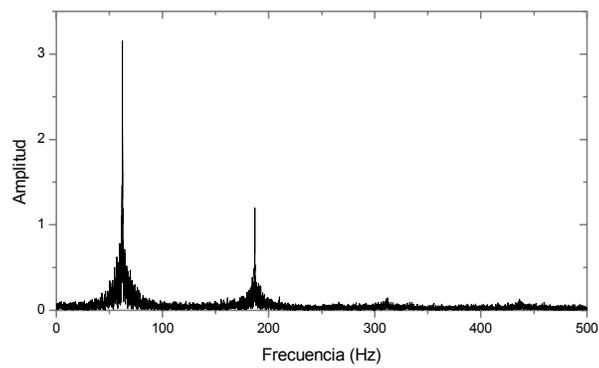
Figura 3.4 a) Flameo en 15.1 kV, a una temperatura de 19°C, una humedad relativa de 90% y una DESD de 0.30 mg/cm²; b) forma de onda de la corriente de fuga; c) análisis de frecuencia



a)



b)



c)

Figura 3.5 a) Flameo en 13.3 kV, a una temperatura de 20°C, una humedad relativa de 88% y una DESD de 0.425 mg/cm²; b) acercamiento del flameo; c) análisis de frecuencia

3.3 Análisis de resultados

En la gráfica de la figura 3.1 se observa que la corriente de fuga fue del orden de 20-30 mA, siendo la tensión de flameo de 18.2 kV.

En la gráfica de la figura 3.2 se puede observar que los niveles de corriente de fuga se mantuvieron en un rango de 15-25 mA, y la tensión de flameo fue de 5.1 kV.

La grafica de la figura 3.3 muestra la corriente de fuga para una DESD de 0.84 mg/cm^2 , siendo del orden de 20-30 mA con un pico cercano a los 40 mA. La tensión de flameo fue de 7.7 kV.

Para la prueba con 0.30 mg/cm^2 , la tensión de flameo registrada fue de 15.1 kV, y la magnitud de la corriente de fuga se mantuvo entre 40-50 mA, con pulsos de diferente magnitud, cercanos a los 100 y 200 mA. Esto se ilustra en la figura 3.4.

Finalmente, la gráfica de la figura 3.5 muestra que los valores de corriente de fuga fueron del orden de 20-40 mA, presentándose pulsos cercanos a los 80 mA. La tensión de flameo registrada fue de 13.3 kV.

El armónico que apareció en los análisis de frecuencia fue el tercero y el quinto, aunque este último de amplitud muy pequeña.

Como se ha visto, los cambios en la densidad relativa del aire provocaron cambios significativos en los valores de la tensiones de flameo, para los aisladores de EPDM. Al incrementarse la altitud se generó una reducción de las tensiones de flameo. Y esta reducción fue mayor en condiciones de alta contaminación.

En general, la formulación del material, en este caso EPDM, no tuvo una influencia significativa en el comportamiento de la tensión disruptiva, ya que su desempeño fue menor a lo esperado. En condiciones de alta contaminación y gran altitud, los aisladores de EPDM poseen un rendimiento similar a los aisladores convencionales.

Es importante mencionar que no se llevó a cabo una corrección por altitud, ya que hasta el momento no existe todavía un factor de corrección para aisladores poliméricos que haga que los resultados de la niebla limpia sean más relevantes en las condiciones de servicio. Obviamente se necesita mayor colaboración entre diferentes laboratorios para determinar dicho factor.

3.4 Determinación de la hidrofobicidad superficial en aisladores poliméricos contaminados

La hidrofobicidad superficial es la propiedad más importante de los aisladores poliméricos y consiste en inhibir la formación de una película continua de agua sobre su superficie. La hidrofobicidad puede ser evaluada en laboratorio, determinando el ángulo de contacto estático de una gota de agua desmineralizada, sobre la superficie del material. Esta técnica de medición es ideal para caracterizar superficies hidrofóbicas y es el método más empleado en la determinación de la pérdida y/o recuperación de la hidrofobicidad de los aisladores no cerámicos.

3.4.1 Medición de la hidrofobicidad mediante la técnica del ángulo de contacto

Para medir el ángulo de contacto, se coloca una gota de agua desmineralizada sobre la superficie del aislador y se mide con un microscopio el ángulo que forma la gota con la superficie.

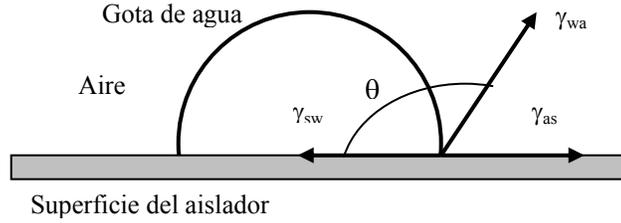


Figura 3.6 Ángulo de contacto de una gota de agua sobre una superficie hidrofóbica

En la figura 3.6, el ángulo de contacto θ depende de las fuerzas en la interfaz de las tres fronteras, esto es, sólido/agua (γ_{sw}), agua/aire (γ_{wa}) y aire/sólido (γ_{as}). Según la ecuación de Young para el balance de fuerzas:

$$\gamma_{as} = \gamma_{sw} + \gamma_{wa} \cos \theta \quad (3.2)$$

Si γ_{wa} y la energía de adhesión del líquido al sólido son conocidas, el ángulo de contacto puede ser calculado.

Otro método para el cálculo de θ es utilizar la siguiente relación geométrica:

$$\text{Tan } \frac{\theta}{2} = \frac{2h}{\Delta} \quad (3.3)$$

Siendo Δ la longitud de la base de la gota y h su altura, según se muestra en la figura 3.7.

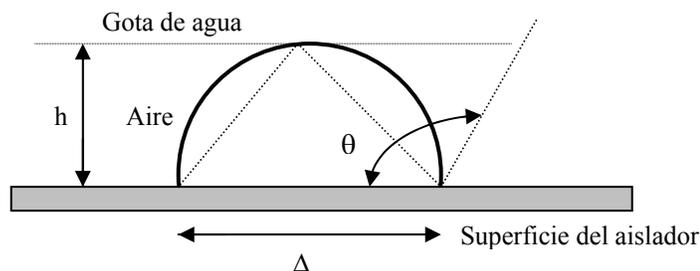


Figura 3.7 Medición del ángulo de contacto

Ahora bien, una superficie puede ser considerada hidrofílica si el ángulo de contacto es menor de 90° o hidrofóbica si el ángulo es mayor a 90° .

En esta investigación, para determinar el grado de hidrofobicidad superficial de los aisladores evaluados, se midieron los ángulos de contacto de acuerdo a la ecuación 3.3. Cabe señalar que primero se midieron los ángulos de contacto en los aisladores nuevos. Posteriormente se midieron al final de cada evaluación en cada una de las etapas.

La metodología para la medición de dichos ángulos fue la siguiente:

1. Se acondicionó la superficie de cada aislador en todos los faldones (4) tanto en la parte superior como en la parte inferior. Toda vez que el aislador había sido evaluado, los depósitos de la mezcla contaminante fueron removidos en su totalidad.
2. Con una micro pipeta de vidrio se colocó en cada faldón una gota de agua desmineralizada de 25 microlitros. Reportes previos indican que esta medida es la adecuada para obtener un ángulo de contacto preciso [22, 23].

3. Con una cámara de video se grabaron las imágenes de las gotas en los 4 faldones, obteniéndose 8 imágenes por cada aislador.

4. Las imágenes se desplegaron en el paquete Corel Draw y se procedió a medir las longitudes de la base de las gotas y sus alturas.

5. Finalmente, empleando la relación geométrica conocida, se calculó el ángulo de contacto.

Los valores de los ángulos de contacto para los aisladores nuevos se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Ángulos de contacto de los aisladores nuevos

<i>Número de faldón</i>	<i>Ángulo de contacto (°)</i>
1 superior	94.4
2 superior	87.8
3 superior	92.2
4 superior	86.2
1 inferior	87.4
2 inferior	93.8
3 inferior	86.8
4 inferior	85.1
PROMEDIO	89.21

Como se observa, la hidrofobicidad superficial de los aisladores, en cada uno de los faldones antes de las pruebas fue alta, cercana a los 90°.

Para la medición de la altura y la base de las gotas se utilizó el paquete Corel Draw Versión 9.0. En este paquete se desplegaron las imágenes de las gotas. A continuación se muestra una imagen con el detalle de las mediciones.



Figura 3.8 Detalle de las mediciones de una gota de agua en el paquete Corel Draw

Conociendo la altura y la base de la gota se determino el ángulo de contacto de acuerdo a la relación:

$$\text{Tan } \frac{\theta}{2} = \frac{2h}{\Delta}$$

Las imágenes que a continuación se exhiben corresponden a las obtenidas antes de la evaluación, es decir, en los aisladores nuevos.

F: Faldón, S: Superior, I: Inferior

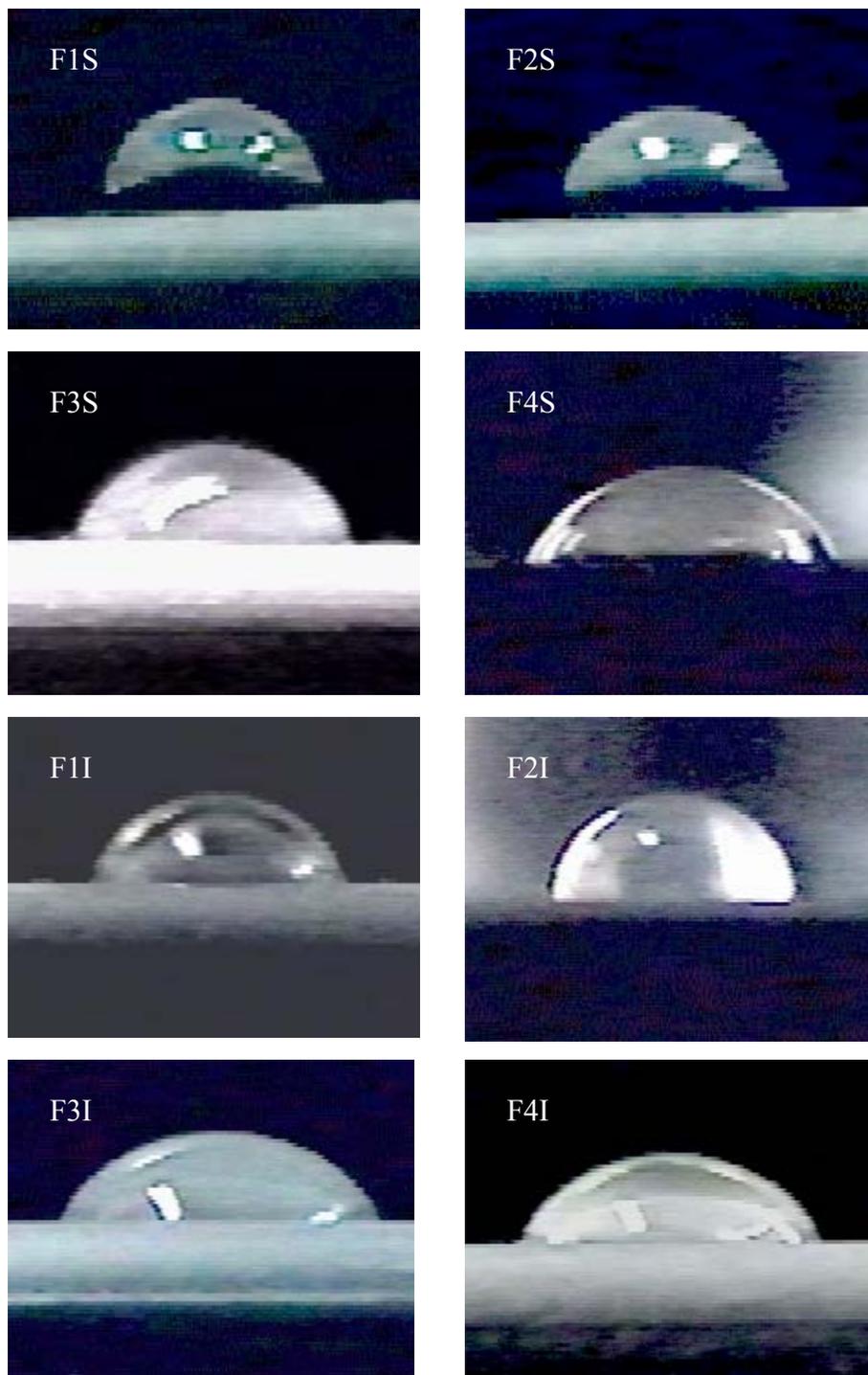


Figura 3.9 Imágenes de las gotas sobre la superficie de un aislador nuevo

Las imágenes que a continuación se muestran corresponden a las obtenidas durante la primera evaluación de los aisladores.

