

**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA  
MECÁNICA Y ELÉCTRICA**

**SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

**Impacto de la lluvia ácida sobre el envejecimiento  
de aisladores EPDM**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:**

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



**PRESENTA**

**Ing. Enrique Pérez Ruiz**

**MÉXICO D. F.**

**2002**



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

*ACTA DE REVISION DE TESIS*

En la Ciudad de México, D.F. siendo las 17:00 horas del día 11 del mes de Octubre del 2002 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de la E.S.I.M.E. para examinar la tesis de grado titulada:

**“IMPACTO DE LA LLUVIA ACIDA SOBRE EL ENVEJECIMIENTO DE AISLADORES EPDM”**

**PEREZ**

Apellido paterno

**RUIZ**

materno

**ENRIQUE**

nombre(s)

Con registro: 

9	8	0	3	1	8
---	---	---	---	---	---

aspirante al grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

**LA COMISION REVISORA**

Director de tesis

DR. PRIMO ALBERTO CALVA CHAVARRIA

DR. RICARDO OCTAVIO MOTA PALOMINO

M. en C. GILBERTO ENRIQUEZ HARPER

M. en C. CARLOS RAMIREZ PACHECO

DR. JAIME ROBLES GARCIA

M. en C. TOMAS IGNACIO ASIAIN OLIVARES

**EL PRESIDENTE DEL COLEGIO**

DR. FLORENCIO SANCHEZ SILVA

COLEGIO DE PROFESORES DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION



*A mi esposa e hijo,  
con mucho amor y cariño.*

*A mis padres y hermanos,  
por estar siempre conmigo, mil gracias por el apoyo que me  
brindaron durante toda mi formación profesional.*

# Agradecimientos

Al Dr. Primo Alberto Calva Chavarría por haber dirigido esta tesis, ya que sus consejos y sugerencias hicieron posible este trabajo.

A los miembros de la comisión revisora por sus observaciones y comentarios para la presentación final de esta tesis.

A todos los profesores de la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación por haber contribuido en mi formación académica.

A todos mis compañeros de la Sección por la amistad que me brindaron durante mis estudios

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada.

# Contenido

	Página
<b>Resumen</b>	iv
<b>Abstract</b>	v
<b>Objetivos</b>	vi
<b>Glosario</b>	vii
<b>Lista de símbolos</b>	viii
<b>Lista de figuras</b>	x
<b>Lista de tablas</b>	xv
<b>Organización de la tesis</b>	xvii
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN</b>	1
1.1. Presentación	1
1.2. Justificación	4
1.3. Estado del arte	5
1.3.1. Aisladores poliméricos	11
1.3.2. Hidrofobicidad superficial	14
1.3.3. Mecanismos de degradación asociados con la exposición a la intemperie	16
1.3.4. Proceso de flameo en aisladores contaminados	17
1.3.5. Alternativas para disminuir el riesgo de flameo en aisladores debido a la contaminación	18
1.4. Lluvia ácida	20

1.4.1. El fenómeno de la lluvia ácida	20
1.4.2. Estudios sobre la caracterización de la lluvia ácida en México	22
1.5. Contribuciones del presente trabajo	28

<b>CAPÍTULO 2. DISEÑO Y REALIZACIÓN DE PRUEBAS EXPERIMENTALES</b>	<b>30</b>
---	-----------

2.1. Introducción	30
2.2. Diseño de las pruebas experimentales	33
2.2.1. Fuente de alta tensión	34
2.2.2. Sistema de protecciones	37
2.2.3. Sistema de adquisición de datos	38
2.2. Realización de las pruebas experimentales	40
2.3.1. Envejecimiento de los aisladores	41
2.3.2. Evaluación de la hidrofobicidad superficial	42
2.3.3. Contaminación de los aisladores	43
2.3.4. Pruebas de contaminación artificial	44

<b>CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES</b>	<b>46</b>
--	-----------

3.1. Introducción	46
3.2. Influencia de un ambiente ácido y de la DESD, en el envejecimiento de los aisladores	47
3.3. Influencia de un ambiente ácido en la tensión de flameo	76
3.4. Análisis de la corriente de fuga	81

3.4.1. Análisis de las gráficas de corriente de fuga, registradas instantes antes de que ocurra el flameo	83
3.5. Conclusiones	107
3.6. Recomendaciones para trabajos futuros	111
<b>Referencias</b>	112
<b>Anexo A</b>	120
<b>Anexo B</b>	123

# Resumen

En esta tesis se presentan y analizan resultados experimentales sobre el comportamiento que tienen aisladores poliméricos EPDM de clase 15kV del tipo suspensión, ante un ambiente ácido. Se tomó como base el valor más ácido que se ha reportado en el Valle de México ( $\text{pH} = 3.3$ ) para crear una solución acuosa de acuerdo a los principales componentes iónicos presentes en el agua de lluvia. Se aplicó el método de niebla limpia como lo indica la norma IEC 507 desarrollado para aisladores cerámicos y de vidrio, que usualmente se está extrapolando a los aisladores poliméricos, sin embargo hay algunas diferencias entre las que se encuentra la manera de aplicar la mezcla contaminante sobre la superficie del aislador, esto debido a la naturaleza hidrofóbica con la que cuentan los aisladores poliméricos. Para evaluar la hidrofobicidad superficial y determinar el grado de envejecimiento se aplicó la técnica de medición del ángulo de contacto. Se midieron las tensiones de flameo y corrientes de fuga de los aisladores bajo condiciones de contaminación. Los resultados obtenidos muestran una disminución en los ángulos de contacto en todos los aisladores, y esta disminución fue mucho más notoria en aquellos aisladores que fueron sometidos por mayor tiempo al ambiente ácido; sin embargo ninguno de los aisladores logró recuperar totalmente sus propiedades hidrofóbicas como lo han reportado en otros trabajos de investigación [13,14]. En el análisis de la tensión de flameo se encontró que éstas se reducen significativamente cuando los aisladores presentaban mayor envejecimiento en su superficie. Todas las pruebas se realizaron en el laboratorio de Alta Tensión de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) del Instituto Politécnico Nacional (IPN), ubicado en la Ciudad de México a 2240 msnm.

# Abstract

Experimental results and analysis about the behavior of EPDM class 15 kV polymer insulators facing an acid environment are presented in this thesis. Creating previously an aqueous solution with the principals ions present in the rainwater that they have been registered in the Valley of Mexico; taking as base the value most acid than is there has reported in such zone. The fog cleans method developed for non ceramic insulator that norm IEC-507 indicates was applied, but with the difference in the way of applying the pollutant mixture on the insulator's surface of the insulator, this due to the hydrophobic nature on the one which count these insulators. For evaluate the loss of hydrophobicity and to determine the aging degree, the technique of contact angle was used. The flashover levels and the behavior of the leakage current during the development of the tests were registered. The final results show a reduction in contact angles on everything insulators. This reduction was more evident on insulators who more time an ambient acid were subject. Nevertheless neither of the insulators recovered their hydrophobic properties. The insulators who showed more erosion on their surfaces had reduced flashover voltages.

All the tests were carried out at the High Voltage Laboratory from Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) of Instituto Politécnico Nacional (IPN), located in Mexico City at an altitude of 2240 masl.

# Objetivo general

Investigar experimentalmente el efecto de un ambiente ácido sobre la tensión de flameo en aisladores poliméricos, evaluados en una cámara de niebla limpia, pero empleando una técnica de medición de las tensiones de flameo y acondicionamiento de los aisladores no convencional.

## Objetivos particulares

- Simular el envejecimiento por lluvia ácida en aisladores poliméricos EPDM, tipo suspensión, de clase 15 kV; considerando el nivel de acidez más alto que se ha reportado en el Valle de México (pH = 3.3).
- Determinar los niveles de hidrofobicidad superficial en aisladores poliméricos EPDM sujetos a distintos periodos de envejecimiento.
- Una vez envejecidos evaluar experimentalmente el efecto que provoca un ambiente ácido en la tensión de flameo ante distintas condiciones de contaminación ambiental., mediante el método de niebla limpia.

# Glosario

**Aislador.** Material aislante diseñado para soportar a un conductor físicamente, y separarlo eléctricamente de otro conductor u objeto.

**Angulo de contacto.** Angulo que se forma entre la superficie de una gota y la superficie de un material hidrofóbico.

**Contaminación atmosférica.** Presencia de materia extraña que altera la composición química de la atmósfera.

**Depósito total.** Constituye todos los elementos del depósito atmosférico, incluyendo las fases sólida, líquida y gaseosa.

**Emisiones antropogénicas.** Descarga de contaminantes a la atmósfera provenientes de chimeneas y otros conductos de escape de las áreas industriales, comerciales y residenciales, así como de los vehículos automotores, locomotoras o escapes de aeronaves y barcos.

**Emisiones naturales.** Salida de contaminantes hacia el ambiente a partir de una fuente natural geológica y/o procesos metabólicos, algunas veces influenciados por la acción de eventos meteorológicos.

**Envejecimiento.** Término usado para describir los cambios permanentes e irreversibles que sufre un aislador, los cuales causan su falla.

**Flameo.** Descarga disruptiva a través del aire, o sobre la superficie de un aislador sólido; que ocurre entre partes de diferente polaridad o potencial, producidos por la aplicación de una tensión; donde la trayectoria de la ruptura llega a ser lo suficientemente ionizada para mantener un arco eléctrico.

**Hidrofobicidad.** Propiedad que tiene la superficie de un aislante sólido para formar gotas en lugar de formar una película continua de agua, cuando existen condiciones de niebla, humedad o lluvia.

**Lluvia ácida.** Es toda agua de lluvia cuyos valores de pH son inferiores a los de la lluvia normal, es decir, valores por debajo de  $\text{pH} = 5.0$

# Lista de símbolos

$\sigma$	Conductividad eléctrica
$\theta$	Angulo de contacto
ATH	Alúmina trihidratada
CCD	Abreviación Charged Coupled Device
$\text{Ca}^{+2}$	Ion calcio con dos cargas positivas
$\text{CaCl}_2$	Cloruro de calcio
$\text{CaSO}_4$	Sulfato de calcio
$\text{Cl}^-$	Ion cloruro negativo
$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Cloruro de cobalto por seis moléculas de agua
$\text{CO}_2$	Bióxido de carbono
$\text{CuCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Cloruro de cobre por cinco moléculas de agua
DESD	Densidad Equivalente de Sal Depositada
EPDM	Monómero Etileno Propileno Dieno
h	Altura de la gota de agua
$\text{H}^+$	Ion hidrógeno positivo
HDPE	Polietileno de alta densidad
HTV	Vulcanizado a alta temperatura
$\text{H}_2\text{SO}_4$	Ácido sulfúrico
$\text{HNO}_3$	Ácido nítrico
$\text{HOCOCOOH}$	Ácido oxálico
$\cdot \text{HO}_2$	Dióxido de hidrógeno
KCl	Cloruro de potasio
$\text{KNO}_3$	Nitrato de potasio
$\text{K}^+$	Ion potasio positivo
L	Longitud de la gota de agua
LMW	Bajo peso molecular
$\text{Mg}^{+2}$	Ion magnesio con dos cargas positivas
$\text{MgSO}_4$	Sulfato de magnesio
$\text{Na}^+$	Ion sodio positivo
NaCl	Cloruro de sodio
$\text{NH}_4^+$	Ion amonio positivo
$\text{NH}_4\text{Cl}$	Cloruro de amonio
$\text{NO}_3$	Óxidos de nitrógeno

$\text{NO}_3^-$	Ion nitrato negativo
PC	Computadora personal
pH	Potencial del ion hidrógeno
RTV	Vulcanizado a temperatura ambiente
SMADF	Secretaria del Medio Ambiente del Distrito Federal
$\text{SO}_2$	Bióxido de azufre
$\text{SO}_4^{-2}$	Ion sulfato con dos cargas negativas
$\cdot \text{SO}_2$	Radical anhídrido sulfuroso
$\cdot \text{SO}_4$	Radical ion sulfato
$\cdot \text{SO}_5$	Radical pentóxido de azufre
SR	Hule silicón
$T_s$	Tensión superficial del sólido
$T_L$	Tensión superficial del líquido
$T_{SL}$	Tensión superficial de la interfaz sólido-líquido
VEV	Velocidad de entrada del vapor

# Lista de figuras

	Página
<b>Capítulo 1</b>	
<b>Figura 1. 1.</b>	Medición de la Corriente de Fuga en periodos de 100 horas, en una muestra de hule silicón [11]. 9
<b>Figura 1. 2.</b>	Componentes de un aislador polimérico típico. 14
<b>Figura 1. 3.</b>	Hidrofobicidad Superficial en un aislador polimérico. 15
<b>Figura 1. 4.</b>	Proceso de flameo en un aislador convencional debido a problemas de contaminación. 19
<b>Figura 1. 5.</b>	Ubicación de los colectores en el Valle de México [1]. 27
<b>Capítulo 2</b>	
<b>Figura 2. 1.</b>	Arreglo experimental. 33
<b>Figura 2. 2.</b>	(a) Transformador Elevador Walter. (b) Resistencia de Limitación Walter. 35
<b>Figura 2. 3.</b>	(a) Consola de mandos para el Transformador Elevador Walter. (b) Divisor Resistivo BERTAN. 36
<b>Figura 2. 4.</b>	(a) Diagrama que muestra la conexión de los dos micro fusibles NIZ5. (b). Diagrama del Sistema de Protecciones. 38
<b>Figura 2. 5.</b>	Diagrama del Inversor de Acoplamiento de C. A. 39
<b>Figura 2. 6.</b>	Aislador polimérico EPDM de 15kV, marca OHIO BRASS. En este gráfico el aislador se encuentra colocado dentro de la cámara de niebla. 40
<b>Figura 2. 7.</b>	Angulo de contacto “ $\theta$ ” entre la superficie de la muestra y la gota de agua. 42
<b>Capítulo 3</b>	
<b>Figura 3. 1.</b>	Promedios de las mediciones del ángulo de contacto en los faldones de los aisladores, antes del inicio de las pruebas en el laboratorio. Para distintos periodos de envejecimiento. 48
<b>Figura 3. 2.</b>	Imágenes de las gotas de agua sobre la superficie de un aislador nuevo y de un aislador envejecido por 240 h., antes de ser sometidos a las pruebas de contaminación artificial. 50

<b>Figura 3. 3.</b>	Imágenes de las gotas de agua sobre la superficie de un aislador envejecido por 600 h. y 1320 h., antes de ser sometidos a las pruebas de contaminación artificial.	51
<b>Figura 3. 4.</b>	Imágenes de las gotas de agua sobre la superficie de un aislador nuevo, registradas después de la primera y segunda prueba respectivamente; NaCl = 5g/l, DESD = 0.02085mg/cm <sup>2</sup> y $\sigma$ = 0.8341S/m.	53
<b>Figura 3. 5.</b>	Imágenes de las gotas de agua sobre la superficie de un aislador nuevo, registradas después de la primera y segunda prueba respectivamente; NaCl = 20g/l, DESD = 0.075mg/cm <sup>2</sup> y $\sigma$ = 3S/m.	54
<b>Figura 3. 6.</b>	Imágenes de las gotas de agua sobre la superficie de un aislador nuevo, registradas después de la primera y segunda prueba respectivamente; NaCl = 80g/l, DESD = 0.25mg/cm <sup>2</sup> y $\sigma$ = 10S/m.	55
<b>Figura 3. 7.</b>	Imágenes de las gotas de agua sobre la superficie de un aislador nuevo, registradas después de la primera y segunda prueba respectivamente; NaCl = 160g/l, DESD = 0.425mg/cm <sup>2</sup> y $\sigma$ = 17S/m.	56
<b>Figura 3. 8.</b>	Imágenes de las gotas de agua sobre la superficie de un aislador envejecido por 240h., registradas después de la primera y segunda prueba respectivamente; NaCl = 5g/l, DESD = 0.02085mg/cm <sup>2</sup> y $\sigma$ = 0.8341S/m.	58
<b>Figura 3. 9.</b>	Imágenes de las gotas de agua sobre la superficie de un aislador envejecido por 240h., registradas después de la primera y segunda prueba respectivamente; NaCl = 20g/l, DESD = 0.075mg/cm <sup>2</sup> y $\sigma$ = 3S/m.	59
<b>Figura 3. 10.</b>	Imágenes de las gotas de agua sobre la superficie de un aislador envejecido por 240h., registradas después de la primera y segunda prueba respectivamente; NaCl = 80g/l, DESD = 0.25mg/cm <sup>2</sup> y $\sigma$ = 10S/m.	60
<b>Figura 3. 11.</b>	Imágenes de las gotas de agua sobre la superficie de un aislador envejecido por 240h., registradas después de la primera y segunda prueba respectivamente; NaCl = 160g/l, DESD = 0.425mg/cm <sup>2</sup> y $\sigma$ = 17S/m.	61
<b>Figura 3. 12.</b>	Imágenes de las gotas de agua sobre la superficie de un aislador envejecido por 600h., registradas después de la primera y segunda prueba respectivamente; NaCl = 5g/l, DESD = 0.02085mg/cm <sup>2</sup> y $\sigma$ = 0.8341S/m.	63
<b>Figura 3. 13.</b>	Imágenes de las gotas de agua sobre la superficie de un aislador envejecido por 600h., registradas después de la primera y segunda prueba respectivamente; NaCl = 20g/l, DESD = 0.075mg/cm <sup>2</sup> y $\sigma$ = 3S/m.	64
<b>Figura 3. 14.</b>	Imágenes de las gotas de agua sobre la superficie de un aislador envejecido por 600h., registradas después de la primera y segunda prueba respectivamente; NaCl = 80g/l, DESD = 0.25mg/cm <sup>2</sup> y $\sigma$ = 10S/m.	65
<b>Figura 3. 15.</b>	Imágenes de las gotas de agua sobre la superficie de un aislador envejecido por 600h., registradas después de la primera y segunda prueba respectivamente; NaCl = 160g/l, DESD = 0.425mg/cm <sup>2</sup> y $\sigma$ = 17S/m.	66
<b>Figura 3. 16.</b>	Imágenes de las gotas de agua sobre la superficie de un aislador envejecido por 1320h., registradas después de la primera y segunda prueba respectivamente; NaCl = 5g/l, DESD = 0.02085mg/cm <sup>2</sup> y $\sigma$ = 0.8341S/m.	68

<b>Figura 3. 17.</b>	Imágenes de las gotas de agua sobre la superficie de un aislador envejecido por 1320h., registradas después de la primera y segunda prueba respectivamente; NaCl = 20g/l, DESD = 0.075mg/cm <sup>2</sup> y $\sigma = 3S/m$ .	69
<b>Figura 3. 18.</b>	Imágenes de las gotas de agua sobre la superficie de un aislador envejecido por 1320h., registradas después de la primera y segunda prueba respectivamente; NaCl = 80g/l, DESD = 0.25mg/cm <sup>2</sup> y $\sigma = 10S/m$ .	70
<b>Figura 3. 19.</b>	Imágenes de las gotas de agua sobre la superficie de un aislador envejecido por 1320h., registradas después de la primera y segunda prueba respectivamente; NaCl = 160g/l, DESD = 0.425mg/cm <sup>2</sup> y $\sigma = 17S/m$ .	71
<b>Figura 3. 20.</b>	Promedios de las mediciones del ángulo de contacto en los faldones del aislador; con una <b>DESD = 0.02085 mg/cm<sup>2</sup></b> y $\sigma = 0.8341 S/m$ .	72
<b>Figura 3. 21.</b>	Promedios de las mediciones del ángulo de contacto en los faldones del aislador; con una <b>DESD = 0.075 mg/cm<sup>2</sup></b> y $\sigma = 3.0 S/m$ .	73
<b>Figura 3. 22.</b>	Promedios de las mediciones del ángulo de contacto en los faldones del aislador; con una <b>DESD = 0.25 mg/cm<sup>2</sup></b> y $\sigma = 10.0 S/m$ .	74
<b>Figura 3. 23.</b>	Promedios de las mediciones del ángulo de contacto en los faldones del aislador; con una <b>DESD = 0.425 mg/cm<sup>2</sup></b> y $\sigma = 17.0 S/m$ .	75
<b>Figura 3. 24.</b>	Flameo en uno de los aisladores durante el desarrollo de las pruebas.	77
<b>Figura 3. 25.</b>	Valores de la tensión de flameo obtenidos durante la primera prueba, para los distintos periodos de envejecimiento, y los diferentes niveles de la DESD.	78
<b>Figura 3. 26.</b>	Valores de la tensión de flameo obtenidos durante la segunda prueba, para los distintos periodos de envejecimiento, y los diferentes niveles de la DESD.	79
<b>Figura 3. 27.</b>	Forma de onda de la corriente de fuga y su análisis de la transformada rápida de Fourier (FFT), antes de que ocurran las primeras descargas.	81
<b>Figura 3. 28.</b>	Forma de onda de la corriente de fuga y su análisis de la transformada rápida de Fourier (FFT), durante el arqueo en bandas secas.	82
<b>Figura 3. 29.</b>	Forma de onda de la corriente de fuga y su análisis de la transformada rápida de Fourier (FFT), durante el flameo.	83
<b>Figura 3. 30.</b>	Nivel de contaminación muy ligera (DESD = 0.02085 mg/cm <sup>2</sup> ). Tensión de flameo en la 1ª prueba = 28.7 kV, a)corriente de fuga; b)en el dominio de la frecuencia; c)carga acumulada. Tensión de flameo en la 2ª prueba = 25.2 kV, d)corriente de fuga, e)en el dominio de la frecuencia; f)carga acumulada.	84
<b>Figura 3. 31.</b>	Nivel de contaminación ligera (DESD = 0.075 mg/cm <sup>2</sup> ). Tensión de flameo en la 1ª prueba = 18.2 kV, a)corriente de fuga; b)en el dominio de la frecuencia; c)carga acumulada. Tensión de flameo en la 2ª prueba = 18 kV, d)corriente de fuga, e)en el dominio de la frecuencia; f)carga acumulada.	85
<b>Figura 3. 32.</b>	Nivel de contaminación pesada (DESD = 0.25 mg/cm <sup>2</sup> ). Tensión de flameo en la 1ª prueba = 15.7 kV, a)corriente de fuga; b)en el dominio de la frecuencia; c)carga acumulada. Tensión de flameo en la 2ª prueba = 14.7 kV, d)corriente de fuga, e)en el dominio de la frecuencia; f)carga acumulada.	86

<b>Figura 3. 33.</b>	Nivel de contaminación muy pesada (DESD = 0.425 mg/cm <sup>2</sup> ). Tensión de flameo en la 1ª prueba = 13.3 kV, a)corriente de fuga; b)en el dominio de la frecuencia; c)carga acumulada. Tensión de flameo en la 2ª prueba = 17 kV, d)corriente de fuga, e)en el dominio de la frecuencia; f)carga acumulada.	87
<b>Figura 3. 34.</b>	Nivel de contaminación muy ligera (DESD = 0.02085 mg/cm <sup>2</sup> ). Tensión de flameo en la 1ª prueba = 25.4 kV, a)corriente de fuga; b)en el dominio de la frecuencia; c)carga acumulada. Tensión de flameo en la 2ª prueba = 23 kV, d)corriente de fuga, e)en el dominio de la frecuencia; f)carga acumulada.	89
<b>Figura 3. 35.</b>	Nivel de contaminación ligera (DESD = 0.075 mg/cm <sup>2</sup> ). Tensión de flameo en la 1ª prueba = 16 kV, a)corriente de fuga; b)en el dominio de la frecuencia; c)carga acumulada. Tensión de flameo en la 2ª prueba = 10.6 kV, d)corriente de fuga, e)en el dominio de la frecuencia; f)carga acumulada.	90
<b>Figura 3. 36.</b>	Nivel de contaminación pesada (DESD = 0.25 mg/cm <sup>2</sup> ). Tensión de flameo en la 1ª prueba = 12.6 kV, a)corriente de fuga; b)en el dominio de la frecuencia; c)carga acumulada. Tensión de flameo en la 2ª prueba = 10 kV, d)corriente de fuga, e)en el dominio de la frecuencia; f)carga acumulada.	91
<b>Figura 3. 37.</b>	Nivel de contaminación muy pesada (DESD = 0.425 mg/cm <sup>2</sup> ). Tensión de flameo en la 1ª prueba = 8.6 kV, a)corriente de fuga; b)en el dominio de la frecuencia; c)carga acumulada. Tensión de flameo en la 2ª prueba = 6.3 kV, d)corriente de fuga, e)en el dominio de la frecuencia; f)carga acumulada.	92
<b>Figura 3. 38.</b>	Nivel de contaminación muy ligera (DESD = 0.02085 mg/cm <sup>2</sup> ). Tensión de flameo en la 1ª prueba = 23 kV, a)corriente de fuga; b)en el dominio de la frecuencia; c)carga acumulada. Tensión de flameo en la 2ª prueba = 21.7 kV, d)corriente de fuga, e)en el dominio de la frecuencia; f)carga acumulada.	94
<b>Figura 3. 39.</b>	Nivel de contaminación ligera (DESD = 0.075 mg/cm <sup>2</sup> ). Tensión de flameo en la 1ª prueba = 13.5 kV, a)corriente de fuga; b)en el dominio de la frecuencia; c)carga acumulada. Tensión de flameo en la 2ª prueba = 9.6 kV, d)corriente de fuga, e)en el dominio de la frecuencia; f)carga acumulada.	95
<b>Figura 3. 40.</b>	Nivel de contaminación pesada (DESD = 0.25 mg/cm <sup>2</sup> ). Tensión de flameo en la 1ª prueba = 11.3 kV, a)corriente de fuga; b)en el dominio de la frecuencia; c)carga acumulada. Tensión de flameo en la 2ª prueba = 8.3 kV, d)corriente de fuga, e)en el dominio de la frecuencia; f)carga acumulada.	96
<b>Figura 3. 41.</b>	Nivel de contaminación muy pesada (DESD = 0.425 mg/cm <sup>2</sup> ). Tensión de flameo en la 1ª prueba = 7.8 kV, a)corriente de fuga; b)en el dominio de la frecuencia; c)carga acumulada. Tensión de flameo en la 2ª prueba = 7 kV, d)corriente de fuga, e)en el dominio de la frecuencia; f)carga acumulada.	97
<b>Figura 3. 42.</b>	Nivel de contaminación muy ligera (DESD = 0.02085 mg/cm <sup>2</sup> ). Tensión de flameo en la 1ª prueba = 23 kV, a)corriente de fuga; b)en el dominio de la frecuencia; c)carga acumulada. Tensión de flameo en la 2ª prueba = 20.7 kV, d)corriente de fuga, e)en el dominio de la frecuencia; f)carga acumulada.	99
<b>Figura 3. 43.</b>	Nivel de contaminación ligera (DESD = 0.075 mg/cm <sup>2</sup> ). Tensión de flameo en la 1ª prueba = 12.4 kV, a)corriente de fuga; b)en el dominio de la frecuencia; c)carga acumulada. Tensión de flameo en la 2ª prueba = 7 kV, d)corriente de fuga, e)en el dominio de la frecuencia; f)carga acumulada.	100

<b>Figura 3. 44.</b>	Nivel de contaminación pesada (DESD = 0.25 mg/cm <sup>2</sup> ). Tensión de flameo en la 1ª prueba = 10.2 kV, a) corriente de fuga; b) en el dominio de la frecuencia; c) carga acumulada. Tensión de flameo en la 2ª prueba = 7.4 kV, d) corriente de fuga, e) en el dominio de la frecuencia; f) carga acumulada.	101
<b>Figura 3. 45.</b>	Nivel de contaminación muy pesada (DESD = 0.425 mg/cm <sup>2</sup> ). Tensión de flameo en la 1ª prueba = 7 kV, a) corriente de fuga; b) en el dominio de la frecuencia; c) carga acumulada. Tensión de flameo en la 2ª prueba = 6.3 kV, d) corriente de fuga, e) en el dominio de la frecuencia; f) carga acumulada.	102
<b>Figura 3. 46.</b>	Grafica comparativa de la tensión de flameo y carga acumulada, para una DESD = 0.02085 mg/cm <sup>2</sup> ; contra los distintos periodos de envejecimiento.	104
<b>Figura 3. 47.</b>	Grafica comparativa de la tensión de flameo y carga acumulada, para una DESD = 0.075 mg/cm <sup>2</sup> ; contra los distintos periodos de envejecimiento.	105
<b>Figura 3. 48.</b>	Grafica comparativa de la tensión de flameo y carga acumulada, para una DESD = 0.25 mg/cm <sup>2</sup> ; contra los distintos periodos de envejecimiento.	106
<b>Figura 3.49.</b>	Grafica comparativa de la tensión de flameo y carga acumulada, para una DESD = 0.425 mg/cm <sup>2</sup> ; contra los distintos periodos de envejecimiento.	107

## Anexo B

<b>Figura B. 1.</b>	Balance de fuerzas en la interfaz Sólido / líquido en una gota de agua sobre una superficie sólida.	124
<b>Figura B. 2.</b>	Obtención del ángulo de contacto $\theta$ a través de la ecuación B.2.	125
<b>Figura B. 3.</b>	Ejemplo de la adquisición de una imagen de una gota de agua sobre la superficie del aislador.	125
<b>Figura B. 4.</b>	Aspecto del programa CorelDraw, se muestra la imagen de una gota sobre la superficie del aislador, donde la altura de la gota en la imagen ampliada es de 12.91 mm, con una longitud de 36.31 mm.	126

# Lista de tablas

	Página
<b>Capítulo 1</b>	
<b>Tabla 1. 1.</b>	Valores de pH para sustancias comunes. 2
<b>Tabla 1. 2.</b>	Ingredientes de la lluvia ácida artificial [5]. 6
<b>Tabla 1. 3.</b>	Ingredientes de la lluvia ácida artificial [7]. 7
<b>Tabla 1. 4.</b>	Composición de las soluciones de prueba [11]. 8
<b>Tabla 1. 5.</b>	Valores de pH del agua de lluvia registrados en 1982 [27]. 23
<b>Tabla 1. 6.</b>	Valores de pH del agua de lluvia registrados en 1983 [3]. 24
<b>Tabla 1. 7.</b>	Valores de pH del agua de lluvia registrados en 1984 – 1985[28]. 24
<b>Tabla 1. 8.</b>	Datos históricos del pH en muestras de agua de lluvia mediante depósito húmedo y total por sitio para el periodo 1987 – 1999 [24]. 26
<b>Tabla 1. 9.</b>	Nombre y código de los lugares donde se encuentran los colectores automáticos y convencionales [24]. 27
<b>Capítulo 2</b>	
<b>Tabla 2. 1.</b>	Ingredientes de la lluvia ácida artificial que se empleo para el envejecimiento de los aisladores. 41
<b>Tabla 2. 2.</b>	Mezclas contaminantes empleadas para la contaminación de los aisladores. 44
<b>Capítulo 3</b>	
<b>Tabla 3. 1.</b>	Datos de las mediciones del ángulo de contacto ( $\theta$ ) para distintos periodos de envejecimiento. Los cuales fueron obtenidos antes de que los aisladores fueran sometidos a las pruebas de contaminación artificial. 48
<b>Tabla 3. 2.</b>	Datos de todas las mediciones del ángulo de contacto ( $\theta$ ) que se obtuvieron a <b>aisladores nuevos</b> , antes del inicio de las pruebas, y después de ser sometidos a la primera y segunda prueba en la cámara de niebla limpia. 52
<b>Tabla 3. 3.</b>	Datos de todas las mediciones del ángulo de contacto ( $\theta$ ) que se obtuvieron a <b>aisladores envejecidos por 240 h.</b> , antes del inicio de las pruebas, y después de ser sometidos a la primera y segunda prueba en la cámara de niebla limpia 57

<b>Tabla 3. 4.</b>	Datos de todas las mediciones del ángulo de contacto ( $\theta$ ) que se obtuvieron a <b>aisladores envejecidos por 600 h.</b> , antes del inicio de las pruebas, y después de ser sometidos a la primera y segunda prueba en la cámara de niebla limpia.	62
<b>Tabla 3. 5.</b>	Datos de todas las mediciones del ángulo de contacto ( $\theta$ ) que se obtuvieron a <b>aisladores envejecidos por 1320 h.</b> , antes del inicio de las pruebas, y después de ser sometidos a la primera y segunda prueba en la cámara de niebla limpia.	67
<b>Tabla 3. 6.</b>	Valores de la tensión de flameo para cada periodo de envejecimiento y de acuerdo con los distintos niveles de la DESD empleados en el desarrollo de las pruebas.	77
<b>Tabla 3. 7.</b>	Valores del incremento que tubo la carga acumulada para cada periodo de envejecimiento, y de acuerdo con los distintos niveles de la DESD.	104

# Organización de la tesis

En el capítulo uno se presenta una introducción general, la justificación de esta tesis, así como los antecedentes de este tipo de trabajos. Se presenta una breve introducción sobre los aisladores poliméricos, sus ventajas, los mecanismos de degradación asociados con la exposición a la intemperie y algunas de las alternativas que se tienen para disminuir el riesgo de flameo en aisladores contaminados. Se describe el fenómeno de la lluvia ácida y los estudios sobre su caracterización que se han hecho en nuestro país.; y finalmente se encuentran las contribuciones del presente trabajo.

En el capítulo dos se describen los aspectos relacionados con el diseño y la realización de las pruebas experimentales. En el capítulo tres se describen los resultados obtenidos que muestran el efecto que provoca un ambiente ácido en la hidrofobicidad superficial y tensión de flameo; y la manera en que influyen distintos niveles de contaminación en dichos parámetros. Además se tienen las conclusiones generales de esta tesis, y algunas recomendaciones para trabajos futuros.