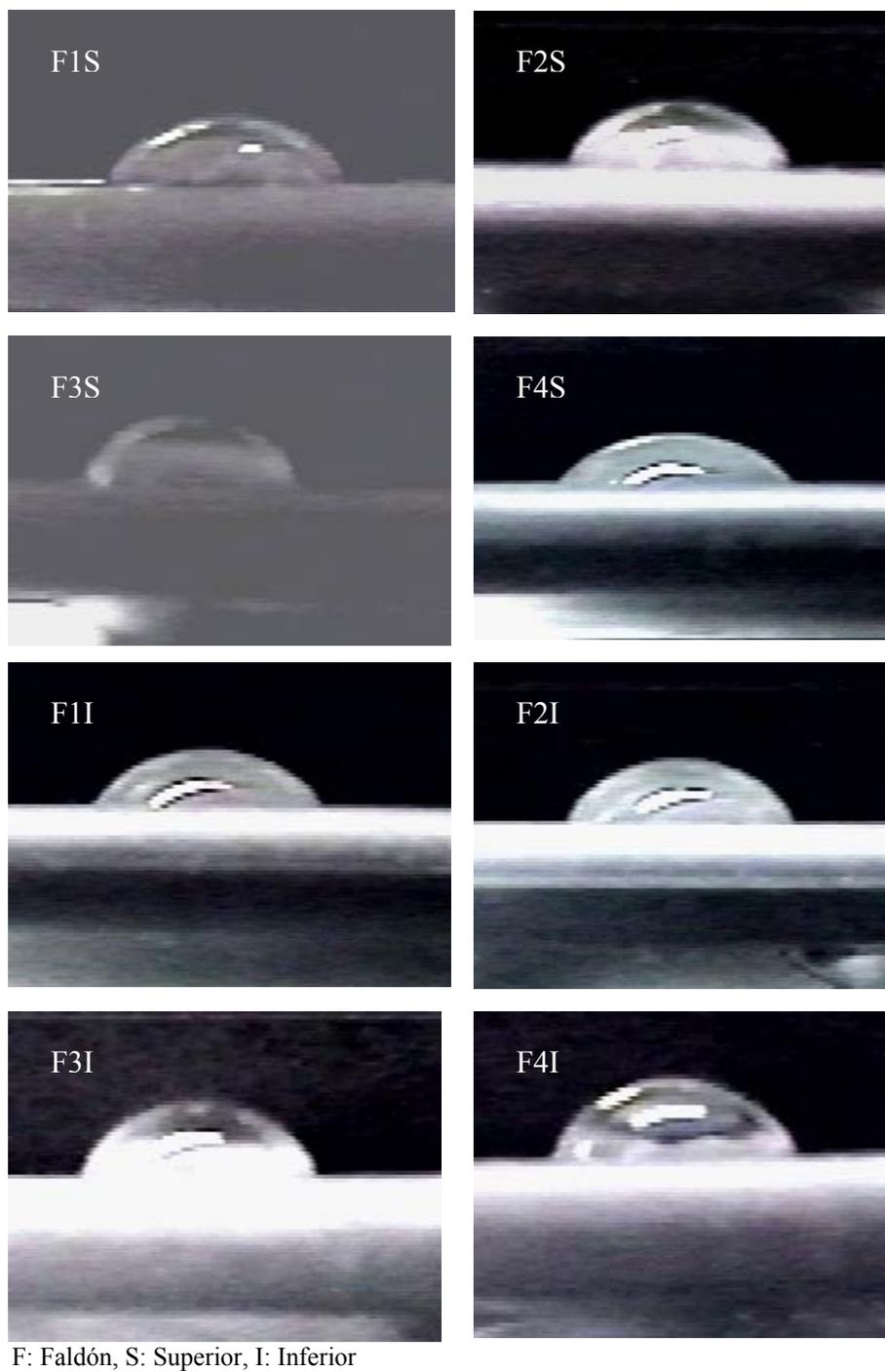
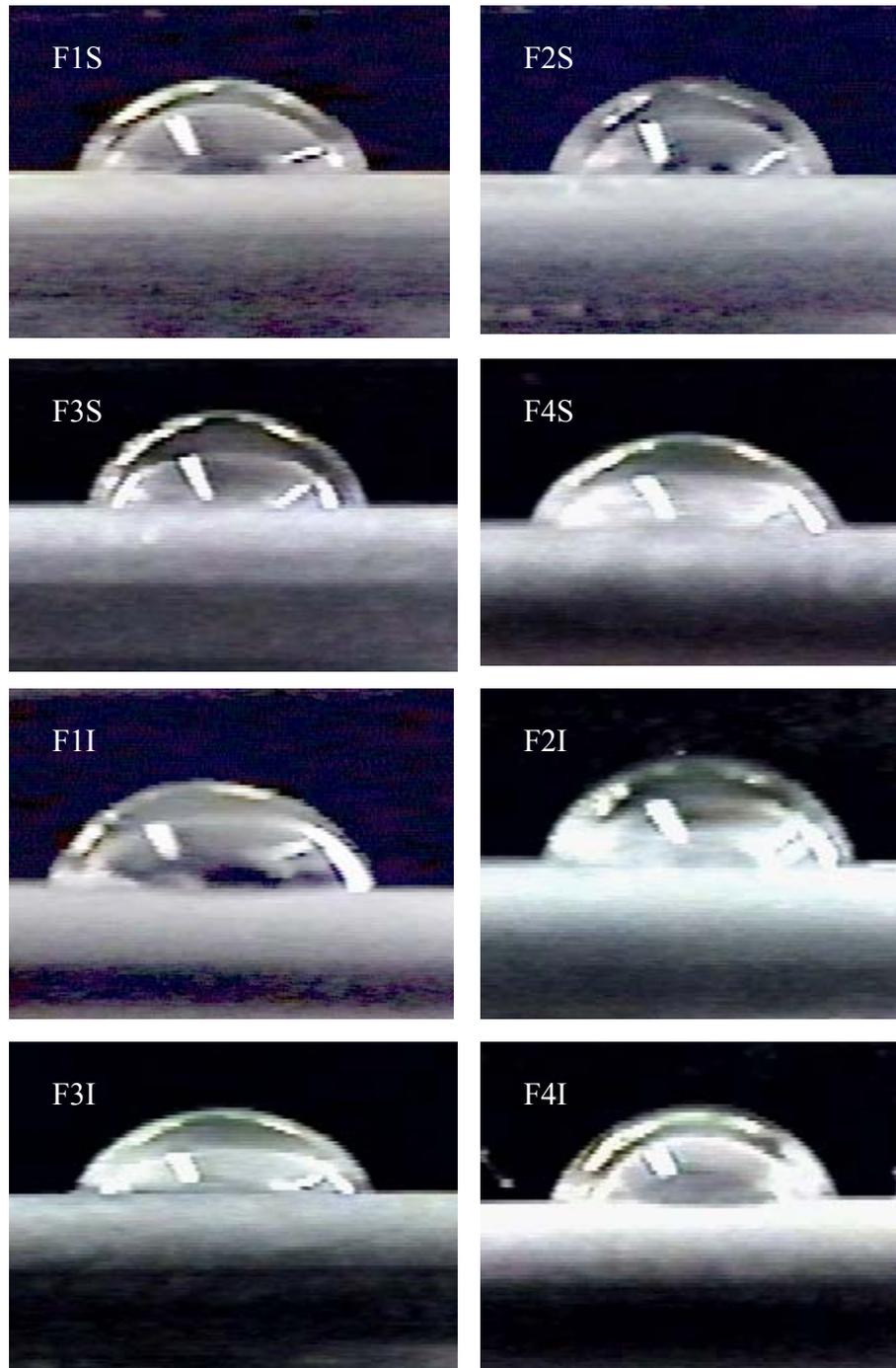
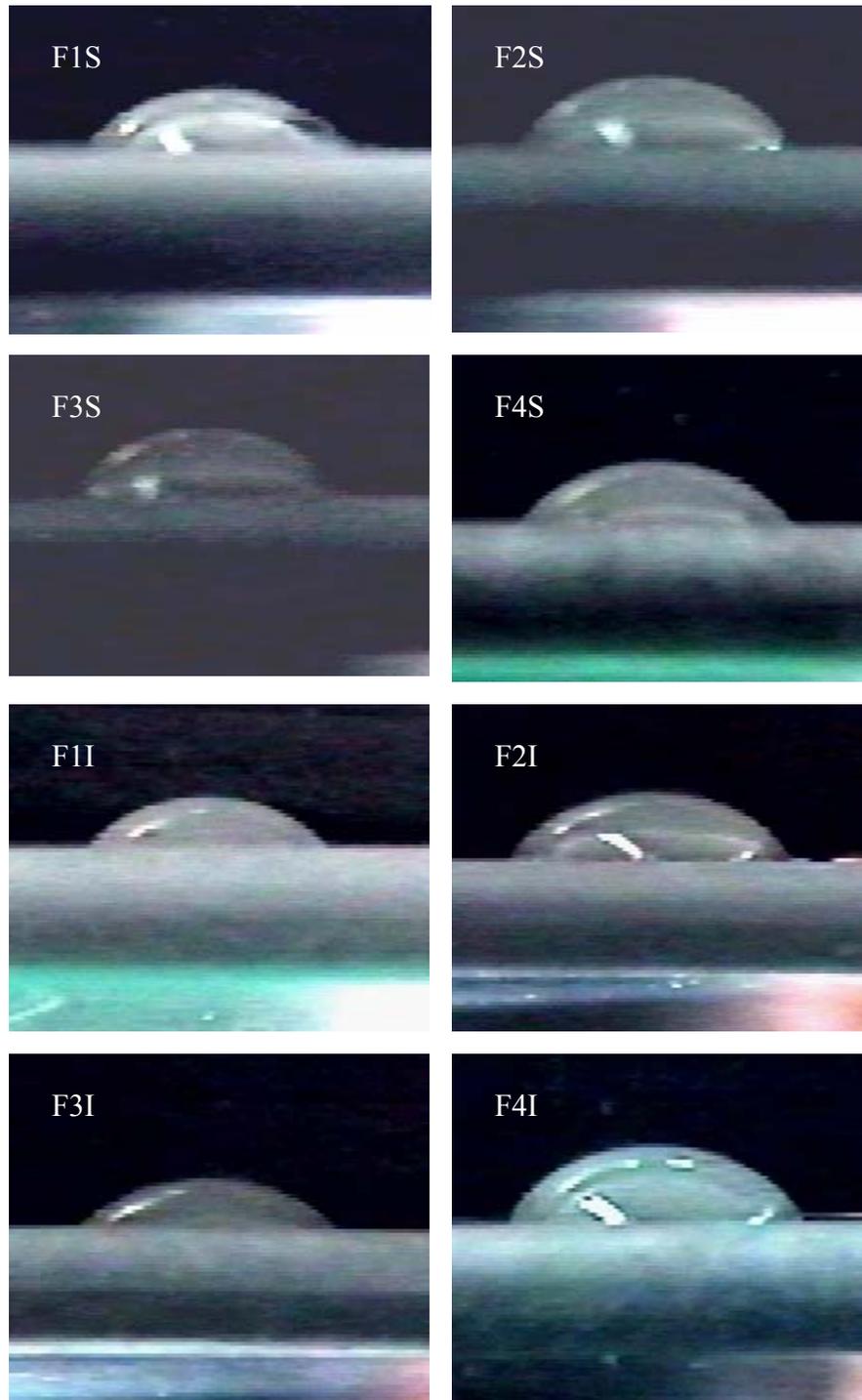


Figura 3.10 Imágenes de las gotas sobre la superficie del aislador, para una mezcla de 5 gr de NaCl/40 gr de Caolín/1 lt de agua



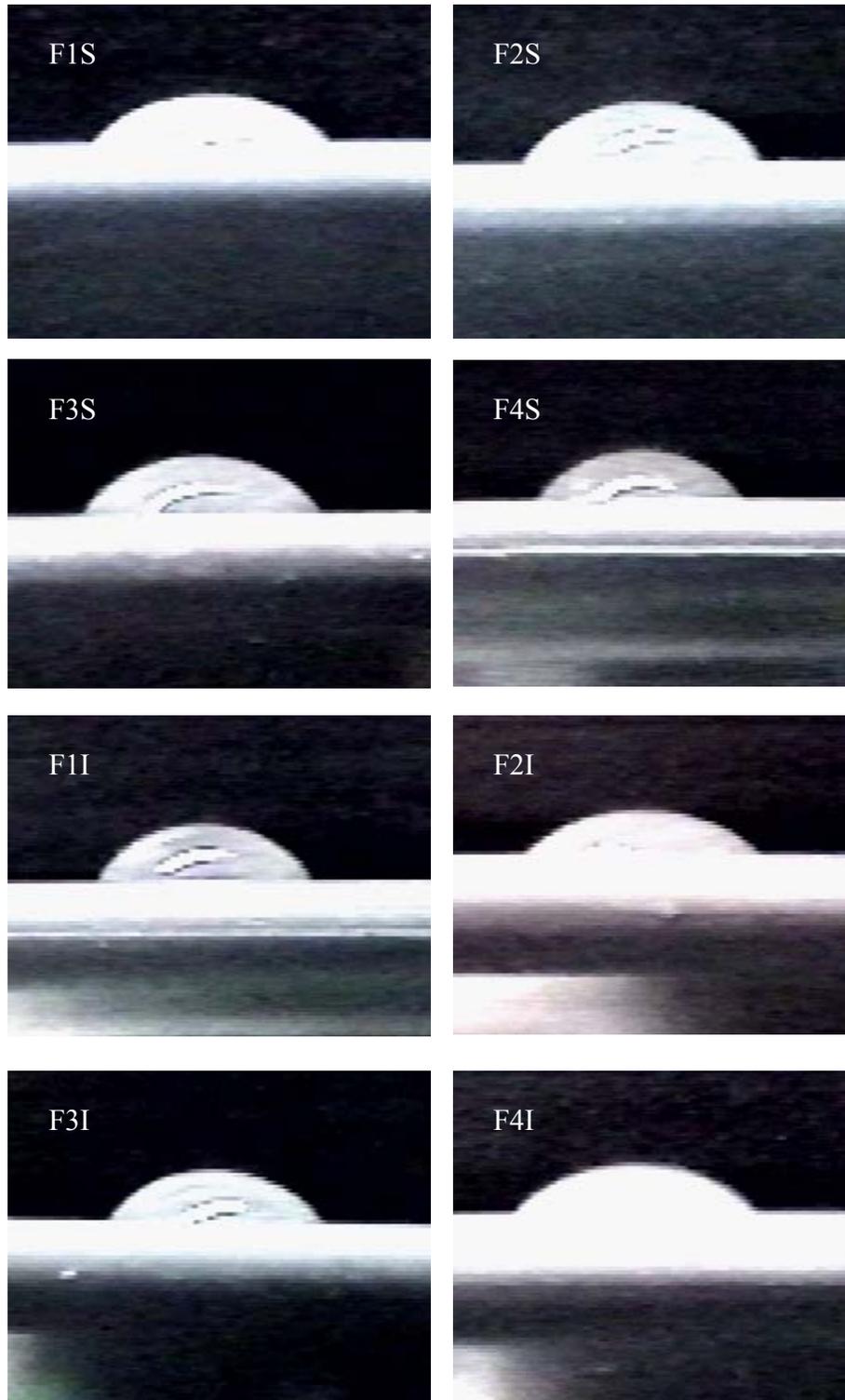
F: Faldón, S: Superior, I: Inferior

Figura 3.11 Imágenes de las gotas sobre la superficie del aislador, para una mezcla de 20 gr de NaCl/40 gr de Caolín/1 lt de agua



F: Faldón, S: Superior, I: Inferior

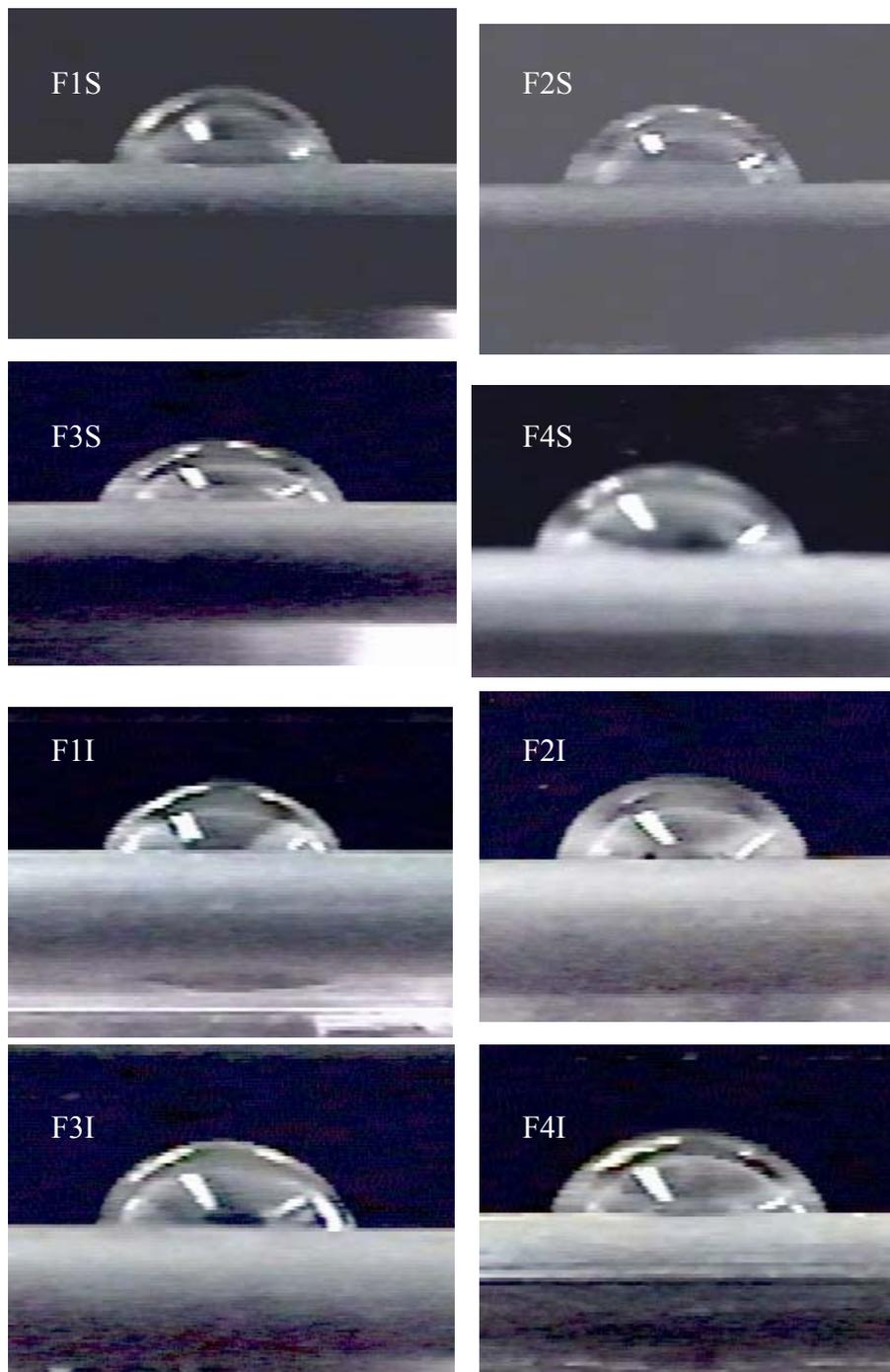
Figura 3.12 Imágenes de las gotas sobre la superficie del aislador, para una mezcla de 80 gr de NaCl/40 gr de Caolín/1 lt de agua



F: Faldón. S: Superior, I: Inferior

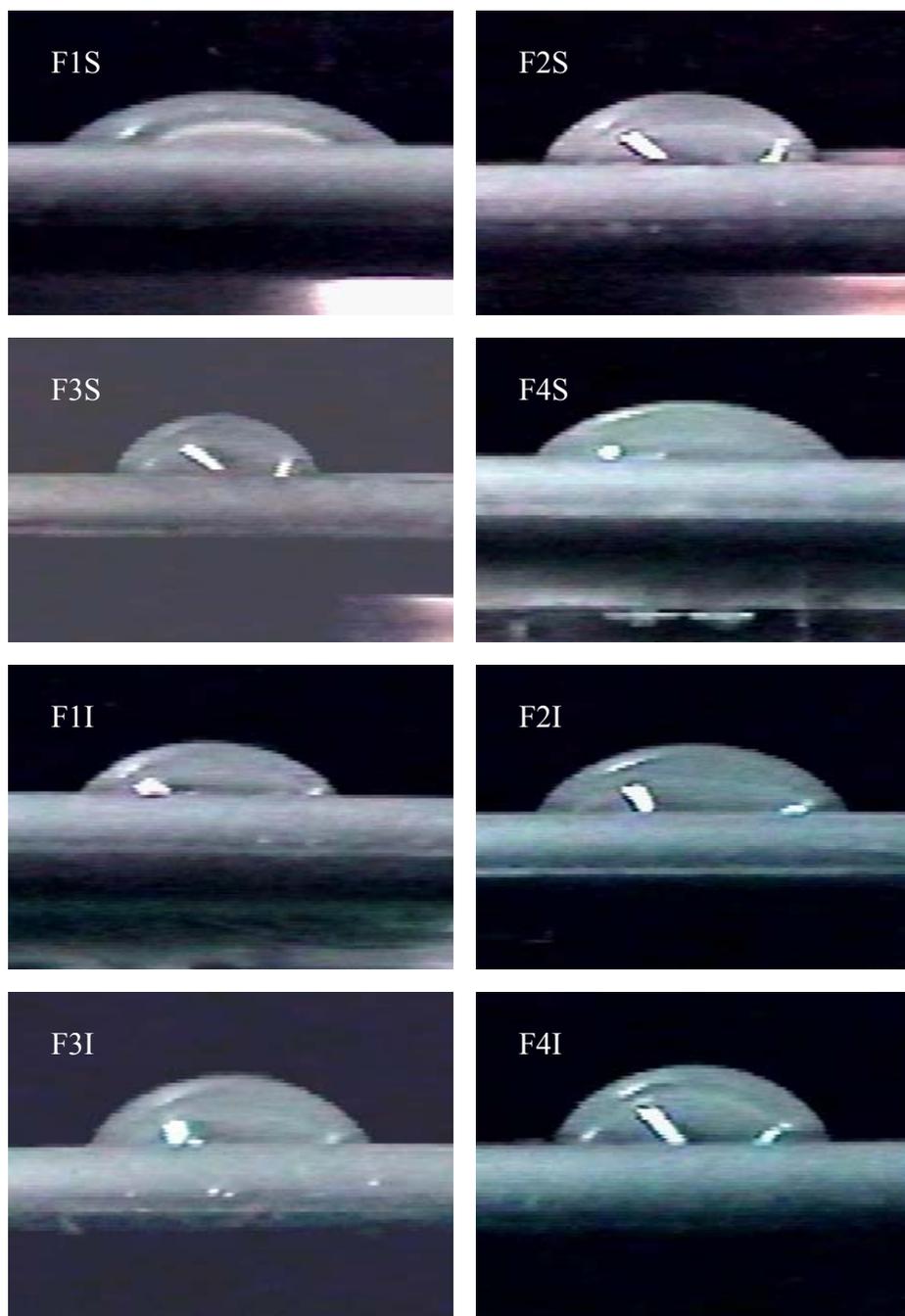
Figura 3.13 Imágenes de las gotas sobre la superficie del aislador, para una mezcla de 160 gr de NaCl/40 gr de Caolín/1 lt de agua

Las imágenes siguientes se obtuvieron durante la segunda fase de las pruebas de laboratorio.



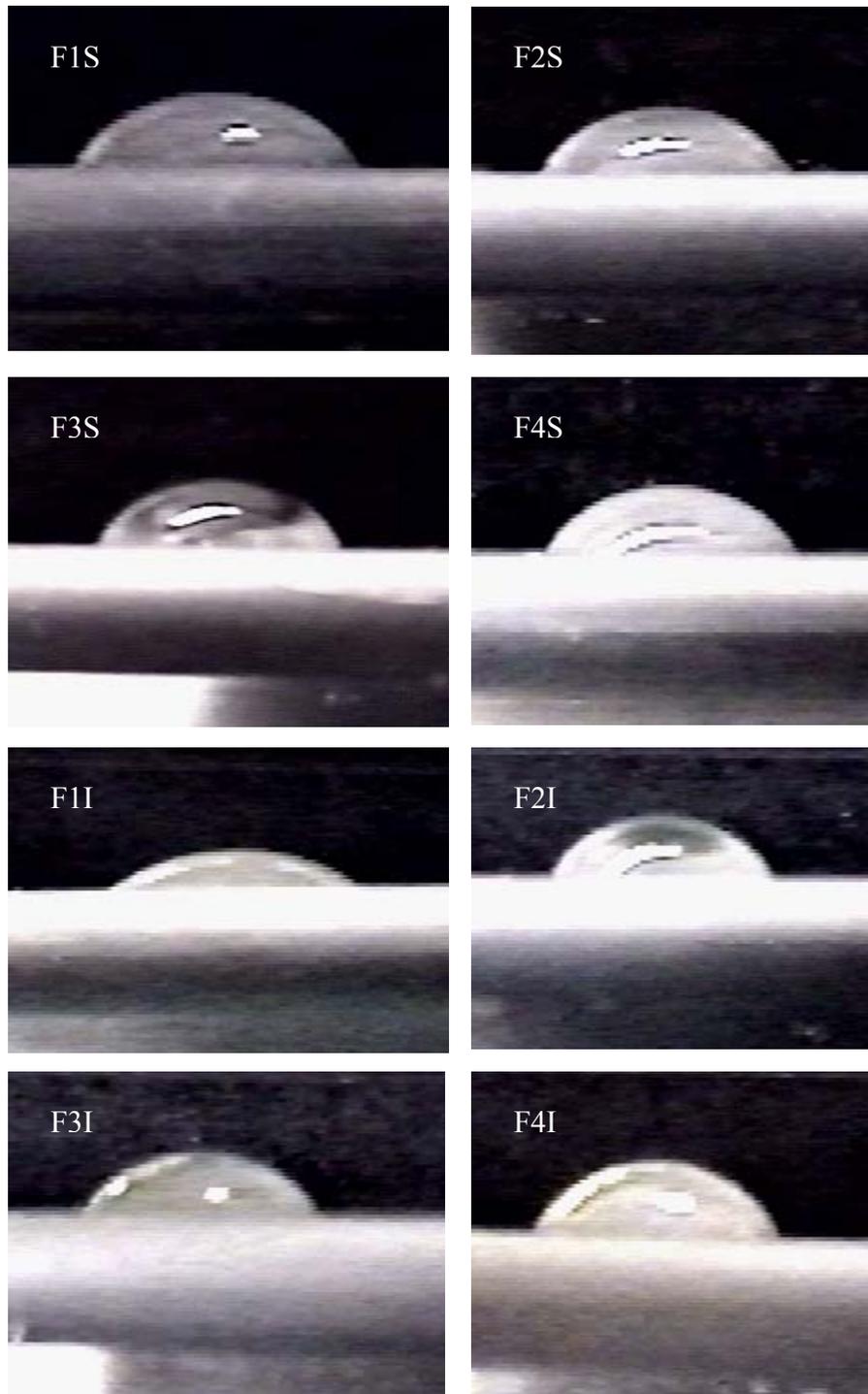
F: Faldón, S: Superior, I: Inferior

Figura 3.14 Imágenes de las gotas sobre la superficie del aislador, para una mezcla de 5 gr de NaCl/40 gr de Caolín/1 lt de agua



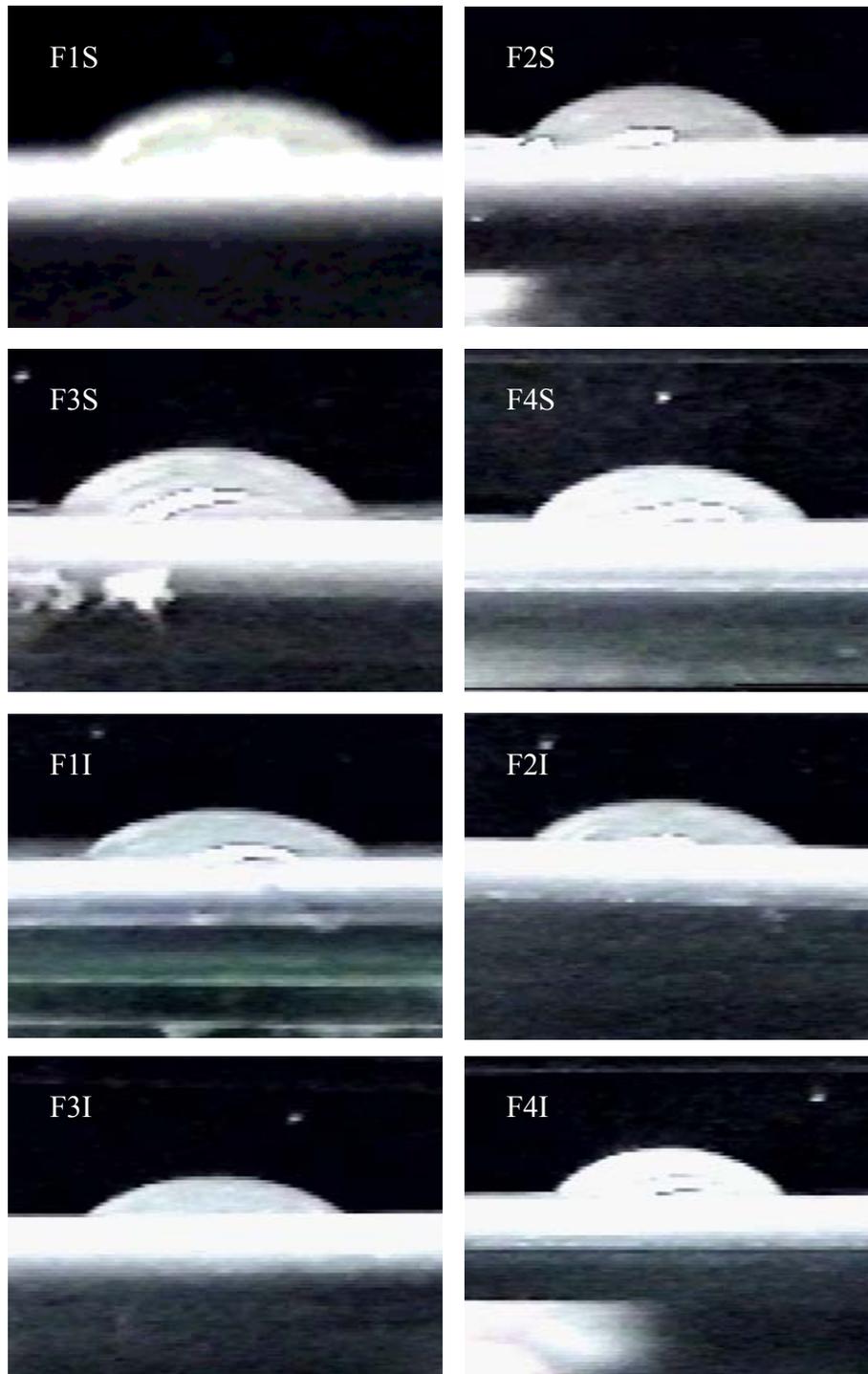
F: Faldón, S: Superior, I: Inferior

Figura 3.15 Imágenes de las gotas sobre la superficie del aislador, para una mezcla de 20 gr de NaCl/40 gr de Caolín/1 lt de agua



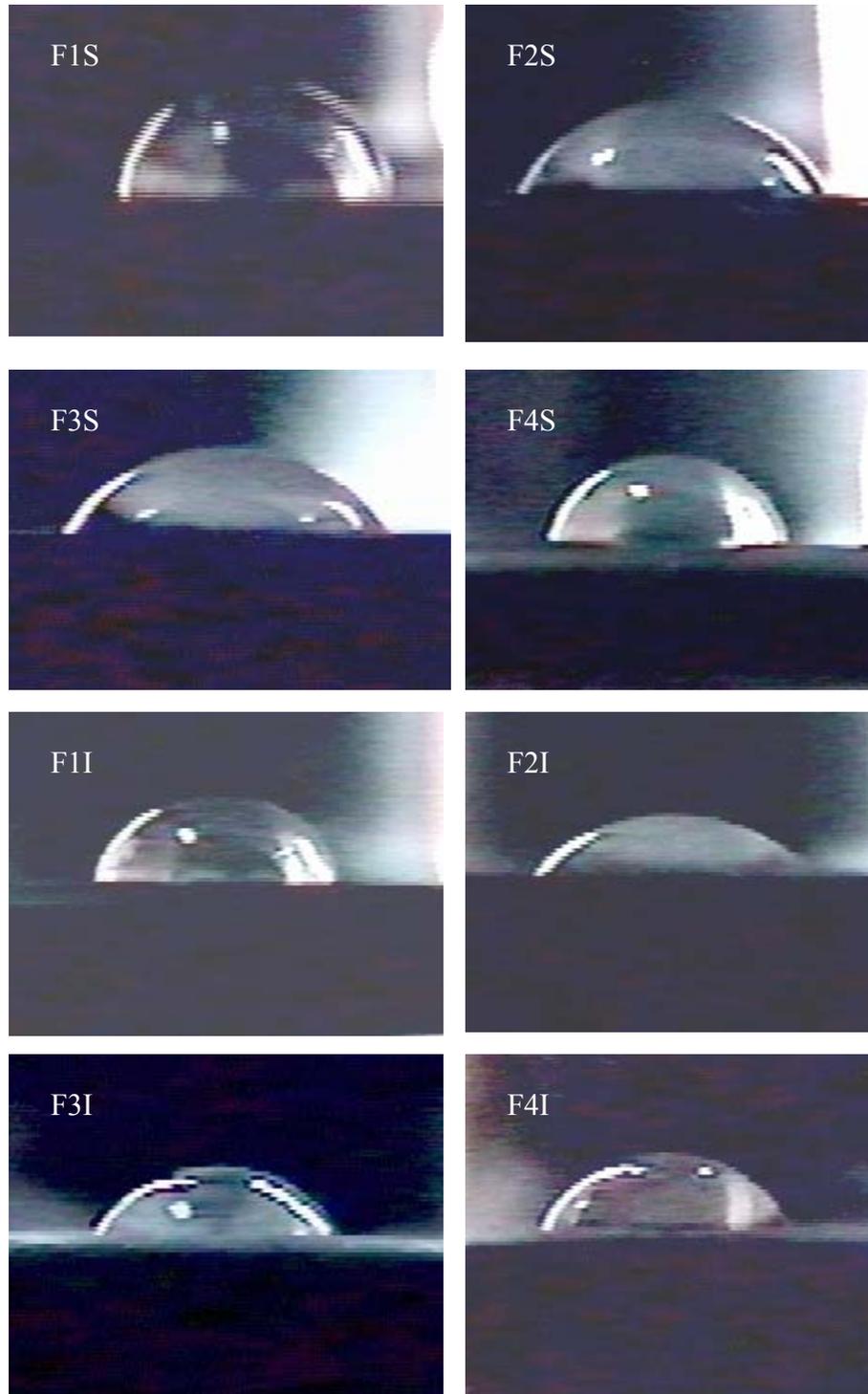
F: Faldón, S: Superior, I: Inferior

Figura 3.16 Imágenes de las gotas sobre la superficie del aislador, para una mezcla de 80 gr de NaCl/40 gr de Caolín/1 lt de agua



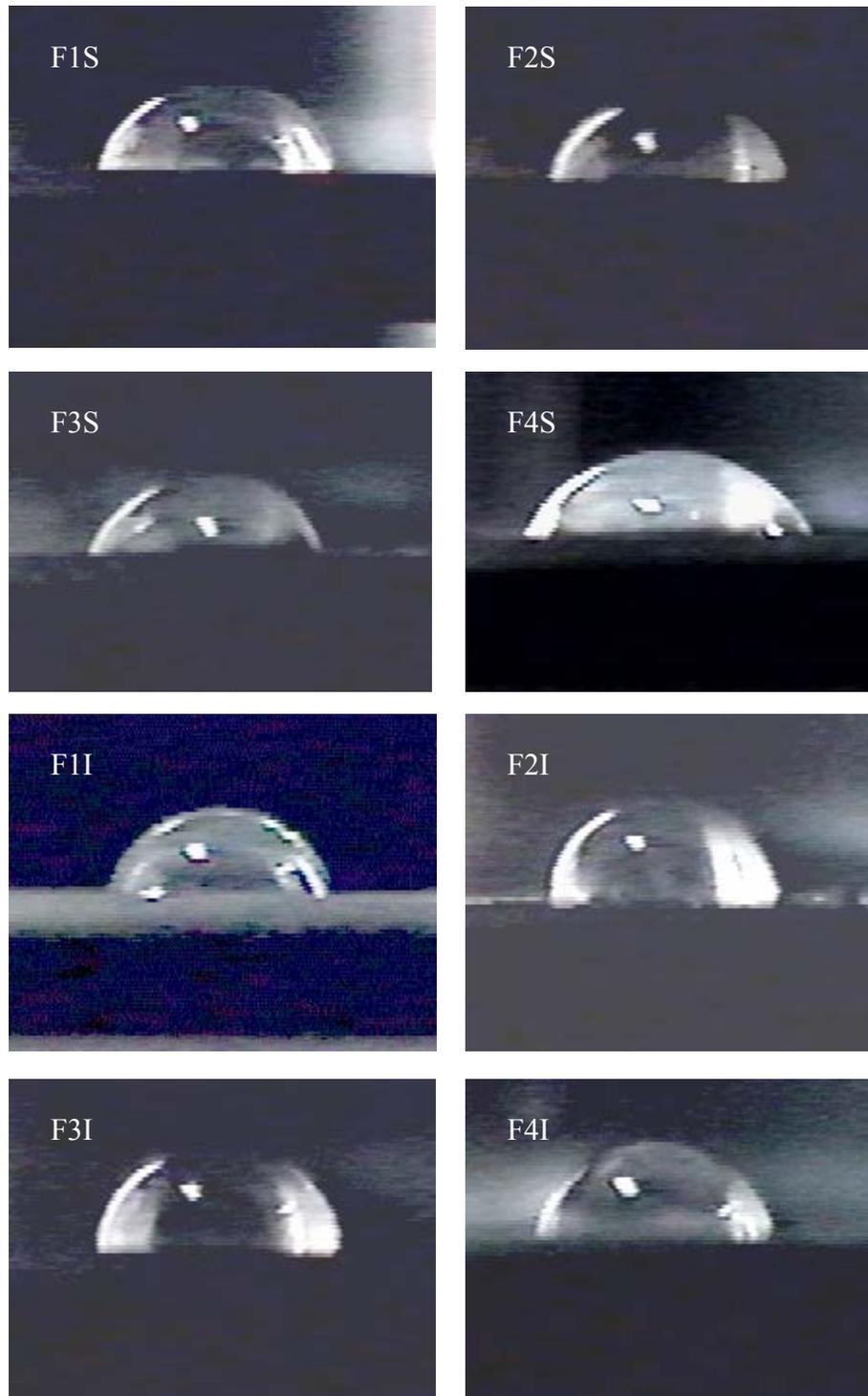
F: Faldón, S: Superior, I: Inferior

Figura 3.17 Imágenes de las gotas sobre la superficie del aislador, para una mezcla de 160 gr de NaCl/40 gr de Caolín/1 lt de agua