Posteriormente se presenta la bibliografía de esta tesis; el Anexo A que muestra las características mecánicas y eléctricas de los aisladores que se emplearon para la elaboración de las pruebas experimentales; y finalmente se tiene el Anexo B que describe la técnica del ángulo de contacto, así como el proceso de adquisición y digitalización de las gotas de agua sobre las superficies de los aisladores.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

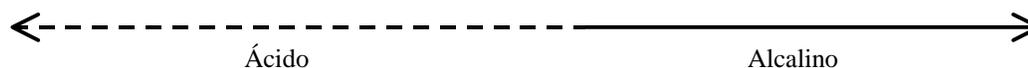
### 1. 1 Presentación

Las emisiones atmosféricas principalmente de  $\text{SO}_2$ , de  $\text{CO}_2$  y de  $\text{NO}_3$ , la operación de la industria, el transporte, el uso de fertilizantes, la combustión de desechos industriales, urbanos y agrícolas; son las causas a las que se atribuye la aparición de lluvia ácida. Se ha designado con este nombre al agua de lluvia que presenta valores de pH menores a 5.0, ya que esto indica la presencia de ácidos fuertes como el sulfúrico y el nítrico [1].

La lluvia que se forma en una atmósfera limpia generalmente tiene cierta acidez causada por la disolución de  $\text{CO}_2$  atmosférico. Este proceso ocasiona que el pH del agua de lluvia tenga valores dentro de un rango entre 5 y 5.6 (ver tabla 1.1).

**Tabla 1. 1.** Valores de pH para sustancias comunes.

Sustancia	Limón	Vinagre	Vino tinto	Agua de lluvia	Leche	Agua destilada	Sangre	Amoniaco	Sosa
pH	2.3	2.9	3.8	5.0/5.6	6.8	7.0	7.3	12	14



Esta ligera acidez que se produce a causa del CO<sub>2</sub> presente en la atmósfera en forma de ácido carbónico, no se ha considerado como el fenómeno de la lluvia ácida.

El parámetro que se emplea para medir el nivel de acidez o alcalinidad en una sustancia acuosa es el pH (potencial del ion hidrógeno). El pH es una escala que va de 0 a 14 y nos indica que tan ácida o alcalina es una sustancia. Una disminución en el valor de pH significa un aumento de la acidez, pero en forma logarítmica. Como ejemplo tenemos que un pH igual a 4.0 es 10 veces más ácido que un pH igual a 5.0 y 100 veces más ácido que un pH igual a 6.0, y así sucesivamente.

La industrialización ha provocado la emisión de sustancias tóxicas a la atmósfera. Entre las más importantes se encuentran los hidrocarburos, el monóxido de carbono, el bióxido de azufre, los óxidos de nitrógeno, compuestos con elementos metálicos, el clorofluorocarbono, el ozono, etcétera.

Algunos de estos contaminantes, en particular los óxidos de azufre y de nitrógeno, en presencia de humedad atmosférica dan lugar a reacciones químicas que producen ácidos, principalmente sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) y nítrico (HNO<sub>3</sub>), originando así, la lluvia ácida, uno de los problemas ambientales de las grandes urbes.

Este proceso origina un decremento del pH hasta valores que fluctúan entre 5 y 3, incluso en algunos casos pueden ser menores.

Independientemente de que la lluvia ácida tiene un impacto ambiental desfavorable, los aisladores poliméricos también se ven afectados en sus propiedades dieléctricas provocándoles envejecimiento en la superficie. Esto aunado a que a una mayor altitud se tiene una mayor incidencia de luz U.V.

## **1. 2. Justificación**

Los aisladores poliméricos se han usado con buenos resultados en los sistemas eléctricos de potencia, y están desplazando paulatinamente a los aisladores tradicionales de porcelana y de vidrio. El éxito de los aisladores poliméricos se basa en gran parte en su uso en regiones costeras, pero su aplicación se ha expandido a otras regiones con distintas condiciones ambientales, por lo que es importante entre otros aspectos saber cómo es el efecto de un ambiente ácido en las tensiones de flameo y envejecimiento en éstos aisladores.

En México, se han estado instalando aisladores poliméricos en algunas líneas de transmisión y distribución; pero la experiencia que se tiene con el uso de estos aisladores es muy poca, debido a que el proceso de flameo por contaminación en aisladores poliméricos difiere al de los aisladores cerámicos, esto por la característica hidrofóbica con la que cuentan los polímeros [2].

En nuestro país se han reportado valores de acidez en el agua de lluvia bastante altos, no solamente en las grandes ciudades, sino que también en lugares lejanos a las grandes urbes debido a la acción que provocan los vientos [3]. El desarrollo de pruebas experimentales permitirá conocer el comportamiento que tienen los aisladores poliméricos, cuando son sometidos a estos niveles de acidez.

### 1. 3. Estado del arte

Desde 1960, los aisladores poliméricos han sido empleados como aisladores externos para alta tensión atribuyéndose a sus excelentes características comparadas con aquellas de los aisladores de porcelana o de vidrio.

Entre varios materiales poliméricos tales como el EPDM, el polietileno, la resina epóxica, el hule silicón, entre otros; el último ha sido preferido para uso externo debido a su excelente hidrofobicidad, su alta resistencia al tracking, al arqueado y al medio ambiente.

En 1988, R. S. Gorur, et al [4]; realizaron un estudio comparativo del envejecimiento superficial en una cámara de niebla para varias muestras de polímeros, utilizando C.A. (60Hz). Las muestras fueron el hule silicón vulcanizado a alta temperatura (HTV) y el monómero etileno propileno dieno (EPDM) conteniendo varias cantidades de alúmina trihidratada (ATH). Observaron que para una baja conductividad en la niebla ( $250\mu\text{s}/\text{cm}$ ), el hule silicón tuvo un mejor comportamiento que las muestras de EPDM, mientras que para un valor alto de conductividad ( $1000\mu\text{s}/\text{cm}$ ) el orden del comportamiento fue inverso.

En 1992, Yi Dong-Young, et al [5]; llevaron a cabo un estudio sobre el efecto que tiene la lluvia ácida sobre el tracking en el elastómero. Las muestras de elastómero fueron sumergidas en lluvia ácida artificial, los ingredientes de esta solución se muestran en la tabla 1.2. Las muestras fueron envejecidas por un periodo de 20 y 45 días.

**Tabla 1. 2.** Ingredientes de la lluvia ácida artificial [5].

<b>Ingredientes (g/2l)</b>	<b>Solución No. 1</b>	<b>Solución No. 2</b>
NaCl	0.28	0.28
KNO <sub>3</sub>	1.30	1.30
CaCl <sub>2</sub>	0.002	0.002
CuCl <sub>2</sub> · 5H <sub>2</sub> O	0.003	0.003
CoCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	0.0009	0.0009
Ácido Cítrico	2.1	-
Ácido Acético	-	0.6
KOH	-	0.7
pH	3.09	5.76

En cuanto a las pruebas para evaluar la resistencia al tracking Dong-Young se basó en lo que dicta la norma IEC 587 (Prueba del Plano Inclinado) [6], donde la solución contaminante estaba compuesta por  $0.1 \pm 0.02\%$  de NH<sub>4</sub>Cl y  $0.02 \pm 0.002\%$  de TRITON X-100 en agua destilada. La resistividad de la solución contaminante la mantuvieron entre 3.7 y 3.8 ( $\Omega$ m) a 25°C. Encontraron que la solución de la lluvia ácida artificial aceleró la degradación del elastómero conforme éste pasaba más tiempo dentro de la solución, y en consecuencia se reducía la resistencia al tracking del material. Pero no hubo ninguna diferencia en los resultados obtenidos en el envejecimiento entre la lluvia ácida artificial no. 1 y no. 2, y de acuerdo con estos resultados la degradación del elastómero no depende del valor de pH de la lluvia ácida artificial.

Durante el año de 1997 se llevaron a cabo distintas investigaciones, una de ellas encabezada por Joeng-Ho Kim, et al [7], en la cual estudiaron la resistencia que presenta el hule silicón ante un ambiente ácido, así como su resistencia al tracking ante las mismas condiciones. Las muestras de hule silicón fueron sumergidas dentro de una solución ácida por periodos de 30, 60 y 90 días. Los ingredientes de dicha solución se muestran en la tabla 1.3.

**Tabla 1. 3.** Ingredientes de la lluvia ácida artificial [7].

<b>Ingrediente (g/l)</b>	<b>Contenido</b>
NaCl	0.14
KNO <sub>3</sub>	0.65
CaCl <sub>2</sub>	0.001
CuCl <sub>2</sub> · 5H <sub>2</sub> O	0.0015
CoCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	0.00045
Ácido cítrico	1.05
pH	2.85

Las pruebas de tracking también las realizaron de acuerdo con la norma IEC 587, y la solución empleada para contaminar a las muestras de hule silicón durante la prueba de resistencia al tracking fue la misma que se mencionó anteriormente utilizada por Dong-Yong, y la cual tuvo una conductividad de 2500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a 23°C. Kim observó que el ángulo de contacto de las muestras disminuyó significativamente ante la exposición a la solución ácida, y lo mismo ocurrió en cuanto a la resistencia al tracking. También observó una pérdida gradual en el peso de la muestra de hule silicón conforme ésta pasaba más tiempo expuesta a la solución ácida.

En el mismo año, J. Y. Koo, et al [8], estudiaron las características de envejecimiento por lluvia ácida del hule silicón. El grupo de trabajo de J. Y. Koo evaluó la resistencia al tracking, el ángulo de contacto y la tensión de ruptura; para estas pruebas utilizaron soluciones nítricas y sulfúricas con diferentes niveles de pH (5.6, 4.0, 2.5, 1.5) durante un periodo de 1500 h. Observaron que con respecto a la solución nítrica la superficie de la muestra fue ligeramente dañada hasta un pH de 2.5, pero sufriendo daños serios para un pH de 1.5; mientras que con respecto a la solución sulfúrica el grado de la degradación superficial se incrementó consistentemente. Cabe mencionar que J. Y. Koo utilizó el método del plano inclinado de la ASTM D2303 para las pruebas de resistencia al tracking [9].

Sang-Il Han, et al [10]; para la creación de la lluvia ácida artificial que emplearon en la elaboración de sus pruebas, utilizaron los mismos ingredientes que se muestran en la tabla 1.3, pero estos fueron ajustados para dar valores de pH de 3, 4 y 5 respectivamente. Encontrando que la superficie del hule silicón se erosionó a consecuencia de los efectos de la lluvia ácida.

También en el mismo año de 1997 N. E. Frost, et al [11]; realizaron pruebas con tres diferentes soluciones, las cuales fueron aplicadas a un polímero del tipo hule silicón. El trabajo desarrollado por Frost fue el de investigar la influencia de los componentes no cloruros de sodio, y en particular los efectos de un bajo pH y de la combinación de sales encontradas en la lluvia natural sobre el envejecimiento del hule silicón. Una descripción de las soluciones empleadas en estas pruebas aparece en la tabla 1.4.

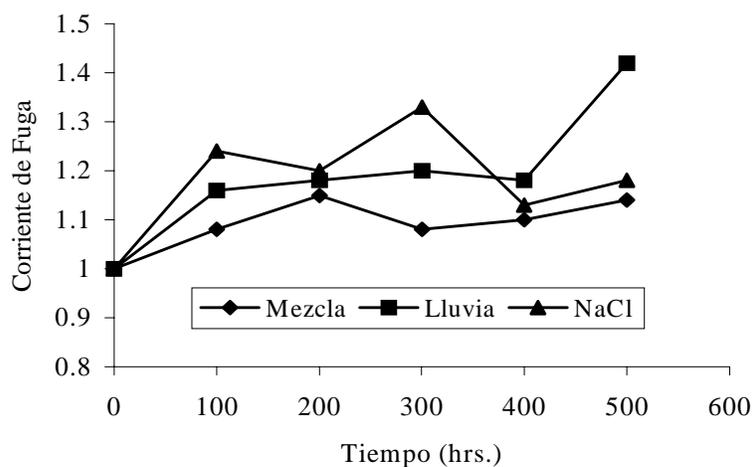
La primera solución es una solución estándar de cloruro de sodio (NaCl). La segunda solución la crearon mezclando diferentes sales, fue compuesta de iones encontrados en la precipitación natural pero el pH fue mantenido al igual que el de la solución de cloruro de sodio. El pH para estas dos soluciones lo mantuvieron en un valor de 7, como se ve en la tabla 1.4.

**Tabla 1. 4.** Composición de las soluciones de prueba [11].

<b>Solución</b>	<b><math>\sigma(\mu\text{S/cm})</math></b>	<b>pH</b>	<b>Iones Dominantes</b>
NaCl	265 - 285	7	$\text{Na}^+, \text{Cl}^-$
Mezcla	265 - 285	7	$\text{Mg}^{+2}, \text{Na}^+, \text{Ca}^{+2}, \text{NH}_4^+, \text{K}^+, \text{Cl}^-, \text{SO}_4^{-2}, \text{NO}_3^-$
Lluvia	265 - 285	3.5 - 4.1	$\text{H}^+, \text{Mg}^{+2}, \text{Na}^+, \text{Ca}^{+2}, \text{NH}_4^+, \text{K}^+, \text{Cl}^-, \text{SO}_4^{-2}, \text{NO}_3^-$

La tercera solución fue puesta para simular las condiciones encontradas en la precipitación natural (lluvia), conteniendo ácidos y componentes conductores. Esta tercera solución fue puesta con un pH de  $3.8 \pm 0.3$ , manteniendo la componente de la mezcla de sal con un nivel de conductividad en el rango de 265 - 285  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Este fue el mismo nivel de conductividad que usaron para las tres diferentes soluciones.

Los resultados de sus mediciones indicaron que tanto la solución de NaCl como la solución de lluvia sintética producen un rápido incremento en la corriente de fuga; pero al paso del tiempo para la solución de NaCl, la corriente de fuga tiende a estabilizarse. Mientras que la solución de la mezcla de sales produjo un insignificante incremento a lo largo de la prueba, como puede apreciarse en la figura 1.1. Según los autores esto parece indicar que el componente ácido de la lluvia sintética puede ser el agente que produce el incremento en la corriente de fuga.



**Figura 1. 1.** Medición de la Corriente de Fuga en periodos de 100 horas, en una muestra de hule silicón [11].

En 1998, J. Montesinos, et al [12]; aplicaron cuatro diferentes recubrimientos de hule silicón vulcanizado a temperatura ambiente (RTV SR) sobre tabletas de porcelana. Aquí se utilizaron tres tipos de ácidos: ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ), sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) y oxálico ( $\text{HOCOCOOH}$ , éste ácido puede ser generado debido a la corona o arqueo sobre superficies poliméricas húmedas) [12]. Los valores de pH fueron 2 y 4, para diferentes periodos de duración, los cuales llegaron hasta una semana. Encontraron que el ácido que produjo mayores daños fue el oxálico, seguido por el nítrico y al final el sulfúrico. Es importante señalar que los resultados que se encontraron aquí con respecto al ácido nítrico y sulfúrico no coinciden a los que obtuvo J. Y. Koo [8], en donde el ácido nítrico sólo produjo ligeros daños en la superficie, mientras que el daño que produjo el ácido sulfúrico se incrementó gradualmente.

Probablemente esto pueda deberse a los diferentes valores de pH utilizados, así como a los diferentes periodos de tiempo en que fueron expuestas las muestras a la solución ácida en ambas investigaciones; ya que J. Montesinos utilizó un periodo máximo de 168 horas (una semana), mientras que el tiempo a la que fue expuesta la muestra utilizada por J. Y. Koo fue de 1500 horas.

Nuevamente en 1998, X. Wang, et al [13]; investigaron el comportamiento del aislador de hule silicón bajo la influencia de lluvia ácida, envejecido aceleradamente en una cámara de niebla. Encontraron resultados similares a los que se mencionaron anteriormente tales como: una disminución en la hidrofobicidad superficial y un aumento en la corriente de fuga.

Ellos observaron que el aislador era capaz de restaurar en algún grado la parte degradada bajo condiciones secas; esto lo atribuyeron al bajo peso molecular (LMW) del líquido polimérico, el cual se difunde o emigra a la superficie recobrando la superficie degradada y suministrando una capa hidrofóbica. Resultados similares se han encontrado en otros trabajos de investigación [14, 15, 16].

En el mismo año, N. E. Frost, et al [17]; realizaron otra investigación empleando la misma solución de lluvia ácida artificial que se mostró anteriormente en la tabla 1. 4, pero ahora aplicando la solución a distintos materiales poliméricos como: el HDPE (high density polyethylene), el EPDM (ethylene propylene diene monomer), y el Hule Silicón; encontrando que todos los materiales sufrieron degradación, pero comportándose de manera distinta ante las pruebas de tracking. El periodo de prueba para la resistencia al tracking fue de 888 horas, donde el HDPE fue el aislador que sufrió mayores cambios en su corriente de fuga así como en la pérdida de peso, seguido por el EPDM y el Hule Silicón, éste último mostró un mejor comportamiento ante los otros dos materiales.

Lo anterior induce a realizar investigaciones concernientes al impacto de lluvia ácida sobre los aisladores poliméricos en nuestro país.

### **1. 3. 1. Aisladores poliméricos**

La necesidad de transmitir grandes bloques de energía a largas distancias trajo como consecuencia la concepción de sistemas de transmisión en extra y ultra alto voltaje (EHV, UHV) a finales de los años cincuenta. Estos desarrollos impusieron un reto para los aislamientos cerámicos utilizados convencionalmente,

requiriéndose aisladores de menor peso y mejores características eléctricas y mecánicas. Aunque el interés en la transmisión a voltajes superiores a 1000 kV disminuyó gradualmente, el interés en tener un aislador más ligero se incrementó, dando lugar a que en 1959 se introdujera en Estados Unidos el primer aislador no cerámico [18].

Sin embargo, éstos aisladores, principalmente fabricados con resina epóxica, registraron degradación prematura (fallas por tracking y erosión) a pesar de sus ventajas prometedoras. Algunos años después, fabricantes europeos introdujeron al mercado lo que se conoce como la primera generación de aisladores no cerámicos.

Durante un periodo de 15 años, un gran número de compañías eléctricas empezó a utilizar como prueba estos aisladores, principalmente para ganar experiencia.

Los aisladores poliméricos poseen características especiales que los hacen atractivos para resolver problemas detectados en los aisladores de vidrio o porcelana, principalmente en zonas de alta contaminación y vandalismo. La primera generación de aisladores no cerámicos para líneas de transmisión ofreció ventajas significativas y generó un interés considerable entre las compañías usuarias. Las ventajas específicas, en comparación con los aisladores cerámicos convencionales, son:

- **Peso ligero.** La densidad de los materiales poliméricos es mucho menor que la de los cerámicos, por lo que su peso es menor. Esto ayuda a tener menores costos de construcción y transportación.
- **Resistencia al vandalismo.**

- Alta resistencia mecánica en relación con su peso. Esto ayuda al diseño de nuevas torres con mayores claros.
- Manufactura de geometrías complejas. La facilidad para moldear un polímero favorece la reducción en los costos de producción.
- Mejores niveles de tensión de aguante que los aisladores cerámicos y de vidrio.
- Mejor comportamiento en ambientes contaminados. Esto es gracias a su propiedad hidrofóbica.
- Su uso reduce los costos por mantenimiento de los aisladores cerámicos convencionales cuando éstos se encuentran en ambientes con altos niveles de contaminación.
- Mejora la estética de la línea de transmisión.
- Son mucho más baratos.

En la figura 1.2 se muestran los componentes básicos de un aislador polimérico: un núcleo, faldones y herrajes acoplados a ambos extremos. Los herrajes se sujetan al núcleo en diferentes formas para lograr la resistencia mecánica requerida. El núcleo está formado por fibras de vidrio alineadas axialmente y unidas por medio de una resina orgánica.

Sin embargo éstos aisladores pueden envejecerse y presentar cambios debido a los múltiples esfuerzos encontrados en servicio, ya que tienen uniones más débiles que los materiales cerámicos [19]. El envejecimiento y la vida esperada de los aisladores poliméricos dependen de varios factores, muchos de los cuales están asociados con la exposición a la intemperie, mientras que otros están relacionados con las condiciones de operación.



**Figura 1. 2.** Componentes de un aislador polimérico típico.

El envejecimiento se refiere al proceso que causa la falla del aislador para poder cumplir con su función. Una propiedad importante que se relaciona con el envejecimiento del material polimérico es la hidrofobicidad superficial.

### **1. 3. 2. Hidrofobicidad superficial**

Una de las principales características de los aisladores poliméricos es su hidrofobicidad superficial, ésta propiedad ayuda a que éste tipo de aisladores tenga un mejor desempeño en ambientes contaminados en comparación con los aisladores cerámicos convencionales.

La hidrofobicidad es la propiedad que tiene la superficie de un aislante sólido para formar gotas en lugar de formar una película continua de agua cuando existen condiciones de niebla, alta humedad o lluvia ligera; como puede verse en la figura 1.3.



**Figura 1. 3.** Hidrofobicidad superficial en un aislador polimérico.

Por medio de ésta propiedad se reduce la corriente de fuga y la probabilidad de que se formen bandas secas aumentando así el nivel de tensión de flameo.

El envejecimiento de la superficie de los polímeros causa pérdida de la hidrofobicidad, ésta pérdida de hidrofobicidad se ve acelerada por la temperatura, la contaminación, las descargas corona, las descargas superficiales, la lluvia ácida y los rayos UV; sin embargo otra característica importante de los polímeros es la de poder recuperar su hidrofobicidad después de un cierto tiempo. El tiempo en que se mantiene la hidrofobicidad y el tiempo en que se puede llegar a recuperarse depende considerablemente del tipo de material.

### **1. 3. 3. Mecanismos de degradación asociados con la exposición a la intemperie**

Como se mencionó anteriormente, el envejecimiento de un aislador se refiere al proceso que causa la falla del aislador para que éste pueda cumplir con su función. Pero también dependiendo de los materiales utilizados en los aisladores, así como de su diseño y de las condiciones ambientales en las cuales se encuentra trabajando el aislador, se pueden generar diferentes mecanismos de degradación que pueden provocar la falla del aislador. Algunos de estos mecanismos son [20]:

- Brittle Fracture. Diversas formas de falla mecánica de la barra de fibra de vidrio.
- Tracking. Formación de pistas conductoras sobre la superficie del material aislante.
- Chalking. Aparición de partículas del relleno en la superficie aislante.
- Cambios en el color base del material aislante.
- Corona Cutting. Rompimiento del material polimérico como resultado de la exposición a altos niveles de energía UV asociada con la presencia de corona.
- Corrosión de las partes metálicas debido a la reacción química con el ambiente.
- Crazing. Micro fracturas superficiales con profundidades entre 0.01 y 0.1 mm.
- Debonding. Rompimiento del material adhesivo usado para unir químicamente dos materiales del aislador.
- Erosión. Pérdida significativa del material aislante, irreversible y no conductora.

- Exposición de la barra de fibra de vidrio al ambiente.
- Aligating. Fracturas superficiales con profundidad mayor a 0.1 mm.
- Fuga de grasa de las interfaces faldón-cubierta o faldón-núcleo hacia la superficie.
- Hidrólisis. Penetración de agua en forma líquida o vapor, causando el ablandamiento de cubierta o faldones.
- Peeling. Pérdida de adhesión del sello de los herrajes.
- Daños por arco de potencia.
- Puncture. Daños por perforación.
- Splitting. Separación o apertura del material aislante.
- Daños por vandalismo.

Aunque muchos factores están involucrados en el envejecimiento de los aisladores poliméricos, la lluvia ácida juega un papel muy importante. En un aislador estándar de 25 cm de diámetro la tensión de flameo disminuye 1.5 kV cuando el valor de pH cambia de seis a tres [21]. Esto se debe a que a medida que el pH se incrementa, ocurre lo mismo en la corriente de fuga, originando una reducción en la tensión de flameo.

### **1. 3. 4. Proceso de flameo en aisladores contaminados**

La contaminación del aislamiento consiste en el depósito paulatino de partículas contaminantes sobre su superficie. Cuando la contaminación en el aislador se ve sujeta a procesos de humectación por niebla, rocío o llovizna ligera, dependiendo de la conductividad de las partículas contaminantes, se llegan a reducir las distancias dieléctricas del aislamiento provocando el flameo. El flameo de los

aisladores debido a la contaminación es un fenómeno dinámico que se presenta en varias etapas [22]. Aunque este proceso ha sido presentado en muchas publicaciones, las etapas principales del fenómeno se presentan en la siguiente página, de una manera resumida y en forma esquemática en la figura 1.4.

### **1. 3. 5. Alternativas para disminuir el riesgo de flameo en aisladores debido a la contaminación**

En el fenómeno de aisladores contaminados intervienen tres agentes: alta tensión, depósitos contaminantes y humedad. Al inhibir o minimizar la acción de uno de estos tres agentes, no existe probabilidad de que se presente el flameo por contaminación. Las alternativas para disminuir el riesgo de flameo de los aisladores se pueden dividir en tres grupos [23]:

1. Minimización de la acumulación del contaminante.
  - Lavado periódico.
  - Perfiles aerodinámicos.
2. Reducción de los esfuerzos eléctricos.
  - Mayor número de aisladores en las cadenas.
  - Aisladores con gran distancia de fuga.
  - Extensores de distancia de fuga.
3. Prevención de la humectación de la capa contaminante.
  - Aisladores con propiedades semiconductoras.
  - Aisladores de material sintético.
  - Aisladores recubiertos con grasa de petróleo o silicón.
  - Aisladores con recubrimiento elastomérico de silicón.

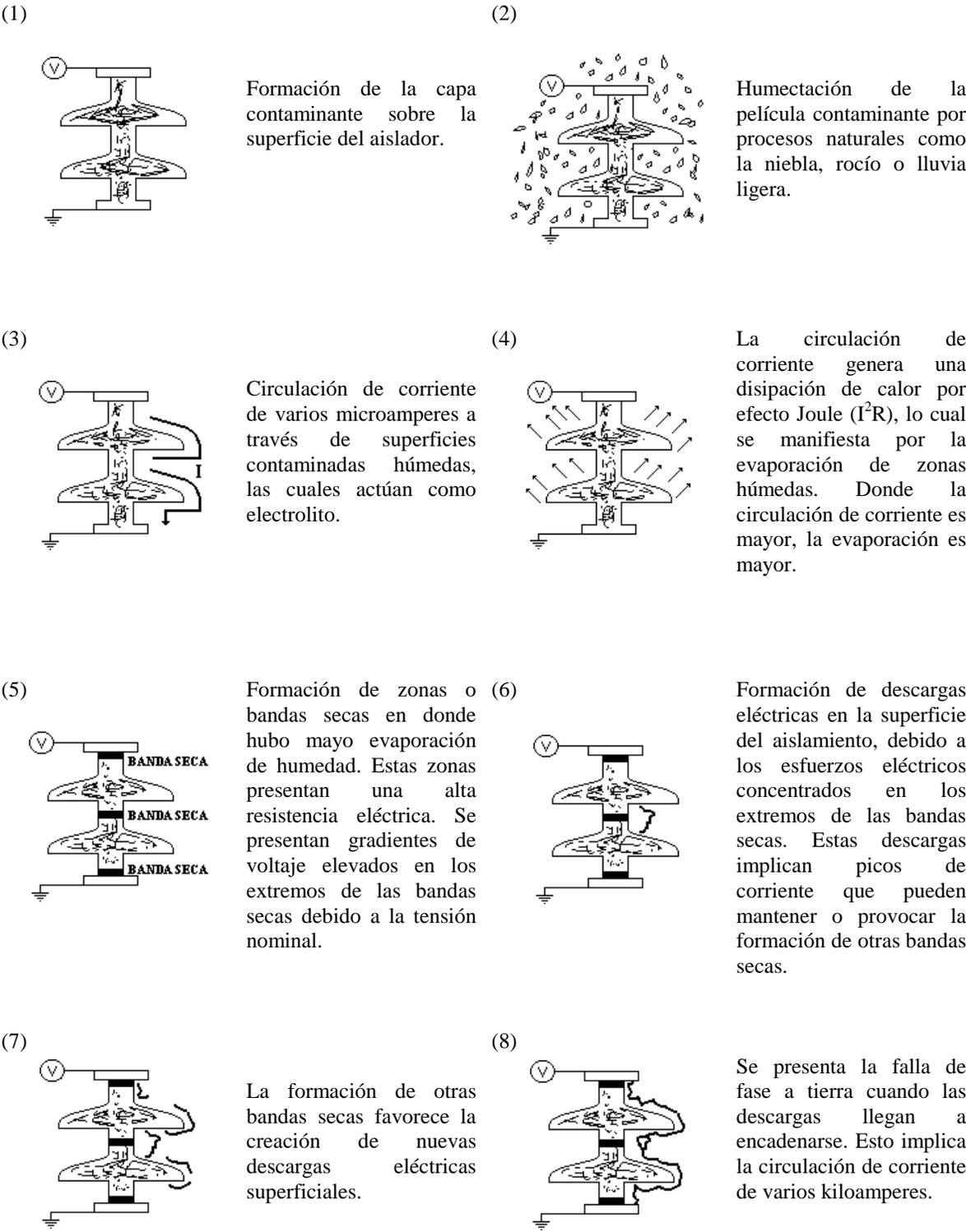


Figura 1. 4. Proceso de flameo en un aislador convencional debido a problemas de contaminación.

## **1. 4. Lluvia ácida**

Actualmente los problemas ambientales en las grandes ciudades han alcanzado matices significativos, debido a la cantidad excesiva de material contaminante generado por el consumo intenso de combustibles, asociado al crecimiento industrial, urbano y vehicular.

Cuando los óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno emitidos a la atmósfera interactúan con la radiación solar, la humedad atmosférica y la lluvia propician la formación de los compuestos ácidos (ácido sulfúrico  $H_2SO_4$  y ácido nítrico  $HNO_3$ ). Las precipitaciones ácidas, comúnmente denominadas lluvias ácidas representan uno de los problemas ambientales típicos de las grandes ciudades.

Es importante mencionar que la composición química del agua de lluvia no contaminada es producto de la interacción de factores naturales, su valor de pH es cercano a 5.6, recientemente un pH de 5.0 constituye el pH normal del agua de lluvia. La ligera acidez que presenta el agua de lluvia se debe al equilibrio que existe entre el agua y el  $CO_2$  en la atmósfera, resultando una solución carbónica débilmente ácida.

### **1. 4. 1. El fenómeno de la lluvia ácida**

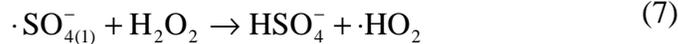
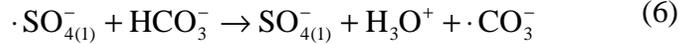
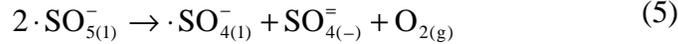
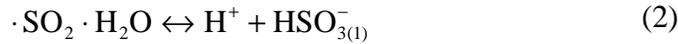
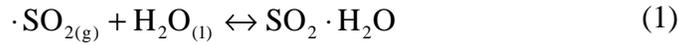
La Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) enfrenta serios problemas de deterioro ambiental relacionados con factores físicos, económicos y sociales. Uno de los problemas ambientales asociado a la contaminación atmosférica es la presencia de precipitación ácida, término usualmente conocido como lluvia

ácida o depósito ácido atmosférico, el cual se ha acentuado en áreas específicas de la ciudad.

La lluvia es un mecanismo natural de limpieza de la atmósfera y tiene propiedades de acarreo únicas, remueve los gases atmosféricos, aerosoles, partículas, y todos aquellos compuestos que han sido introducidos a la atmósfera por diferentes fuentes de emisión naturales (erupciones volcánicas, incendios forestales, etc.) o antropogénicas (plantas de energía, industria y transporte). Por lo tanto, la lluvia es un indicador útil de los niveles de contaminación ambiental [24].

La lluvia tiene su origen en centros urbanos e industriales, siendo las principales áreas de emisión de sus precursores: el bióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), los cuales son transportados a cientos o miles de kilómetros de sus fuentes. Después de ser emitidos dentro de la atmósfera son transformados químicamente a partículas de sulfatos y nitratos, posteriormente en combinación con vapor de agua generan ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) y nítrico ( $\text{HNO}_3$ ). Estos ácidos regresan a la tierra como rocío, llovizna, niebla, aguanieve, nieve y lluvia [24].

De los compuestos precursores de ácidos, el  $\text{SO}_2$  en fase gaseosa es emitido en forma significativa por plantas termoeléctricas, el cual es oxidado a  $\text{SO}_4^-$  y el radical ( $\cdot\text{SO}_4^-$ ) al reaccionar con el peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) produce el  $\text{H}_2\text{SO}_4$  influenciado por la intensidad de la luz solar, la humedad relativa y la presencia de nieblas y nubes, éste proceso de transformación química se describe de manera general mediante las siguientes ocho ecuaciones [24]:



La ligera acidez que presenta el agua de lluvia en condiciones normales es causada por la formación de ácido carbónico, cuando la humedad atmosférica alcanza un equilibrio con el bióxido de carbono en el ambiente presentando un pH entre 5.0 y 5.6 unidades [25]. La lluvia ácida es influenciada en menor proporción por los ácidos débiles (ácido acético y fórmico), mientras que los fuertes (ácido sulfúrico y nítrico) debido a su fuerza iónica son los que determinan la acidez en el agua de lluvia cuando no son neutralizados.

## 1. 4. 2. Estudios sobre la caracterización de la lluvia ácida en México

El pH se ha considerado como un parámetro de suma importancia en los estudios de caracterización de la lluvia ácida. Es difícil obtener la determinación del pH con exactitud en las muestras de agua que contienen baja conductividad eléctrica (o sales disueltas) tales como agua destilada, desionizada o de lluvia.

Para la caracterización química de la lluvia se realiza la determinación de los iones mayores como  $\text{Ca}_2^+$ ,  $\text{Mg}_2^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  [26]. Las investigaciones sistemáticas sobre el monitoreo de las precipitaciones pluviales en México son relativamente recientes.

Báez, et al [27]; durante las épocas de lluvia de 1981 y 1982 colectaron muestras de lluvia en tres lugares diferentes en la Ciudad de México (Zócalo, Coyoacán y Xochimilco; además de la UNAM), los valores del pH que obtuvieron se muestran en la tabla 1.5.