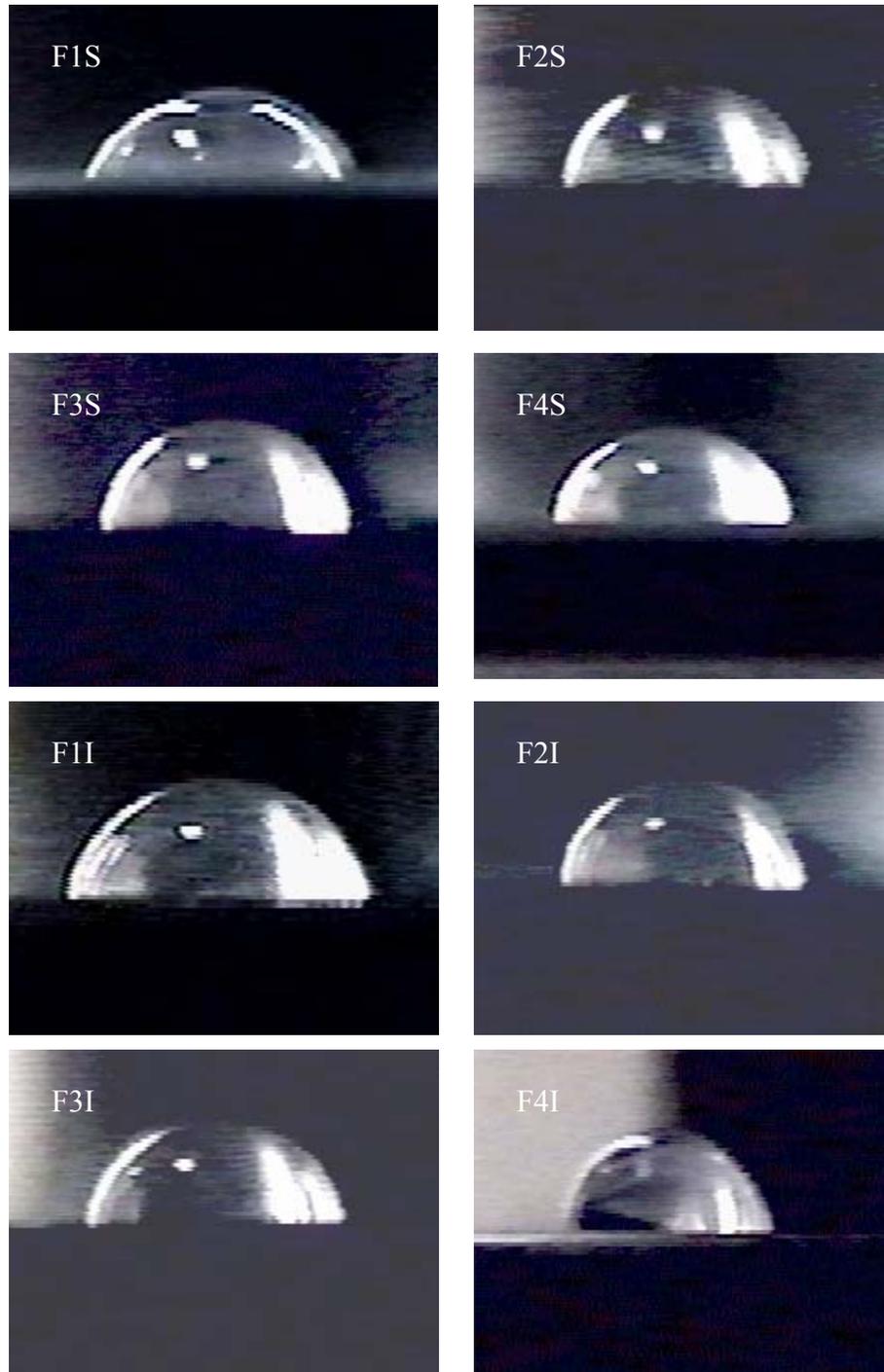
F: Faldón, S: Superior, I: Inferior

Figura 3.18 Imágenes de las gotas sobre la superficie del aislador, para una mezcla de 50 gr de NaCl/100 gr de Caolín/1 lt de agua



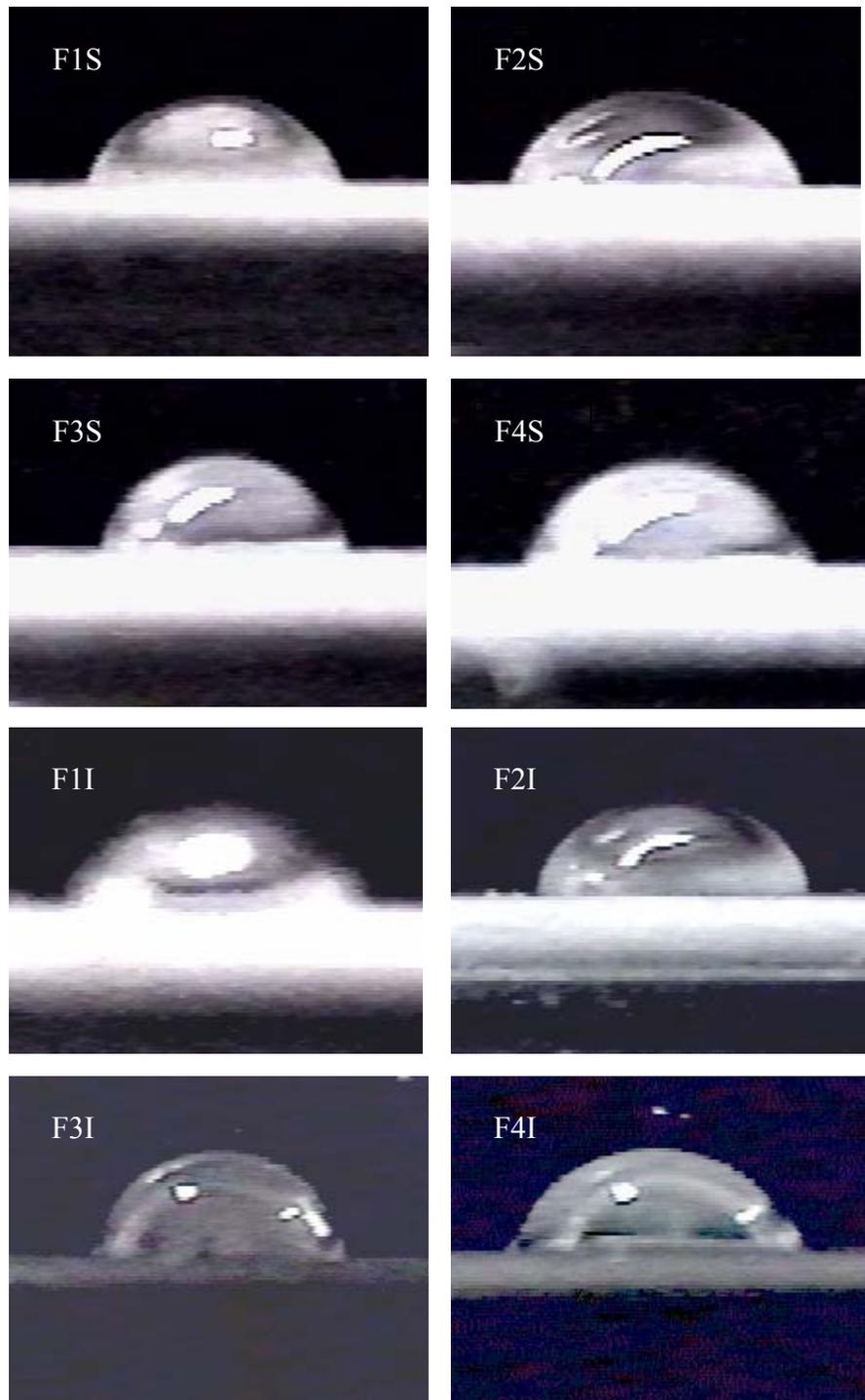
F: Faldón, S: Superior, I: Inferior

Figura 3.19 Imágenes de las gotas sobre la superficie del aislador, para una mezcla de 600 gr de Caolín/200 gr de Sulfato de Calcio/5 gr de NaCl/1 lt de agua



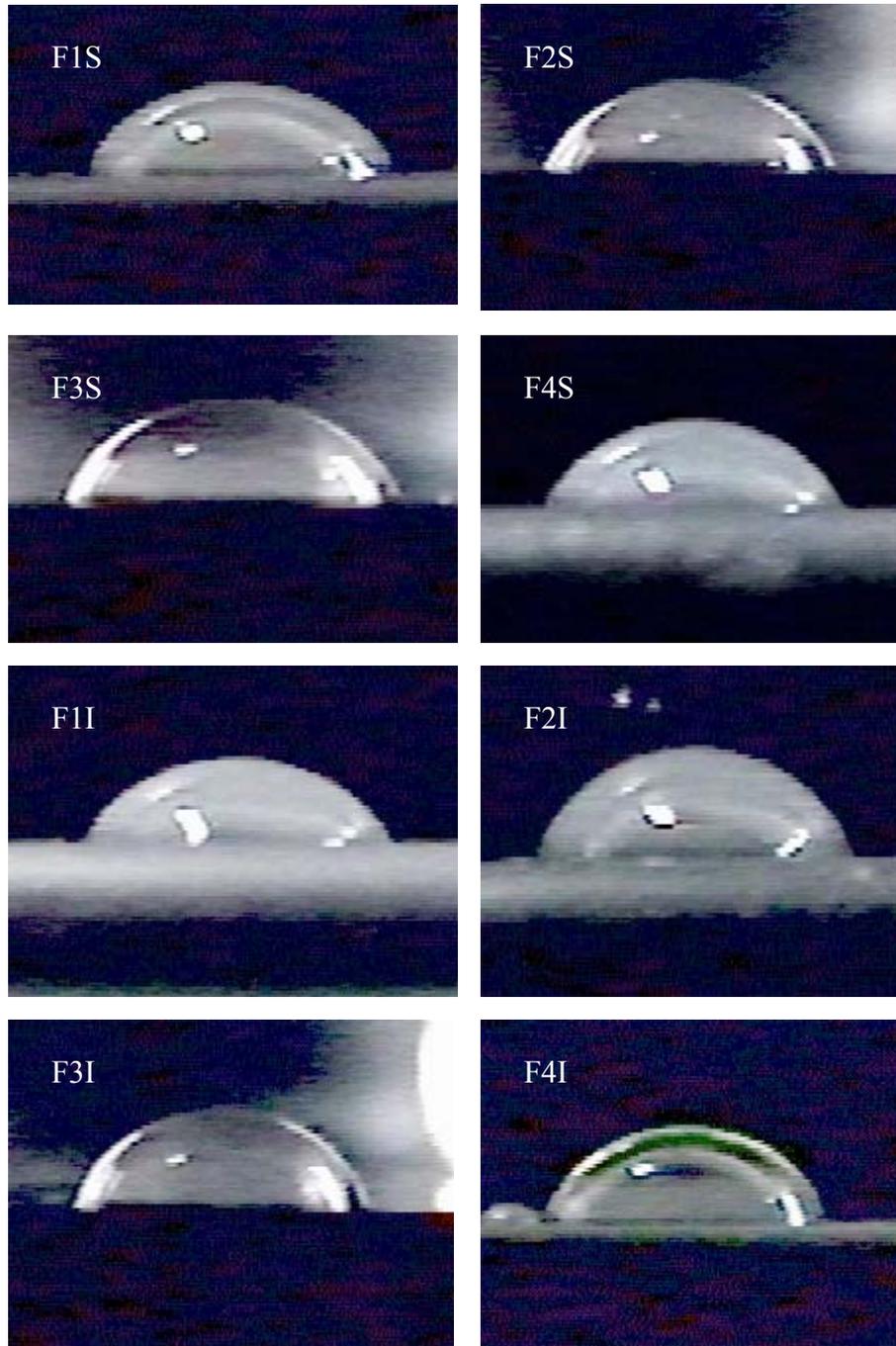
F: Faldón, S: Superior, I: Inferior

Figura 3.20 Imágenes de las gotas sobre la superficie del aislador, para una mezcla de 320 gr de NaCl/40 gr de Caolín/1 lt de agua



F: Faldón, S: Superior, I: Inferior

Figura 3.21 Imágenes de las gotas sobre la superficie del aislador, para una mezcla de 20 gr de NaCl/40 gr de Caolín/1 lt de agua



F: Faldón, S: Superior, I: Inferior

Figura 3.22 Imágenes de las gotas sobre la superficie del aislador, para una mezcla de 160 gr de NaCl/40 gr de Caolín/1 lt de agua

Tabla 3 Ángulos de contacto en aisladores de EPDM, clase 15, calculados para 4 niveles de contaminación

Faldón	Densidad Equivalente de Sal Depositada (mg/cm ²)											
	0.02 (L)			0.075 (M)			0.25 (P)			0.425 (MP)		
	Δ (mm)	h (mm)	θ (grados)	Δ (mm)	h (mm)	θ (grados)	Δ (mm)	h (mm)	θ (grados)	Δ (mm)	h (mm)	θ (grados)
1S	30.46	8.74	59.70	39.66	12.75	65.47	35.41	8.26	50.02	29.97	7.32	52.06
2S	30.22	9.92	66.57	40.85	12.51	62.97	35.18	9.92	58.84	34.00	7.32	46.59
3S	27.15	9.68	70.98	38.25	12.99	68.36	36.12	8.50	50.40	33.76	8.50	53.45
4S	33.29	7.79	50.15	43.68	13.46	63.29	38.01	8.50	48.19	29.98	6.14	44.54
1I	28.80	7.79	56.82	44.15	16.29	72.85	32.35	10.40	65.47	29.28	7.32	53.13
2I	28.80	8.74	63.42	40.37	13.69	68.29	37.30	10.39	58.24	32.82	6.37	42.43
3I	32.11	9.92	60.80	38.25	11.33	61.28	31.87	6.85	46.52	29.04	7.08	44.12
4I	30.22	8.26	57.32	38.96	11.10	59.35	40.61	9.44	49.86	34.94	7.08	51.98
PROMEDIO	30.13	8.85	60.72	40.52	13.01	65.23	35.82	9.03	53.44	31.72	7.14	48.53

S: Superior, I: Inferior, L: Ligera, M: Media, P: Pesada, MP: Muy pesada

Tabla 4 Ángulos de contacto en aisladores de EPDM, clase 15, calculados para 4 niveles de contaminación. Influencia del tiempo de recuperación

Faldón	Densidad Equivalente de Sal Depositada (mg/cm ²)											
	0.02 (L)			0.075 (M)			0.25 (P)			0.425 (MP)		
	Δ (mm)	h (mm)	θ (grados)	Δ (mm)	h (mm)	θ (grados)	Δ (mm)	h (mm)	θ (grados)	Δ (mm)	h (mm)	θ (grados)
1S	29.75	9.92	67.39	46.04	8.26	39.47	32.58	9.21	58.95	35.89	5.67	35.06
2S	32.58	10.86	67.38	37.78	11.10	60.87	34.00	8.97	55.63	35.65	6.37	39.33
3S	30.69	10.15	66.96	28.10	8.50	62.34	31.40	9.21	60.79	38.25	8.26	46.71
4S	35.90	11.57	65.60	39.66	8.97	48.67	34.00	6.60	42.43	38.01	6.61	38.35
1I	31.17	9.68	63.68	32.35	7.56	50.10	32.58	4.01	27.65	36.60	6.37	38.38
2I	34.94	10.86	63.73	43.91	11.10	53.64	30.22	8.97	61.39	34.00	6.14	39.71
3I	33.76	13.69	78.08	38.01	8.74	49.39	32.58	8.50	55.11	35.41	4.72	29.85
4I	37.07	11.10	61.83	38.25	11.10	60.26	33.53	9.92	61.22	31.87	6.14	42.14
PROMEDIO	33.23	10.97	66.83	38.01	9.41	53.09	32.31	8.17	52.89	35.71	6.28	38.69

S: Superior, I: Inferior, L: Ligera, M: Media, P: Pesada, MP: Muy pesada

3.5 Análisis de resultados

Para las pruebas con diferentes humedades, se tuvieron los siguientes resultados: Con la DESD de 0.425 mg/cm^2 los ángulos de contacto en cada uno de los faldones, en promedio, fueron de 48.53° , siendo este valor el más bajo. Con 0.25 mg/cm^2 se tuvo un ángulo de 53.44° ; con 0.075 mg/cm^2 el ángulo fue de 65.23° y finalmente, con la DESD de 0.02 mg/cm^2 se tuvo un ángulo de 60.72° . Ver Tabla 3. De aquí se desprende que la hidrofobicidad disminuyó considerablemente, conforme el nivel de contaminación fue en aumento. Este fenómeno influyó decisivamente en los valores de tensión de flameo registrados durante esta etapa.

Durante la segunda fase de las pruebas, y permitiendo 16 días de tiempo de recuperación para la evaluación con la contaminación ligera, se observó que este lapso de tiempo sí influyó en la recuperación de las propiedades hidrofóbicas del aislador. Los ángulos de contacto en los faldones aumentaron en comparación a los calculados durante la etapa inicial. La hidrofobicidad en promedio fue de 66.83° . Este aumento de hidrofobicidad se vio reflejado en las tensiones de flameo, ya que aunque los valores fueron similares a los obtenidos previamente, no se presentaron tensiones de menor magnitud. Con la contaminación media, el promedio de los ángulos de contacto se vio reducido a un valor de 53.09° . Consecuentemente se registraron tensiones menores. Finalmente, para la contaminación pesada y muy pesada, el tiempo de recuperación —21 días— no tuvo una influencia significativa en la recuperación de la hidrofobicidad. Se observó que para la contaminación pesada el promedio de los ángulos fue de 52.89° , siendo este valor prácticamente similar al registrado durante la fase inicial. En la evaluación con la contaminación muy pesada, se registró el valor más bajo de hidrofobicidad, siendo el ángulo promedio de 38.69 . Para este nivel de contaminación las tensiones de flameo registradas fueron las menores durante el desarrollo de las pruebas. Estos resultados se muestran en la tabla 4.

CAPÍTULO 4

DETERMINACIÓN DE LAS CORRIENTES DE FUGA EN PÉRTIGAS PARA TRABAJO EN LÍNEA VIVA



4.1 Introducción

Los polímeros como aislamientos externos son indispensables en la industria eléctrica, por tener un buen comportamiento en ambientes húmedos y secos. No obstante, al ser expuestos a la intemperie son atacados por la radiación ultravioleta, lluvia, niebla, etc., asimismo, la acumulación de residuos en su superficie los hace reaccionar químicamente, degradándose con el paso del tiempo. Al estar expuestos a entornos que los dañan, se presentan fallas superficiales, siendo las más comunes el *tracking* y la *erosión*.

Las resinas epóxicas son polímeros termoendurecibles cuya estabilidad mecánica y química permite su aplicación en: Recubrimientos, herramientas plásticas, vaciado y encapsulado, adhesivos y laminados. Este tipo de resinas se forman por hidrólisis y condensación (*polimerización*) de mezclas de alquilelorosilanos bifuncionales y trifuncionales.

Existen muchos tipos de resinas epóxicas: las hay de peso molecular bajo con alto contenido de anillos epóxicos, de apariencia líquida que se emplean en el campo de la impregnación y para el laminado y el vaciado de piezas utilizadas en la industria química, electrónica, aeronáutica, entre otras.

Las resinas de tipo sólido son polímeros de pesos moleculares más elevados, en los cuales se ha controlado no solo la longitud de la cadena, sino la presencia de anillos epóxicos para subsecuentes polimerizaciones. Los grupos de resinas epóxicas sólidas encuentran su principal aplicación en las industrias de pinturas y acabados especiales, para resistir esfuerzos mecánicos y agentes químicos que otros tipos de acabados no resisten con iguales ventajas. Cabe señalar que las resinas epóxicas como tales, sin modificar, son productos con campos de aplicación muy limitados. Siempre que se encuentra un uso satisfactorio para

dichas resinas, está implícito el uso coincidente de agentes modificadores y de sistemas de polimerización diferentes.

Como ya se ha mencionado, las resinas epóxicas polimerizadas presentan propiedades eléctricas muy atractivas que, junto con su estabilidad dimensional y su resistencia mecánica, le han dado un lugar preponderante dentro de la industria electrónica y la industria eléctrica.

Como parte de esta investigación se realizaron pruebas experimentales en pértigas dieléctricas de resina epóxica y de fibra de vidrio, las cuales se emplean en la conexión y desconexión de fusibles de alta tensión. Las pértigas se probaron bajo el criterio de la norma IEC-855 [3], la cual es aplicable a pértigas para trabajo en línea viva con tensiones arriba de 1 kV, y que también entra en concordancia con la norma ASTM F711-89 [13]. Un fabricante externo proporcionó todas las pértigas para su evaluación. Las pruebas de laboratorio se llevaron a cabo bajo condiciones húmedas y secas, siendo éstas, condiciones severas de operación. Específicamente se analizaron los niveles de corriente de fuga. Para la medición de la corriente se utilizó el circuito de medición empleado en las pruebas de aisladores poliméricos.

4.2 Diseño de pruebas experimentales

Las pértigas se fabricaron de resina epóxica cuyo núcleo se reforzó con fibra de vidrio. El color de la pértiga dependió del pigmento empleado como recubrimiento. El diámetro externo de las pértigas fue de 39.5 mm.

Pruebas húmedas

La metodología de prueba según la norma IEC-855 [3], en condiciones húmedas, fue la siguiente:

1. De un lote de 10 pértigas, de 3 m cada una, se seleccionó un sublote de 3 pértigas
2. Antes de la evaluación, se procedió a una inspección visual de la pértigas, a fin de que estas no presentaran imperfecciones superficiales en su manufactura, y que sus dimensiones fueran las especificadas en la norma
3. Las pértigas del sublote se cortaron, a fin de tener 3 pértigas, de 1.20 m cada una. Se limpiaron con una solución de isopropanol y se dejaron secar a temperatura ambiente durante 15 minutos
4. Sobre la pértiga de prueba se conectaron dos electrodos. Los electrodos se fabricaron de aluminio, en forma de alambre, cuyo diámetro fue de 3 a 4 mm, con una distancia de separación de 1 m entre cada uno
5. Como se trató de pruebas húmedas, los requerimientos fueron los siguientes: La velocidad de precipitación del agua fue de 1.0 mm/min a 1.5 mm/min, siendo su resistividad de $100 \pm 15 \Omega\cdot m$. La temperatura del agua estuvo comprendida entre 18 C y 28 C
6. El diagrama esquemático para esta prueba se muestra en el apéndice B. La pértiga se colocó al centro de la estructura, con una inclinación de 45  sobre el piso. Se aplicó una tensión de 91 kV de CA entre los electrodos durante una hora, de acuerdo a la norma IEC 60-1 [38]
7. La tensión se aplicó al inicio de la prueba, simultáneamente con el inicio de la ca da de agua

8. Se consideró que la prueba fue satisfactoria cuando: No se presentó flameo, ni descargas por chispas (*sparkover*), o perforación (*puncture*) en la pértiga, ni se presentaron signos visuales de *tracking* o *erosión* sobre la superficie. Asimismo cuando no ocurrió un incremento en la temperatura

En la figura 4.1 se muestra el arreglo experimental empleado para las pruebas en las pértigas húmedas.

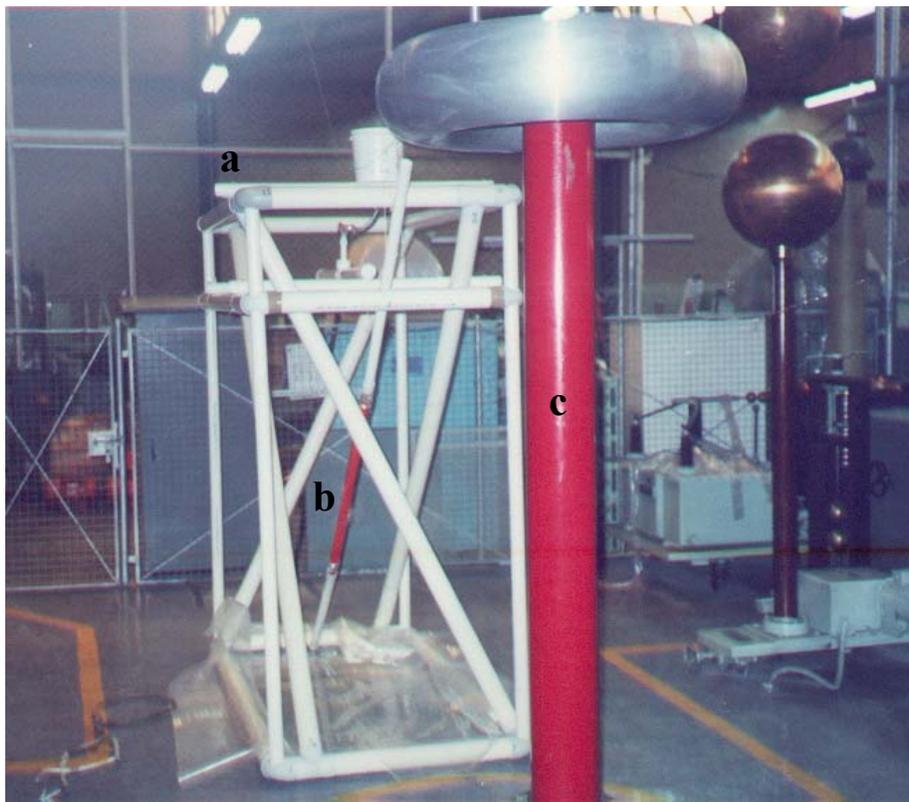


Figura 4.1 Arreglo experimental para las pruebas en pértigas húmedas: a) Estructura de pvc, b) pértiga de prueba, c) divisor resistivo

La estructura mostrada en la figura anterior es de policloruro de vinil (pvc). En la parte superior se colocó un contenedor de agua, cuya caída correspondió a la especificada en la norma. La pértiga a probar se colocó al centro de la estructura. El electrodo superior se conectó a la alta tensión y en la parte inferior se conectó el

circuito de medición. Cabe señalar que para la medición de la corriente de fuga se utilizó el circuito eléctrico y el sistema de adquisición de datos empleados en las pruebas con aisladores poliméricos. El sistema de adquisición de datos constó de un circuito derivador, un circuito de protección, un circuito offset, un microprocesador y una computadora personal. El microprocesador envió los datos a la pc, y mediante un software comercial (Origin 6.0) se graficaron los valores de corriente de fuga contra el tiempo.

En la figura 4.2 se muestran diferentes tipos de pértigas de resina epóxica. Como se mencionó, el color de cada una de ellas está en función del pigmento usado como recubrimiento, y de su espesor. El núcleo de estas pértigas está reforzado con fibra de vidrio.

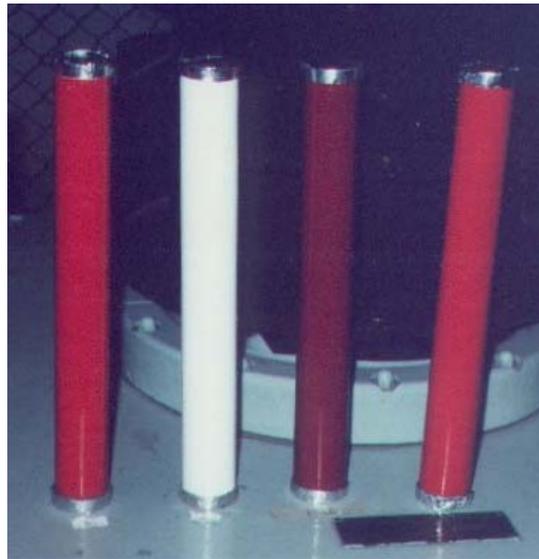


Figura 4.2 Pértigas de resina epóxica

En la figura 4.3 se muestra una pértiga después de haber sido evaluada. Se puede observar la ausencia de degradación superficial o decoloramiento.



Figura 4.3 Aspecto de una pértiga de resina epoxy después de haber sido evaluada

En la figura 4.4 se muestra una pértiga fallada. Se puede apreciar la formación de pistas conductoras de carbón a través de la superficie de la pértiga. Se observa también un decoloramiento parcial.



Figura 4.4 *Tracking* sobre una pértiga dieléctrica fallada

4.3 Corrientes de fuga en pértigas bajo condiciones húmedas

Para las pruebas en condiciones húmedas, la norma IEC-855 no indica los niveles de corriente de fuga que deben circular sobre la superficie de la pértiga. En esta investigación se midieron las corrientes a fin de determinar dichos niveles, y que pudieran servir como referencia para análisis posteriores.

A continuación se muestran las graficas de la corriente de fuga de las pértigas evaluadas.

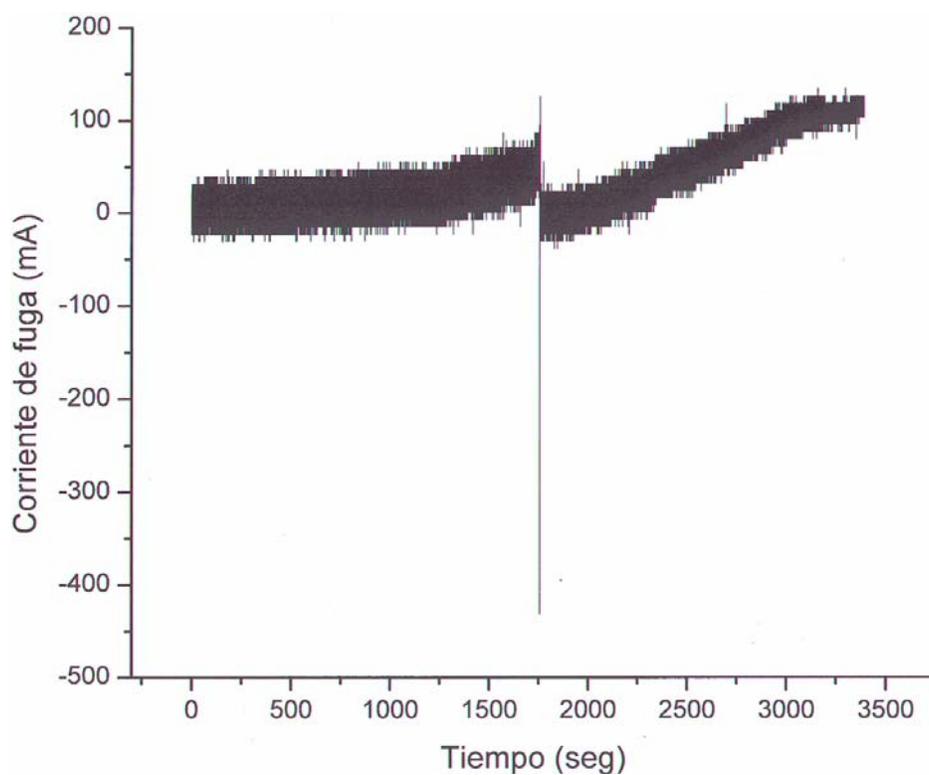


Figura 4.5 Corriente de fuga VS tiempo. Tensión de prueba = 91 kV, temperatura = 26°C y una humedad relativa = 60%

La gráfica de la figura 4.5 corresponde a una pértiga de poliuretano, color blanco, y cuyo pigmento tuvo un espesor de 12 mm. Se observa que la corriente de fuga al inicio de la prueba fue menor a los 50 mA, y conforme se incrementó el tiempo dicha corriente llegó a valores comprendidos entre 50-110 mA. Solamente a los 30 minutos se presentó un pico de corriente cercano a los 450 mA. La pértiga paso satisfactoriamente la prueba ya que no se presento ningún rastro de *tracking* al término de la misma.

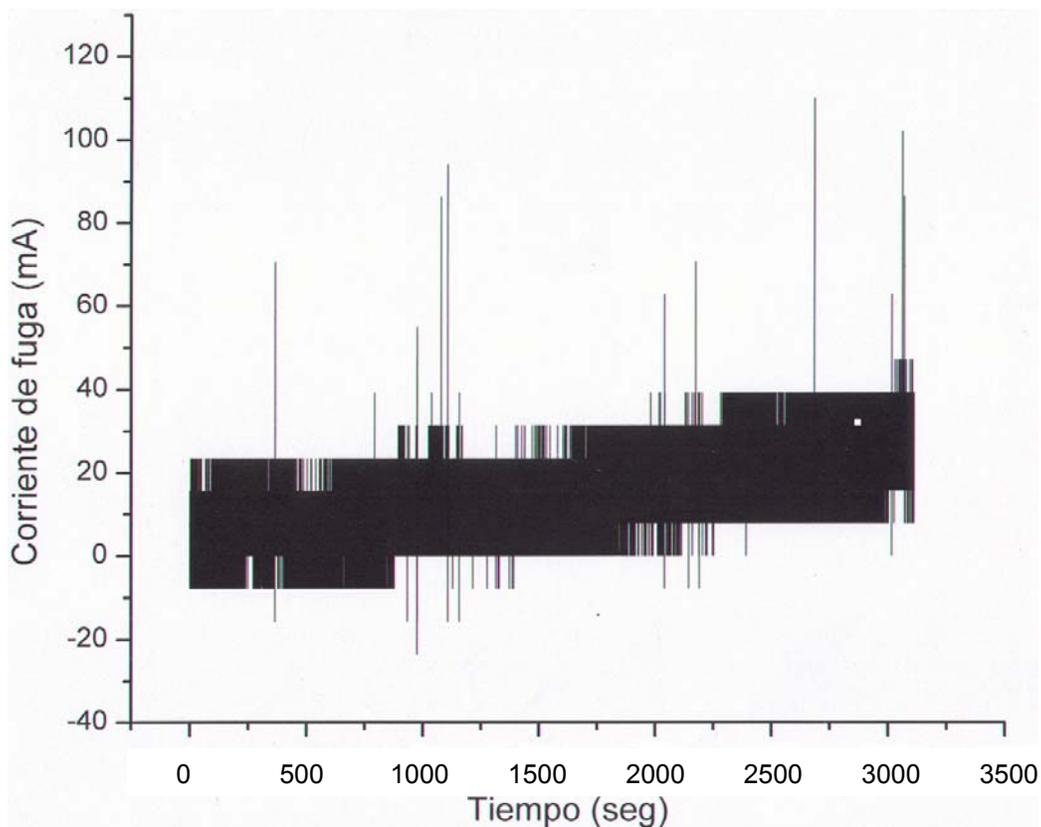


Figura 4.6 Corriente de fuga VS tiempo. Tensión de prueba = 91 kV, temperatura = 26°C y una humedad relativa = 58%

La gráfica de la figura 4.6 corresponde a una pértiga de resina epoxy, color rojo. El diámetro del espesor del pigmento fue de 5 mm. La corriente de fuga se incrementó gradualmente conforme el tiempo de prueba transcurría. Al inicio de la prueba se presentaron corrientes entre 10-25 mA, y al final se tuvieron corrientes mayores a los 30 mA. Cabe mencionar que se presentaron algunos picos de corriente cercanos a los 100 mA. La prueba fue satisfactoria dado que no se presentó ningún degradamiento sobre la superficie de la pértiga.