**Tabla 1. 5.** Valores de pH del agua de lluvia registrados en 1982 [27].

<b>LUGAR</b>	<b>RANGO</b>	<b>PROMEDIO</b>
UNAM (C.U.)	5.94 – 6.86	6.46
Zócalo	4.81 – 7.50	5.73
Coyoacán	4.71 – 7.53	5.52
Xochimilco	4.20 – 7.87	5.09

Durante el periodo de junio a septiembre de 1983 [3], llevaron a cabo la determinación del pH en 173 muestras de lluvia colectadas en forma secuencial por fracciones, en la Ciudad de México y áreas circundantes, los datos que obtuvieron se muestran en la tabla 1.6. Los resultados indicaron valores ácidos del pH en la mayoría de las muestras colectadas en el área urbana y aun en aquellas muestras que fueron obtenidas en lugares montañosos (valores de pH menores a 4.5)

De 1984 a 1985, Baez y Belmont [28], realizaron un estudio de la composición química de la lluvia a un área urbana fuertemente contaminada (Distrito Federal), un lugar prominentemente agrícola (El Bajío, Estado de Guanajuato) y por último a una región costera en donde se encuentra instalado uno

de los mayores complejos petroquímicos del país (Minatitlán y Coatzacoalcos), sus datos se muestran en la tabla 1.7.

**Tabla 1. 6.** Valores de pH del agua de lluvia registrados en 1983 [3].

LUGAR	RANGO	PROMEDIO
UNAM (C.U.)	4.38 – 5.16	4.68
Lomas de Chapultepec	4.39 – 5.77	4.97
Rancho Viejo	4.10 – 5.10	4.53
Tlamacas	5.23 – 5.51	5.37
Nevado de Toluca	3.70 – 3.78	3.74
Ajusco	4.15 – 4.17	4.16
Lagunas de Zempoala	4.23 – 4.72	4.47

**Tabla 1. 7.** Valores de pH del agua de lluvia registrados en 1984 – 1985[28].

LUGAR	RANGO	PROMEDIO
UNAM (C.U.)	4.59 – 7.40	5.48
Salamanca	6.85 – 8.10	7.22
Irapuato	5.45 – 6.70	5.96
Penjamo	6.55 – 7.40	6.92
Yuriria	6.12 – 7.00	6.57
Salvatierra	6.13 – 7.40	6.72
Celaya	5.74 – 7.40	6.14
V. de Santiago	6.54 – 7.40	7.00
Mina. – Coatza.	3.75 – 7.66	4.66

En 1993 Baez, et al [29], presentaron un estudio para comparar las variaciones de las especies químicas en las lluvias durante 1986 y 1987 tales como  $H^+$ ,  $NH_4^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$  y  $NO_3^-$  en dos sitios: la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), en el Distrito Federal, y Rancho Viejo, en el Estado de México. Las tendencias de comportamiento de las especies  $NH_4^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$  y  $NO_3^-$  son las mismas para ambos sitios.

La concentración de los constituyentes químicos decae en la porción primera durante un evento de lluvia, mientras que ésta concentración se incrementó, decreció o bien no varió durante la última parte del mismo. En el caso del  $H^+$  (o pH), no hay un apreciable cambio sistemático durante 1986 en ambos sitios. La concentración de  $H^+$  para el sitio UNAM se incrementa continuamente con los números de fracción precipitada.

Los autores relacionaron que las concentraciones bajas fueron consecuencia de la neutralización de algunos ácidos fuertes por las partículas alcalinas de la atmósfera.

Los rangos de variación del pH fueron de 3.88 – 7.10 para 1986 y 4.31 – 7.11 para 1987 en el caso de la UNAM; y 4.05 – 5.40 para 1986 y 4.46 – 5.40 para 1987 en el caso de Rancho Viejo. Páramo et al. (1987) presentaron un estudio en 10 sitios localizados en el Distrito Federal y un análisis estadístico de los valores del pH medidos en las lluvias.

En 1987, el Instituto Nacional de Ecología (INE) implementó el programa Precipitaciones Ácidas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México; determinando el pH, la conductividad eléctrica, los sulfatos, los nitratos, los cloruros, el sodio, el potasio, el magnesio y el calcio a través de la técnica de muestreo por depósito total. En 1993 se revaluó éste programa e iniciaron una etapa de monitoreo automático y continuo de los depósitos secos y húmedos en la zona; esto a través de la Secretaria del Medio Ambiente del Distrito Federal (SMADF).

Los datos históricos del pH para el depósito húmedo y total por sitio registrados por la SMADF se muestran en la tabla 1.8.

**Tabla 1. 8.** Datos históricos del pH en muestras de agua de lluvia mediante depósito húmedo y total por sitio para el periodo 1987 – 1999 [24].

SITIO	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
Cerro del Tepeyac (TEC)	4.8	3.6	5.3	4.3	4.3	4.5	5.7	4.7	5.13	4.76	3.93	4.21	4.64
Xalostoc (XAL)	Nm	Nm	6.1	Nm	6.0	5.3	5.5	5.2	5.56	5.89	3.6	4.38	5.71
Nezahualcoyotl Sur (NTS)	Nm	Nm	Nm	5.4	5.2	4.9	5.4	3.9	5.6	4.66	3.91	4.35	4.3
Chapingo (CHA)	Nm	5.8	6.73	4.42	5.21	5.12	5.29						
Tlalnepantla (TLA)	Nm	Nm	5.7	Nm	4.7	5.1	4.9	4.5	5.4	4.79	3.76	4.14	4.65
Secretaria de Hacienda (SHA)	Nm	Nm	4.0	4.1	4.9	4.0	4.2	3.7	4.58	4.36	3.83	4.22	4.16
Lab. de Bacteriología y Físico-Química (LBFQ)	Nm	5.16	4.48	3.95	4.23	4.5							
Museo de la Cd. de México (MCM)	3.8	3.9	4.9	5.3	4.0	4.5	5.1	4.2	4.93	4.45	3.93	4.19	4.31
Xochimilco (XCH)	Nm	Nm	Nm	3.7	4.2	4.4	4.9	4.2	4.33	3.62	3.75	RS	RS
Cerro de la Estrella (CES)	Nm	Nm	4.7	Nm									
Centro de Educación Ambiental Acuexcómatl (CEA)	Nm	4.28	4.12										
Milpa Alta (MPA)	Nm	4.2	4.03										
Lomas (LOM)	3.9	3.6	3.4	4.2	3.9	4.1	3.7	3.7	4.35	3.85	3.3	4.1	4.26
Felipe Ángeles (FANJ)	3.6	3.8	4.5	4.0	3.8	4.1	4.7	3.7	4.1	3.97	3.69	4.21	4.13
Pedregal (PED)	Nm	Nm	4.8	3.7	4.1	3.9	4.5	3.8	3.54	3.91	3.48	RS	RS
Ecoguardas Ajusco Picacho (EAJ)	Nm	4.15	3.66										
Parres (PAR)	Nm	4.07	3.98										
Exconvento Desierto de los Leones (EDL)	Nm	4.12	3.94										
San Nicolas Totolapan (SNT)	Nm	4.08	3.6										

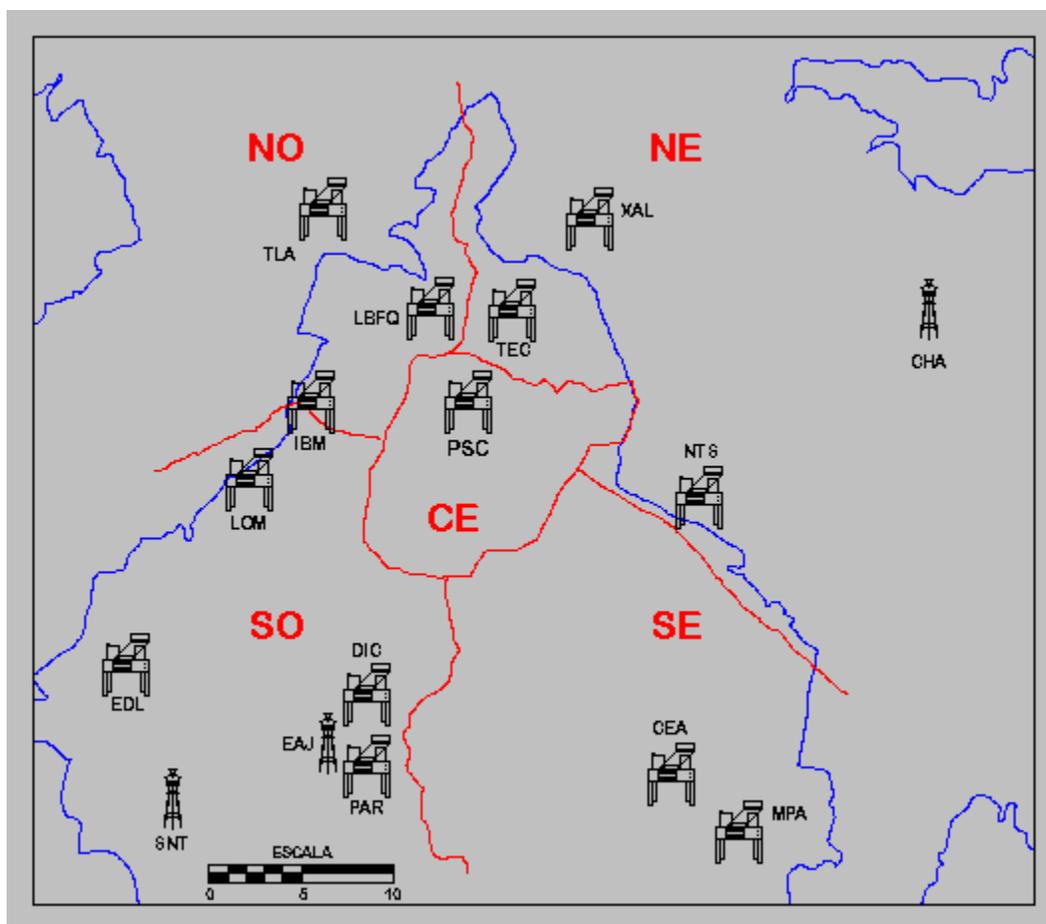
Nm = No monitoreado.

RS = Reubicación del sitio.

En la figura 1.5 se muestra un mapa donde la SMADF tiene ubicados los colectores, y en la tabla 1.9 se indican los nombres de los lugares así como los códigos con los que cuentan [1].

**Tabla 1. 9.** Nombre y código de los lugares donde se encuentran los colectores automáticos y convencionales [24].

Código	Nombre	Código	Nombre
LOM	Lomas	PSC	Plaza de Santa Catarina
IBM	Legaria	DIC	DICONSA
TLA	Tlalnepantla	EAJ	Ecoguardas Ajusco Picacho
LBFQ	Laboratorio de Bacteriología y Físicoquímica	EDL	Exconvento Desierto de los Leones
XAL	Xalostoc	PAR	Parres
CHA	Chapingo	MPA	Milpa Alta
NTS	Nezahualcóyotl Sur	CEA	Centro de Educación Ambiental Acuexcómatl
TEC	Cerro del Tepeyac	SNT	San Nicolás Totolapan



**Figura 1. 5.** Ubicación de los colectores en el Valle de México [1].

## 1. 5. Contribuciones del presente trabajo

Este trabajo forma parte de una serie de investigaciones encaminadas a conocer el comportamiento que tiene la tensión de flameo y la corriente de fuga en aisladores polimérico en ambientes ácidos y bajo distintos niveles de contaminación. Concretamente se realizaron una serie de pruebas experimentales a aisladores EPDM de 15 kV, tipo suspensión en una cámara de niebla limpia. A continuación se resumen aspectos importantes y contribuciones de esta investigación:

- Se analiza el efecto de un ambiente ácido y de la densidad equivalente de sal depositada (DESD) en el envejecimiento de aisladores EPDM; así mismo se muestran imágenes que se obtuvieron de las gotas de agua sobre las superficies de los aisladores para cada uno de los distintos periodos de envejecimiento, encontrando que conforme los aisladores eran expuestos al ambiente ácido por mayor tiempo, sufrían mayores daños en su hidrofobicidad superficial; y que a pesar de que se dejaron descansar los aisladores por periodos de 7 a 13 días, ninguno de ellos logró recuperar al 100% sus propiedades hidrofóbicas.
  
- Se presentan gráficas de las tensiones de flameo en función de los distintos periodos de envejecimiento y los diferentes niveles de contaminación. Los resultados muestran una disminución en la tensión de flameo para todos los niveles de la densidad equivalente de sal depositada (DESD). Los aisladores que se vieron mayormente afectados en sus tensiones de flameo fueron aquellos que presentaron mayor daño en sus características hidrofóbicas.

- Para la obtención de las corrientes de fuga, se implementó un sistema de adquisición de datos. Este sistema fue conformado por un circuito derivador, un circuito de protección, un circuito offset, un microcontrolador 68HC11 y una computadora personal. Todo este sistema de adquisición de datos nos permitió monitorear las caídas de tensión en el circuito derivador durante todo el desarrollo de las pruebas, las cuales en promedio tenían una duración entre 40 y 60 minutos. Posteriormente toda la información que era almacenada en la PC era analizada con ayuda del software Origin 6.0.

# CAPÍTULO 2

## **DISEÑO Y REALIZACIÓN DE PRUEBAS EXPERIMENTALES**

### **2. 1. Introducción**

El problema de la contaminación en aislamiento externo representa un foco de atención que ha generado un gran interés, por lo que en las últimas décadas ha cobrado gran fuerza un concepto innovador en lo que a aislamiento se refiere. Y éste se ha dado en virtud de la aparición de aisladores poliméricos.

Durante los últimos años se han realizado una gran cantidad de estudios para determinar la vida útil de aisladores no cerámicos, cuando éstos son sometidos a diferentes tipos de esfuerzos eléctricos, mecánicos y factores ambientales (contaminación, rayos UV, lluvia ácida, etc.). Sin embargo los efectos de éstos factores sobre el envejecimiento no han sido aún establecidos de manera definitiva.

En distintos estudios realizados por diferentes investigadores se ha reportado que el envejecimiento del material ha sido la principal causa de falla en aisladores poliméricos, mientras que el resto de fallas se atribuye a la minimización de las propiedades mecánicas y eléctricas del mismo [30]. Actualmente el reto es reproducir el proceso de envejecimiento sufrido por dichos aisladores, para poder predecir su vida útil, además de desarrollar una técnica confiable para su evaluación. Por otro lado, las necesidades actuales exigen la determinación de la tensión de flameo basándose en la severidad de las condiciones ambientales, impulsando de esta manera la aplicación de aisladores poliméricos como alternativa de solución a problemas de contaminación en México, aunque mundialmente se reconozca su superioridad ante el aislamiento convencional en este tipo de condiciones.

Por lo tanto, es importante determinar la tensión de flameo así como el comportamiento de la corriente de fuga en aisladores nuevos o envejecidos, sometiéndoles a condiciones específicas de contaminación.

Dos métodos, el de niebla limpia y niebla salina han sido estandarizados para aisladores de porcelana y de vidrio en la norma IEC 507 [31]. Estos métodos difieren principalmente en la manera de aplicar la contaminación sobre el aislador, la generación de niebla y en los mecanismos de humectación. Actualmente en muchas partes del mundo la tensión de flameo en aisladores poliméricos está siendo evaluada por éstos mismos métodos desarrollados para los aisladores de vidrio y cerámicos.

Sin embargo la naturaleza orgánica de los aisladores poliméricos hace que su respuesta a la humectación y al arqueado por bandas secas difiera de manera significativa a los aisladores no cerámicos, por lo que la validación de éstas pruebas es bastante cuestionable.

Además de que éstas pruebas se establecieron bajo la base de que ni el vidrio ni la porcelana sufren grandes cambios con el paso del tiempo, ni bajo condiciones climáticas naturales, es decir, radiación solar, viento, lluvia ácida y temperaturas extremas.

En el ámbito mundial, se han estudiado las posibles pruebas que pueden evaluar a los aisladores poliméricos bajo condiciones que simulen los efectos del medio ambiente lo más cercano a la realidad. Las normas han incluido entre las pruebas para este tipo de aisladores algunas de envejecimiento acelerado. Así la norma IEC 1109 [32], 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 UV, voltaje, niebla salina) por un periodo de 5000 horas, en el cual se han basado prácticamente todos los fabricantes de aisladores poliméricos ya que sólo aquellos materiales y diseños deficientes no la cumplen.

El segundo se basa en la aplicación de una tensión constante y niebla salina ( $10 \text{ kg/m}^3$ ) por un periodo de 5000 horas, el cual los fabricantes no efectúan por considerar que es muy severa en adición a que no representa las condiciones operativas [33].

## 2. 2. Diseño de las pruebas experimentales

El arreglo experimental que se empleó se muestra en la figura 2.1. Las dimensiones de la cámara de niebla fueron: 1.5x1.5x1.5 m. Se alimentó con C. A. a través de una fuente de alta tensión. Se utilizó un divisor resistivo para monitorear los niveles de tensión a los cuales era expuesto el aislador.

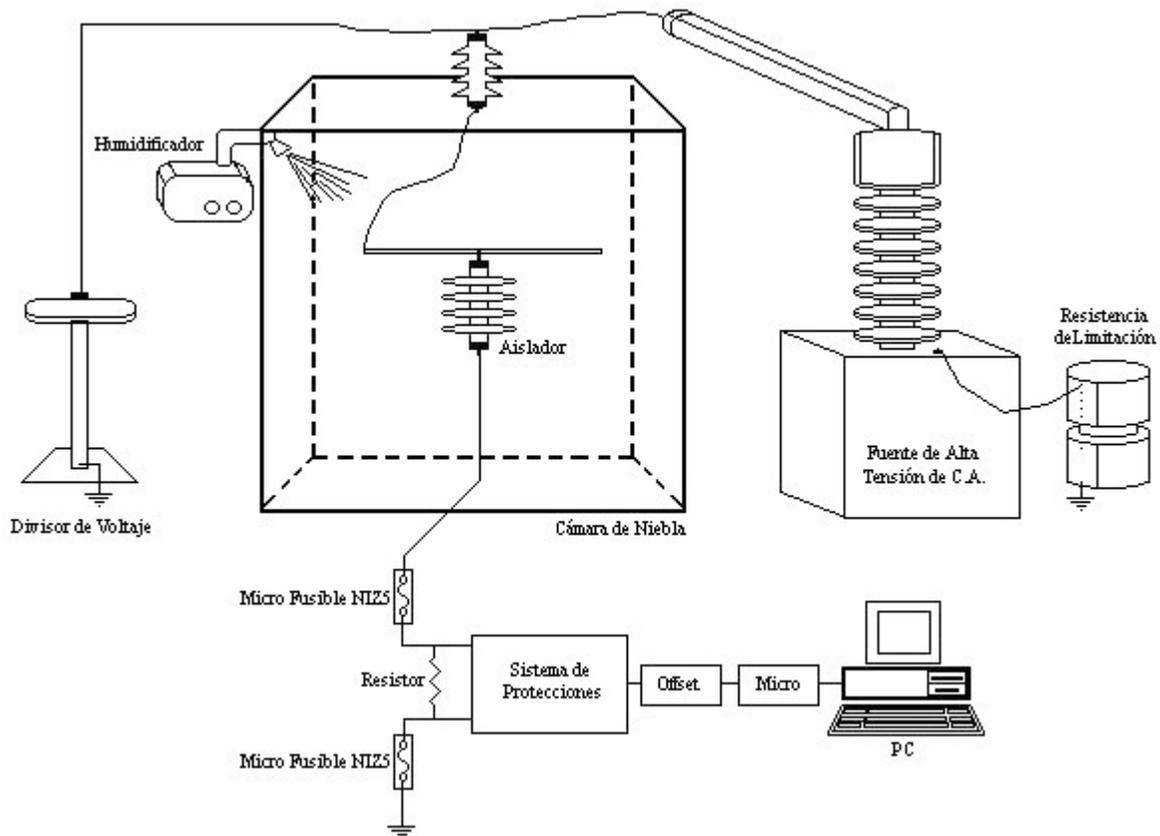


Figura 2. 1. Arreglo experimental.

La tensión de flameo se monitoreo a través de un resistor de  $2.5\Omega$  conectado en serie al aislador, donde la caída de tensión en este resistor era registrada por medio de un microcontrolador 68HC11, el cual almacenaba los datos en una PC; para posteriormente ser analizados con ayuda del software Origin 6.0.

A continuación se muestran las características de los elementos que constituyen la configuración experimental.

### **2. 2. 1. Fuente de alta tensión**

Se cuenta con una fuente de C. A., la cual esta conformada por un Transformador Elevador y una Resistencia de Limitación; ambos equipos marca Walter.

Los datos de placa del Transformador Elevador son: Type TE120, No. 263828; Relación: 220/100,000 volts; P = 25kVA Permanente; U<sub>ess</sub> = 150kV; F = 50 a 60 Hz. Y los de la Resistencia de Limitación son: 5, 6, 7, 8, 9 y 10 k $\Omega$ ; 0.3 amp. permanente. En la figura 2.2 se muestran estos equipos.

El control de la alta tensión se llevó acabo en la consola de mandos, figura 2.3 (a); mientras que la medición de la tensión se realizó en la carátula de un vóltmetro para alta tensión, a través de un divisor resistivo marca BERTAN de 60kV con una relación de 10,000:1; colocado en paralelo con el Transformador Elevador Walter, figura 2.3 (b).



**Figura 2. 2.** (a) Transformador Elevador Walter. (b) Resistencia de Limitación Walter.

La generación de niebla limpia se realizó a través de un humidificador marca SUNSHINE modelo HUM006. Las características de este humidificador son: tensión nominal 127 Volts; frecuencia 60 Hz; potencia 45 W; rango de control de humedad 30 a 80 %; consumo de agua 0.4 L/h +/-10 %; capacidad 5.7 L; tiempo continuo de uso 15 ½ horas.



(a)



(b)

**Figura 2. 3.** (a) Consola de mandos para el Transformador Elevador Walter. (b) Divisor Resistivo BERTAN.

En esta investigación la velocidad de entrada del vapor a la cámara de niebla se llevó al doble de lo que marca la norma IEC 507, la cual es de  $50 \text{ g/h/m}^3$ ; esto debido a que han reportado que para velocidades de entrada de vapor por arriba al normalizado se obtienen tensiones de flameo mucho más bajas [34]. Como se mencionó anteriormente la velocidad de entrada del vapor (VEV) se calcula dividiendo la cantidad de agua convertida en vapor por unidad de tiempo entre el volumen de la cámara; por lo tanto la VEV para la cámara de niebla que se empleó en el laboratorio fue:

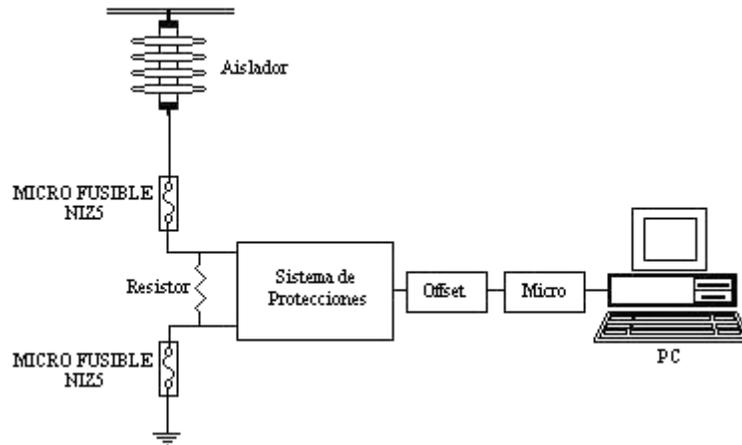
$$\text{VEV} = \frac{400\text{g/h}}{3.375\text{m}^3} = 118.5\text{g/h/m}^3$$

Para la medición de la humedad relativa dentro de la cámara de niebla se empleó un polímetro marca Casella London. El cual está conformado de un Higrómetro, con una escala de 0 a 100%; y de un termómetro con escala de 0 a 30°C.

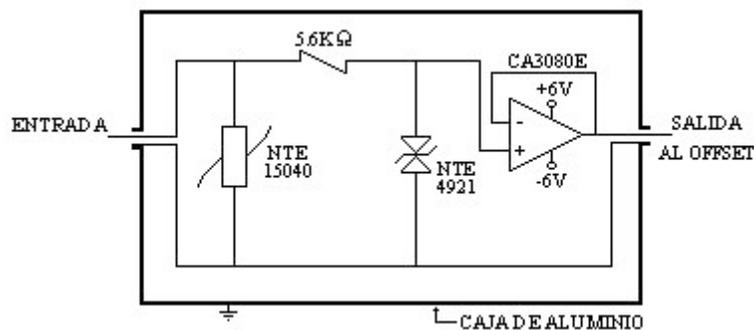
### **2. 2. 2. Sistema de protecciones**

Este sistema consistió de dos partes: la primera conformada por dos micro fusibles de 0.5 A (NI5Z) de apertura rápida conectados en serie como lo muestra la figura 2.4 (a); los cuales tienen la finalidad de proteger al equipo de medición de posibles sobre corrientes.

La segunda parte consistió básicamente de tres etapas conectadas en paralelo como lo muestra la figura 2.4 (b). El propósito de estas tres etapas fue el de contar con una protección completa, por ejemplo en caso de que algún componente llegara a fallar, todavía se contaba con otros dos elementos para poder proteger tanto al microcontrolador como a la PC. La primera etapa consiste de un supresor de gas (NTE 15040), el cual protege a los instrumentos de voltajes que excedan los 75 V. En la segunda etapa se encuentra un diodo zener bidireccional (NTE 4921), el cual limita el voltaje a 5 V. Y finalmente se encuentra un amplificador operacional de transconductancia (CA3080E), el cual es para proteger a los instrumentos de posibles sobre corrientes.



(a)



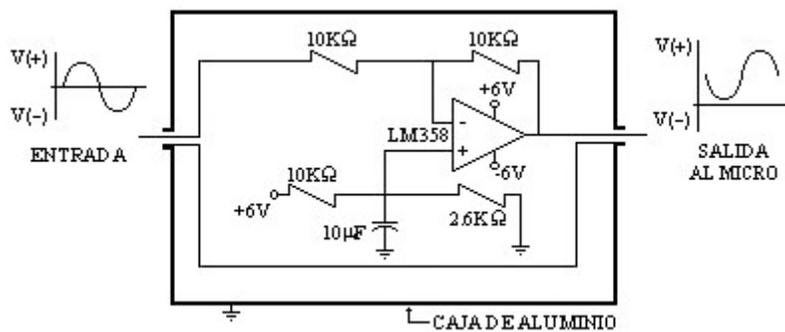
(b)

**Figura 2. 4.** (a) Diagrama que muestra la conexión de los dos micro fusibles NIZ5. (b). Diagrama del Sistema de Protecciones.

### 2. 2. 3. Sistema de adquisición de datos

Este sistema se conformó básicamente de dos partes. La primera de un inversor de acoplamiento de C. A. (Offset), el cual tiene la finalidad de invertir la señal a modo de suministrar únicamente valores de tensión positivos, los cuales requiere el microcontrolador, debido a que éste dispositivo no se le pueden suministrar valores de tensión negativos, como lo muestra la figura 2.5.

En la segunda parte se encuentra el microcontrolador 68HC11, el cual monitoreaba la caída de tensión en el resistor de  $2.5\Omega$ , y a su vez almacenaba los datos generados en una PC. El programa para que corriera el microcontrolador fue desarrollado en el Laboratorio de Sistema Digitales de la ESIME – IPN [35]. Este microcontrolador es de 16 bits, por lo que registraba 16 mediciones por ciclo, lo cual nos generaba un registro de 960 mediciones por segundo.



**Figura 2. 5.** Diagrama del Inversor de Acoplamiento de C. A.

Posteriormente con ayuda del software Micro Cal Origin 6.0 se llevaron a cabo los análisis correspondientes de los datos generados por el microcontrolador; los cuales consistían básicamente en graficar todas las señales y poder observar el comportamiento de la tensión así como el de la corriente de fuga; graficar los componentes armónicos de dicha corriente; obtener la carga acumulada en el aislador; y en eliminar la componente de C. D. generada por el inversor de acoplamiento y así volver a tener valores positivos y negativos en las señales registradas.

## 2. 3. Realización de las pruebas experimentales

El procedimiento para la realización de las pruebas en el Laboratorio de Alta Tensión de la ESIME – IPN se puede resumir en forma general en los siguientes puntos:

1. Envejecimiento de los aisladores
2. Evaluación de la hidrofobicidad superficial
3. Contaminación de los aisladores
4. Pruebas de contaminación artificial

Los aisladores poliméricos que se evaluaron fueron EPDM, tipo suspensión, de clase 15 kV, marca OHIO BRASS (ver figura 2.6). Las características mecánicas y eléctricas de estos aisladores se encuentran en el Anexo A. Se probaron un total de 16 aisladores.



**Figura 2. 6.** Aislador polimérico EPDM de 15kV, marca OHIO BRASS. En este gráfico el aislador se encuentra colocado dentro de la cámara de niebla.

### 2. 3. 1. Envejecimiento de los aisladores

El envejecimiento de los aisladores se llevó a cabo sometiéndolos a una solución artificial que simulara las condiciones que se presentan en la lluvia ácida. Esto con el fin de evaluar el daño que provoca un ambiente ácido en la hidrofobicidad superficial de dichos aisladores.

Los aisladores se sumergieron en la solución artificial por periodos de 240, 600 y 1320 horas, con la finalidad de evaluar que tanto afecta el tiempo al que este expuesto un aislador a un ambiente ácido. Se uso un total de 4 aisladores para cada periodo de envejecimiento.

Los componentes químicos que se usaron para la creación de la lluvia ácida artificial se muestran en la tabla 2.1, cabe mencionar que se empleo agua destilada para la creación de ésta solución acuosa.

**Tabla 2. 1.** Ingredientes de la lluvia ácida artificial que se empleó para el envejecimiento de los aisladores.

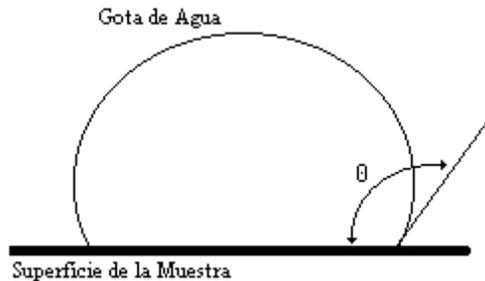
<b>Ingrediente</b>	<b>Contenido (mg/l)</b>
NH <sub>4</sub> Cl	235
NaCl	170
KCl	5.9
HNO <sub>3</sub>	23.5
MgSO <sub>4</sub>	35.3
CaSO <sub>4</sub>	29.4
pH	3.3

Como se mencionó en el estado del arte, para la selección y cantidad de los ingredientes se tomó como base el valor de pH más ácido que se ha registrado en el Valle de México desde 1987 a la fecha; y el cual fue de 3.3, registrado en Las Lomas, en la zona suroeste de la Cd. de México en 1997 [36].

### 2. 3. 2. Evaluación de la hidrofobicidad superficial

Para la evaluación de la hidrofobicidad superficial en los aisladores se empleó la técnica del ángulo de contacto, la cual consiste básicamente en medir el ángulo que se forma entre la superficie de la gota, llamado  $\theta$  y la superficie del material, en este caso la del aislador, como se indica en la figura 2.7.

Para la colocación de la gota sobre la superficie del aislador se utilizó una micro-pipeta de  $25\mu\text{l}$ , esto fue para que el tamaño de la gota fuera siempre el mismo en todas las muestras.



**Figura 2. 7.** Ángulo de contacto “ $\theta$ ” entre la superficie de la muestra y la gota de agua.

Una vez que la gota era colocada sobre la superficie del aislador, mediante una cámara de video SONY modelo CCD–TRV57, se grabaron las imágenes de la gota de agua, para posteriormente digitalizar las imágenes y poder medir el ángulo de contacto a través del software Corel-Draw. El proceso que se siguió desde la adquisición de las imágenes hasta su digitalización se muestra mas detalladamente en el Anexo B, así como la manera en que se midió el ángulo de contacto. Se grabaron un total de ocho imágenes para cada aislador.

### **2. 3. 3. Contaminación de los aisladores**

Al aplicar la solución contaminante sobre la superficie del material polimérico de acuerdo a como lo indica la norma IEC – 507 resulta ser muy irregular, esto es debido a la característica hidrofóbica que tienen los aisladores poliméricos. Por lo que la superficie de estos aisladores debe hacerse hidrofílica o humectable, lo cual exige la norma. Para lograr esto a continuación se describe el método que se empleo para que los aisladores perdieran temporalmente su hidrofobicidad [34], y así poder aplicar uniformemente la capa contaminante.

- Usar un algodón seco para empolvar un poco de kaolín sobre la superficie del aislador. Un toque ligeramente suave es todo lo que se necesita para hacer que el kaolín se adhiera a la superficie, y éste forme una ligera capa.
- Humedecer la muestra ligeramente con agua.
- Aplicar la mezcla de kaolín - sal, y rotar el aislador a lo largo de su eje para obtener una contaminación uniforme.

La aplicación del kaolín provee una interfase entre la superficie del aislador y la mezcla contaminante, sin cambiar las características del material, debido a que el kaolín es un material hidrofílico; y con esto se logra que la capa contaminante sobre el aislador sea uniforme. El método de niebla limpia señala que se puede utilizar el tonoko, el cual es otro material insoluble, pero debido a que tiene mas  $\text{SiO}_2$  que el kaolín, esto lo vuelve más hidrofóbico [37].

El método descrito anteriormente se aplicó solamente a los aisladores que se encontraban totalmente nuevos, y los cuales contaban al 100% con sus propiedades hidrofóbicas; mientras que para los aisladores que fueron sometidos a los distintos

periodos de envejecimiento, no fue necesario aplicar éste método, ya que como se verá más adelante éstos aisladores sí llegaron a perder sus propiedades hidrofóbicas, por lo que las distintas mezclas contaminantes se aplicaron directamente sobre la superficie de los aisladores logrando que la capa contaminante fuera uniforme.

Las distintas mezclas contaminantes que se emplearon se muestran en la tabla 2.2. Se varió el contenido de NaCl para poder obtener distintos niveles de la DESD y conductividad, esto con la finalidad de poder evaluar el comportamiento de los aisladores ante distintos niveles de contaminación. Se empleó agua destilada para la creación de estas mezclas, tal como lo indica el método de niebla limpia.