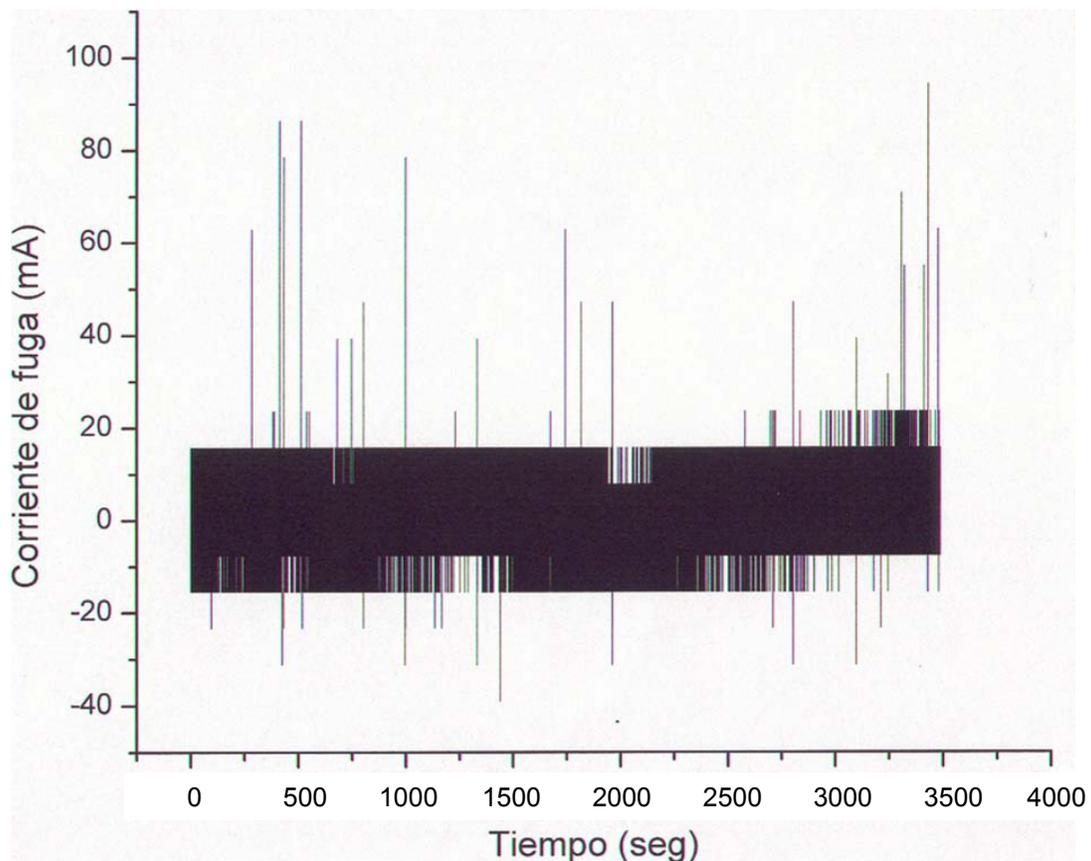


Figura 4.7 Corriente de fuga VS tiempo. Tensión de prueba = 91 kV, temperatura = 24°C y una humedad relativa = 62%

La gráfica de la figura 4.7 corresponde a la prueba para una pértiga de resina epoxy color naranja. El espesor del recubrimiento fue de 5 mm. Los niveles de corriente de fuga durante toda la prueba prácticamente fueron los mismos, siendo estos del orden de 10-20 mA. No obstante, se presentaron algunos pulsos de corriente cercanos a los 90 mA. No se presentó degradación superficial.

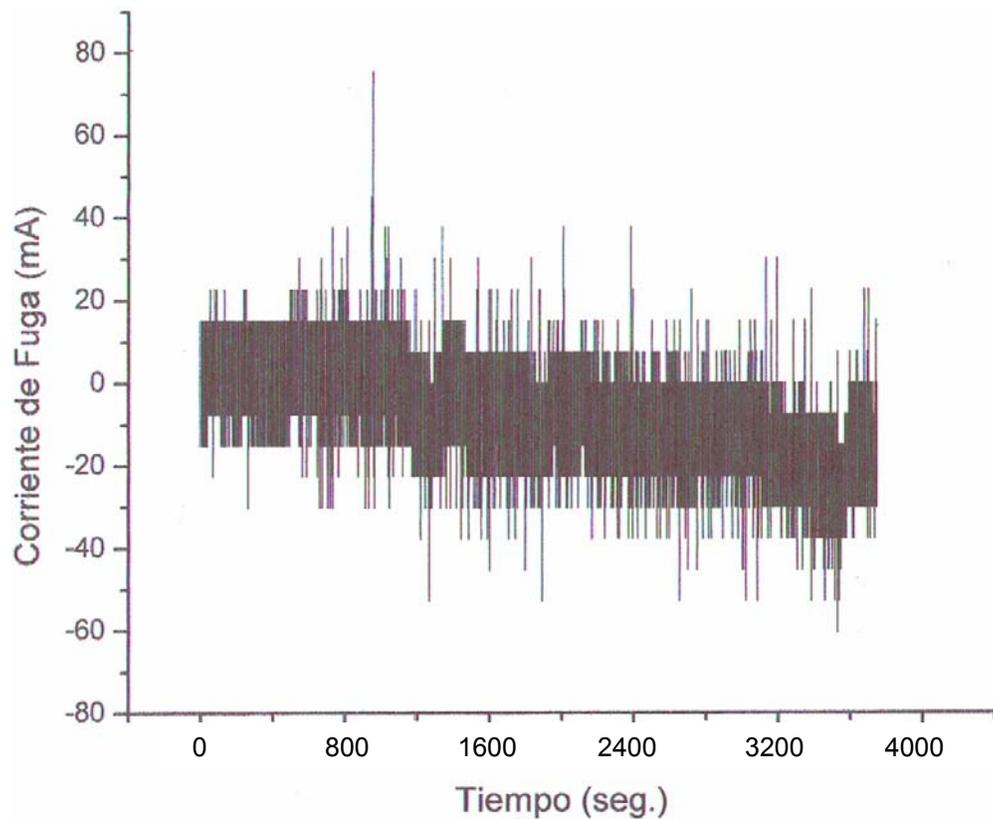


Figura 4.8 Corriente de fuga VS tiempo. Tensión de prueba = 91 kV, temperatura = 24°C y una humedad relativa = 65%

La gráfica de la figura 4.8 corresponde a la prueba para una pértiga de resina epoxy color rojo, cuyo recubrimiento tuvo un espesor de 10 mm. La corriente de fuga al inicio de la prueba fue del orden de 10-20 mA y conforme la prueba transcurrió el nivel de la corriente aumentó, llegando a valores comprendidos entre

30-40 mA. A lo largo de la prueba se presentaron picos de diferente magnitud, siendo el más grande de 70 mA. La inspección visual al término de la prueba reveló la ausencia de *tracking* sobre la superficie de la pértiga, por lo que se consideró aceptable su comportamiento.

4.4 Pruebas en condiciones secas

Las pértigas se fabricaron de fibra de vidrio y carecían de núcleo. El color de las pértigas era amarillo y no tenían ningún recubrimiento o pigmento especial en su superficie. El diámetro externo de las pértigas fue de 32 mm.

La metodología de prueba, según la norma IEC-855, fue la siguiente:

1. De un lote de 10 pértigas, de 3 m cada una, se seleccionó un sublote de 3 pértigas
2. Antes de la prueba, se procedió a una inspección visual de las pértigas, con el fin de observar que estas no presentaran imperfecciones superficiales en su manufactura, y que sus dimensiones fueran las especificadas en la norma
3. Las pértigas del sublote se cortaron, a fin de tener 3 pértigas, de 30 cm cada una. Se limpiaron con una solución de isopropanol y se dejaron secar a temperatura ambiente durante 15 minutos
4. En los extremos de cada una de las pértigas se colocó cinta conductora de aluminio. Se conectaron dos electrodos circulares de cobre en ambos extremos de la pértiga de prueba. Se aplicó una tensión de 91 kV de CA entre electrodos, durante un minuto, de acuerdo a la norma IEC 60-1. Se registraron los valores de la corriente de fuga sobre la superficie de la pértiga

5. El diagrama esquemático se muestra en el apéndice B
6. Se consideró que la prueba fue satisfactoria cuando: No se presentó flameo, ni descargas por chispas (*sparkover*), o perforación (*puncture*) en la pértiga, ni se presentaron signos visuales de *tracking* o *erosión* sobre la superficie

En la figura 4.9 se muestra el arreglo experimental empleado en la evaluación de las pértigas secas.

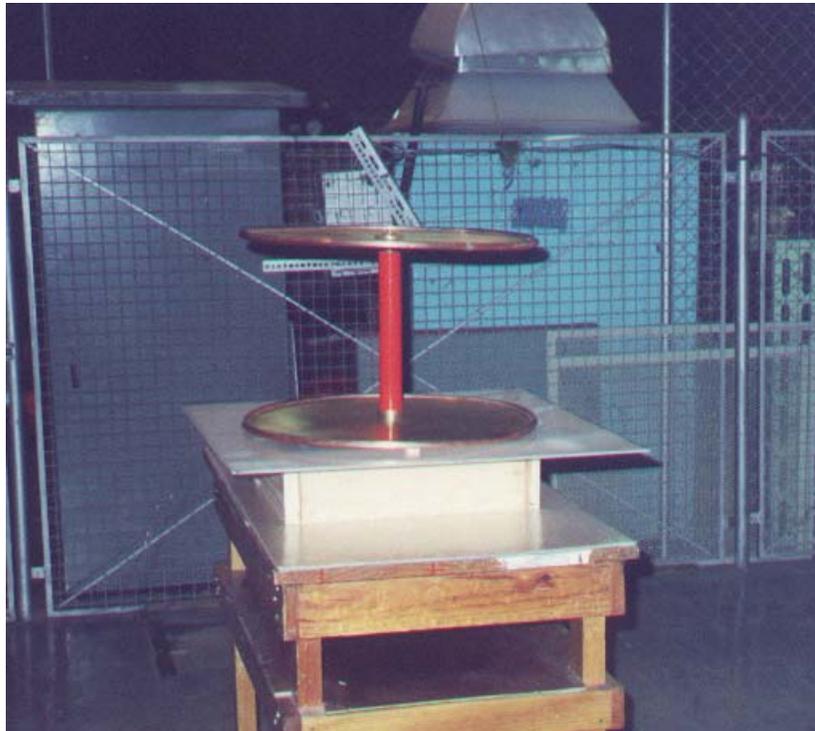


Figura 4.9 Arreglo experimental para las pruebas en pértigas secas

De la figura anterior, el electrodo superior se conectó a la alta tensión y en el electrodo inferior se conectó el circuito de medición. La señal registrada se envió a un osciloscopio, a través de un cable coaxial, en donde se graficaron los valores de tensión medidos y con los cuales se calcularon las corrientes de fuga. El osciloscopio empleado fue un Tektronik TDS680B de 4 canales, 5 gigamuestras por segundo y 1 GHz de ancho de banda.

4.5 Corrientes de fuga en pértigas bajo condiciones secas

Los niveles de corriente de fuga para pértigas probadas bajo condiciones secas, según se indican en la norma IEC-855, son del orden de microamperes. Para una pértiga con un diámetro de 32 mm, la corriente de fuga no debe exceder de 12 μA r.m.s., sin embargo, las pértigas probadas registraron valores de corriente mayores, por lo que se considero que no cumplían satisfactoriamente con la norma. Para estas pruebas, el ruido electromagnético generado por las corrientes inducidas se redujo empleando un blindaje electrostático, tanto en el circuito de medición como en los cables de conexión.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en la evaluación de pértigas en condiciones secas.

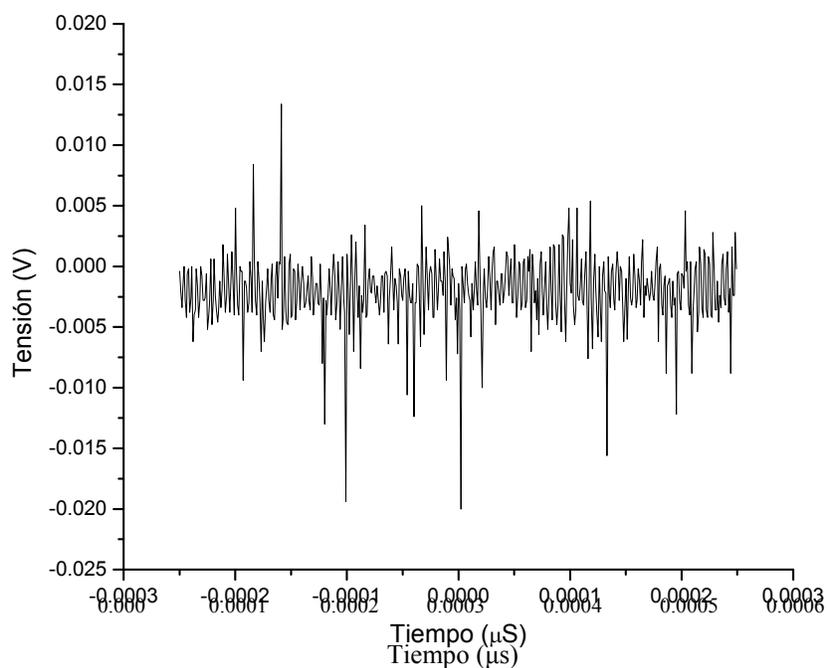


Figura 4.10 Oscilograma para una pértiga de fibra de vidrio. Temperatura = 21°C, Humedad relativa = 69%, tensión pico-pico = 27.8 mV, Corriente de fuga calculada = 197 μA

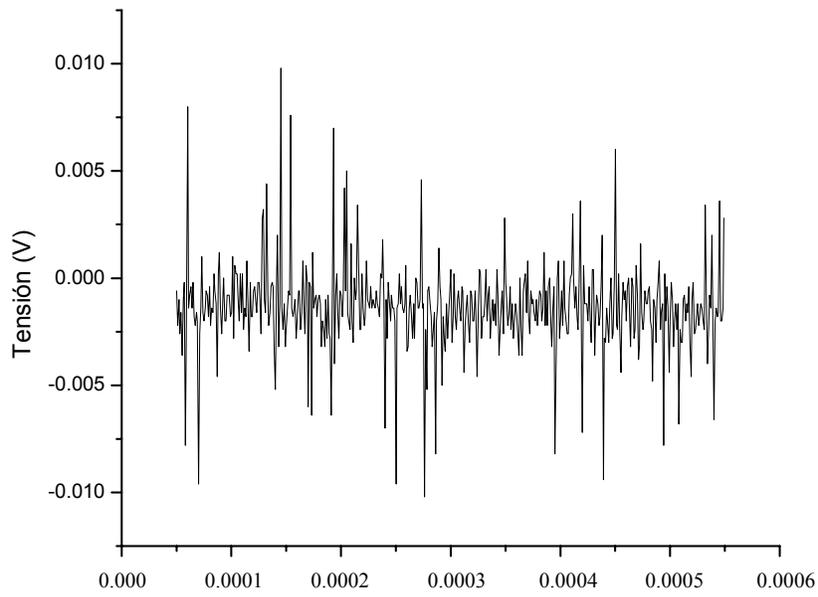


Figura 4.11 Oscilograma para una pértiga de fibra de vidrio. Temperatura = 21°C, Humedad relativa = 70%,
tensión pico-pico = 25.5 mV, Corriente de fuga calculada = 145.5 μ A

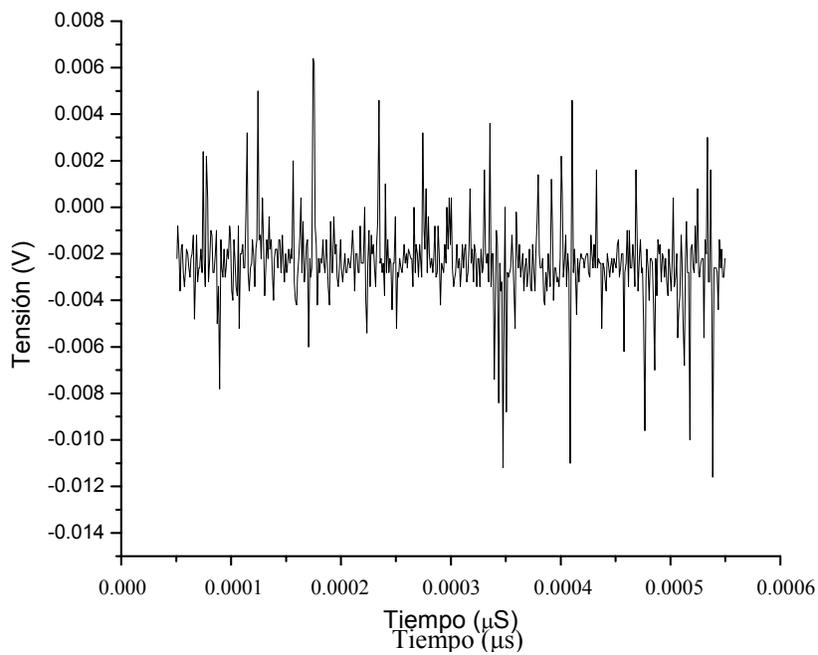


Figura 4.12 Oscilograma para una pértiga de fibra de vidrio. Temperatura = 22°C, Humedad relativa = 71%,
tensión pico-pico = 17.2 mV, Corriente de fuga calculada = 93.57 μ A

Para las pértigas de resina epóxica polimerizadas se llevaron también a cabo las pruebas bajo condiciones secas. La metodología de prueba fue la misma que se empleó en la evaluación de las pértigas de fibra de vidrio. Las graficas de la corriente de fuga se muestran a continuación.

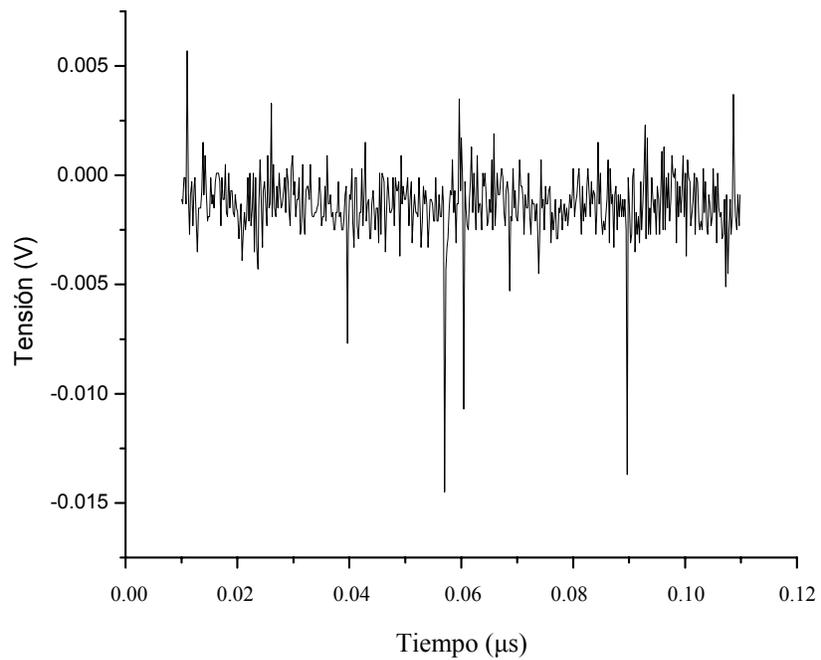


Figura 4.13 Oscilograma para una pértiga de resina epóxica. Temperatura = 21°C, Humedad relativa = 80%, tensión pico-pico = 20.2 mV, Corriente de fuga calculada = 105 μ A

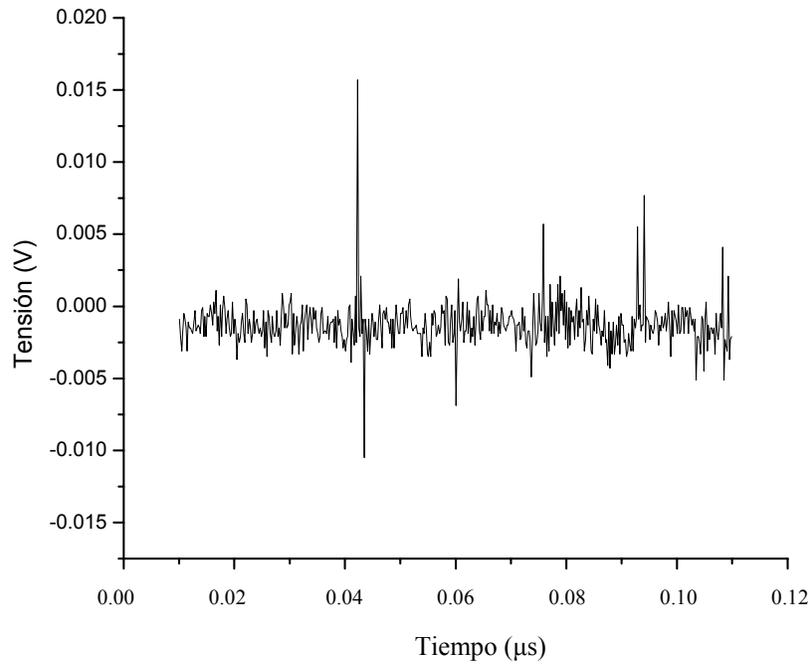


Figura 4.14 Oscilograma para una pértiga de resina epóxica. Temperatura = 21°C, Humedad relativa = 79%, tensión pico-pico = 20 mV, Corriente de fuga calculada = 105 μA

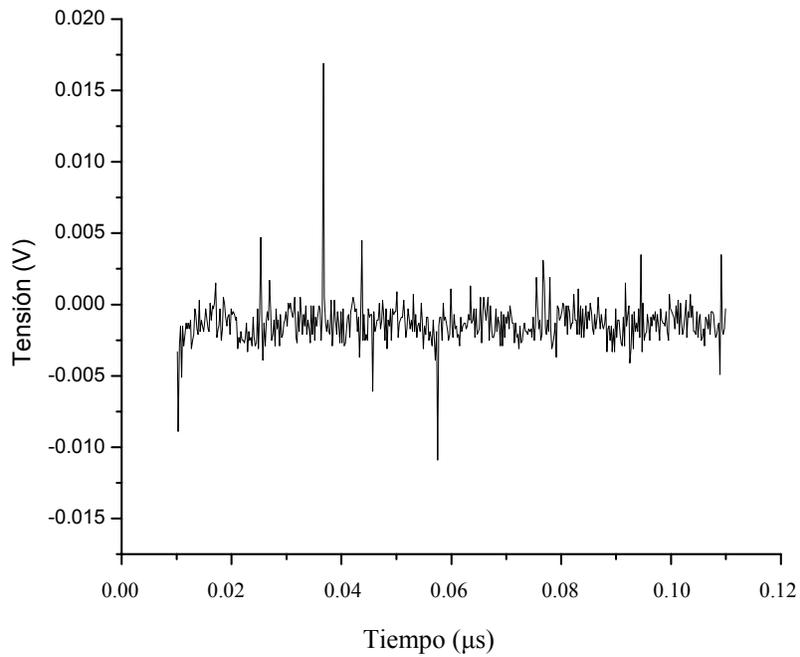


Figura 4.15 Oscilograma para una pértiga de resina epóxica. Temperatura = 21°C, Humedad relativa = 79% tensión pico-pico = 27.5 mV, Corriente de fuga calculada = 144 μA

La grafica que se muestra a continuación corresponde a la evaluación de una p ertiga de resina ep oxica, pero con una humedad relativa menor.

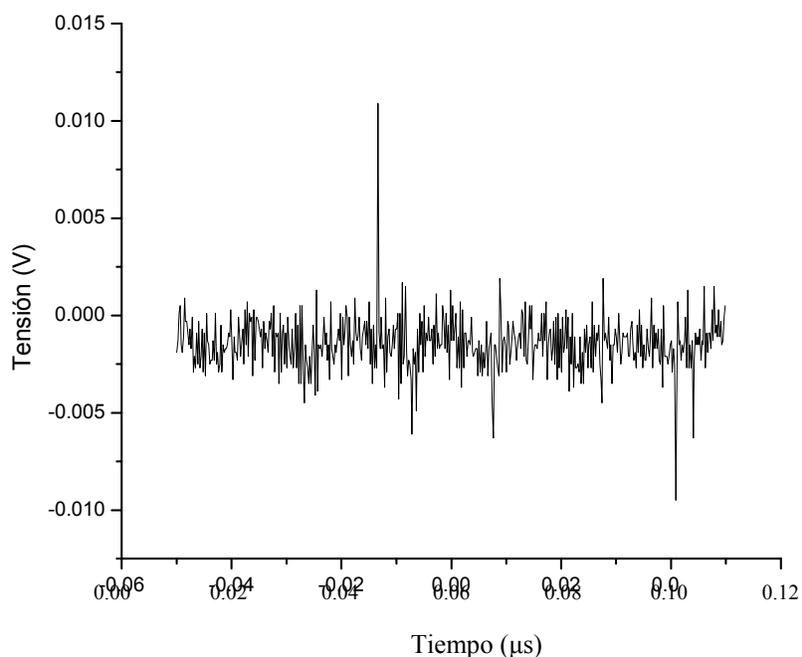


Figura 4.16 Oscilograma para una p ertiga de resina ep oxica. Temperatura = 24°C, Humedad relativa = 70%
tensi3n pico-pico = 17.5 mV, Corriente de fuga calculada Corriente = 89.4 μA

Puede apreciarse que al disminuir la humedad relativa, la corriente de fuga tambi en disminuye su valor.

4.6 Análisis de resultados

Al final de la evaluación de las pértigas de resina epóxica, en condiciones húmedas, no se observó ningún degradamiento o decoloramiento superficial y dado que la norma IEC-855 no indica los valores de corriente de fuga, se consideró que las pruebas resultaron satisfactorias.

El examen visual al final de la evaluación de las pértigas de resina epóxica, en condiciones secas, reveló que estas no presentaron *tracking* o *erosión* a lo largo de su superficie. Sin embargo, se registraron niveles de corriente mayores a los indicados en la norma, por lo que se consideró que su comportamiento no fue satisfactorio.

Al final de la evaluación de las pértigas de fibra de vidrio, bajo condiciones secas, se notó la ausencia de degradaciones (*tracking*) o decoloramientos superficiales. No obstante, se obtuvieron niveles de corriente de fuga mayores a los que indica la norma, por lo que se considero que las pruebas no cumplieron plenamente con lo especificado.

Cabe mencionar que también se evaluaron las pértigas de fibra de vidrio en condiciones húmedas, sin embargo, estas presentaron un pobre comportamiento ya que al inicio y durante los primeros 20 minutos de la prueba se presentó un degradamiento superficial notable (*puncture*) y, en algunos casos, se llegó al flameo. Para estas pruebas no se registraron los niveles de corriente de fuga.

De los resultados obtenidos puede concluirse que ninguno de los dos tipos de material proporcionados por el fabricante cumplió satisfactoriamente con las pruebas, según lo indica la norma IEC-855.

4.7 Conclusiones generales

En esta investigación se presentó un análisis experimental sobre el comportamiento de la tensión de flameo en aisladores poliméricos contaminados. Se determinó el efecto de una densidad reducida de aire así como el efecto de la humedad relativa cuando ésta varía. Dicha investigación permite establecer los siguientes resultados:

El incremento en la humedad relativa, cuando se tienen niveles de contaminación ligeros y/o medios, provoca que la tensión de flameo tienda a disminuir, alrededor de un 10%. Sin embargo, cuando el nivel de contaminación es alto, el cambio en la humedad prácticamente no provoca cambios en la tensión de flameo. Solamente cuando el rango de humedad relativa es muy alto, alrededor del 90%, la tensión de flameo tiende a ser irregular.

Al incrementarse la altitud, la densidad relativa del aire disminuye provocando una reducción en la tensión de flameo. Esta reducción fue mayor en condiciones de alta contaminación. No obstante, en ambientes con una contaminación ligera, la tensión de flameo fue mayor a la reportada en otros laboratorios [27]. En general, la formulación de los aisladores, EPDM en este caso, no tuvo una influencia significativa en el comportamiento de la tensión disruptiva, ya que su desempeño fue menor a lo esperado. En condiciones de alta contaminación y gran altitud, los aisladores de EPDM poseen un rendimiento similar a los aisladores convencionales.

El estudio de la hidrofobicidad superficial de los aisladores evaluados lleva a los siguientes resultados:

Cuando el tiempo de recuperación es mayor, los aisladores de EPDM tienden a recuperar sus propiedades hidrofóbicas, sólo si han sido expuestos a niveles de contaminación ligeros. En ambientes con una contaminación severa, el tiempo de recuperación no influye decisivamente en la recuperación de la hidrofobicidad.

Una reducción significativa de la hidrofobicidad superficial propicia que las tensiones de flameo sean menores, sobre todo en aisladores expuestos a altos niveles de contaminación.

En el análisis de las pértigas se puede concluir lo siguiente:

Se empleó una metodología para llevar a cabo mediciones de corriente de fuga en pértigas dieléctricas de resina epóxica y de fibra de vidrio, empleadas en la conexión y desconexión de fusibles en líneas de 115 kV, bajo condiciones secas y húmedas, según lo indica la norma internacional IEC-855. La técnica de medición empleada arrojó resultados originales, ya que las pruebas realizadas en esta investigación no se llevan a cabo en ningún otro laboratorio nacional, siendo esta la primera vez que se emplea la norma IEC-855 en la evaluación de pértigas para trabajo en línea viva.

En el caso de las pruebas húmedas, las pértigas de fibra de vidrio tuvieron un pobre comportamiento ya que presentaron degradaciones superficiales (*tracking* y *puncture*) en una etapa incipiente de las pruebas. Las pértigas de resina epóxica tuvieron un buen desempeño durante estas pruebas, ya que no presentaron signos de degradación superficial al término de los ensayos.

El ruido electromagnético generado por las corrientes inducidas se redujo empleando un blindaje electrostático tanto en el circuito de medición como en los cables de conexión. No obstante, los niveles de corriente de fuga encontrados en

condiciones secas, tanto para las pértigas de resina epóxica y las de fibra de vidrio, son excesivamente mayores a los reportados en la normatividad internacional.

De los resultados obtenidos se considera que las dos formulaciones con las que se fabrican las pértigas evaluadas en esta investigación: Resina epóxica y fibra de vidrio, resultan inadecuadas para realizar trabajo en línea viva dado que no cumplen con las especificaciones de la norma.

4.8 Recomendaciones para trabajos futuros

Tomando como referencia este trabajo se pueden iniciar investigaciones encaminadas al análisis de la tensión de flameo a otras altitudes y con otros niveles de contaminación. Se puede investigar experimentalmente en otros laboratorios y con diferentes materiales poliméricos. Hasta hace poco tiempo, la normativa internacional ha empezado a tomar en cuenta los problemas por contaminación de los países situados a gran altitud. Sin embargo, la información con la que se cuenta no es extensa. Asimismo, no se cuenta con una guía estandarizada que permita evaluar aisladores poliméricos en laboratorio, por lo que una línea de investigación podría ser la de encontrar un método confiable, sencillo y reproducible.

Otro punto importante a investigar sería el de conocer el efecto en los cambios de temperatura sobre la tensión de flameo.

El impacto de una hidrofobicidad reducida sobre el funcionamiento eléctrico de un aislador polimérico es un aspecto importante que merece ser estudiado, dado que puede proveer líneas de estudio a los investigadores y/o los fabricantes para el mantenimiento preventivo, a fin de minimizar los flameos por contaminación.

En el caso de las pértigas se puede investigar como influyen los cambios de la humedad relativa en la corriente de fuga. También se puede investigar experimentalmente con diferentes materiales aislantes y con diferentes procesos de fabricación, para encontrar una formulación que cumpla con lo exigido en la normatividad internacional, para realizar trabajo en línea viva.

REFERENCIAS

- [1] J. L. Fierro Ch., *Alternativas de Solución al Problema de Contaminación en Aisladores*, Boletín IIE, Vol. 20, No. 3, mayo-junio de 1996
- [2] Y. Mizuno et al., *Effect of Climatic Conditions on Contaminated Flashover Voltage of Insulators*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 4, No. 3, June 1997
- [3] *Insulating Foam-Filled Tubes and Solid Rods for Live Working*, IEC-855, 1985
- [4] M. M. Barraza, *Efecto de las Condiciones Ambientales en las Pruebas de Contaminación*, II Jornadas Latinoamericanas en Alta Tensión y Aislamiento Eléctrico, Instituto Tecnológico de Morelia, Michoacán, México, del 8-11 de octubre de 1996
- [5] T. A. Phillips et al., *Influence of Air Density on Electrical Strength of Transmission Line Insulators*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-86, No.8, August 1967
- [6] T. Kawamura et al., *Pressure Dependence of DC Breakdown of Contaminated Insulators*, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-17, No.1, February 1982
- [7] V. M. Rudakova and N.N. Tikhodeev, *Influence of Low Air Pressure on Flashover Voltages of Polluted Insulators: Test Data, Generalization Attempts and Some Recommendations*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No.1, January 1989

- [8] H. P. Mercure, *Insulator Pollution Performance at High Altitude: Major Trends*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 2, April 1989
- [9] R. Sundararajan and R. Nowlin, *Effect of Altitude on the Flashover Voltage of Contaminated Insulators*, IEEE Annual Report, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, San Francisco, 20-23 October 1996
- [10] F. A. M. Risk and A. Q. Rezazada, *Modeling of Altitude Effects on AC Flashover of Polluted High Voltage Insulators*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.12, No.2, April 1997
- [11] D. A. Hoch and D. A. Swift, *Flashover Performance of Polluted Insulation: An Assessment on the Influence of Air Density*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No.2, April 1997
- [12] S. Matsui et al., *Improved Corona Characteristics of Partially Semiconducting Glazed Suspension Insulators for Use at High Altitudes*, Reunión de Verano de Potencia del IEEE, Acapulco, Guerrero, México, del 13-18 de julio de 1997
- [13] *Standard Specification for Fiberglass-Reinforced Plastic (FRP) Rod and Tube Used in Live Line Tools*, ASTM D-F711-89, 1997
- [14] J. L. Fierro, *Aisladores No Cerámicos Para Líneas de Transmisión Parte I: Experiencias de una Tecnología Prometedora*, Boletín IIE, marzo/abril de 1999
- [15] R. Hackman, *Outdoor HV Composite Polymeric Insulators*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 6, No. 5, October 1999

- [16] R. Bärsch et al., *Test Methods for Polymeric Insulating Materials for Outdoor HV Insulation*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 6, No.5, October 1999
- [17] J. Mackevich and M. Shah, *Polymer Outdoor Insulating Materials Part I: Comparison of Porcelain and Polymer Electrical Insulation*, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 13, No. 3, May/June 1997
- [18] R. S. Gorur et al., *Contamination Performance of Polymeric Insulating Materials Used for Outdoor Insulating Applications*, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 24, No.4, August 1989
- [19] A. De la O et al., *Electrical Performance of Non-ceramic Insulators in Artificial Contamination Tests: Role of Resting Time*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 3, No. 6, December 1996
- [20] M. Shah, *Signature Analysis of Flashover Voltage Phenomena on Contaminated Insulator Surfaces*, IEEE Annual Report, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, San Francisco, 20-23 October 1996
- [21] S. Simmons et al., *Polymer Outdoor Insulating Materials Part III: Silicone Elastomer Considerations*, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 13, No.5, September/October 1997
- [22] J. P. Reynders et al., *Review of Aging and Recovery of Silicone Rubber Insulation for Outdoor Use*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 6, No.5, October 1999

[23] H. Hillborg and U.W. Gedde, *Hydrophobicity Changes in Silicone Rubbers*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 6, No.5, October 1999

[24] *Artificial Pollution Tests on High-Voltage Insulators to be Used on AC Systems*, IEC-507, 1991-04, Second Edition

[25] *Guide for the Selection of Insulators in Respect of Polluted Conditions*, IEC-815, 1986, First Edition

[26] G. G. Karady et al., *Revisión de la Investigación CIGRE-IEEE en el Comportamiento de Aisladores No Cerámicos Bajo Contaminación (Efectos de Envejecimiento en Campo y Técnicas de Prueba en Laboratorio)*, Traducción del artículo publicado por CIGRE SC-33, elaborado por : Marcos Moreno Barraza para la revista mexicana Tecnolab Vol. XI, No. 62, en julio de 1995

[27] CIGRE WG 33-04 Taskforce 01, *A Review of Current Knowledge: Polluted Insulators*, August 1998