**Tabla 2. 2.** Mezclas contaminantes empleadas para la contaminación de los aisladores.

No. Mezcla	Kaolin (g/l)	NaCl (g/l)	DESD (mg/cm <sup>2</sup> )	Nivel de Contaminación.
1	40	5	0.02085	Muy ligero
2	40	20	0.07501	Ligero
3	40	80	0.25003	Pesado
4	40	160	0.425	Muy Pesado

La utilización del kaolín dentro de las mezclas contaminantes es para que la sal fuera retenida sobre la superficie del aislador por más tiempo.

### **2. 3. 4. Pruebas de contaminación artificial**

Las pruebas para evaluar la tensión de flameo se realizaron en una cámara de niebla limpia, bajo un método distinto al que indica la norma IEC 507, y con el cual se han reportado resultados satisfactorios [34]. El método es el siguiente:

1. Se aplicó una tensión inicial de aproximadamente el 80% de la tensión probable de flameo, de acuerdo a pruebas preliminares. Esta tensión se aplicaba una vez que la humedad relativa dentro de la cámara estuviera por arriba del 80%.
2. Se incrementó la tensión un 5%. Si no ocurría un flameo dentro de los próximos 2 minutos, se repetía éste paso.
3. Después de que ocurrió el flameo, se energizó con una tensión 10% más baja que la tensión de flameo. Si el flameo ocurría dentro de los próximos dos minutos, se repetía este paso.
4. Se repitió el paso 2 hasta que ocurría otro flameo. El valor más bajo de la tensión de flameo es conocido como la primera medición válida.
5. Cada prueba fue la última hasta que fuera obtenido al menos un valor más arriba al valor mínimo de la tensión de flameo.

La duración promedio de cada prueba fue de 30 a 60 minutos aproximadamente. Una buena indicación de cuando parar la prueba fue a través de una inspección visual del aislador, si éste se encontraba lo suficientemente seco como para permitir otro flameo.

# CAPÍTULO 3

## **ANALISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES**

### **3. 1. Introducción**

Los resultados experimentales muestran el efecto que provoca un ambiente ácido en la hidrofobicidad superficial y en la tensión de flameo en aisladores poliméricos del tipo EPDM. De la misma manera se presentan los resultados obtenidos al usar distintas mezclas contaminantes sobre los aisladores con sus respectivos niveles de la DESD y conductividad. Por último se muestran los distintos comportamientos que toma la forma de onda de la corriente de fuga antes de que aparezcan las primeras descargas sobre la superficie del aislador, durante la presencia de dichas descargas y finalmente instantes antes de que ocurra el flameo.

### **3. 2. Influencia de un ambiente ácido, y de la DESD; en el envejecimiento de los aisladores**

Para el análisis del efecto que provoca un ambiente ácido en la hidrofobicidad superficial de los aisladores, se utilizó el método del ángulo de contacto el cual se describe detalladamente en el Apéndice B.

Los aisladores que se probaron cuentan con 4 faldones, enumerados de arriba a abajo como faldón número 1, 2, 3 y 4 respectivamente. Por lo que para la toma de las mediciones de las gotas, los faldones se clasificaron como superiores e inferiores, llamando superiores a las superficies que se encuentran viendo hacia arriba, e inferiores a las que se encuentran viendo hacia abajo; por ejemplo cuando nos referimos al faldón F1Sup nos referimos a la superficie superior del faldón número uno.

Por medio de la técnica del ángulo de contacto se encontró que hay una disminución drástica en la hidrofobicidad superficial de los aisladores conforme éstos están expuestos a mayor tiempo a la solución de lluvia ácida artificial. Y también se encontró que ésta propiedad hidrofóbica disminuía aún más después de que los aisladores eran sometidos a las pruebas del laboratorio; y que a pesar de que se dejó descansar cada aislador un promedio de 168 a 312 h. (7 a 13 días), éstos no llegaron a recuperar su hidrofobicidad, contrariamente a lo que han reportado varios investigadores [13,14].

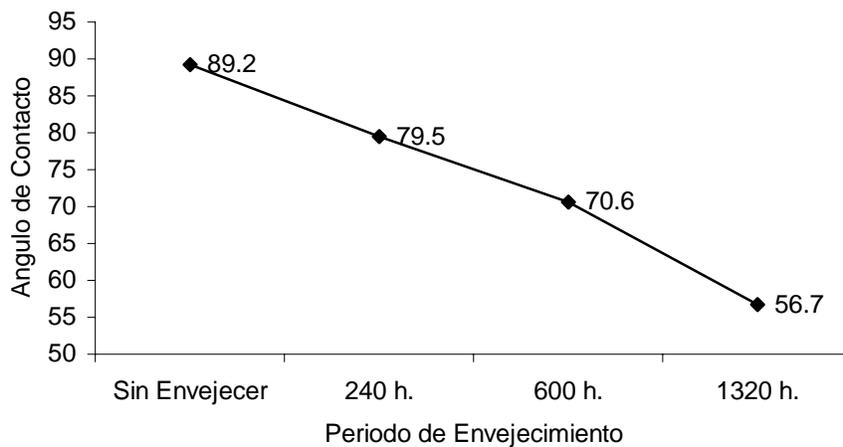
En la tabla 3.1 se muestran las mediciones del ángulo de contacto para un aislador totalmente nuevo, así como de los aisladores que se sometieron a los distintos periodos de envejecimiento. Cabe señalar que estos datos corresponden a

las imágenes de las gotas que se obtuvieron antes de que dichos aisladores fueran sometidos a las pruebas del laboratorio; esto con la finalidad de que sirvieran como referencia para los datos que se obtuvieron después de que los aisladores eran probados dentro de la cámara de niebla limpia.

**Tabla 3. 1.** Datos de las mediciones del ángulo de contacto ( $\theta$ ) para distintos periodos de envejecimiento. Los cuales fueron obtenidos antes de que los aisladores fueran sometidos a las pruebas de contaminación artificial.

Número de Faldón	Aislador Nuevo, sin Envejecer ( $\theta$ ).	Aislador Envejecido por 240 h ( $\theta$ ).	Aislador envejecido por 600 h ( $\theta$ ).	Aislador Envejecido 1320 h ( $\theta$ ).
F1 Sup.	94.4	76.8	65.1	44.7
F2 Sup.	87.8	84.2	72.3	64.7
F3 Sup.	92.2	81	74.1	56.1
F4 Sup.	86.2	75.2	70.3	57.1
F1 Inf.	87.4	72.2	64	61.9
F2 Inf.	93.8	91.7	71.9	62.9
F3 Inf.	86.8	75.6	78.4	56.9
F4 Inf.	85.1	79.5	68.4	49.1
<b>Promedios</b>	89.2125	79.525	70.5625	56.675

Graficando los promedios de la tabla anterior se puede apreciar claramente una disminución en el ángulo de contacto conforme se incrementa el periodo de envejecimiento como lo muestra la figura 3.1.



**Figura 3. 1.** Promedios de las mediciones del ángulo de contacto en los faldones de los aisladores, antes del inicio de las pruebas en el laboratorio. Para distintos periodos de envejecimiento.

Esta gráfica muestra hasta una reducción del 36.4% en la hidrofobicidad superficial para los aisladores envejecidos por 1320 h. (55 días), con respecto a los aisladores nuevos; mientras que para los aisladores envejecidos por 600 h. (25 días) fue del 20.85%, y para los envejecidos por 240 h. (10 días) solamente fue del 10.8%. En las figuras 3.2 y 3.3, se muestran las imágenes de las gotas de agua sobre las superficies de los aisladores, correspondientes a los datos mostrados en la tabla 3.1.

Una vez que los aisladores eran sometidos a su primera prueba dentro de la cámara de niebla limpia, éstos eran lavados para remover la mezcla contaminante de su superficie y así poder evaluar su hidrofobicidad superficial.

Posteriormente se dejaron por un periodo entre 168 a 312 h., y se observó que ninguno de los aisladores habían recuperado sus propiedades hidrofóbicas. Se les hizo una segunda prueba dentro de la cámara de niebla, y al finalizar ésta prueba, nuevamente eran lavados y se les evaluaba su hidrofobicidad.

Cabe hacer mención que la segunda prueba realizada en los aisladores nuevos, se llevo a cabo 168 horas después de haberseles realizado la primera evaluación. Y como se observó que después de este tiempo, estos aisladores no recuperaron sus propiedades hidrofóbicas, se optó por dejar descansar más tiempo a los aisladores envejecidos por 240 h., por lo que la segunda prueba para dichos aisladores se llevo a cabo 312 horas posteriores a su primera evaluación.

Igualmente para los aisladores envejecidos por 600 h., su segunda evaluación se realizó 312 h. (13 días) después. Finalmente para los aisladores envejecidos por 55 días., 192 h. después se les aplicó la segunda prueba.

**Aislador Nuevo, (sin envejecer).**



Faldón 1, superior.



Faldón 1, inferior.



Faldón 2, superior.



Faldón 2, inferior.



Faldón 3, superior.



Faldón 3, inferior.



Faldón 4, superior.



Faldón 4, inferior.

**Aislador Envejecido por 240 h.**



Faldón 1, superior.



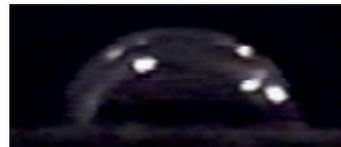
Faldón 1, inferior.



Faldón 2, superior.



Faldón 2, inferior.



Faldón 3, superior.



Faldón 3, inferior.



Faldón 4, superior.



Faldón 4, inferior.

**Figura 3. 2.** Imágenes de las gotas de agua sobre la superficie de un aislador nuevo y de un aislador envejecido por 240 h., antes de ser sometidos a las pruebas de contaminación artificial.

**Aislador Envejecido por 600 h.**



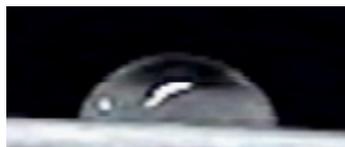
Faldón 1, superior.



Faldón 1, inferior.



Faldón 2, superior.



Faldón 2, inferior.



Faldón 3, superior.



Faldón 3, inferior.



Faldón 4, superior.

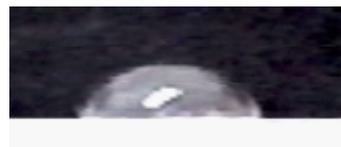


Faldón 4, inferior.

**Aislador Envejecido por 1320 h.**



Faldón 1, superior.



Faldón 1, inferior.



Faldón 2, superior.



Faldón 2, inferior.



Faldón 3, superior.



Faldón 3, inferior.



Faldón 4, superior.



Faldón 4, inferior.

**Figura 3. 3.** Imágenes de las gotas de agua sobre la superficie de un aislador envejecido por 600 h. y 1320 h., antes de ser sometidos a las pruebas de contaminación artificial.

A continuación se muestran en la tabla 3.2 las mediciones del ángulo de contacto ( $\theta$ ) que se obtuvieron de los aisladores nuevos (sin envejecer), para cada nivel de la DESD empleado en las pruebas de contaminación artificial.

**Tabla 3. 2.** Datos de todas las mediciones del ángulo de contacto ( $\theta$ ) que se obtuvieron a **aisladores nuevos**, antes del inicio de las pruebas, y después de ser sometidos a la primera y segunda prueba en la cámara de niebla limpia.

Número de Faldón	Datos de los aisladores antes del inicio de las pruebas ( $\theta$ ).	DESD = 0.02085 mg/cm <sup>2</sup>		DESD = 0.075 mg/cm <sup>2</sup>		DESD = 0.25 mg/cm <sup>2</sup>		DESD = 0.425 mg/cm <sup>2</sup>	
		1a. Prueba ( $\theta$ )	2a. Prueba ( $\theta$ )	1a. Prueba ( $\theta$ )	2a. Prueba ( $\theta$ )	1a. Prueba ( $\theta$ )	2a. Prueba ( $\theta$ )	1a. Prueba ( $\theta$ )	2a. Prueba ( $\theta$ )
F1 Sup.	94.4	67.1	65.5	65.6	66.8	67.4	57.1	71.5	58
F2 Sup.	87.8	68.8	61.8	64.1	69.1	64	59.2	67.9	65.3
F3 Sup.	92.2	83.6	67.9	78.5	69.9	67.7	73.3	67.9	64.9
F4 Sup.	86.2	77.1	61.8	73.9	63.2	67.1	63.5	71.1	62.3
F1 Inf.	87.4	78.7	61.4	71.2	58.7	65.2	56.6	62.5	60.9
F2 Inf.	93.8	84.1	62.6	73.2	65.1	71.8	69.7	57.5	57.3
F3 Inf.	86.8	74.6	69.2	81.7	66.6	90	52	69.3	66
F4 Inf.	85.1	65.9	70.9	74	65.1	73.1	67.4	73.9	55
<b>Promedios</b>	89.2125	74.9875	65.1375	72.775	65.5625	70.7875	62.35	67.7	61.2125

1ª. Prueba = Mediciones que se tomaron justo después de que los aisladores eran sometidos a su primera prueba dentro de la cámara de niebla.

2ª. Prueba = Mediciones que se tomaron justo después de que los aisladores eran sometidos a su segunda prueba dentro de la cámara de niebla (168 hrs. después de haberse concluido la primera prueba).

En las siguientes figuras (3.4 – 3.7), se muestran las imágenes de las gotas de agua sobre las superficies de los aisladores correspondientes a los datos mostrados en la tabla 3.2.

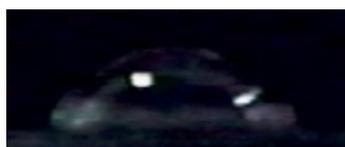
Después de la primera prueba.



Faldón 1, superior.



Faldón 1, inferior.



Faldón 2, superior.



Faldón 2, inferior.



Faldón 3, superior.



Faldón 3, inferior.



Faldón 4, superior.



Faldón 4, inferior.

Después de la segunda prueba.



Faldón 1, superior.



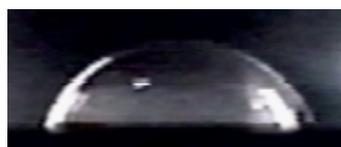
Faldón 1, inferior.



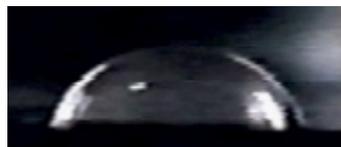
Faldón 2, superior.



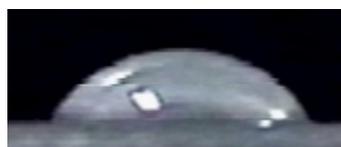
Faldón 2, inferior.



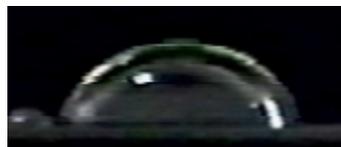
Faldón 3, superior.



Faldón 3, inferior.



Faldón 4, superior.



Faldón 4, inferior.

**Figura 3. 4.** Imágenes de las gotas de agua sobre la superficie de un aislador nuevo, registradas después de la primera y segunda prueba respectivamente; NaCl = 5g/l, DESD = 0.02085mg/cm<sup>2</sup> y  $\sigma = 0.8341\text{S/m}$ .

Después de la primera prueba.



Faldón 1, superior.



Faldón 1, inferior.



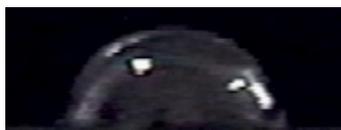
Faldón 2, superior.



Faldón 2, inferior.



Faldón 3, superior.



Faldón 3, inferior.



Faldón 4, superior.



Faldón 4, inferior.

Después de la segunda prueba.



Faldón 1, superior.



Faldón 1, inferior.



Faldón 2, superior.



Faldón 2, inferior.



Faldón 3, superior.



Faldón 3, inferior.



Faldón 4, superior.



Faldón 4, inferior.

**Figura 3. 5.** Imágenes de las gotas de agua sobre la superficie de un aislador nuevo, registradas después de la primera y segunda prueba respectivamente; NaCl = 20g/l, DESD = 0.075mg/cm<sup>2</sup> y  $\sigma = 3S/m$ .

Después de la primera prueba.



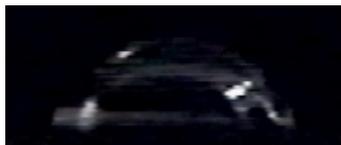
Faldón 1, superior.



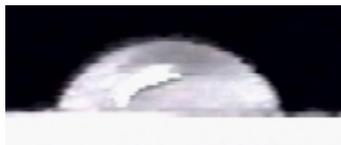
Faldón 1, inferior.



Faldón 2, superior.



Faldón 2, inferior.



Faldón 3, superior.



Faldón 3, inferior.



Faldón 4, superior.

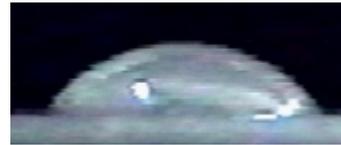


Faldón 4, inferior.

Después de la segunda prueba.



Faldón 1, superior.



Faldón 1, inferior.



Faldón 2, superior.



Faldón 2, inferior.



Faldón 3, superior.



Faldón 3, inferior.



Faldón 4, superior.



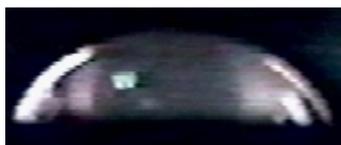
Faldón 4, inferior.

**Figura 3. 6.** Imágenes de las gotas de agua sobre la superficie de un aislador nuevo, registradas después de la primera y segunda prueba respectivamente; NaCl = 80g/l, DESD = 0.25mg/cm<sup>2</sup> y  $\sigma = 10\text{S/m}$ .

Después de la primera prueba.



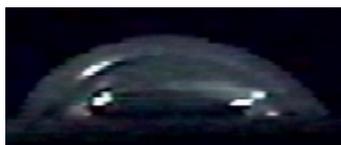
Faldón 1, superior.



Faldón 1, inferior.



Faldón 2, superior.



Faldón 2, inferior.



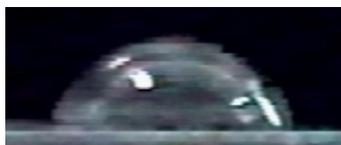
Faldón 3, superior.



Faldón 3, inferior.



Faldón 4, superior.



Faldón 4, inferior.

Después de la segunda prueba.



Faldón 1, superior.



Faldón 1, inferior.



Faldón 2, superior.



Faldón 2, inferior.



Faldón 3, superior.



Faldón 3, inferior.



Faldón 4, superior.



Faldón 4, inferior.

**Figura 3. 7.** Imágenes de las gotas de agua sobre la superficie de un aislador nuevo, registradas después de la primera y segunda prueba respectivamente; NaCl = 160g/l, DESD = 0.425mg/cm<sup>2</sup> y  $\sigma$  = 17S/m.

En la tabla 3.3 se muestran las mediciones del ángulo de contacto ( $\theta$ ) que se obtuvieron de los aisladores envejecidos por 240 h., para cada nivel de la DESD empleado en las pruebas de contaminación artificial.

**Tabla 3.3.** Datos de todas las mediciones del ángulo de contacto ( $\theta$ ) que se obtuvieron a **aisladores envejecidos por 240 h.**, antes del inicio de las pruebas, y después de ser sometidos a la primera y segunda prueba en la cámara de niebla limpia.

Número de Faldón	Datos de los aisladores antes del inicio de las pruebas ( $\theta$ ).	DESD = 0.02085 mg/cm <sup>2</sup>		DESD = 0.075 mg/cm <sup>2</sup>		DESD = 0.25 mg/cm <sup>2</sup>		DESD = 0.425 mg/cm <sup>2</sup>	
		1a. Prueba ( $\theta$ )	2a. Prueba ( $\theta$ )	1a. Prueba ( $\theta$ )	2a. Prueba ( $\theta$ )	1a. Prueba ( $\theta$ )	2a. Prueba ( $\theta$ )	1a. Prueba ( $\theta$ )	2a. Prueba ( $\theta$ )
1 Sup.	76.8	58	60.2	56.1	54.4	60.6	53.9	61.6	44.6
2 Sup.	84.2	61.2	70.5	63.8	52.9	70.8	60	69.5	60.9
3 Sup.	81	69.3	60.3	63	63.6	62.9	56.3	72.4	58.4
4 Sup.	75.2	64.2	60	71.7	58.8	61.9	54.8	70.9	69
1 Inf.	72.2	75.9	58.4	61.3	58.3	58.1	46.7	47.9	51.9
2 Inf.	91.7	74.8	55.2	73.5	59	61.2	57.9	58.8	47.1
3 Inf.	75.6	79	62.7	67.7	68.7	62	55.4	67.7	49.5
4 Inf.	79.5	64	63.9	65.3	61.9	67.4	60.4	61.7	49.4
<b>Promedios</b>	79.525	68.3	61.4	65.3	59.7	63.1125	55.675	63.8125	53.85

1ª. Prueba = Mediciones que se tomaron justo después de que los aisladores eran sometidos a su primera prueba dentro de la cámara de niebla.

2ª. Prueba = Mediciones que se tomaron justo después de que los aisladores eran sometidos a su segunda prueba dentro de la cámara de niebla (312 hrs. después de haberse concluido la primera prueba).

De la figura 3.8 a la figura 3.11, se muestran las imágenes de las gotas de agua sobre las superficies de los aisladores correspondientes a los datos mostrados en la tabla anterior (ver tabla 3.3).

Después de la primera prueba.



Faldón 1, superior.



Faldón 1, inferior.



Faldón 2, superior.



Faldón 2, inferior.



Faldón 3, superior.



Faldón 3, inferior.



Faldón 4, superior.



Faldón 4, inferior.

Después de la segunda prueba.



Faldón 1, superior.



Faldón 1, inferior.



Faldón 2, superior.



Faldón 2, inferior.



Faldón 3, superior.



Faldón 3, inferior.



Faldón 4, superior.



Faldón 4, inferior.

**Figura 3. 8.** Imágenes de las gotas de agua sobre la superficie de un aislador envejecido por 240h., registradas después de la primera y segunda prueba respectivamente; NaCl = 5g/l, DESD = 0.02085mg/cm<sup>2</sup> y  $\sigma = 0.8341\text{S/m}$ .

Después de la primera prueba.



Faldón 1, superior.



Faldón 1, inferior.



Faldón 2, superior.



Faldón 2, inferior.



Faldón 3, superior.



Faldón 3, inferior.



Faldón 4, superior.



Faldón 4, inferior.

Después de la segunda prueba.



Faldón 1, superior.



Faldón 1, inferior.



Faldón 2, superior.



Faldón 2, inferior.



Faldón 3, superior.



Faldón 3, inferior.



Faldón 4, superior.



Faldón 4, inferior.

**Figura 3. 9.** Imágenes de las gotas de agua sobre la superficie de un aislador envejecido por 240h., registradas después de la primera y segunda prueba respectivamente; NaCl = 20g/l, DESD = 0.075mg/cm<sup>2</sup> y  $\sigma = 3\text{S/m}$ .

Después de la primera prueba.



Faldón 1, superior.



Faldón 1, inferior.



Faldón 2, superior.



Faldón 2, inferior.



Faldón 3, superior.



Faldón 3, inferior.

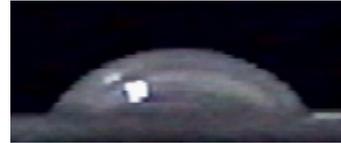


Faldón 4, superior.

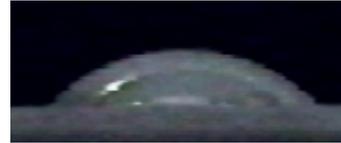


Faldón 4, inferior.

Después de la segunda prueba.



Faldón 1, superior.



Faldón 1, inferior.



Faldón 2, superior.



Faldón 2, inferior.



Faldón 3, superior.



Faldón 3, inferior.



Faldón 4, superior.



Faldón 4, inferior.

**Figura 3. 10.** Imágenes de las gotas de agua sobre la superficie de un aislador envejecido por 240h., registradas después de la primera y segunda prueba respectivamente; NaCl = 80g/l, DESD =  $0.25\text{mg/cm}^2$  y  $\sigma = 10\text{S/m}$ .

Después de la primera prueba.



Faldón 1, superior.



Faldón 1, inferior.



Faldón 2, superior.



Faldón 2, inferior.



Faldón 3, superior.



Faldón 3, inferior.



Faldón 4, superior.



Faldón 4, inferior.

Después de la segunda prueba.



Faldón 1, superior.



Faldón 1, inferior.



Faldón 2, superior.



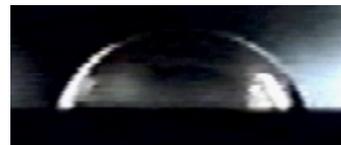
Faldón 2, inferior.



Faldón 3, superior.



Faldón 3, inferior.



Faldón 4, superior.



Faldón 4, inferior.

**Figura 3. 11.** Imágenes de las gotas de agua sobre la superficie de un aislador envejecido por 240h., registradas después de la primera y segunda prueba respectivamente; NaCl = 160g/l, DESD = 0.425mg/cm<sup>2</sup> y  $\sigma = 17\text{S/m}$ .

En la tabla 3.4 se muestran las mediciones del ángulo de contacto ( $\theta$ ) que se obtuvieron de los aisladores envejecidos por 600 h., para cada nivel de la DESD empleado en las pruebas de contaminación artificial.

**Tabla 3. 4.** Datos de todas las mediciones del ángulo de contacto ( $\theta$ ) que se obtuvieron a **aisladores envejecidos por 600 h.**, antes del inicio de las pruebas, y después de ser sometidos a la primera y segunda prueba en la cámara de niebla limpia.

Número de Faldón	Datos de los aisladores antes del inicio de las pruebas ( $\theta$ ).	DESD = 0.02085 mg/cm <sup>2</sup>		DESD = 0.075 mg/cm <sup>2</sup>		DESD = 0.25 mg/cm <sup>2</sup>		DESD = 0.425 mg/cm <sup>2</sup>	
		1a. Prueba ( $\theta$ )	2a. Prueba ( $\theta$ )	1a. Prueba ( $\theta$ )	2a. Prueba ( $\theta$ )	1a. Prueba ( $\theta$ )	2a. Prueba ( $\theta$ )	1a. Prueba ( $\theta$ )	2a. Prueba ( $\theta$ )
1 Sup.	65.1	58.9	62	55.5	50	55.6	46.5	50.2	46
2 Sup.	72.3	61.3	58.5	56.3	47.8	63.8	55.9	51.4	56.2
3 Sup.	74.1	65.9	57.2	61.6	56.8	57.9	60.1	59.5	55.9
4 Sup.	70.3	61.6	52.9	65.9	59.4	54.1	49	60.4	49.5
1 Inf.	64	56.5	56	48.5	54.1	53.7	51.6	56.5	48.8
2 Inf.	71.9	68.5	56.5	64.4	57.9	60	59.8	55.8	46.9
3 Inf.	78.4	62.3	58	57.4	56.5	64.5	54.2	58.4	46.2
4 Inf.	68.4	59.9	59.9	52.7	52.7	62.9	45.3	54.2	50.6
Promedios	70.5625	61.8625	57.625	57.725	54.4	59.0625	52.8	55.8	50.0125

1ª. Prueba = Mediciones que se tomaron justo después de que los aisladores eran sometidos a su primera prueba dentro de la cámara de niebla.

2ª. Prueba = Mediciones que se tomaron justo después de que los aisladores eran sometidos a su segunda prueba dentro de la cámara de niebla (312 hrs. después de haberse concluido la primera prueba).

A continuación se muestran las imágenes de las gotas de agua sobre las superficies de los aisladores correspondientes a los datos mostrados en la tabla 3.4 (ver figura 3.12 a la figura 3.15).

Después de la primera prueba.



Faldón 1, superior.



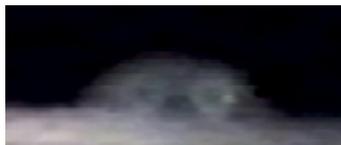
Faldón 1, inferior.



Faldón 2, superior.



Faldón 2, inferior.



Faldón 3, superior.



Faldón 3, inferior.



Faldón 4, superior.



Faldón 4, inferior.

Después de la segunda prueba.



Faldón 1, superior.



Faldón 1, inferior.



Faldón 2, superior.



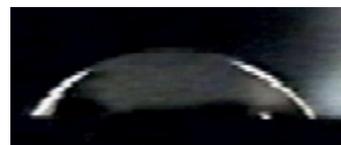
Faldón 2, inferior.



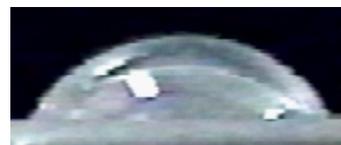
Faldón 3, superior.



Faldón 3, inferior.



Faldón 4, superior.



Faldón 4, inferior.

**Figura 3. 12.** Imágenes de las gotas de agua sobre la superficie de un aislador envejecido por 600h., registradas después de la primera y segunda prueba respectivamente; NaCl = 5g/l, DESD = 0.02085mg/cm<sup>2</sup> y  $\sigma = 0.8341\text{S/m}$ .

Después de la primera prueba.



Faldón 1, superior.



Faldón 1, inferior.



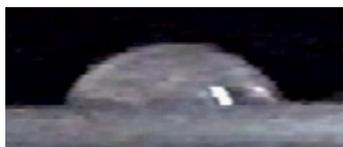
Faldón 2, superior.



Faldón 2, inferior.



Faldón 3, superior.



Faldón 3, inferior.



Faldón 4, superior.



Faldón 4, inferior.

Después de la segunda prueba.



Faldón 1, superior.



Faldón 1, inferior.



Faldón 2, superior.



Faldón 2, inferior.



Faldón 3, superior.



Faldón 3, inferior.



Faldón 4, superior.



Faldón 4, inferior.

**Figura 3. 13.** Imágenes de las gotas de agua sobre la superficie de un aislador envejecido por 600h., registradas después de la primera y segunda prueba respectivamente; NaCl = 20g/l, DESD = 0.075mg/cm<sup>2</sup> y  $\sigma = 3\text{S/m}$ .

Después de la primera prueba.



Faldón 1, superior.



Faldón 1, inferior.



Faldón 2, superior.



Faldón 2, inferior.



Faldón 3, superior.



Faldón 3, inferior.



Faldón 4, superior.



Faldón 4, inferior.

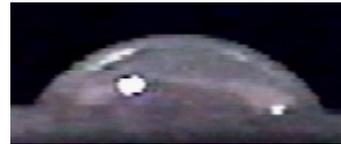
Después de la segunda prueba.



Faldón 1, superior.



Faldón 1, inferior.



Faldón 2, superior.



Faldón 2, inferior.



Faldón 3, superior.



Faldón 3, inferior.



Faldón 4, superior.



Faldón 4, inferior.

**Figura 3. 14.** Imágenes de las gotas de agua sobre la superficie de un aislador envejecido por 600h., registradas después de la primera y segunda prueba respectivamente; NaCl = 80g/l, DESD =  $0.25\text{mg/cm}^2$  y  $\sigma = 10\text{S/m}$ .

Después de la primera prueba.



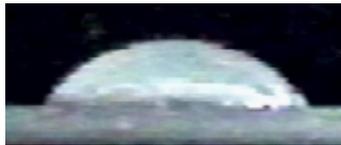
Faldón 1, superior.



Faldón 1, inferior.



Faldón 2, superior.



Faldón 2, inferior.



Faldón 3, superior.



Faldón 3, inferior.



Faldón 4, superior.



Faldón 4, inferior.

Después de la segunda prueba.



Faldón 1, superior.



Faldón 1, inferior.



Faldón 2, superior.



Faldón 2, inferior.



Faldón 3, superior.



Faldón 3, inferior.



Faldón 4, superior.



Faldón 4, inferior.

**Figura 3. 15.** Imágenes de las gotas de agua sobre la superficie de un aislador envejecido por 600h., registradas después de la primera y segunda prueba respectivamente; NaCl = 160g/l, DESD = 0.425mg/cm<sup>2</sup> y  $\sigma = 17\text{S/m}$ .

Finalmente en la tabla 3.5 se muestran las mediciones del ángulo de contacto ( $\theta$ ) que se obtuvieron de los aisladores envejecidos por 1320 h., para cada nivel de la DESD empleado en las pruebas de contaminación artificial.

**Tabla 3. 5.** Datos de todas las mediciones del ángulo de contacto ( $\theta$ ) que se obtuvieron a **aisladores envejecidos por 1320 h.**, antes del inicio de las pruebas, y después de ser sometidos a la primera y segunda prueba en la cámara de niebla limpia.

Número de Faldón	Datos de los aisladores antes del inicio de las pruebas ( $\theta$ ).	DESD = 0.02085 mg/cm <sup>2</sup>		DESD = 0.075 mg/cm <sup>2</sup>		DESD = 0.25 mg/cm <sup>2</sup>		DESD = 0.425 mg/cm <sup>2</sup>	
		1a. Prueba ( $\theta$ )	2a. Prueba ( $\theta$ )	1a. Prueba ( $\theta$ )	2a. Prueba ( $\theta$ )	1a. Prueba ( $\theta$ )	2a. Prueba ( $\theta$ )	1a. Prueba ( $\theta$ )	2a. Prueba ( $\theta$ )
1 Sup.	44.7	46.8	46.2	40.9	46.7	48.3	42	55.5	44.9
2 Sup.	64.7	50.2	37.7	39.3	51.5	58	51.9	41.3	53
3 Sup.	56.1	55.35	50.7	66	51.8	45.5	52.7	58.2	42.5
4 Sup.	57.1	61.4	49.4	64	52.9	58.2	50.3	49.2	49.1
1 Inf.	61.9	52.6	50.4	47.4	53.9	60	42.1	52.2	47.2
2 Inf.	62.9	53.5	45.9	46.1	38.4	49.7	52.5	53.3	42.3
3 Inf.	56.9	60.7	56.6	54.5	52.2	40.3	44.9	61.2	43.6
4 Inf.	49.1	40.6	57.5	55.3	50.8	55.5	48.8	40.3	45
Promedios	56.675	52.6375	49.3	51.6875	49.775	51.925	48.15	51.4	45.95

1ª. Prueba = Mediciones que se tomaron justo después de que los aisladores eran sometidos a su primera prueba dentro de la cámara de niebla.