[28] *Composite Insulators for AC Overhead Lines with a Nominal Voltage Greater than 1000 V-Definitions*, Test methods and Acceptance Criteria

[29] J. Montesinos et al., *Determinación del Voltaje de Flameo de Aisladores con Propiedades Hidrofóbicas Superficiales*, Reunión de Verano de Potencia del IEEE, Acapulco, Guerrero, México, de 16-21 de julio de 1995

[30] S.A. Sebo and T. Zhao, *Utilization of Fog Chambers for Non-ceramic Outdoor Insulator Evaluation*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 6, No. 5, October 1999

[31] A. De la O et al., *AC Clean Fog Tests on Non-ceramic Insulating Materials and a Comparison with Porcelain*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 4, October 1994

[32] A. De la O y R. S. Gorur, *Flashover of Contaminated Non-ceramic Outdoor Insulators in a Wet Atmosphere*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 5, No. 6, December 1998

[33] R. Sundararajan, *Preliminary Theoretical Study on The Flashover Voltage of Polymeric Insulators*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 6, No.5, October 1999

[34] E. Pérez, SEPI-ESIME-IPN, México D.F., Comunicación Privada

[35] M. A. R. M. Fernando and S. M. Gubanski, *Leakage Currents on Non-ceramic Insulators and Materials*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 6, No. 5, October 1999

[36] F. Espino C., *Caracterización de Descargas Corona en Corriente Directa*, Tesis de Maestría, SEPI-ESIME-IPN, México D.F., 1998

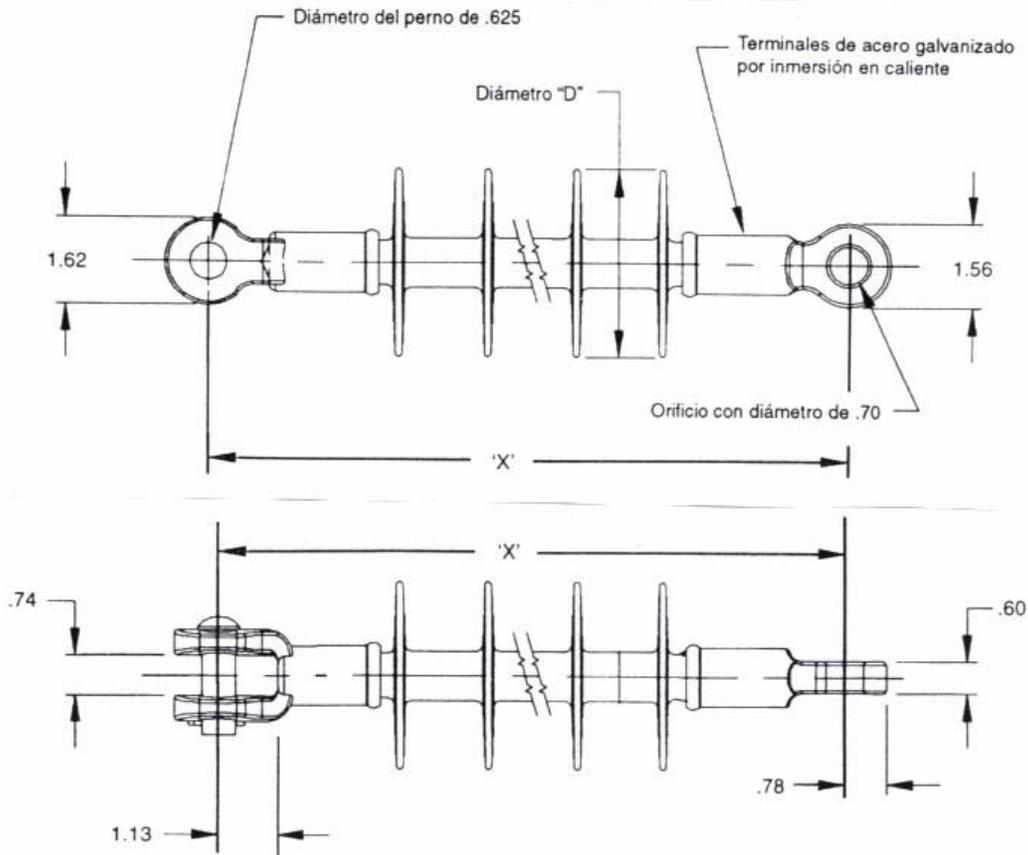
[37] Revista Tecnolab, Publicación del Laboratorio de Pruebas de Equipos y Materiales de la Comisión Federal de Electricidad, Irapuato, Guanajuato, México, Volumen XIV, No. 81, septiembre de 1998

[38] *High Voltage Test Techniques Part I: General Definitions and Test Requirements*, IEC 60-1, 1989, Second Edition

[39] *High Voltage Test Techniques*, IEEE STD-4, 1978

[40] R. H. Corona et al., *Design of an Anti-Contamination Insulator Profile by Using a Computer Program*, IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1999

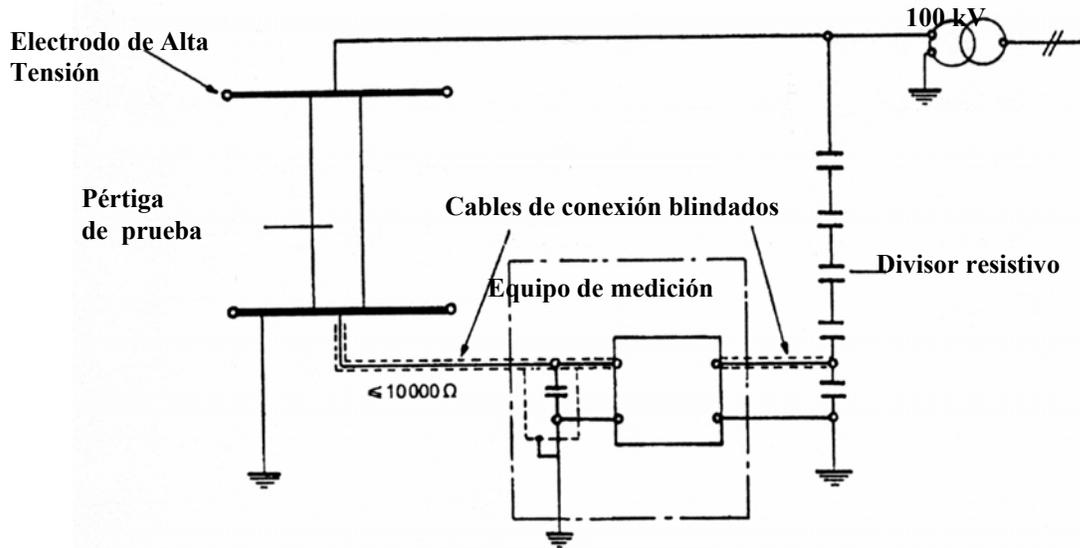
APÉNDICE A



Características técnicas

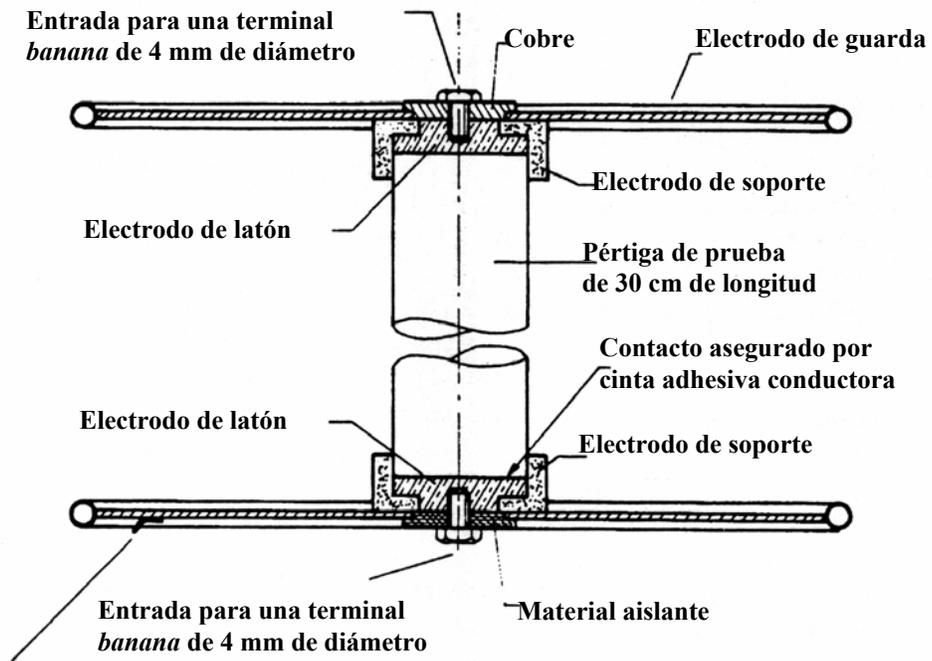
Tipo de aislador	Número de faldones	Clase	Longitud 'X' (mm)	Diámetro 'D' (mm)	Peso (kg)	Distancia de fuga (mm)	Distancia de arqueado en seco (mm)
Polimérico de EPDM	4	15	318	92	.95	406	203

APÉNDICE B



Equipo de medición situado a 2 m de la fuente de Alta Tensión

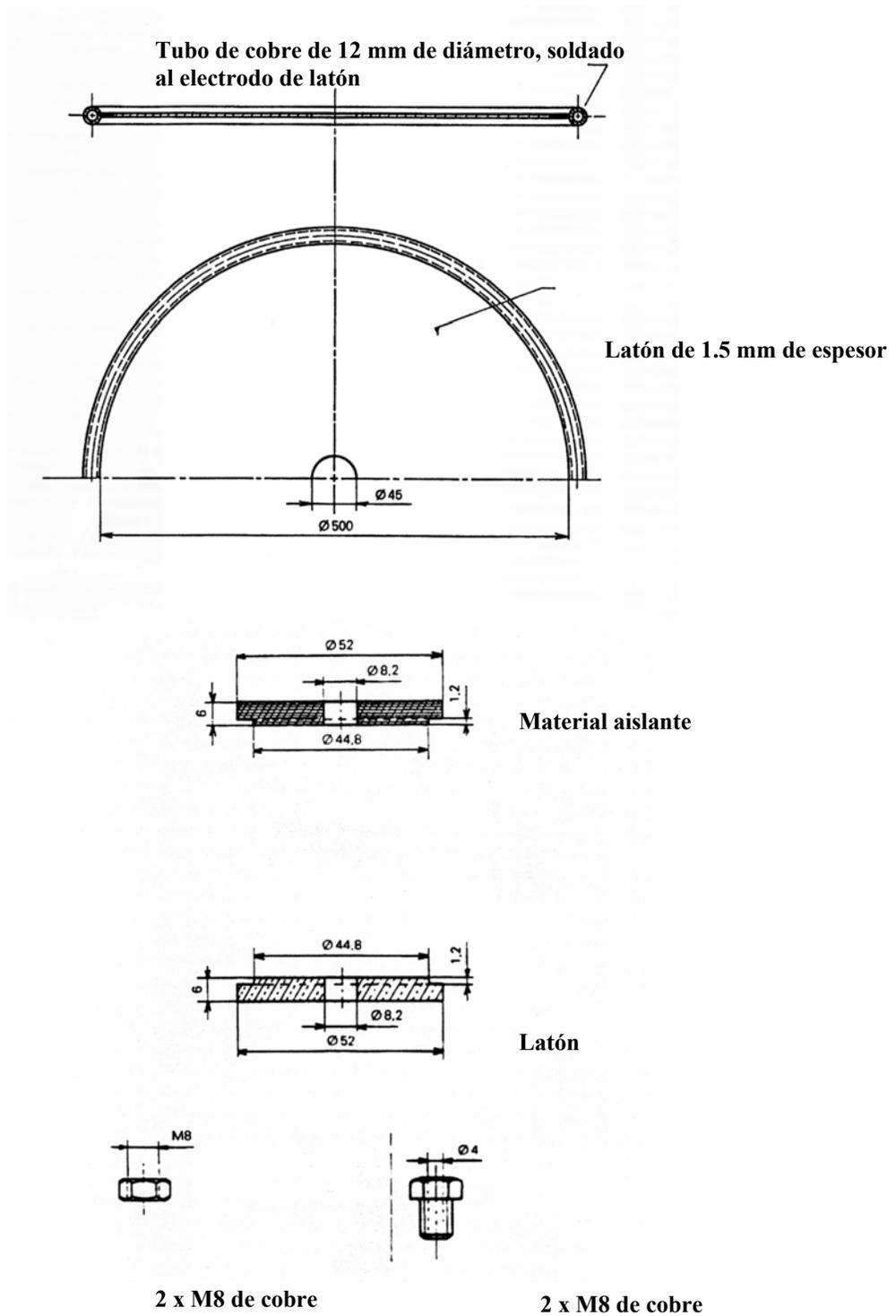
a)



Entrada para una terminal *banana* de 4 mm de diámetro, soldada al electrodo de tierra

b)

Figura B1. a) Esquema experimental para la prueba en condiciones secas, b) Diagrama de ensamble



Dimensiones en milímetros

Figura B2. Diagrama para la construcción de los electrodos de potencial

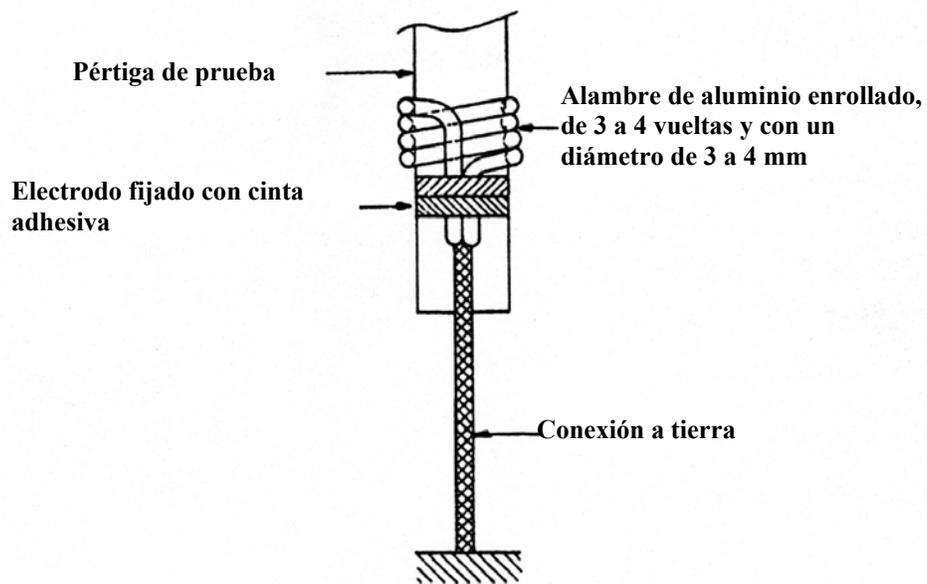
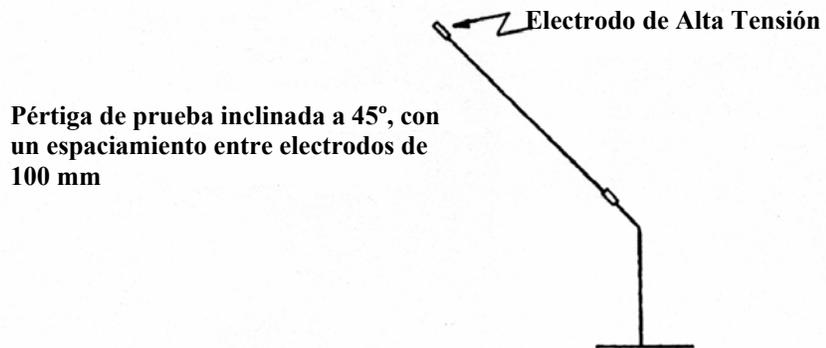


Figura B3. Detalle del arreglo para los electrodos de conexión en la prueba húmeda

APÉNDICE C



Figura C1. Flameo de un aislador polimérico de EPDM, clase 15, en una cámara de contaminación artificial, para un nivel de contaminación ligero

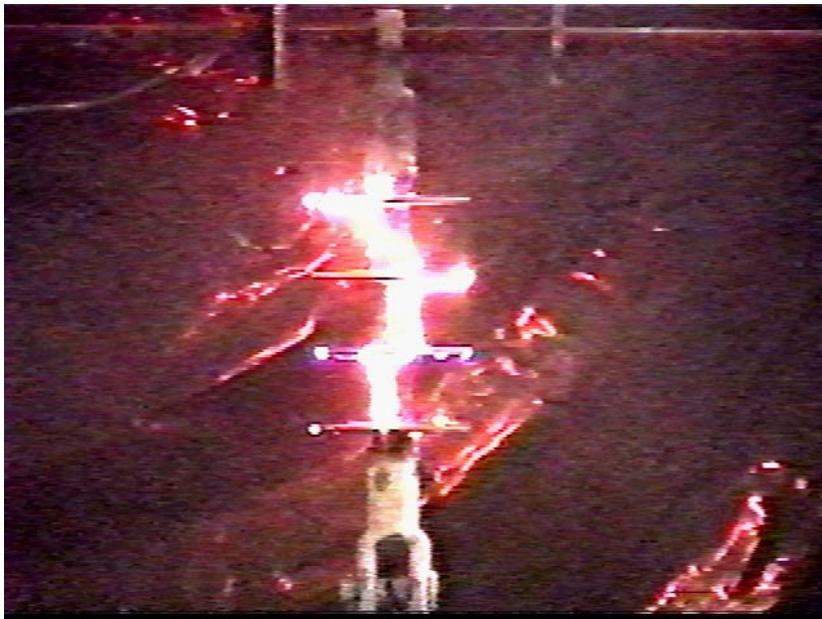


Figura C2. Flameo de un aislador polimérico de EPDM, clase 15, en una cámara de contaminación artificial, para un nivel de contaminación pesado