2ª. Prueba = Mediciones que se tomaron justo después de que los aisladores eran sometidos a su segunda prueba dentro de la cámara de niebla (192 hrs. después de haberse concluido la primera prueba).

Las imágenes de las gotas de todos los datos presentados en la tabla anterior se muestran en las siguientes figuras (3.16 – 3.19).

Después de la primera prueba.



Faldón 1, superior.



Faldón 1, inferior.



Faldón 2, superior.



Faldón 2, inferior.



Faldón 3, superior.



Faldón 3, inferior.



Faldón 4, superior.



Faldón 4, inferior.

Después de la segunda prueba.



Faldón 1, superior.



Faldón 1, inferior.



Faldón 2, superior.



Faldón 2, inferior.



Faldón 3, superior.



Faldón 3, inferior.



Faldón 4, superior.



Faldón 4, inferior.

**Figura 3. 16.** Imágenes de las gotas de agua sobre la superficie de un aislador envejecido por 1320h., registradas después de la primera y segunda prueba respectivamente; NaCl = 5g/l, DESD = 0.02085mg/cm<sup>2</sup> y  $\sigma = 0.8341\text{S/m}$ .

Después de la primera prueba.



Faldón 1, superior.



Faldón 1, inferior.



Faldón 2, superior.



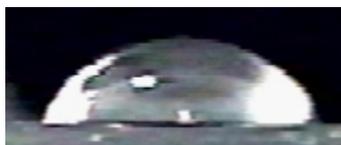
Faldón 2, inferior.



Faldón 3, superior.



Faldón 3, inferior.



Faldón 4, superior.



Faldón 4, inferior.

Después de la segunda prueba.



Faldón 1, superior.



Faldón 1, inferior.



Faldón 2, superior.



Faldón 2, inferior.



Faldón 3, superior.



Faldón 3, inferior.



Faldón 4, superior.



Faldón 4, inferior.

**Figura 3. 17.** Imágenes de las gotas de agua sobre la superficie de un aislador envejecido por 1320h., registradas después de la primera y segunda prueba respectivamente; NaCl = 20g/l, DESD = 0.075mg/cm<sup>2</sup> y  $\sigma = 3S/m$ .

Después de la primera prueba.



Faldón 1, superior.



Faldón 1, inferior.



Faldón 2, superior.



Faldón 2, inferior.



Faldón 3, superior.



Faldón 3, inferior.



Faldón 4, superior.



Faldón 4, inferior.

Después de la segunda prueba.



Faldón 1, superior.



Faldón 1, inferior.



Faldón 2, superior.



Faldón 2, inferior.



Faldón 3, superior.



Faldón 3, inferior.



Faldón 4, superior.



Faldón 4, inferior.

**Figura 3. 18.** Imágenes de las gotas de agua sobre la superficie de un aislador envejecido por 1320h., registradas después de la primera y segunda prueba respectivamente; NaCl = 80g/l, DESD = 0.25mg/cm<sup>2</sup> y  $\sigma = 10S/m$ .

Después de la primera prueba.



Faldón 1, superior.



Faldón 1, inferior.



Faldón 2, superior.



Faldón 2, inferior.



Faldón 3, superior.



Faldón 3, inferior.



Faldón 4, superior.



Faldón 4, inferior.

Después de la segunda prueba.



Faldón 1, superior.



Faldón 1, inferior.



Faldón 2, superior.



Faldón 2, inferior.



Faldón 3, superior.



Faldón 3, inferior.



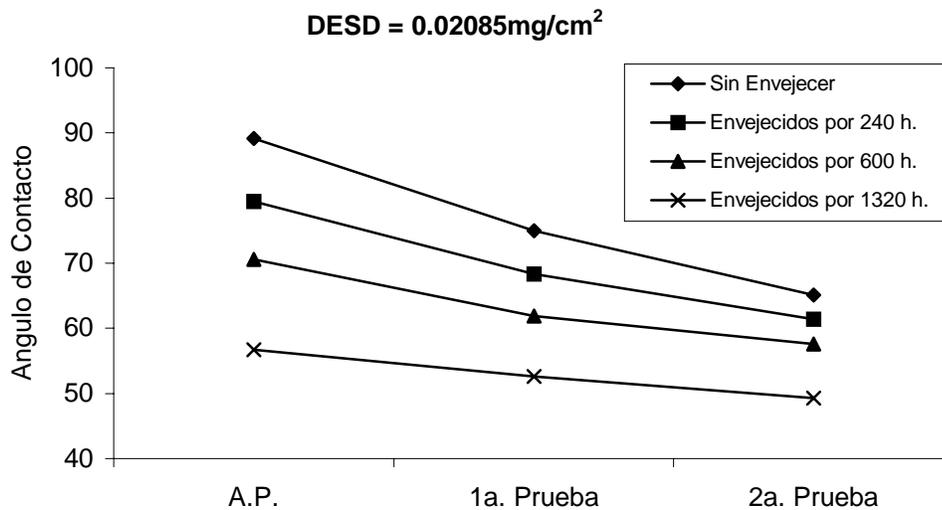
Faldón 4, superior.



Faldón 4, inferior.

**Figura 3. 19.** Imágenes de las gotas de agua sobre la superficie de un aislador envejecido por 1320h., registradas después de la primera y segunda prueba respectivamente; NaCl = 160g/l, DESD = 0.425mg/cm<sup>2</sup> y  $\sigma = 17S/m$ .

De las tablas anteriores, tomando los promedios del ángulo de contacto de todos los faldones para cada periodo de envejecimiento, y grificándolos contra los valores de referencia (tabla 3.1) y los datos de la 1ª y 2ª prueba; pero seleccionando los valores para un mismo nivel de la DESD (ver figura 3.20 a 3.23), podremos apreciar que hay una fuerte disminución en la hidrofobicidad superficial en comparación con los ángulos que se tienen de referencia (ver figura 3.1), los cuales se registraron antes del inicio de las pruebas.



A. P. = Mediciones que se tomaron antes del inicio de las pruebas.

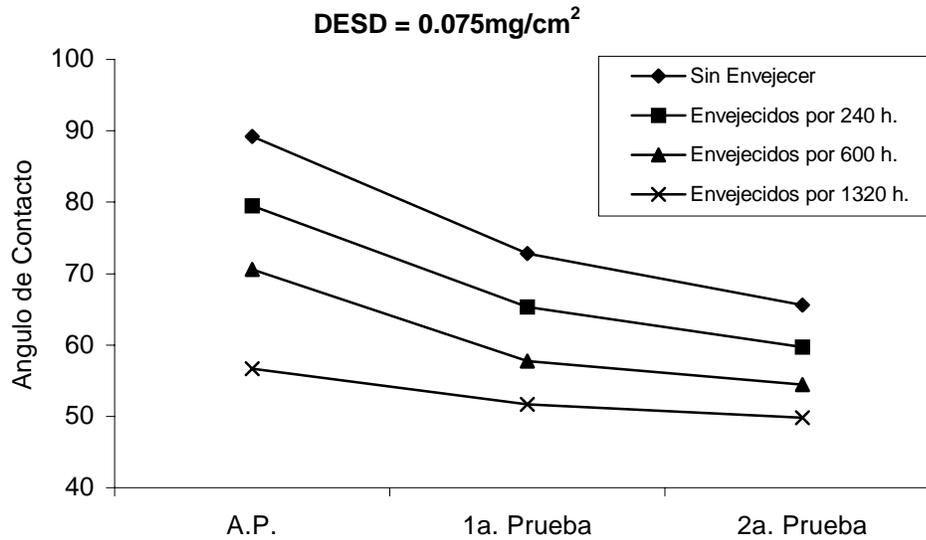
1ª. Prueba = Mediciones que se tomaron justo después de que los aisladores eran sometidos a su primera prueba dentro de la cámara de niebla.

2ª. Prueba = Mediciones que se tomaron justo después de que los aisladores eran sometidos a su segunda prueba dentro de la cámara de niebla.

**Figura 3. 20.** Promedios de las mediciones del ángulo de contacto en los faldones del aislador; con una **DESD = 0.02085 mg/cm<sup>2</sup>** y  $\sigma = 0.8341$  S/m.

Como puede apreciarse para los aisladores nuevos, el ángulo de contacto disminuyó en un 16% y 27 % después de ser sometidos a la primera y segunda prueba respectivamente; esto en comparación con el valor de referencia que se obtuvo antes del inicio de las pruebas. Mientras que para los aisladores envejecidos por 240 h., la disminución fue del 14% y 22.8% con respecto a su valor de referencia.

Para los aisladores que se envejecieron por 600 h., la disminución después de su primera y segunda prueba fueron del 12.3% y 18.4%. Finalmente para los que se envejecieron por 1320 h., su disminución fue del 7.2% y 13.1%.



A. P. = Mediciones que se tomaron antes del inicio de las pruebas.

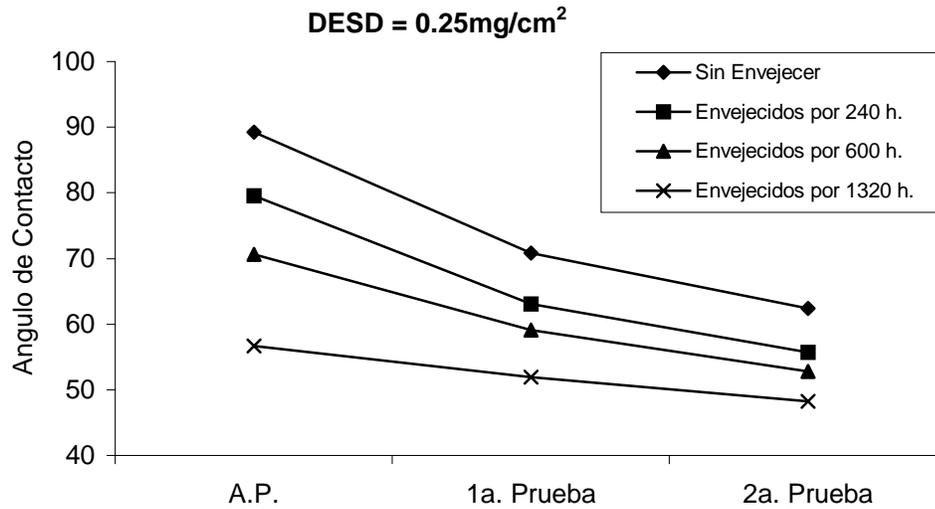
1ª. Prueba = Mediciones que se tomaron justo después de que los aisladores eran sometidos a su primera prueba dentro de la cámara de niebla.

2ª. Prueba = Mediciones que se tomaron justo después de que los aisladores eran sometidos a su segunda prueba dentro de la cámara de niebla.

**Figura 3. 21.** Promedios de las mediciones del ángulo de contacto en los faldones del aislador; con una **DESD = 0.075 mg/cm<sup>2</sup>** y  $\sigma = 3.0$  S/m.

De la misma manera para una  $DESD = 0.075 \text{ mg/cm}^2$ , los aisladores nuevos tuvieron una disminución del 18.4% y 26.5%, después de su primera y segunda prueba respectivamente. Para los aisladores envejecidos por 240 h., su ángulo de contacto disminuyó en un 17.9% y 25% en comparación con su valor de referencia.

Para los que se envejecieron por 600 h., su disminución después de su primera y segunda prueba fue del 18.3% y 23% respectivamente. Mientras que para los aisladores envejecidos por 1320 h., su ángulo de contacto solamente disminuyó en un 8.8% y 12.2% con respecto a su valor de referencia.



A. P. = Mediciones que se tomaron antes del inicio de las pruebas.

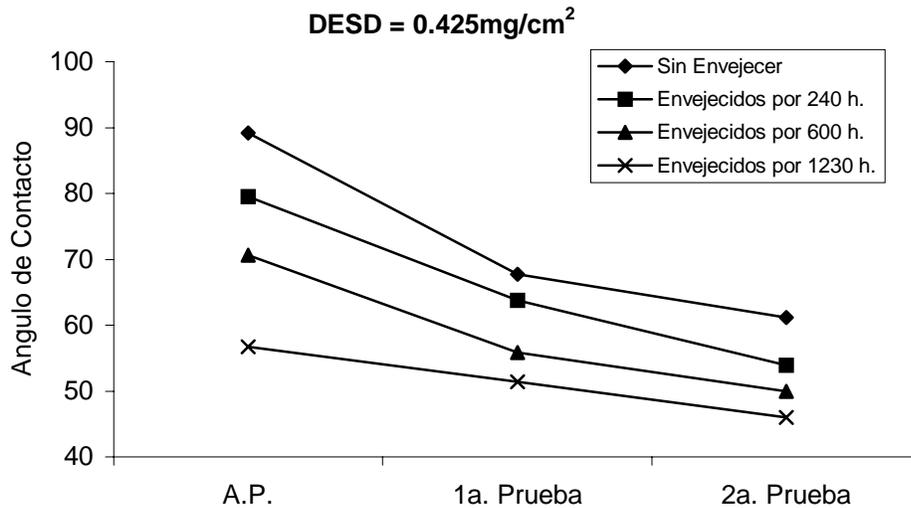
1ª. Prueba = Mediciones que se tomaron justo después de que los aisladores eran sometidos a su primera prueba dentro de la cámara de niebla.

2ª. Prueba = Mediciones que se tomaron justo después de que los aisladores eran sometidos a su segunda prueba dentro de la cámara de niebla.

**Figura 3. 22.** Promedios de las mediciones del ángulo de contacto en los faldones del aislador; con una **DESD = 0.25 mg/cm<sup>2</sup>** y  $\sigma = 10.0$  S/m.

De la figura 3.22, para una  $DESD = 0.25 \text{ mg/cm}^2$ , la disminución en el ángulo de contacto para los aisladores nuevos fue del 20.6% y 30% con respecto a su valor de referencia, después de la primera y segunda prueba respectivamente. Estos porcentajes fueron los mismos para los aisladores envejecidos por 240 h.

Para los que se envejecieron por 600 h., la disminución de  $\theta$  fue del 16.4% y 25.2% con respecto a su valor de referencia. Finalmente para los aisladores envejecidos por 1320 h., la disminución en la hidrofobicidad superficial después de la primera y segunda prueba fue del 8.5% y 15%.



A. P. = Mediciones que se tomaron antes del inicio de las pruebas.

1ª. Prueba = Mediciones que se tomaron justo después de que los aisladores eran sometidos a su primera prueba dentro de la cámara de niebla.

2ª. Prueba = Mediciones que se tomaron justo después de que los aisladores eran sometidos a su segunda prueba dentro de la cámara de niebla.

**Figura 3. 23.** Promedios de las mediciones del ángulo de contacto en los faldones del aislador; con una **DESD = 0.425 mg/cm<sup>2</sup>** y  $\sigma = 17.0$  S/m.

Finalmente para una  $DESD = 0.425 \text{ mg/cm}^2$  (figura 3.23), la disminución en  $\theta$  para los aisladores nuevos después de la primera y segunda prueba fue del 24% y 31.4% respectivamente. En los aisladores envejecidos por 240 h., disminuyó en un 19.7% y 32.2%. Para los envejecidos por 600 h., la disminución en el ángulo de contacto fue del 20.1% y 29.2% sobre la base del valor de referencia. Y por último para los aisladores envejecidos por 1320 h., el ángulo disminuyó solamente un 9.3% y 18.9% con base al ángulo de referencia.

Como puede apreciarse en las gráficas anteriores (ver figuras 3.20 a 3.23), el comportamiento de la hidrofobicidad superficial es a la baja para todo los niveles de la DESD. En especial se puede apreciar que los aisladores nuevos son los que sufren mayor degradación en su superficie, seguidos por los aisladores envejecidos por 240 y 600 h.

Esto puede atribuirse a que además de sufrir una fuerte erosión en la superficie debido a la acción de los agentes ácidos de la lluvia ácida artificial, se suma la degradación que sufren a causa de las descargas que se presentan sobre la superficie del aislador cuando tenemos presencia de humedad, lo cual concuerda con otros resultados reportados por T. Tokoro , et al [38].

Contrariamente para los aisladores envejecidos por 1320 h., la disminución en el ángulo de contacto con respecto a los valores de referencia, no parece ser muy significativa. Incluso para una  $DESD = 0.425 \text{ mg/cm}^2$ , la cual representa una contaminación muy pesada [31]. Esto puede atribuirse al fuerte ataque sufrido por los agentes ácidos a consecuencia de haber estado los aisladores expuestos a un periodo mayor de envejecimiento, lo que pudo haber repercutido que estos ya no consiguieran sufrir más daño a causa de las descargas superficiales.

### **3. 3. Influencia de un ambiente ácido en la tensión de flameo**

Debido al envejecimiento que sufrieron los aisladores al ser expuestos a un ambiente ácido, lo cual se pudo apreciar en la fuerte disminución que tuvieron en su hidrofobicidad superficial; trajo como consecuencia que los niveles en la tensión de flameo se vieran afectados drásticamente. Por ejemplo para un aislador que estuvo expuesto a un envejecimiento por 1320 h., su nivel de tensión de flameo alcanzó una disminución aproximadamente del 61% para una  $DESD = 0.075 \text{ mg/cm}^2$ ; con respecto a la tensión a la cual flameo un aislador nuevo para el mismo valor de la DESD.

La figura 3.24 muestra la imagen de un flameo en uno de los aisladores durante el desarrollo de las pruebas.



**Figura 3. 24.** Flameo en uno de los aisladores durante el desarrollo de las pruebas.

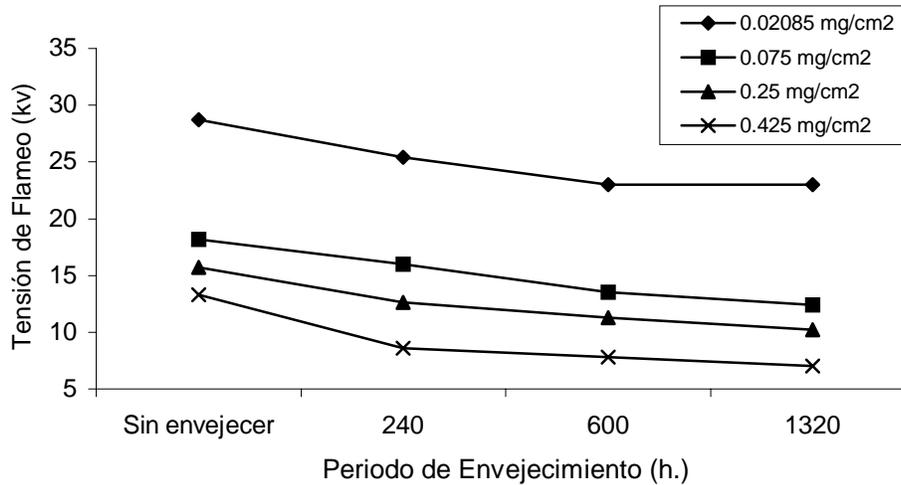
En la tabla 3.6 se muestran de una manera resumida todos los valores de la tensión de flameo para cada periodo de envejecimiento, así como también para las distintas mezclas contaminantes.

**Tabla 3. 6.** Valores de la tensión de flameo para cada periodo de envejecimiento y de acuerdo con los distintos niveles de la DESD empleados en el desarrollo de las pruebas.

Nivel de la DESD (mg/cm <sup>2</sup> )	Aisladores Nuevos "sin envejecer".(kV)		Envejecidos por 240h. (kV)		Envejecidos por 600h. (kV)		Envejecidos por 1320h. (kV)	
	1ª prueba	2ª prueba	1ª prueba	2ª prueba	1ª prueba	2ª prueba	1ª prueba	2ª prueba
0.02085	28.7	25.2	25.4	23	23	21.7	23	20.7
0.075	18.2	18	16	10.6	13.5	9.6	12.4	7
0.25	15.7	14.7	12.6	10	11.3	8.3	10.2	7.4
0.425	13.3	17	8.6	6.3	7.8	7	7	6.3

Graficando los datos de la tabla anterior, se podrá apreciar de una manera mucho más clara la disminución en la tensión de flameo conforme se incrementa el tiempo al que estuvieron expuestos los aisladores a la solución de lluvia ácida artificial.

La figura 3.25 muestra la gráfica de las tensiones a las cuales se presentó el flameo para los distintos periodos de envejecimiento. Estos valores corresponden a los datos obtenidos después de que los aisladores fueron sometidos a su primera prueba dentro de la cámara de niebla limpia.

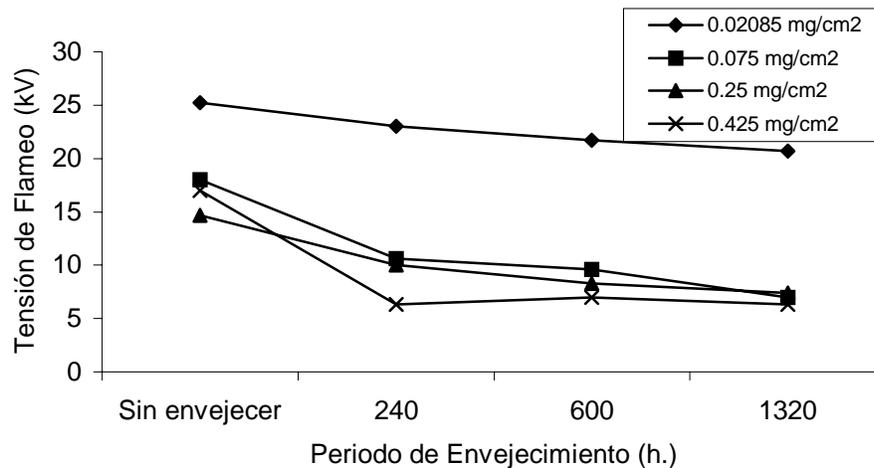


**Figura 3. 25.** Valores de la tensión de flameo obtenidos durante la primera prueba, para los distintos periodos de envejecimiento, y los diferentes niveles de la DESD.

Se aprecia una disminución en las tensiones de flameo para todos los niveles de la densidad equivalente de sal depositada (DESD). Para la DESD = 0.02085 mg/cm<sup>2</sup>, el aislador que se envejeció por 1320 h. tuvo un flameo de 23kV, esto es un 19.9% menos, con respecto a la tensión a la que flameó el aislador nuevo (28.7kV). Para la DESD = 0.075 mg/cm<sup>2</sup>, el nivel de la tensión de flameo cayó en un 31.8% para el aislador envejecido por 1320 h., con respecto a la tensión de flameo = 18.2kV del aislador nuevo. Con la DESD = 0.25 mg/cm<sup>2</sup>, la tensión bajó 35% para el aislador envejecido por 1320 h., con respecto a la tensión de flameo del aislador nuevo, probado con este mismo nivel de la DESD. Finalmente para la DESD = 0.425 mg/cm<sup>2</sup>, el aislador que se envejeció por 1320 h. tuvo una tensión 47.4% menor, en comparación con los 13.3kV del aislador nuevo.

También puede observarse que conforme se incrementa el nivel de contaminación en la mezcla contaminante, la tensión de flameo declinó más para aquellos aisladores que se sometieron a un periodo de envejecimiento de 1320 h.

A continuación en la figura 3.26, se muestran las tensiones de flameo que se obtuvieron en la segunda prueba para todos los aisladores; como ya se mencionó anteriormente, esta prueba se realizó entre 168 y 312 h. después de haberse realizado la primera evaluación.



**Figura 3. 26.** Valores de la tensión de flameo obtenidos durante la segunda prueba, para los distintos periodos de envejecimiento, y los diferentes niveles de la DESD.

Para esta segunda prueba las tensiones de flameo fueron inferiores para todos los casos con respecto a las tensiones registradas en la primera evaluación; con excepción del aislador nuevo para una DESD = 0.425 mg/cm<sup>2</sup>, el cual tuvo una tensión de flameo de 17kV para esta prueba, mientras que el mismo aislador en su primera prueba tuvo una tensión de flameo igual a 13.3kV.

Esto concuerda con lo reportado por Fernando, et al [39], donde manifiestan que la combinación de alta humedad con una elevada conductividad generada por una contaminación muy pesada, provocan que la tensión de flameo tienda a ser irregular.

De la figura 3.26, para el aislador envejecido por 1320h. hubo una disminución del 17.9%, con respecto a la tensión de flameo del aislador nuevo la cual fue de 25.2kV; esto para una contaminación muy ligera ( $DESD = 0.02085 \text{ mg/cm}^2$ ). Para la  $DESD = 0.075 \text{ mg/cm}^2$ , el nivel de la tensión de flameo cayó en un 61.1% para el aislador envejecido por 1320h., en cuanto a la tensión de flameo de 18kV del aislador nuevo. Mientras que para la  $DESD = 0.25 \text{ mg/cm}^2$ , la tensión decayó 49.7% para el aislador envejecido por 1320h., con respecto a la tensión de flameo del aislador nuevo. Finalmente para una contaminación muy pesada ( $DESD = 0.425 \text{ mg/cm}^2$ ), el aislador que se envejeció por 1320h tuvo una tensión 62.9% menor, en proporción con los 17kV del aislador nuevo.

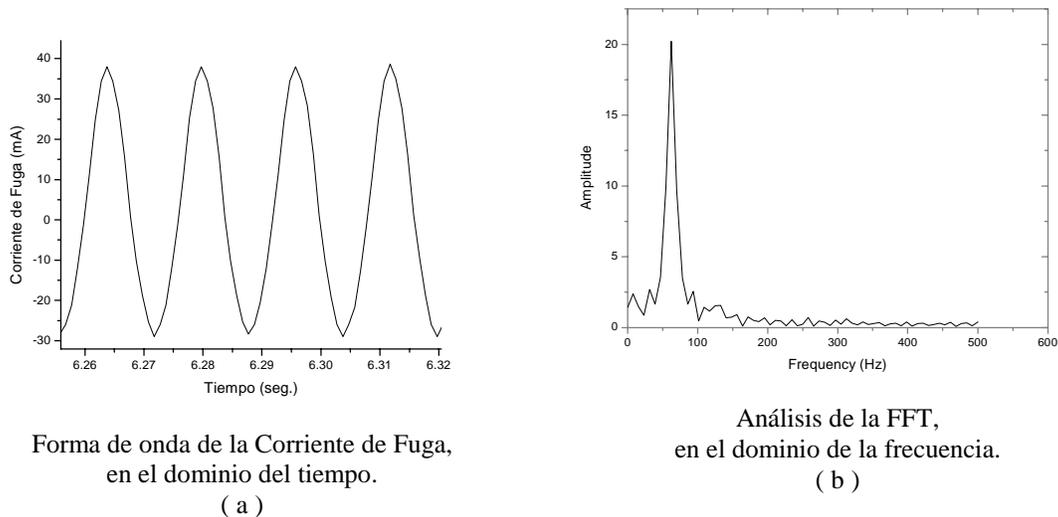
La reducción en los porcentajes en la tensión de flameo para la segunda prueba fueron mayores, comparados con los de la primera evaluación. Esto refuerza lo que se mencionó anteriormente, que como consecuencia de las descargas a las cuales estuvieron sometidos los aisladores durante el desarrollo de las pruebas experimentales, éstos no recuperaron sus propiedades hidrofóbicas después de efectuárseles la primera prueba, a pesar que se dejaron descansar por un periodo comprendido entre 168 y 312 horas. Lo cual indica que efectivamente los aisladores sufrieron un fuerte envejecimiento en su superficie, tal y como lo reflejaron las mediciones del ángulo de contacto.

### 3. 4. Análisis de la corriente de fuga

Se observaron distintos comportamientos en la corriente de fuga durante el desarrollo de las pruebas, como puede apreciarse en las siguientes figuras.

En la figura 3.27, se puede percibir que la forma de onda de la corriente de fuga antes de que aparezcan las primeras descargas, tiene un comportamiento lineal, senosoidal y resistivo; por lo que su análisis en el dominio de la frecuencia muestra solamente la componente fundamental. Este comportamiento resistivo ocurre sobre superficies hidrofílicas, mientras que para superficies hidrofóbicas la conducta de la forma de onda de la corriente de fuga es lineal, senosoidal, pero capacitiva [40].

**Antes de las descargas.**

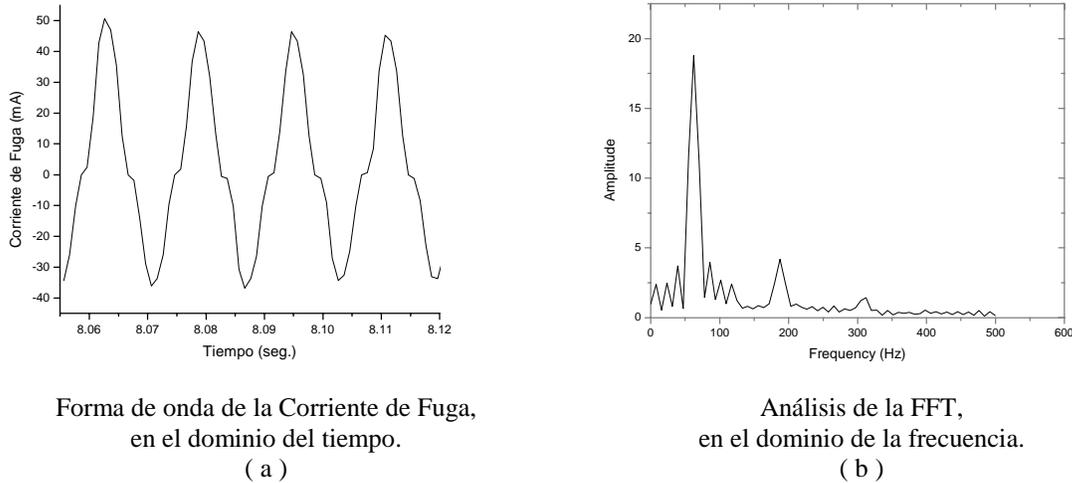


**Figura 3. 27.** Forma de onda de la corriente de fuga y su análisis de la transformada rápida de Fourier (FFT), antes de que ocurran las primeras descargas.

En la siguiente figura se muestra la forma que toma la onda de la corriente cuando se tiene presencia de descargas o arcos en bandas secas. Se puede apreciar

que pasa de una forma senoidal a tener un comportamiento no lineal, lo que ocasiona que aparezca el tercer y quinto armónico, figura 3.28 (a) y (b).

**Durante el arqueo en bandas secas.**

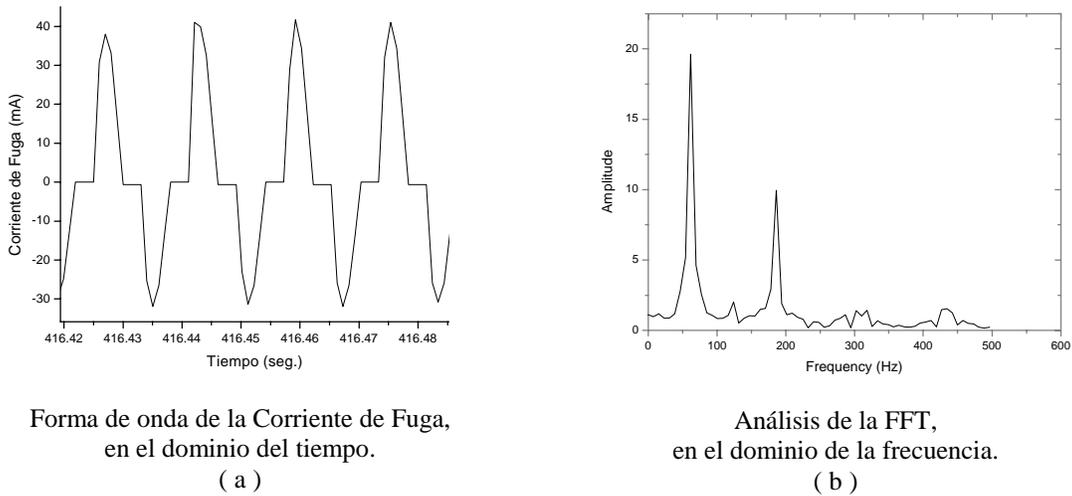


**Figura 3. 28.** Forma de onda de la corriente de fuga y su análisis de la transformada rápida de Fourier (FFT), durante el arqueo en bandas secas.

Finalmente en la figura 3.29 se muestra la forma de onda que adquiere la corriente de fuga justo antes de que ocurra el flameo. Se observa que la onda se deforma todavía aun más, lo que ocasiona que el tercer armónico incremente su amplitud. Hay que señalar que este comportamiento lo mantiene hasta instantes antes de que el aislador llegue al flameo.

El comportamiento no lineal como el que se muestra en las figuras 3.28 y 3.29, ocurre cuando hay actividad de descargas visibles sobre la superficie del aislador, por lo tanto tal deformación en la forma de onda de la corriente de fuga puede atribuirse a la presencia de arqueo en bandas secas sobre la superficie del aislador.

**Instantes antes del flameo.**

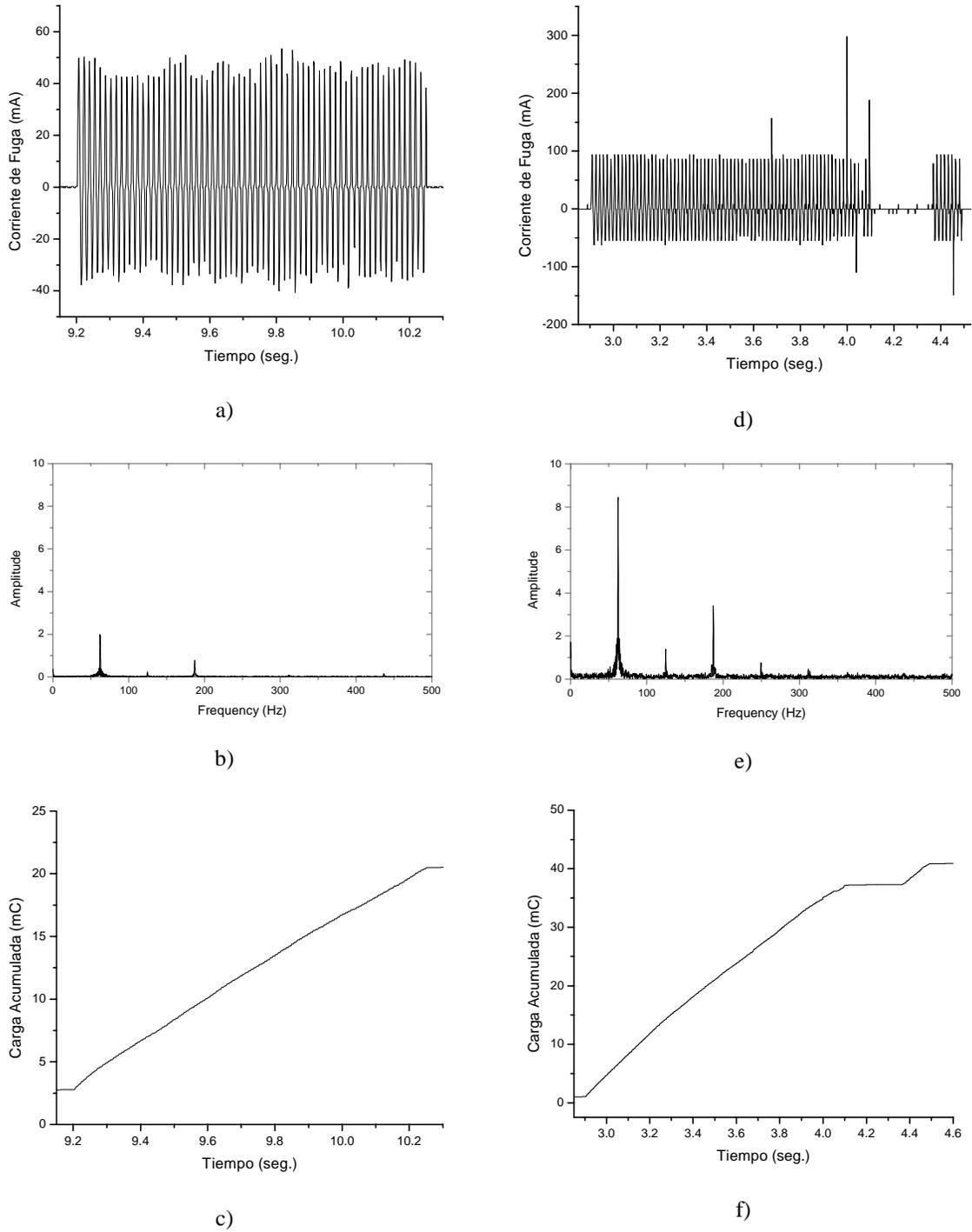


**Figura 3. 29.** Forma de onda de la corriente de fuga y su análisis de la transformada rápida de Fourier (FFT), durante el flameo.

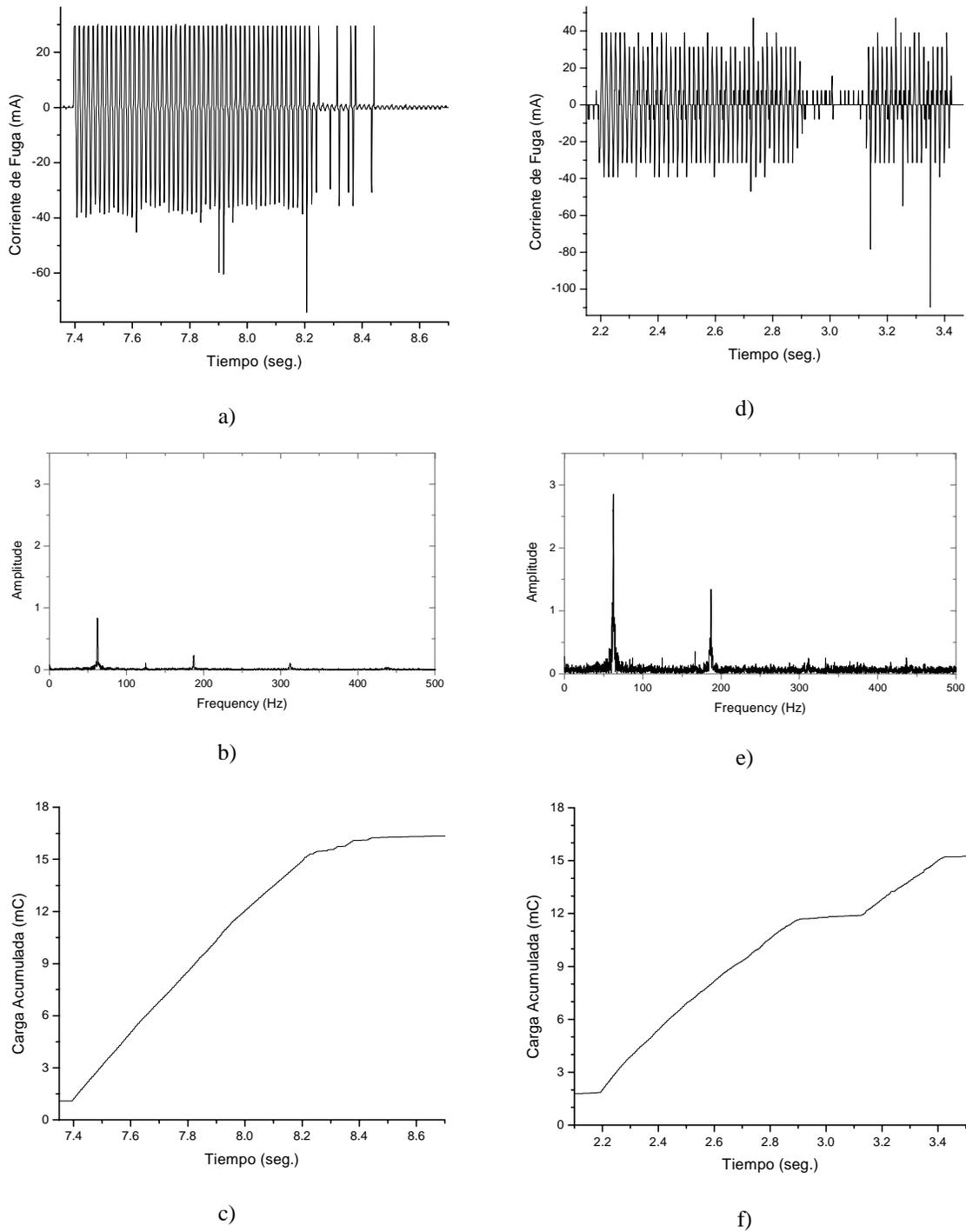
**5.4.1. Análisis de las graficas de corriente de fuga registradas instantes antes de que ocurra el flameo**

Para este análisis solamente se consideraron las gráficas correspondientes a las corrientes que se registraron instantes antes de que ocurra el flameo. Se determinó el componente armónico de cada señal registrada para todas las mezclas contaminantes, asimismo para todos los periodos de envejecimiento. Igualmente se graficó la carga acumulada para todas las corrientes, y se determinaron las pendientes, con el fin de observar con que velocidad se incrementaba ésta carga, expresada en mC/seg.

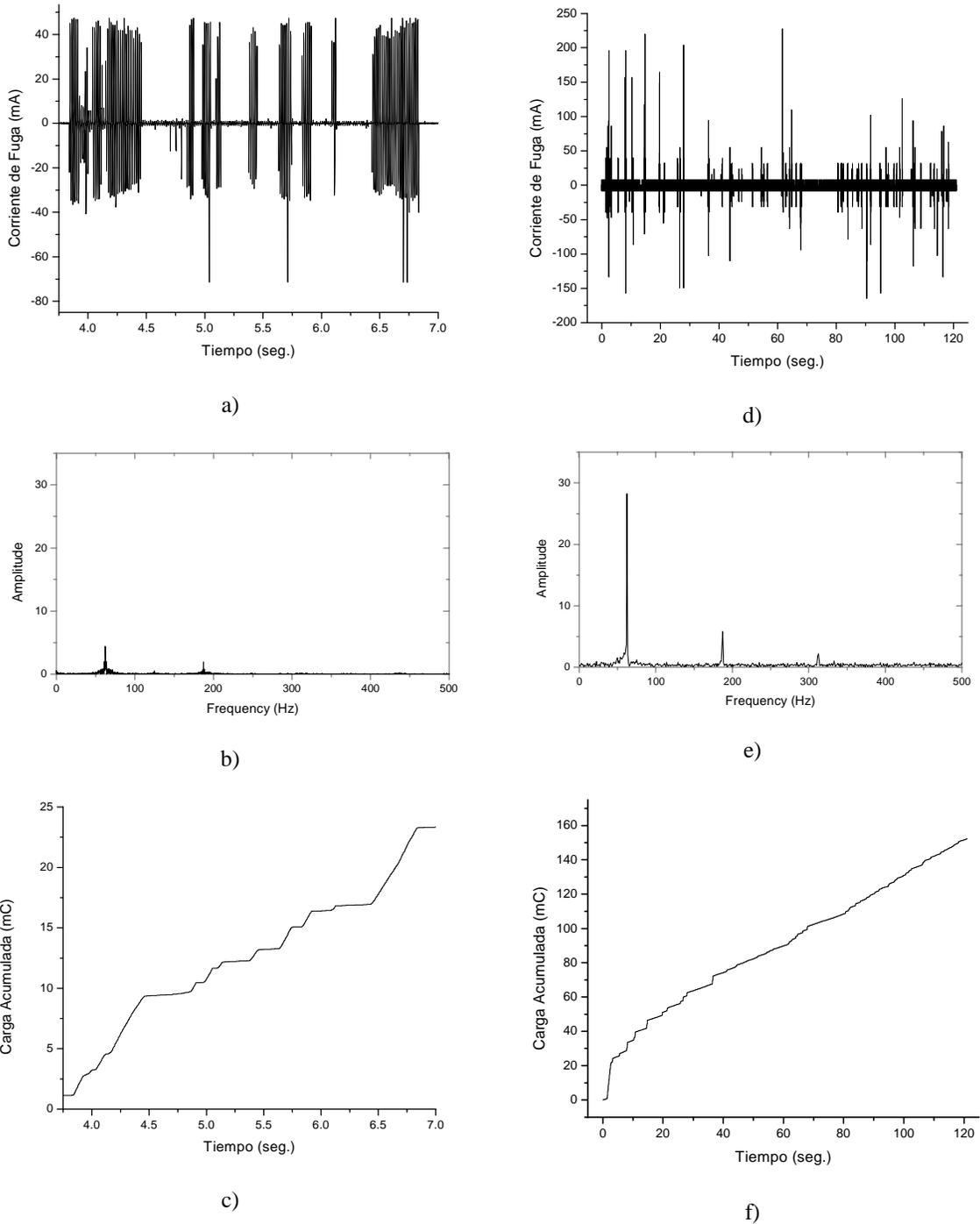
A continuación se muestran las gráficas que se obtuvieron para los aisladores nuevos, con los distintos niveles de contaminación, tanto para la primera y segunda prueba respectivamente.



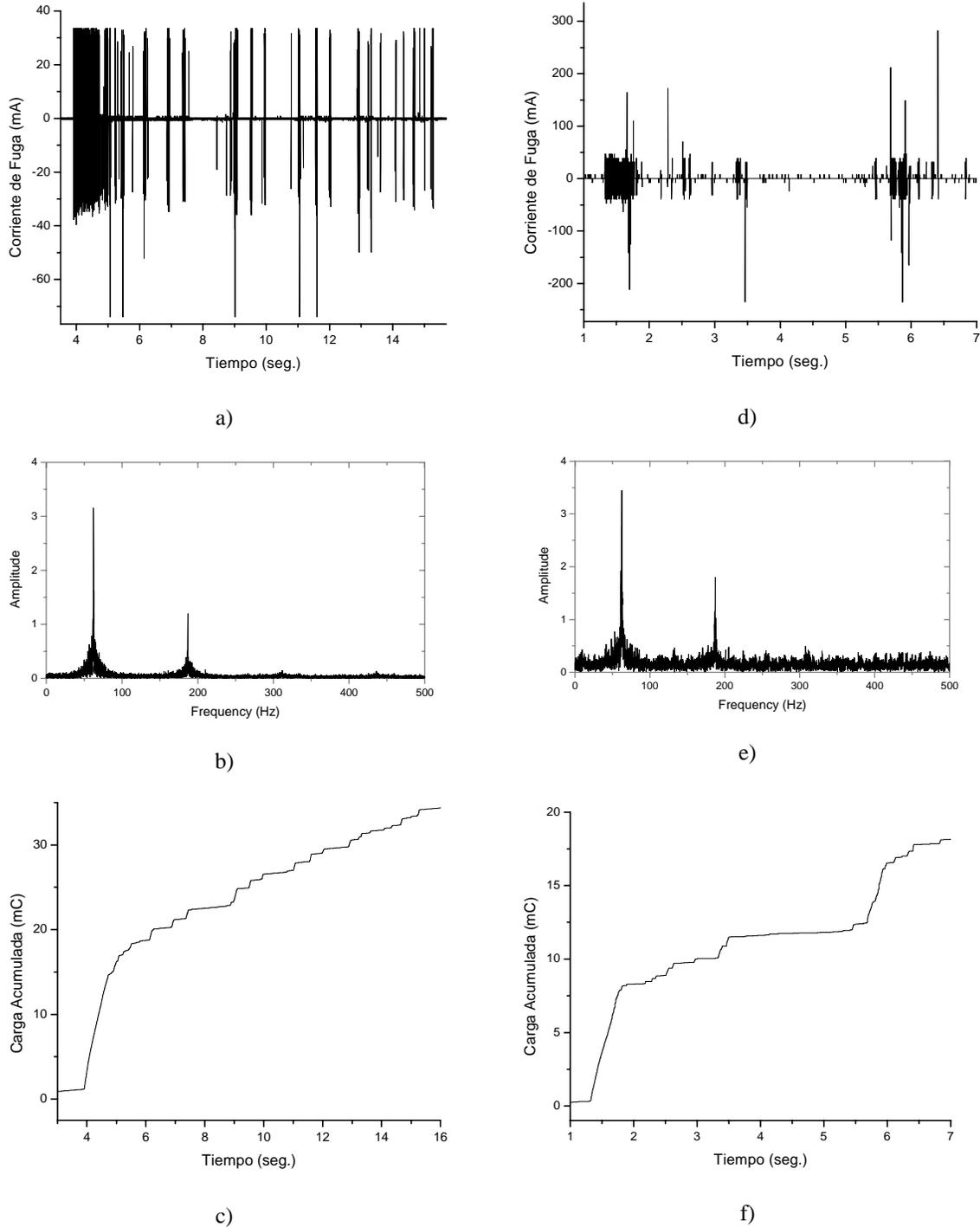
**Figura 3. 30.** Nivel de contaminación muy ligera ( $DESD = 0.02085 \text{ mg/cm}^2$ ). Tensión de flameo en la 1ª prueba = 28.7 kV, a) corriente de fuga; b) en el dominio de la frecuencia; c) carga acumulada. Tensión de flameo en la 2ª prueba = 25.2 kV, d) corriente de fuga, e) en el dominio de la frecuencia; f) carga acumulada.



**Figura 3. 31.** Nivel de contaminación ligera ( $DES D = 0.075 \text{ mg/cm}^2$ ). Tensión de flameo en la 1ª prueba = 18.2 kV, a) corriente de fuga; b) en el dominio de la frecuencia; c) carga acumulada. Tensión de flameo en la 2ª prueba = 18 kV, d) corriente de fuga, e) en el dominio de la frecuencia; f) carga acumulada.



**Figura 3. 32.** Nivel de contaminación pesada (DESD = 0.25 mg/cm<sup>2</sup>). Tensión de flameo en la 1ª prueba = 15.7 kV, a) corriente de fuga; b) en el dominio de la frecuencia; c) carga acumulada. Tensión de flameo en la 2ª prueba = 14.7 kV, d) corriente de fuga, e) en el dominio de la frecuencia; f) carga acumulada.

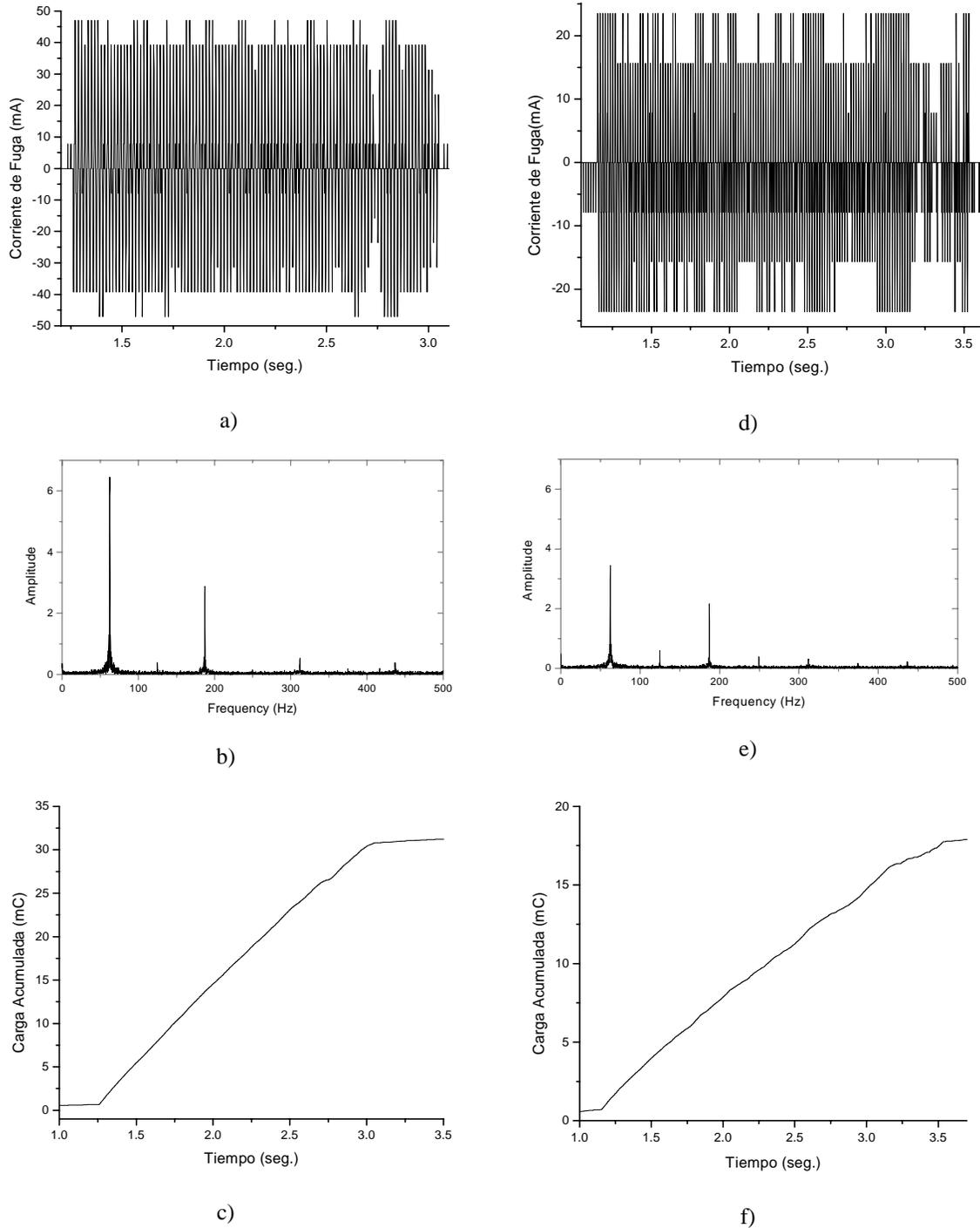


**Figura 3.33.** Nivel de contaminación muy pesada ( $DESD = 0.425 \text{ mg/cm}^2$ ). Tensión de flameo en la 1ª prueba = 13.3 kV, a) corriente de fuga; b) en el dominio de la frecuencia; c) carga acumulada. Tensión de flameo en la 2ª prueba = 17 kV, d) corriente de fuga, e) en el dominio de la frecuencia; f) carga acumulada.

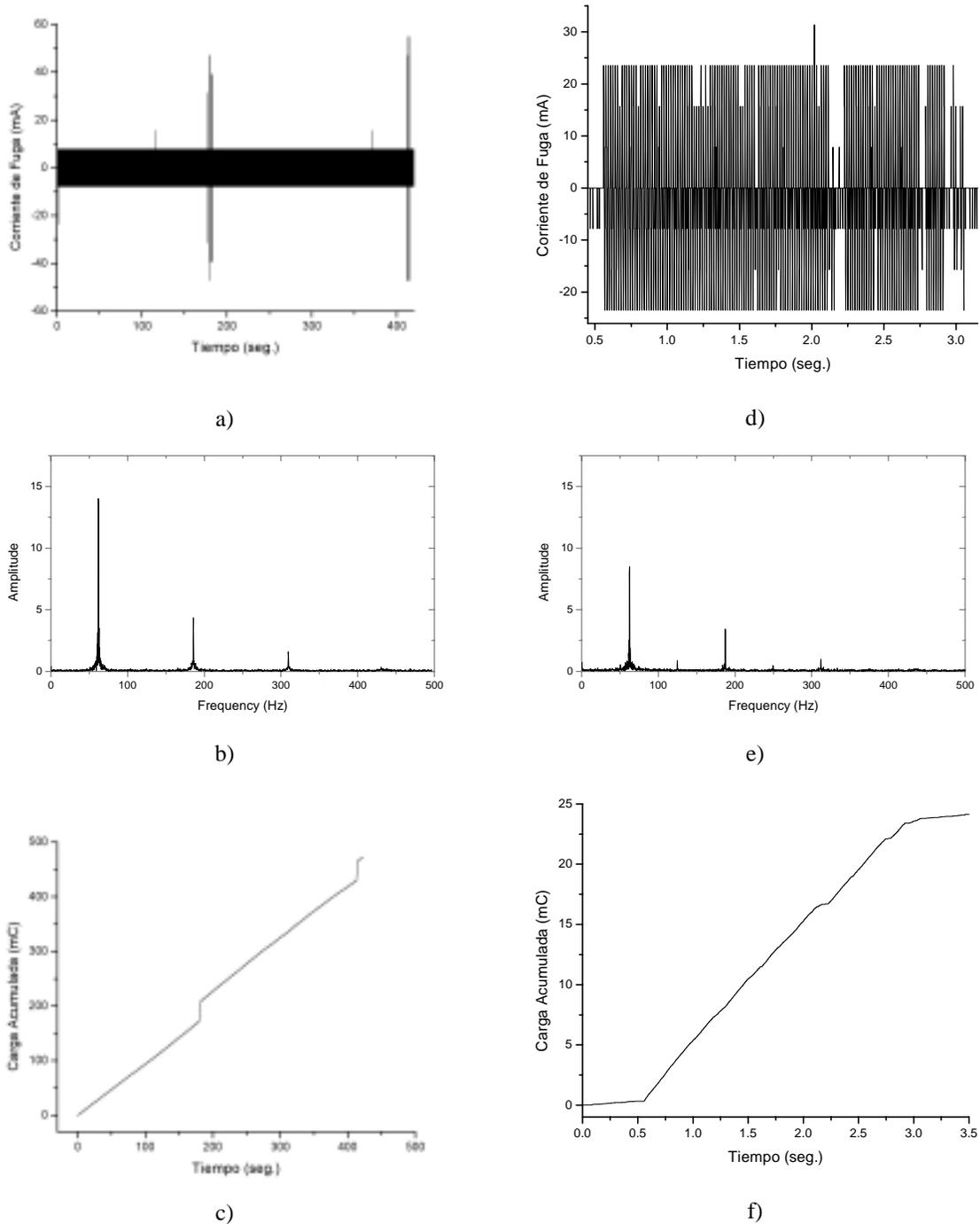
En la figura 3.30, se muestran las corrientes de fuga que se obtuvieron para una contaminación muy ligera; ésta tuvo un rango entre de 40-50mA para la primera prueba; mientras que para la segunda prueba, la corriente de fuga fue mayor, aproximándose a los 100mA, presentándose un pico de corriente que alcanzó los 300mA. La velocidad con la que creció la carga acumulada, representada por la pendiente, fue de 16.5mC/seg. para la primera evaluación, entre tanto para la segunda prueba fue mucho mayor, del orden de 29mC/seg. Para la contaminación ligera, la corriente prácticamente tuvo los mismos valores para ambas pruebas, la cual estuvo entre los 30 y 40mA, figuras 3.31 a) y d) respectivamente; pero presentándose picos de 70 y 110mA en la corriente correspondiente a la segunda prueba; las velocidades de crecimiento de la carga fueron de 17.2 y 12.2mC/seg. respectivamente.

Para la mezcla contaminante número tres (contaminación pesada), la corriente estuvo entre los 40mA con picos que llegaron a los 70mA, para la primera prueba, y con un crecimiento en la carga de 16.2mC/seg. Para la segunda prueba el rango de la corriente estuvo entre los 40 y 50mA, pero presentándose varios picos de corriente que oscilaron entre los 75 y 225mA, y con una carga que tuvo una pendiente de 15.8mC/seg. (figura 3.32). Finalmente en la figura 3.33 a), nuevamente la corriente estuvo entre los 30 y 40mA, con picos que alcanzaron los 70mA, la carga fue de 13.4mC/seg.; en tanto que para la segunda evaluación, figura 3.33 d), la corriente estuvo entre los 50mA con picos que oscilaron entre los 100 y 275mA, y donde la carga tuvo una velocidad de 14.6mC/seg.

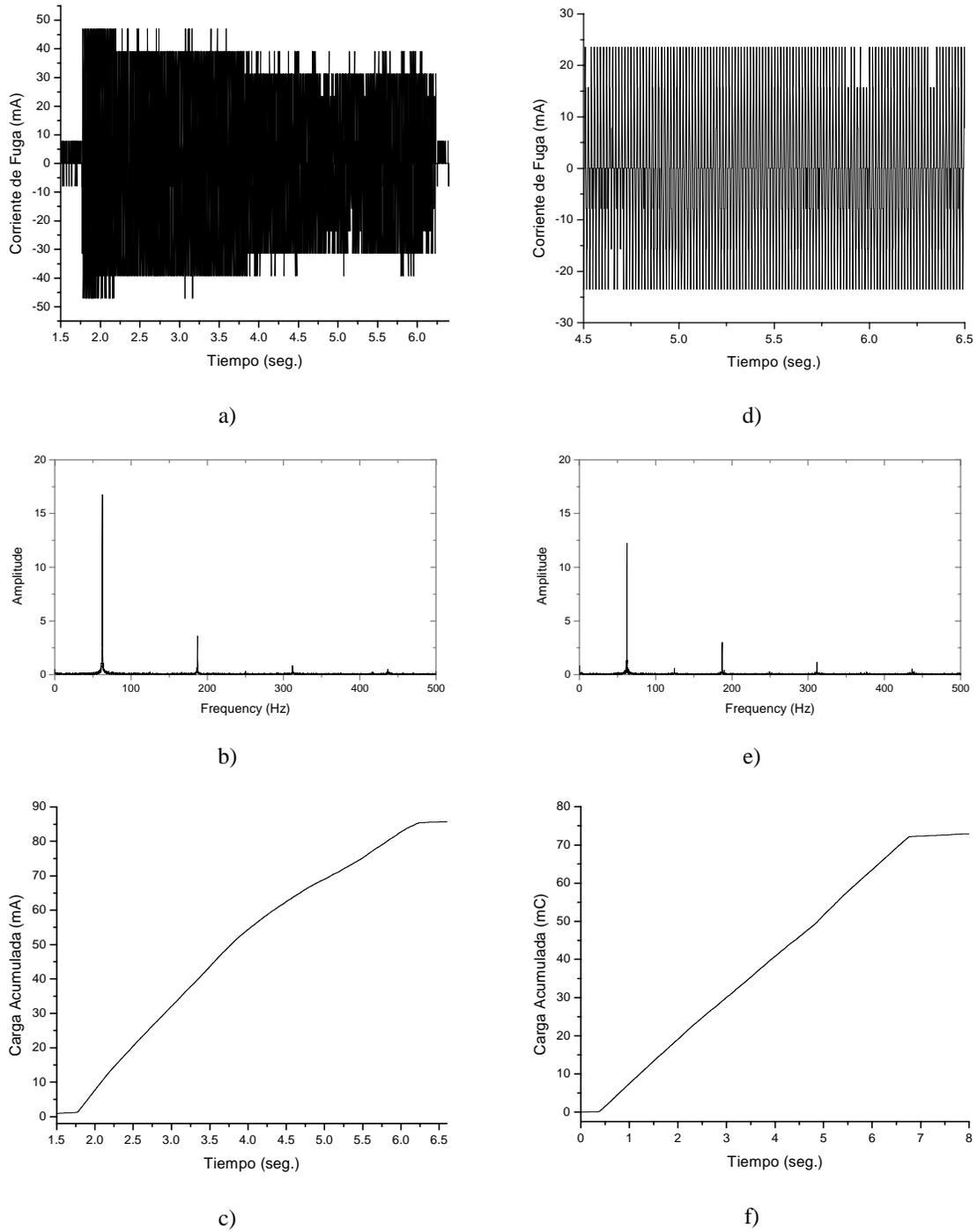
A continuación se muestran las gráficas de las corrientes de fuga y carga acumulada, correspondientes a los aisladores que se envejecieron por 240h.



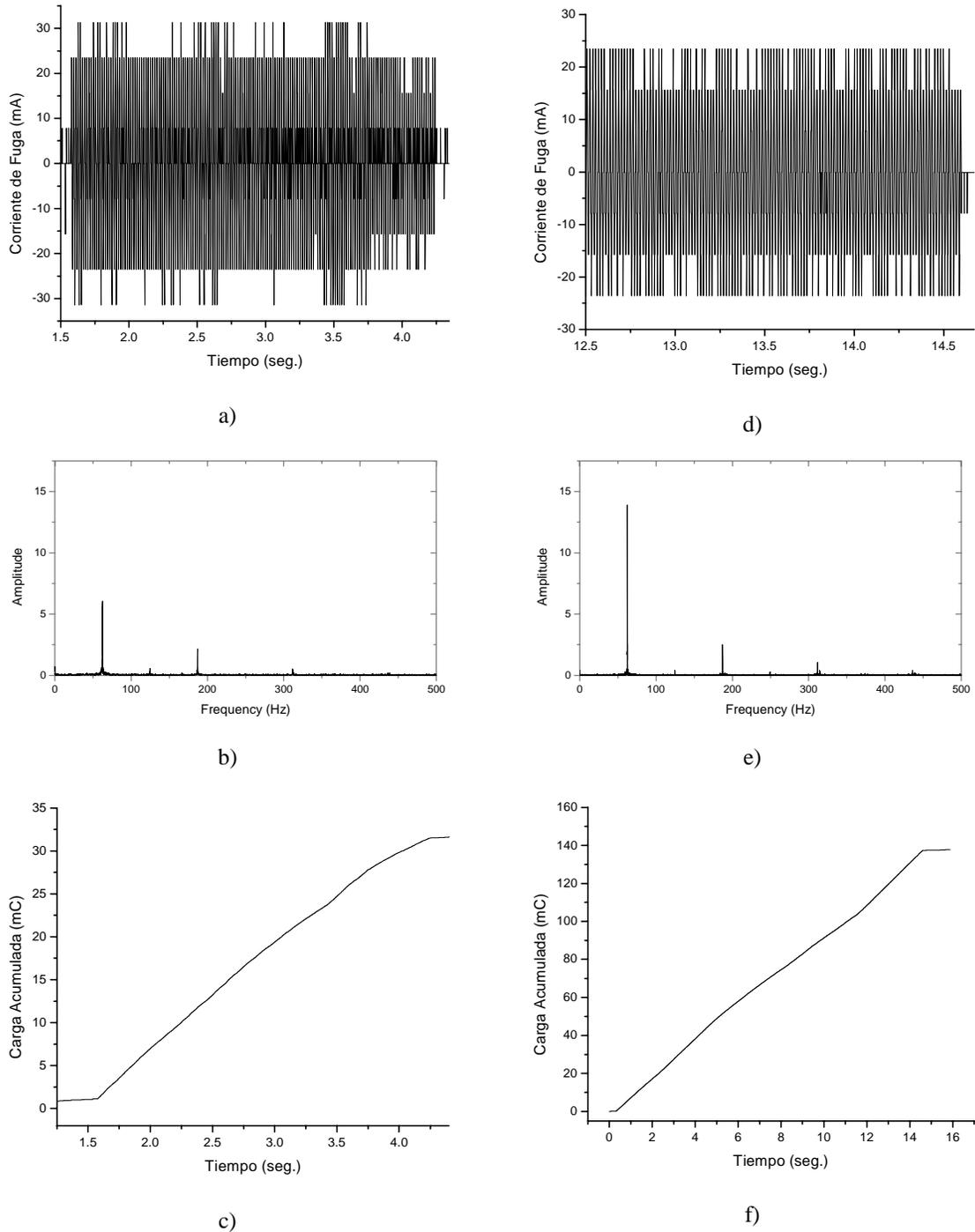
**Figura 3. 34.** Nivel de contaminación muy ligera (DESD = 0.02085 mg/cm<sup>2</sup>). Tensión de flameo en la 1<sup>a</sup> prueba = 25.4 kV, a)corriente de fuga; b)en el dominio de la frecuencia; c)carga acumulada. Tensión de flameo en la 2<sup>a</sup> prueba = 23 kV, d)corriente de fuga, e)en el dominio de la frecuencia; f)carga acumulada.



**Figura 3. 35.** Nivel de contaminación ligera ( $DESD = 0.075 \text{ mg/cm}^2$ ). Tensión de flameo en la 1ª prueba = 16 kV, a)corriente de fuga; b)en el dominio de la frecuencia; c)carga acumulada. Tensión de flameo en la 2ª prueba = 10.6 kV, d)corriente de fuga, e)en el dominio de la frecuencia; f)carga acumulada.



**Figura 3. 36.** Nivel de contaminación pesada (DESD = 0.25 mg/cm<sup>2</sup>). Tensión de flameo en la 1ª prueba = 12.6 kV, a) corriente de fuga; b) en el dominio de la frecuencia; c) carga acumulada. Tensión de flameo en la 2ª prueba = 10 kV, d) corriente de fuga, e) en el dominio de la frecuencia; f) carga acumulada.

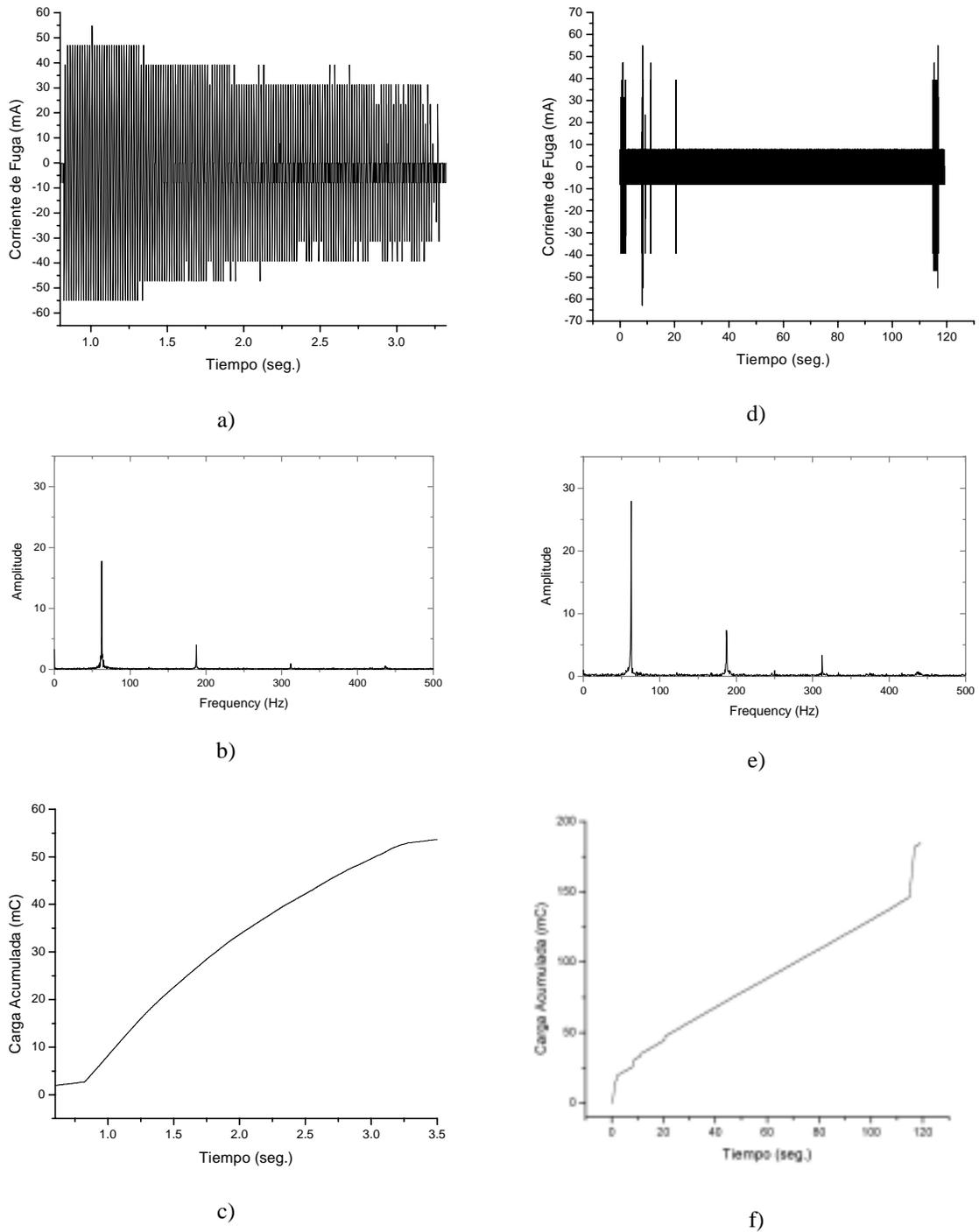


**Figura 3. 37.** Nivel de contaminación muy pesada (DESD = 0.425 mg/cm<sup>2</sup>). Tensión de flameo en la 1<sup>a</sup> prueba = 8.6 kV, a) corriente de fuga; b) en el dominio de la frecuencia; c) carga acumulada. Tensión de flameo en la 2<sup>a</sup> prueba = 6.3 kV, d) corriente de fuga, e) en el dominio de la frecuencia; f) carga acumulada.

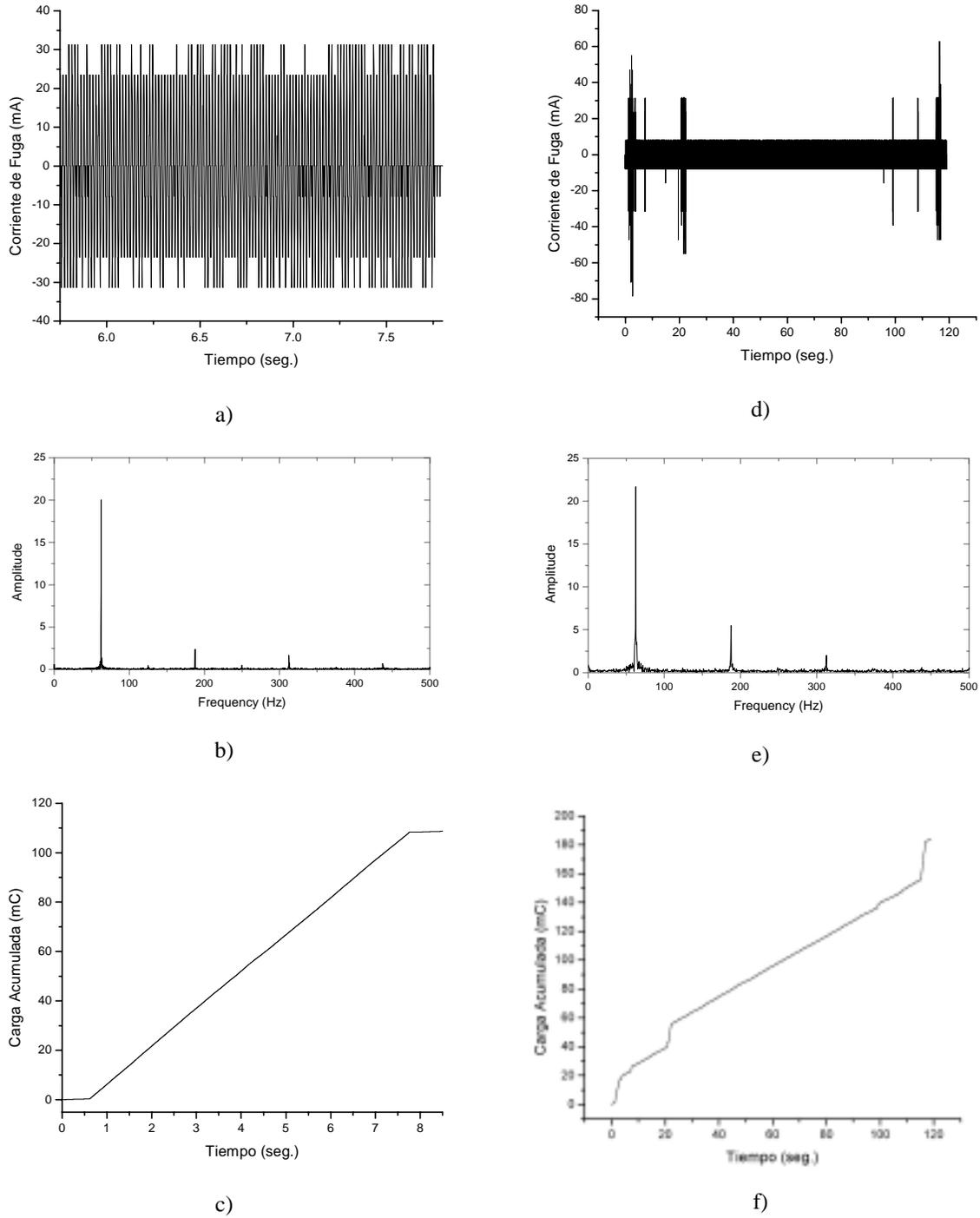
En la figura 3.34 a), la corriente de fuga estuvo entre los 40mA para la primera prueba; mientras que para la segunda prueba la cual se realizó 312 h. después, la corriente estuvo entre los 15 y 25mA. La velocidad con la que creció la carga acumulada, fue de 16.5mC/seg. para la primera evaluación, entre tanto para la segunda prueba fue de 7.1mC/seg. Para la contaminación ligera (figura 3.35), en la gráfica de la corriente correspondiente a la primera prueba se puede apreciar claramente que la carga se incrementa rápidamente cuando se presenta una descarga, como lo muestran las figuras 3.35 a) y c). La pendiente que tiene esta carga es de 19.76mC/seg. Con respecto a la segunda prueba, la corriente apenas y rebasó los 20mA, y su carga tuvo un crecimiento de 10.14mC/seg.

Para la contaminación pesada, la corriente estuvo entre los 40mA y 50mA para la primera prueba, y con un crecimiento en la carga de 18.54mC/seg. Para la segunda prueba la corriente fue de 25mA, y con una carga que tuvo una pendiente de 11.13mC/seg., figuras 3.36 d) y f). Finalmente en la figura 3.37 a), el rango de la corriente fue de 20 a 30mA, la carga fue de 11.61 mC/seg.; en tanto que para la segunda prueba la corriente estuvo entre los 15 y 25mA y donde la carga tuvo un crecimiento de 9.24mC/seg., figura 3.37 d) y f).

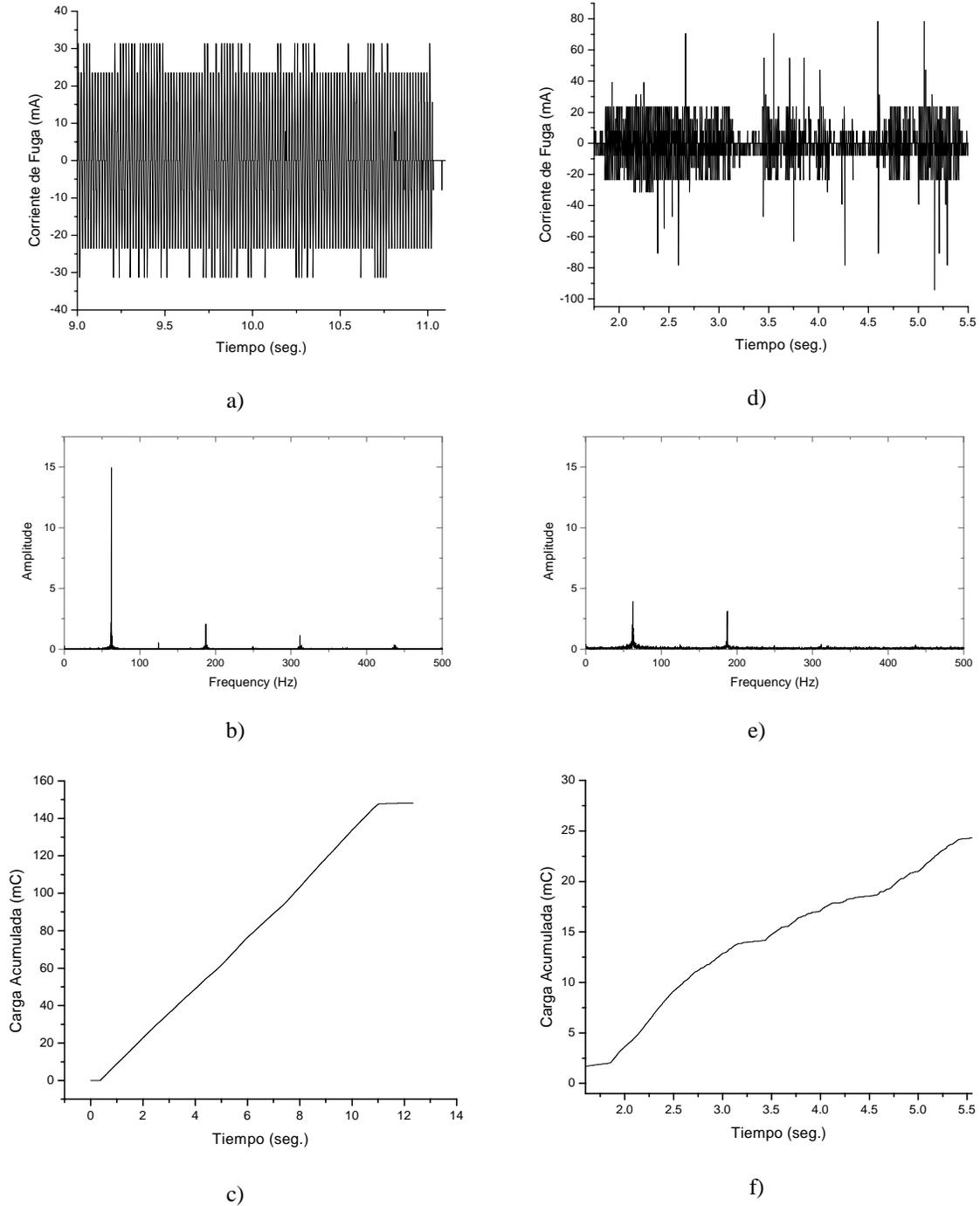
Enseguida se muestran las gráficas de las corrientes de fuga y carga acumulada, correspondientes a los aisladores que fueron sometidos a un envejecimiento de 600h.



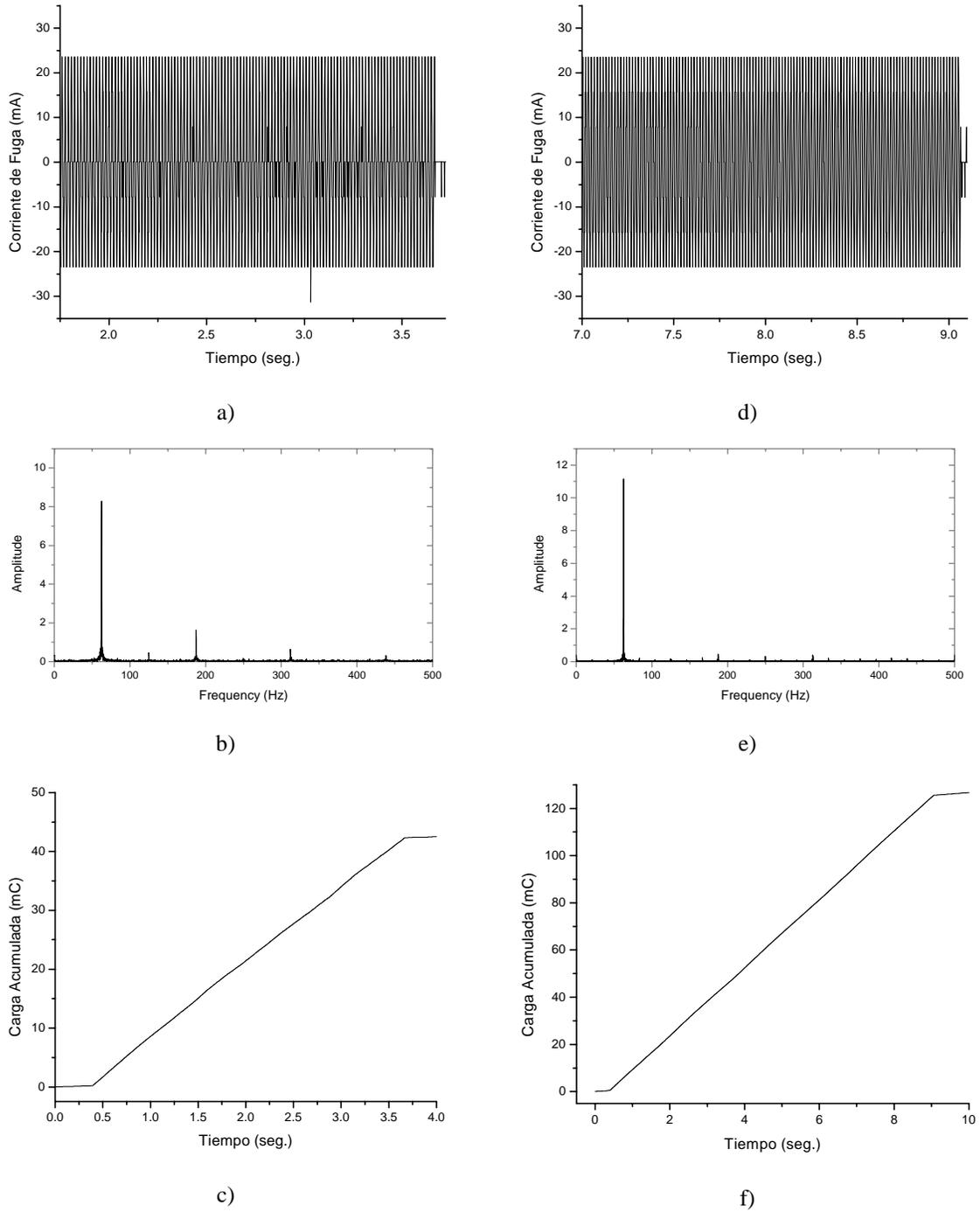
**Figura 3. 38.** Nivel de contaminación muy ligera ( $DESD = 0.02085 \text{ mg/cm}^2$ ). Tensión de flameo en la 1ª prueba = 23 kV, a) corriente de fuga; b) en el dominio de la frecuencia; c) carga acumulada. Tensión de flameo en la 2ª prueba = 21.7 kV, d) corriente de fuga, e) en el dominio de la frecuencia; f) carga acumulada.



**Figura 3. 39.** Nivel de contaminación ligera ( $DESD = 0.075 \text{ mg/cm}^2$ ). Tensión de flameo en la 1ª prueba = 13.5 kV, a) corriente de fuga; b) en el dominio de la frecuencia; c) carga acumulada. Tensión de flameo en la 2ª prueba = 9.6 kV, d) corriente de fuga, e) en el dominio de la frecuencia; f) carga acumulada.



**Figura 3. 40.** Nivel de contaminación pesada (DESD = 0.25 mg/cm<sup>2</sup>). Tensión de flameo en la 1ª prueba = 11.3 kV, a) corriente de fuga; b) en el dominio de la frecuencia; c) carga acumulada. Tensión de flameo en la 2ª prueba = 8.3 kV, d) corriente de fuga, e) en el dominio de la frecuencia; f) carga acumulada.

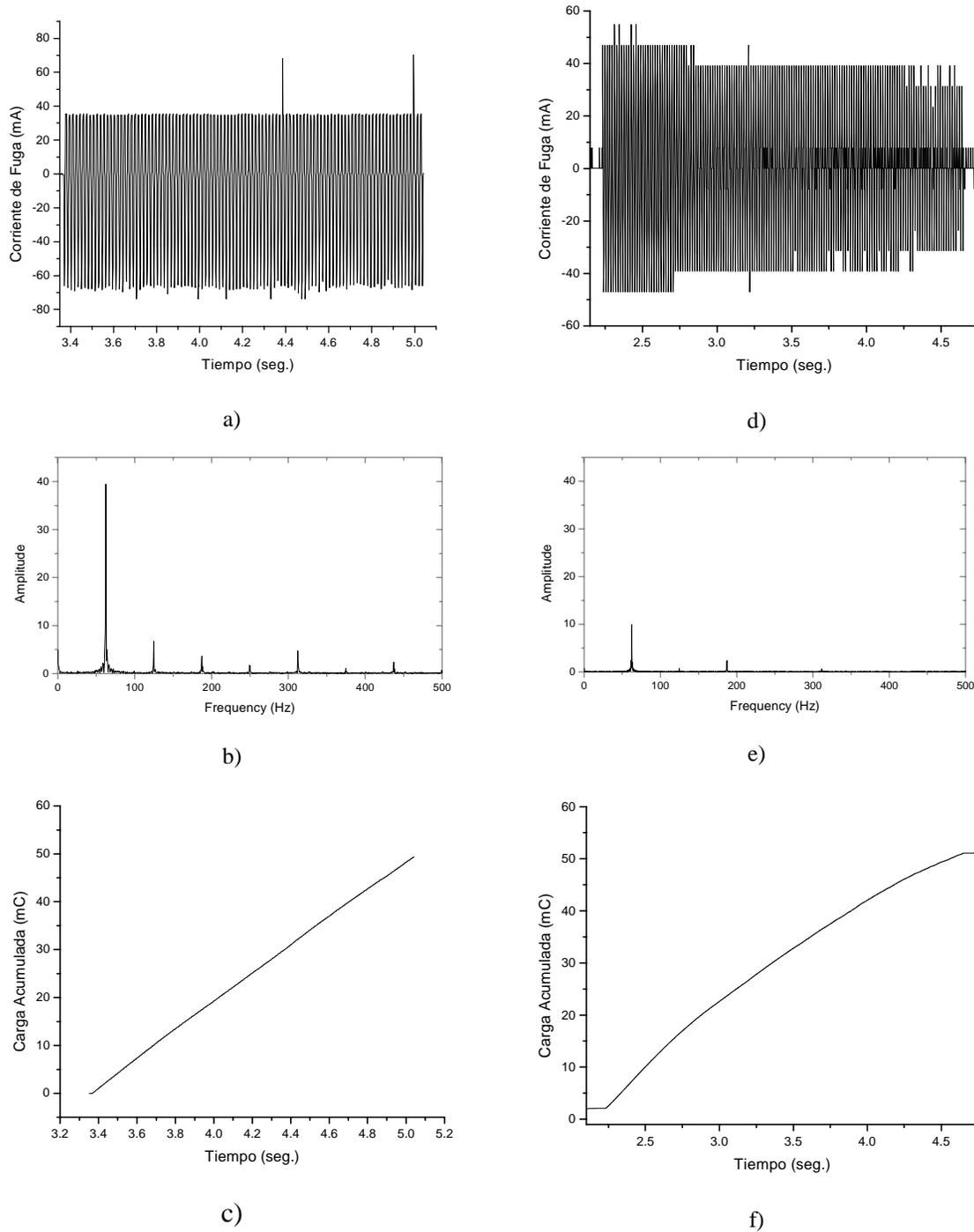


**Figura 3. 41.** Nivel de contaminación muy pesada ( $DESD = 0.425 \text{ mg/cm}^2$ ). Tensión de flameo en la 1ª prueba = 7.8 kV, a) corriente de fuga; b) en el dominio de la frecuencia; c) carga acumulada. Tensión de flameo en la 2ª prueba = 7 kV, d) corriente de fuga, e) en el dominio de la frecuencia; f) carga acumulada.

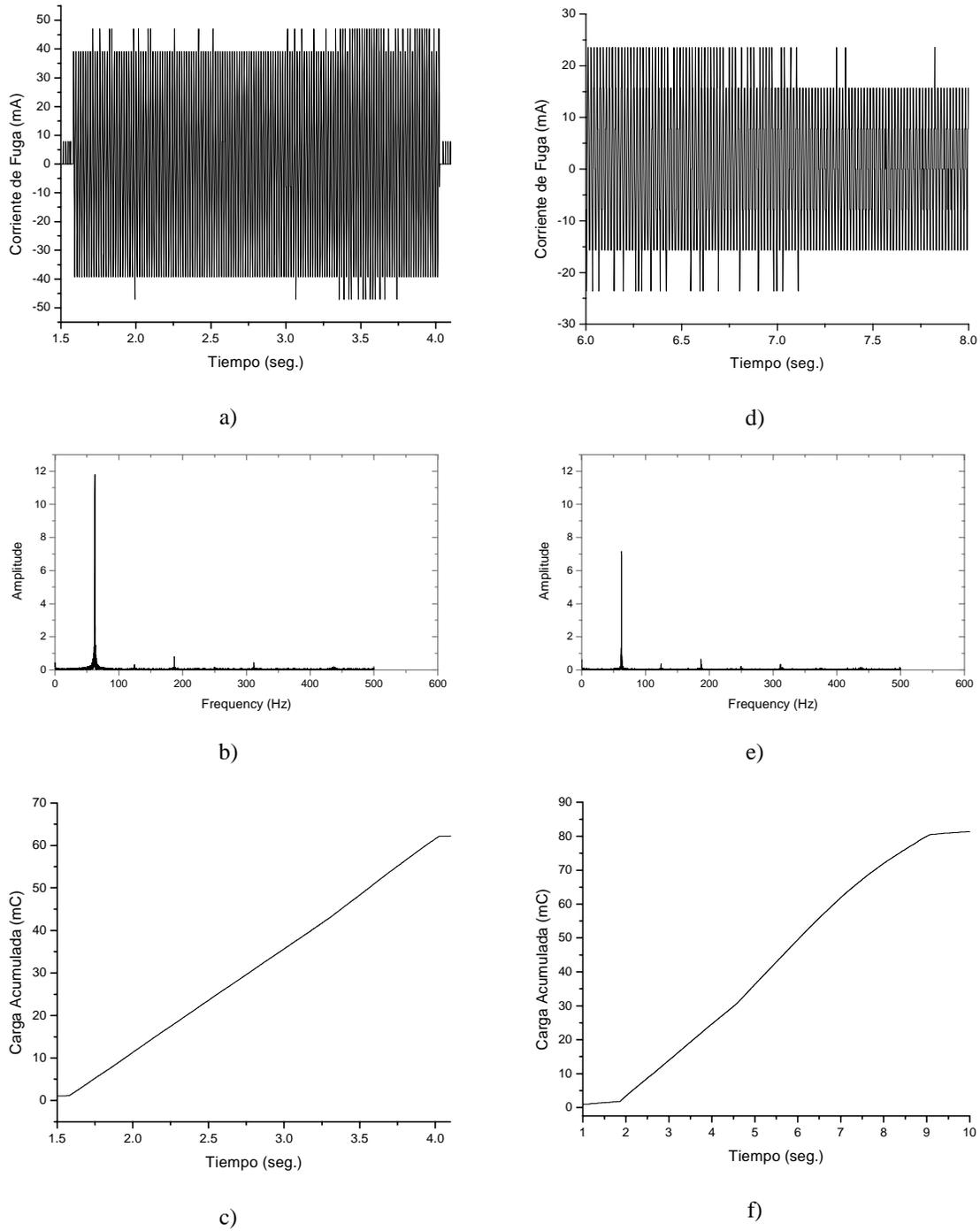
En la figura 3.38, se muestran las corrientes de fuga que se obtuvieron para una contaminación muy ligera; esta tuvo un rango entre de 30-50mA para la primera prueba, figura 3.38 a); mientras que para la segunda, la corriente de fuga fue de 40mA aproximadamente. La velocidad con la que creció la carga acumulada, fue de 20mC/seg. para la primera evaluación, entre tanto para la segunda prueba fue de 15.1mC/seg., nuevamente se aprecia en las figuras 3.38 d) y f), que cuando se presentan las descargas, la carga se incrementa drásticamente. Para la contaminación ligera, la corriente anduvo entre los 20 y 30mA, figura 3.39 a); con un incremento en la carga de 15.1mC/seg., figura 3.39 c); mientras que para la segunda prueba, la corriente tuvo un rango entre 30 y 60mA, y cuyo incremento en la carga acumulada fue de 13.4mC/seg.

Para la contaminación pesada, la corriente estuvo entre los 25mA, para la primera prueba, y con un crecimiento en la carga de 13.8mC/seg. Para la segunda prueba el rango de la corriente estuvo entre los 20mA, pero presentándose varios picos de corriente que oscilaron entre los 60 y 80mA, y con una carga que tuvo una pendiente de 7.6mC/seg., figura 3.40 d)., Finalmente para la contaminación muy pesada, las corrientes para ambas pruebas fueron de 25mA aproximadamente, figuras 3.41 a) y d); donde la carga para la primera prueba fue de 12.8mC/seg.; en tanto que para la segunda prueba la carga tuvo una velocidad de 14.5mC/seg.

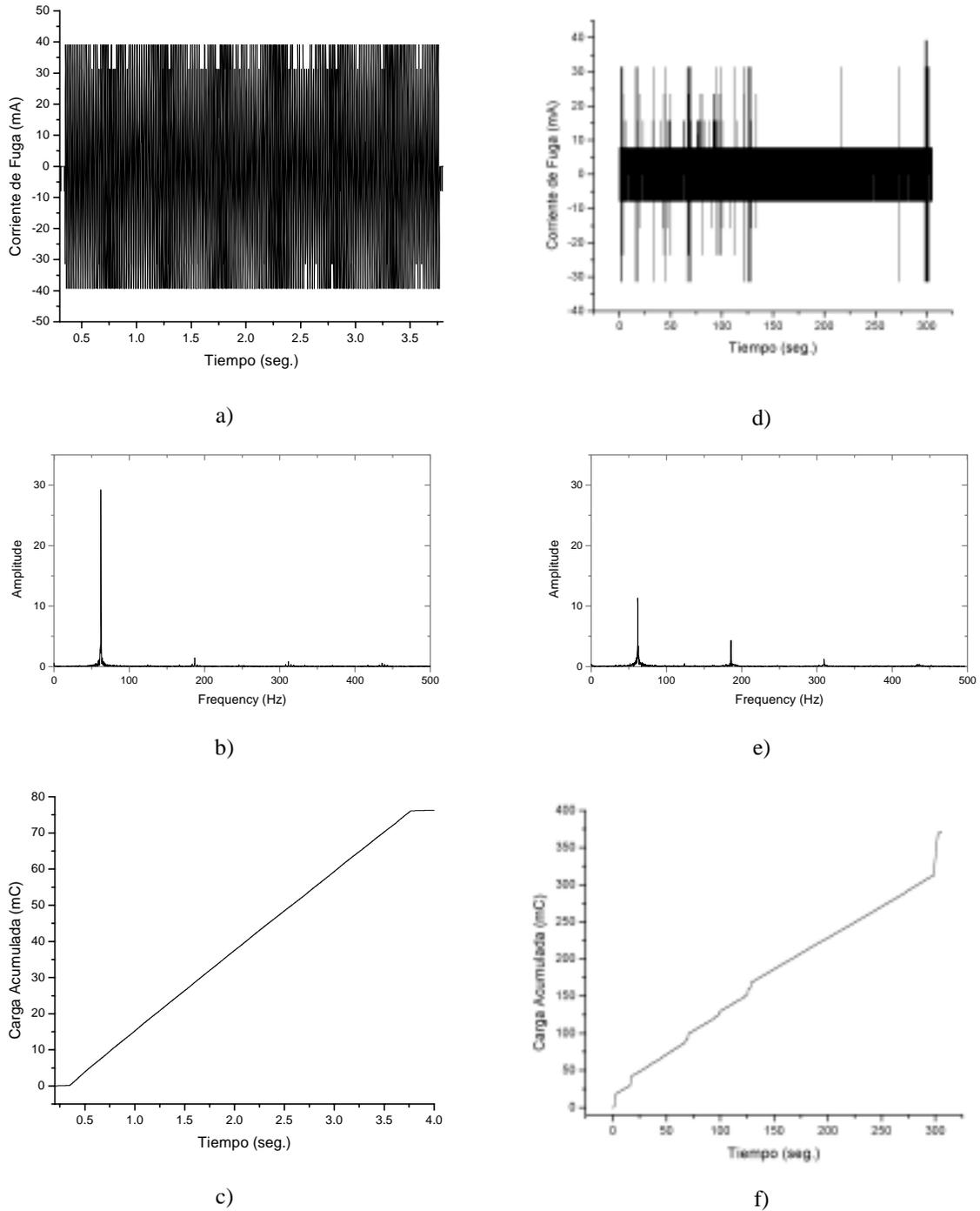
A continuación se muestran las gráficas de las corrientes de fuga y carga acumulada, correspondientes a los aisladores que se envejecieron por 1320h.



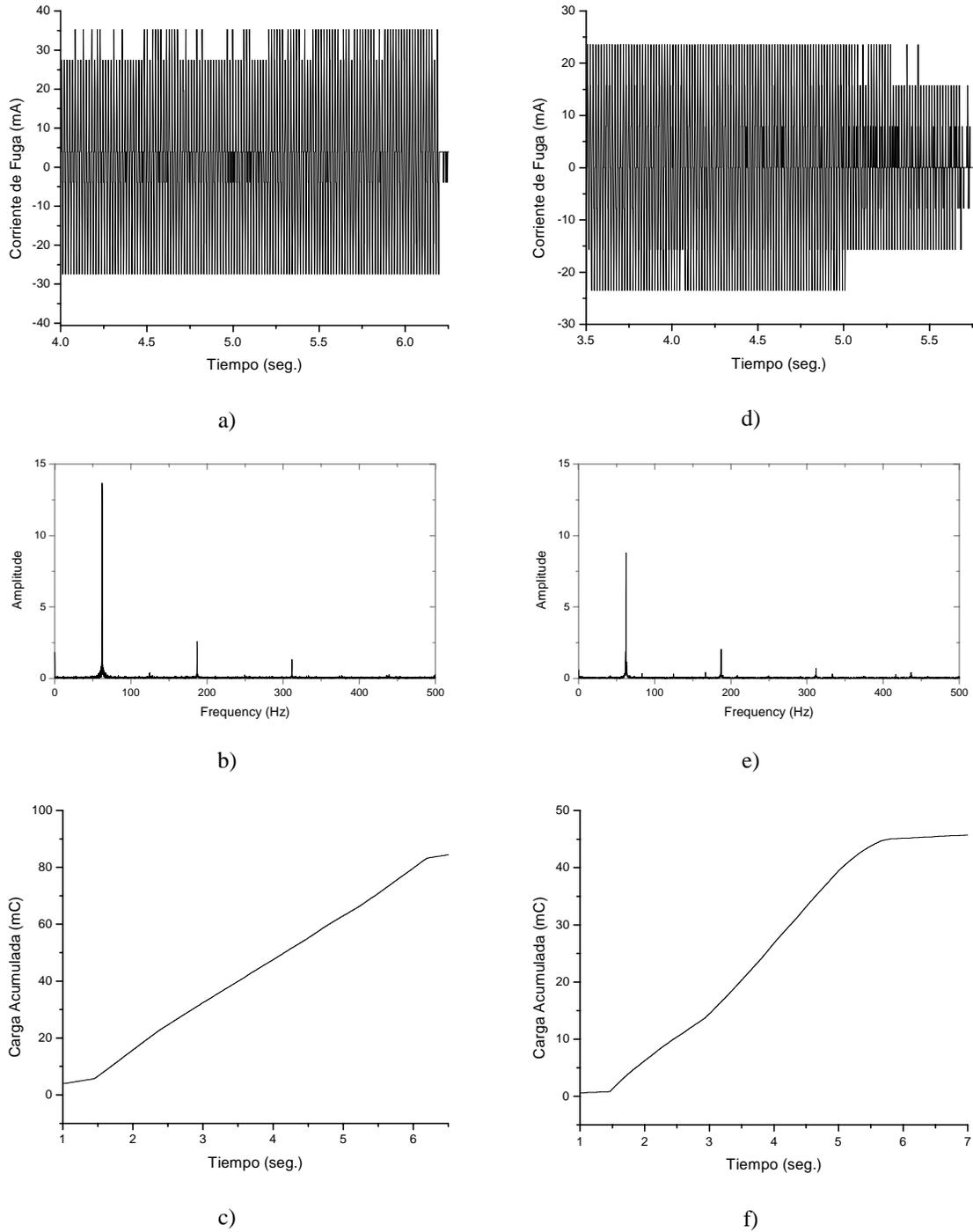
**Figura 3. 42.** Nivel de contaminación muy ligera ( $DESD = 0.02085 \text{ mg/cm}^2$ ). Tensión de flameo en la 1ª prueba = 23 kV, a) corriente de fuga; b) en el dominio de la frecuencia; c) carga acumulada. Tensión de flameo en la 2ª prueba = 20.7 kV, d) corriente de fuga, e) en el dominio de la frecuencia; f) carga acumulada.



**Figura 3. 43.** Nivel de contaminación ligera ( $DES D = 0.075 \text{ mg/cm}^2$ ). Tensión de flameo en la 1ª prueba = 12.4 kV, a) corriente de fuga; b) en el dominio de la frecuencia; c) carga acumulada. Tensión de flameo en la 2ª prueba = 7 kV, d) corriente de fuga, e) en el dominio de la frecuencia; f) carga acumulada.



**Figura 3. 44.** Nivel de contaminación pesada (DESD = 0.25 mg/cm<sup>2</sup>). Tensión de flameo en la 1ª prueba = 10.2 kV, a) corriente de fuga; b) en el dominio de la frecuencia; c) carga acumulada. Tensión de flameo en la 2ª prueba = 7.4 kV, d) corriente de fuga, e) en el dominio de la frecuencia; f) carga acumulada.



**Figura 3. 45.** Nivel de contaminación muy pesada ( $DESD = 0.425 \text{ mg/cm}^2$ ). Tensión de flameo en la 1ª prueba = 7 kV, a) corriente de fuga; b) en el dominio de la frecuencia; c) carga acumulada. Tensión de flameo en la 2ª prueba = 6.3 kV, d) corriente de fuga, e) en el dominio de la frecuencia; f) carga acumulada.

Para la contaminación muy ligera, la corriente de fuga prácticamente tuvo el mismo valor para ambas pruebas, aproximadamente 40mA, figuras 3.42 a) y d). La velocidad con la que creció la carga acumulada, fue de 29.4mC/seg. para la primera evaluación, entre tanto para la segunda prueba fue de 20.1mC/seg. Para la contaminación ligera, la corriente anduvo entre los 40 y 50mA, figura 3.43 a); con un incremento en la carga de 24.9mC/seg., figura 3.43 c); mientras que para la segunda prueba, la corriente tuvo un rango entre 15 y 25mA, y cuyo incremento en la carga acumulada fue de 11.5mC/seg.

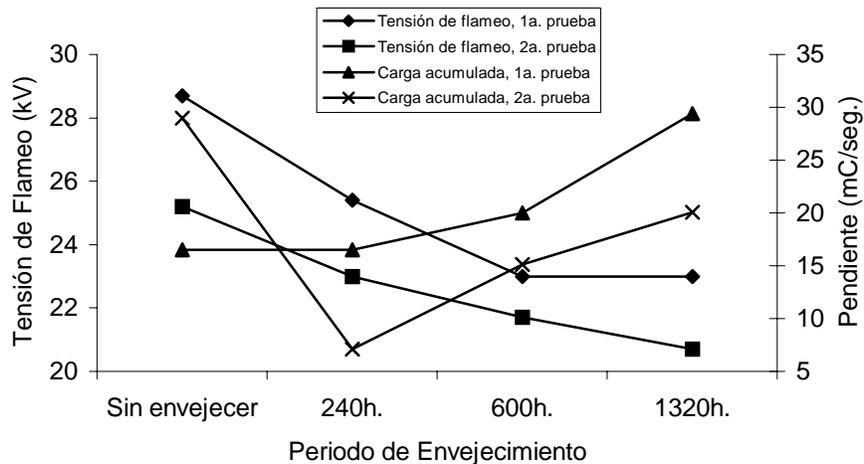
Para la contaminación pesada, la corriente estuvo entre los 40mA, para la primera prueba, y con un crecimiento en la carga de 22.1mC/seg. Para la segunda prueba el rango de la corriente estuvo entre los 15 y 40mA, con una carga que tuvo un incremento de 13.5mC/seg., figura 3.44. Finalmente para la contaminación muy pesada, las corrientes para ambas pruebas fueron de 25mA aproximadamente, figuras 3.45 a) y d); donde la carga para la primera prueba fue de 15.8mC/seg.; en tanto que para la segunda prueba la carga tuvo una velocidad de 11mC/seg.

A continuación en la tabla 3.7, se muestra de una manera resumida el valor de la pendiente que tuvo la carga acumulada, y como se menciona anteriormente, estos datos corresponden a las corrientes de fuga que se registraron instantes antes de que ocurriera el flameo en cada una de las pruebas.

**Tabla 3. 7.** Valores del incremento que tubo la carga acumulada para cada periodo de envejecimiento, y de acuerdo con los distintos niveles de la DESD.

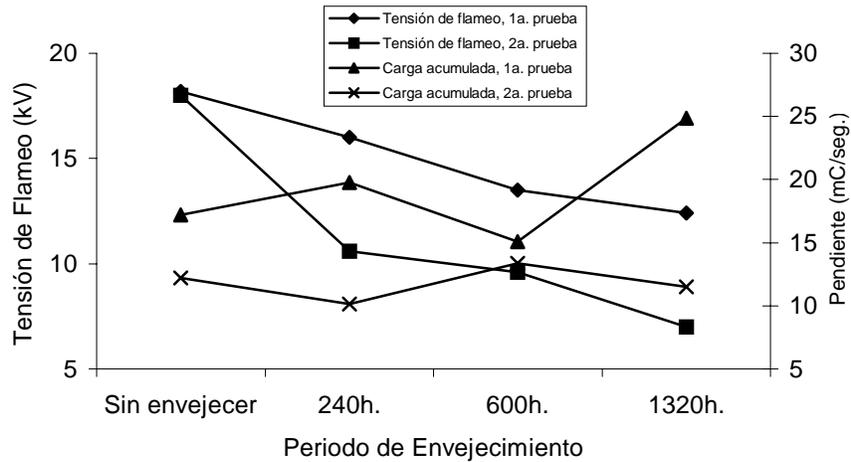
Nivel de la DESD (mg/cm <sup>2</sup> )	Aisladores Nuevos. (mC/seg.)		Envejecidos por 240h. (mC/seg.)		Envejecidos por 600h. (mC/seg.)		Envejecidos por 1320h. (mC/seg.)	
	1ª prueba	2ª prueba	1ª prueba	2ª prueba	1ª prueba	2ª prueba	1ª prueba	2ª prueba
0.02085	16.5	29	16.5	7.1	20	15.12	29.42	20.1
0.075	17.2	12.2	19.76	10.14	15.1	13.35	24.86	11.5
0.25	16.2	15.82	18.54	11.13	13.78	7.61	22.1	13.47
0.425	13.41	14.62	11.61	9.24	12.76	14.44	15.8	10.97

Graficando los datos de la tabla anterior junto con las tensiones de flameo (ver tabla 3.6), se podrá observar que en la mayoría de las pruebas en las que ocurrió el flameo, la velocidad con la que se incrementó la carga acumulada se comportó de manera ascendente, conforme se incrementaba el tiempo de envejecimiento de los aisladores.



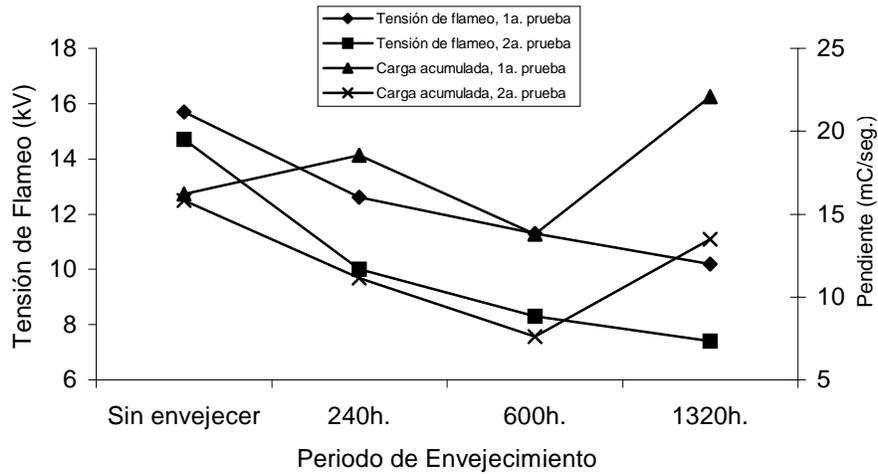
**Figura 3. 46.** Grafica comparativa de la tensión de flameo y carga acumulada, para una **DESD = 0.02085 mg/cm<sup>2</sup>**; contra los distintos periodos de envejecimiento.

En la figura 3.46, se muestran las tensiones de flameo junto con la velocidad de crecimiento que tubo la carga acumulada instantes antes de que ocurrieran estos flameos; tanto para la primera como segunda prueba respectivamente. Estos datos corresponden para un mismo nivel de la DESD ( $0.02085 \text{ mg/cm}^2$ ). Para ésta gráfica puede apreciarse claramente como hay un incremento en cuanto a la pendiente de la carga acumulada, conforme aumenta el tiempo de envejecimiento; también se puede observar que conforme disminuye la tensión de flameo aumenta la carga acumulada.



**Figura 3. 47.** Grafica comparativa de la tensión de flameo y carga acumulada, para una **DESD = 0.075  $\text{mg/cm}^2$** ; contra los distintos periodos de envejecimiento.

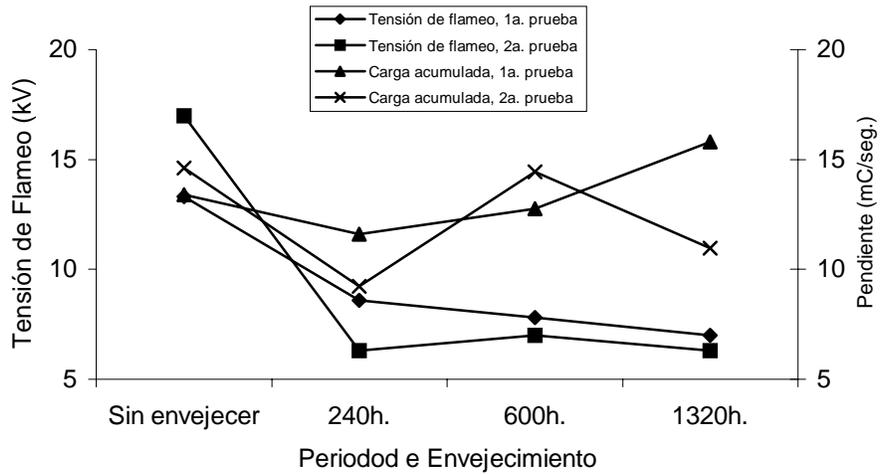
Los datos que se presentan en la figura 3.47, corresponden para el nivel de contaminación ligero ( $\text{DESD} = 0.075 \text{ mg/cm}^2$ ). Aquí para el caso de la primera prueba el comportamiento de la carga es ascendente para el periodo de envejecimiento de 240 y 1320h.; mientras que para la segunda prueba ligeramente se incrementa para los aisladores que se envejecieron por 600h. y 1320h.; al mismo tiempo los niveles de tensión de flameo disminuyeron para todos los casos.



**Figura 3. 48.** Grafica comparativa de la tensión de flameo y carga acumulada, para una **DESD = 0.25 mg/cm<sup>2</sup>**; contra los distintos periodos de envejecimiento.

En la figura 3.48 se muestran los resultados que se obtuvieron para una contaminación pesada, el comportamiento de estos resultados se asemejan a los que se tuvieron para una contaminación muy ligera ( $DESD = 0.02085 \text{ mg/cm}^2$ ). Donde la pendiente de la carga se incrementó conforme aumentó el periodo de envejecimiento, con excepción del aislador nuevo en su segunda prueba, donde tuvo una carga mayor con respecto a los otros periodos de envejecimiento; y donde nuevamente se observa que las tensiones de flameo fueron a las baja (figura 3.48).

Finalmente se presentan los resultados obtenidos para una mezcla contaminante muy pesada ( $DESD = 0.425 \text{ mg/cm}^2$ ), como se muestra en la figura 3.49. Aquí el comportamiento de la carga es similar a los mostrados anteriormente; observamos que para el caso de la primera prueba las mediciones indicaron nuevamente que conforme aumenta el tiempo de envejecimiento, crece la carga acumulada en tanto que la tensión de flameo disminuye. Pero para la segunda evaluación, la carga fue mayor para los aisladores nuevos, así como para los que se envejecieron por 600h.; en tanto que para los otros dos periodos de envejecimiento la carga fue menor.



**Figura 3.49.** Grafica comparativa de la tensión de flameo y carga acumulada, para una **DESD = 0.425 mg/cm<sup>2</sup>**; contra los distintos periodos de envejecimiento.

### 3. 5. Conclusiones

Como se mencionó en el estado del arte, actualmente en muchas partes del mundo los aisladores poliméricos están siendo evaluados por los mismos métodos desarrollados para los aisladores de porcelana y de vidrio (IEC-507), pero la naturaleza orgánica de los aisladores poliméricos hace que su respuesta a la humectación difiera de manera significativa a la de los aisladores cerámicos, por lo que la validación de estas pruebas es bastante cuestionable.

Debido a esto se usó un método no convencional y con el cual se han reportado resultados satisfactorios [34]. Para este método no convencional se implementó un sistema de protecciones y adquisición de datos para la obtención de las corrientes de fuga; este sistema es diferente a otros que se han usado, y resultó ser bastante confiable.

Como se observó en los datos reportados por la SMADF, en el Valle de México los niveles de acidez encontrados en el agua de lluvia resultaron ser bastante altos, alcanzando valores de  $\text{pH} = 3.3$  y  $4.0$  en algunos lugares. Los cuales se encuentran por debajo a los que se han reportado en otros países como son: el sudoeste de Europa ( $\text{pH} = 5.42$ ); Minnessota, U.S.A. ( $\text{pH} = 5.41$ ); Atenas, Grecia ( $\text{pH} = 5.40$ ); Greater Manchester, U.K. ( $\text{pH} = 4.37$ ), [41]; y similares a los reportados en Hong Kong ( $\text{pH} = 3.2$  y  $4.2$ ) [42].

Por medio de la técnica del ángulo de contacto se observó que los aisladores sufren una disminución bastante considerable en su hidrofobicidad superficial, conforme éstos eran sometidos por mayor tiempo a la solución acuosa que representó a la lluvia ácida; mostrando una reducción en el ángulo de contacto del 36.4% para los aisladores que fueron envejecidos por 1320h. con respecto al ángulo promedio que tuvieron los aisladores nuevos ( $\theta = 89.2^\circ$ ). En tanto que para los aisladores envejecidos por 240 y 600h. el promedio de sus ángulos de contacto cayó en un 10.8% y 20.85% respectivamente.

Las mediciones que se realizaron en el ángulo de contacto al finalizar cada prueba revelaron que se degradó aún más la propiedad hidrofóbica de dichos aisladores. Y que a pesar de que se dejaron descansar los aisladores por periodos de 168h a 312h. (7 a 13 días) entre una prueba y otra, ninguno de ellos logró recuperar al 100% sus características hidrofóbicas. Esto puede atribuirse al daño que sufrieron los aisladores como resultado de las fuertes descargas a las que estuvieron sometidos durante el desarrollo de las pruebas; lo cual concuerda con las investigaciones desarrolladas por Tokoro y Fernando[38,40], donde reportan que las descargas en bandas secas ayudan a que los aisladores pierdan sus propiedades hidrofóbicas.

De igual forma la hidrofobicidad superficial se vio afectada por los distintos niveles de la DESD, en especial los aisladores nuevos fueron los que sufrieron más daño conforme se incrementaba la DESD, seguidos por los aisladores envejecidos por 240h y 600h. Pero contrariamente los aisladores que se envejecieron por 1320h., la disminución en el ángulo de contacto para todos los niveles de la DESD con respecto al ángulo promedio que mostró éste aislador antes del inicio de la pruebas ( $\theta = 56.6^\circ$ ) no parece ser muy significativa (ver figuras 3.20 – 3.23). Esto puede atribuirse que como consecuencia de haber estado expuestos a un periodo mayor de envejecimiento (1320h.), repercutió que éstos aisladores ya no consiguieran sufrir más daño en su superficie, debido a la fuerte erosión provocada por los ácidos presentes en la lluvia ácida artificial.

Por consiguiente el envejecimiento que sufrieron los aisladores trascendió que se vieran afectados sus niveles de tensión de flameo, se observó que los aisladores que padecieron una fuerte disminución en su hidrofobicidad superficial fueron los que flamearon a menor tensión como lo muestran las figuras 3.25 y 3.26; donde se observa que los aisladores que se envejecieron por 1320h. fueron los que flamearon a menor tensión para cada uno de los cuatro niveles de la DESD, en tanto que los aisladores que no se sometieron a envejecimiento fueron los que flamearon a mayor tensión.

En la figura 3.25 se aprecia una disminución en la tensión de flameo del 19.9% en el aislador envejecido por 1320h. con respecto a la tensión de flameo del aislador sin envejecer (28.7kV), esto para una DESD =  $0.02085\text{mg}/\text{cm}^2$ ; mientras para una DESD =  $0.075\text{ mg}/\text{cm}^2$  el mismo aislador presentó un flameo 31.8% menor con respecto al aislador nuevo (18.2kV). De la misma manera para una DESD = 0.25 y  $0.425\text{mg}/\text{cm}^2$  éste aislador tuvo una tensión de flameo 35% y 47.4% menor en comparación con las tensiones de flameo que presentaron los aisladores nuevos

respectivamente. Por lo tanto la disminución en la tensión de flameo de un aislador que se ha sometido a envejecimiento con respecto a la tensión de flameo de un aislador totalmente nuevo es mayor conforme se incrementa el nivel de DESD.

Con respecto a las pendientes que se obtuvieron de todas las cargas acumuladas, la cual nos da el cambio estimado en el eje “Y” por incremento unitario en el eje “X”; es decir nos dice con que velocidad se incrementó la carga. Se observó que para la mayoría de las pruebas en las que se presentó el flameo, la carga fue mayor para aquellos aisladores que se envejecieron por periodos de tiempo mayores, mientras que su tensión de flameo fue menor. Esto nos indica que conforme se incrementa el periodo de envejecimiento, aumenta la corriente de fuga, lo que trae como consecuencia que los aisladores flameen a menor tensión.

En resumen cuando éste tipo de aisladores poliméricos EPDM se encuentran ante un medio ambiente ácido en combinación con la presencia de descargas en bandas secas sobre su superficie y/o flameos, y a esto se añade altos niveles de contaminación; su principal propiedad que es la hidrofobicidad superficial se ve seriamente dañada, la cual ya no llegan a recuperar al 100%, contrariamente a lo que han reportado en otras investigaciones [13,14]. Lo que repercute que sus tensiones de flameo disminuyan drásticamente.

### **3. 6. Recomendaciones para trabajos futuros**

Tomando como referencia éste trabajo se pueden iniciar investigaciones encaminadas al análisis de la tensión de flameo con otros ambientes ácidos (distintos niveles de pH) y otros niveles de contaminación. Se puede investigar experimentalmente con otros materiales poliméricos e incluso con los aisladores convencionales de porcelana y de vidrio, y poder hacer una comparación entre ellos.

El efecto que provoca una disminución en la hidrofobicidad superficial sobre el comportamiento eléctrico de un aislador polimérico es un parámetro bastante importante, y el cual merece ser estudiado más puntualmente, por eso se puede analizar las superficies de los aisladores con ayuda de un microscopio electrónico, para poder determinar más detalladamente el grado de erosión que sufren este tipo de aisladores en su superficie.

Hasta hace poco tiempo la normativa internacional ha empezado a tomar en cuenta los problemas por envejecimiento acelerado en los aisladores poliméricos; esto debido a fenómenos como la lluvia ácida, rayos UV, efecto corona, contaminación, etc. De igual forma no se cuenta actualmente con una norma que nos permita evaluar aisladores poliméricos en laboratorio tomando en cuenta los parámetros antes mencionados, por lo que una línea de investigación puede ser el de tratar de reproducir el proceso de envejecimiento sufrido por dichos aisladores para poder predecir su vida útil, además de desarrollar una técnica confiable para su evaluación.

# Referencias

- [1] Programa de Precipitaciones Ácidas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, Informe Anual 1994. Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación. Dirección de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico “RAMA”.
- [2] Chen Yuan, Guan Zhicheng and Liang Xiodong. “Analysis of Flashover on the Contaminated Silicone Rubber Composite Insulator”. Procc. of the 5<sup>th</sup> International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Seoul, Korea, May 25-30, 1997.
- [3] A. P Baez, H.G. Padilla and O. G. De Gonzales. “Acid Rain Over México City Valley and Surrounding Rural Areas”. Geofísica Internacional, Vol 25-2, 1986, pp. 315-326.
- [4] R.S. Gorur, E.A. Cherney, R. Hackam and T. Orbeck. “The Electrical Performance of Polymeric Insulating Materials Under Accelerated Aging in a Fog Chamber”. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 3, July 1988, pp 1157-1164.
- [5] Yi Dong-young, June-Ho Lee, Seong Hwangbo and Min-Koo Han. “ The Effect of Acid Rain on the Tracking Deterioration of Elastomer”. Conference Record of the 1992 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Baltimore, MD USA, June 7-10, 1992, pp 258-261.

[6] IEC Publication 587, First Edition, "Test Method for Evaluating Resistance to Tracking and Erosion of Electrical Insulating Materials used under Severe Ambient Conditions", 1977.

[7] Joeng-Ho Kim, Han-Goo Cho and Yong-Kwan Park. "The Effect of Acid Rain on the Tracking Resistance of Polymeric Insulating Materials". Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, May 25-30 1997, Seoul, Korea, pp 158-161.

[8] J. Y. Koo, I. T. Tim, J. T. Kim and W. K. Park. "An Experimental Investigation on the Degradation Characteristics of the Outdoor Silicone Rubber Insulator due to Sulfate and Nitrate Ions". IEEE Annual Report – Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Minneapolis, October 19-22, 1997, pp 370-373.

[9] ASTM Test Method D2303-85T, "Liquid Contaminant, Inclined Plane Tracking and Erosion of Insulating Materials", pp. 190-199, 1985.

[10] Sang-II, Jin-Yeol Ion, Kang-Sik Park and Sang-Ok Han. "Surface Degradation of Silicone Rubber under Accelerated Aging Condition". IEEE Annual Report – Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Minneapolis, October 19-22, 1997, pp 439-443.

[11] N. E. Frost, G. Xu and P. B. McGrath. “ An Examination of the Environments for Aging of Polymers”. IEEE Annual Report – Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Minneapolis, October 19-22, 1997, pp 354-357.

[12] J. Montesinos, R. S. Gorur and J. Goudie. “Electrical Performance of RTV Silicone Rubber Coatings After Exposure to an Acidic Environment”. Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Annual Report. Conference on Published 1998, Vol. 1, pp 39-42.

[13] X. Wang, S. Kumagai and N. Yoshimura. “Contamination Performances of Silicone Rubber Insulator Subjected to Acid Rain”. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 5, No. 6, December 1998.

[14] X. Wang, S. Kumagai, M. Sato and N. Yoshimura. “Contaminant Properties of Silicone Rubber Insulator in the Accelerating Aging of Acid Rain”. Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Annual Report. Conference on Published 1998, Vol. 1, pp 48-51.

[15] Guoxiang Xu, Paul B. McGrath and Clayton W. Burns. “ Accelerated Environmental and Electrical Aging of Polymer Insulators”. IEEE Annual Report. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, San Francisco, October 20-23, 1996, pp 404-407.

[16] Seiichi Hasegawa, Seiji Kumagai, Wang Xinseng, Kenichi Kobayashi and Noboru Yoshimura. "The Influence of Acid Rain on the Tracking Deterioration of Organic Insulating Materials". Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, May 25-30 1997, Seoul, Korea, pp 754-757.

[17] Nancy E. Frost and Paul B. McGrath. "Comparative Evaluation of Polymer Insulator Materials Subjected to Synthetic Rain". IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Arlington, Virginia, USA, June 7-10, 1998, pp 378-381.

[18] José Luis Fierro Chávez. "Aisladores No Cerámicos para Líneas de Transmisión. Parte I: Experiencia de una Tecnología Prometedora.". Boletín IIE, marzo-abril, 1999, pp. 72-78.

[19] Mackevich J. 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.

[20] J. L. Fierro. "Aisladores No Cerámicos para Líneas de Transmisión. Parte II: Aplicación que requiere de una selección cuidadosa". Boletín IIE, marzo-abril, 1999, pp. 79-83.

[21] M. Teresa Campillo R. y M. Antonio Ponce V. "Análisis Experimental de la Contaminación Ambiental en Equipos Eléctricos". Boletín IIE, mayo-junio, 1996, pp. 133-144.

[22] José Luis Fierro Chávez. “Alternativas de Solución al Problema de Contaminación en Aisladores”. Boletín IIE, mayo-junio, 1996, pp. 126-132.

[23] José Luis Fierro Chávez. “Utilización de Aisladores en Líneas de Distribución en Ambientes Contaminados”. RVP '97-AIS-06, del 13-18 de julio, 1997. Acapulco, Guerrero.

[24] Programa de Precipitaciones Ácidas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, Informe Anual 1999. Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación. Dirección de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico “RAMA”.

[25] Henry, J. G., “Environmental Science and Engineering”. Prentice Hall, Englewood Cliffs. Printed in U.S.A., pp. 124-142.

[26] Mahendra Pal Verma. “Necesidad de la Determinación de la Alcalinidad en la Caracterización de la Lluvia”. Boletín IIE, enero-febrero 1998.

[27] A. P. Baez, R. Belmont, L. LeMoyne and I. Rosas. “Chemistry of Rain Precipitation at Mexico City, Mexico”. Revista Geofísica 24, pp 145-156.

[28] Armando P. Baez and Raul Belmont. “Comparatives Study of the Chemical Composition of Rain of Three Different Zones in Mexico”. Contam. Ambient. 3, 1987, pp 25-36.

- [29] A. Baez P., R. Belmont D. and H. Padilla G. "Variation of Chemical Composition of Wet Precipitation, Using a Sequential Sampling: Urban-Rural Areas Comparison". *Atmósfera*, 6, 1993, pp 163-174.
- [30] J. F. Hall. "History and Bibliography of Polymeric Insulators for Outdoor Applications". *IEEE, Transactions and Power Delivery*, Vol. 8, No. 1, January 1993, pp. 376-385.
- [31] Standard International IEC 507. "Artificial Pollution Tests on High-Voltage Insulators to be used on A.C. Systems". Second Edition, 1991-04.
- [32] Standard International IEC 1109. "Composite Insulators for A.C. Overhead Lines with a Nominal Voltage Greater than 1000 V – Definitions, Test Methods and Acceptance Criteria". First Edition, 1992-03.
- [33] J. L. Fierro, I. Ramírez y J. C. Corona. "Evaluación en Campo y Laboratorio de Aislamiento Sintético para Líneas de Transmisión". RVP'98-AIS-07, del 12-17 de julio, 1998. Acapulco, Guerrero.
- [34] A. De la O., R. S. Gorur and J. Chang. "A. C. Clean Fog Tests on Non Ceramic Insulating Materials and a Comparison with Porcelain". *IEEE, Transactions on Power Delivery*, Vol. 9, No. 4, October 1994, pp. 2000-2008.
- [35] M. Nango, SEPI – ESIME, México D. F., Comunicación Privada.

[36] Programa de Precipitaciones Ácidas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, Informe Anual 1997. Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación. Dirección de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico “RAMA”.

[37] Reuben Hackman. “Outdoor H. V. Composite Polymeric Insulators”. IEEE, Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 6, No. 5, October 1999, pp. 557-585.

[38] Tetsuro Tokoro and Reuben Hackam. “Effect of Water Salinity and Temperature on the Hydrophobicity of Ethylene Propylene Diene Monomer Insulator”. IEEE Annual Report – Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, San Francisco, October 20-23, 1996, pp. 424-427.

[39] 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, pp. 660-667.

[40] M. A. R. M. Fernando and S. M. Gubanski. “Leakage Current Patterns on Contaminated Polymeric Surfaces”. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 6, No. 5, October 1999, pp. 688-694.

[41] A. P. Baez, R. D. Belmont and H. G. Padilla. “Chemical composition of precipitation at two sampling sites in Mexico: a 7 year study”. Atmospheric Environment, Vol. 31, No. 6, pp. 915-925, 1997.

- [42] R. Sequeira and F. Lung. "A critical data analysis and interpretation of the pH, ion loadings and electrical conductivity of rainwater from the territory of Hong Kong". *Atmospheric Environment*, Vol. 29, No. 18, pp. 2439-2447, 1995.
- [43] Varlow B. R. "Surface Insulation Testing Methods", *IEEE Colloquium on Review of Outdoor Insulation Materials*, London 1996, pp. 2/1 – 2/4, 1996.
- [44] Seog-Hyeon K., Cherney E. A. and R. Hackman, "Hydrophobic Behavior of Insulator Coated with RTV Silicone Rubber", *IEEE Transaction on Electrical Insulation*, Vol. 27, Nom. 3, pp. 610-622, 1992.
- [45] Kloes H. J. and Koenig D., "Basic Investigations of the Performance of Droplets on Electrically Stressed Polymer Surfaces" 1997 IEEE Annual Report CEIDP 1997, Minneapolis, Minnesota, U.S.A. , pp. 374 – 377, Octobre de 1997.
- [46] Stanislaw M. Gubanski and Antonios E. Vlastós. "Wettability of Naturally Aged Silicone and EPDM Composite Insulators". *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 5, No. 3, July 1990, pp. 1527-1535.

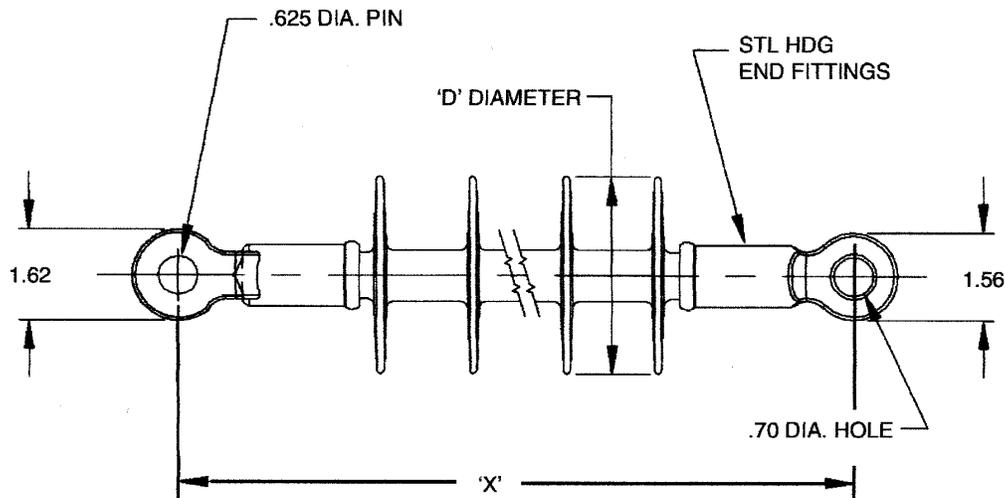
# **Anexo A**

## **Características mecánicas y eléctricas de los aisladores**

Los aisladores que se emplearon en este estudio son aisladores poliméricos del tipo EPDM (etileno propileno dieno monómero) de clase 15 kV del tipo suspensión, marca OHIO-BRASS.

Las características mecánicas y eléctricas de dichos aisladores corresponden al número de catálogo 401015-0215, y las cuales se presentan a continuación.

### 0.625" (16mm) Diameter Rod Deadend Insulators



#### Mechanical Characteristics

Catalog Numbers	No. of Sheds	"X" Length inches (mm)	"D" Diameter Inches (mm)	Net Wt. pounds (kg)	Standard Package Qty.		Torsion ft-lb (N-m)	<sup>1</sup> SML pounds (kN)	<sup>2</sup> RTL pounds (kN)	<sup>3</sup> Proof pounds (kN)
					Carton	Pallet				
401015-0215	4	12.50 (318)	3.6 (92)	2.1 (.95)	15	180	35 (47)	15,000 (70)	7,500 (35)	10,000 (44.5)
401015-6215	4	12.50 (318)	3.6 (92)	2.1 (.95)	15	180	40 (55)	15,000 (70)	7,500 (35)	10,000 (44.5)
401028-0215	8	17.50 (445)	3.0 (76)	2.4 (1.1)	15	240	35 (47)	15,000 (70)	7,500 (35)	10,000 (44.5)
401028-6215	8	17.50 (445)	3.0 (76)	2.4 (1.1)	15	240	40 (55)	15,000 (70)	7,500 (35)	10,000 (44.5)
401025-0215	8	18.75 (475)	3.5 (89)	2.8 (1.3)	15	180	35 (47)	15,000 (70)	7,500 (35)	10,000 (44.5)
401025-6215	8	18.75 (475)	3.5 (89)	2.8 (1.3)	15	180	40 (55)	15,000 (70)	7,500 (35)	10,000 (44.5)
401035-0215	8	25.00 (635)	3.0 (76)	3.3 (1.5)	15	150	35 (47)	15,000 (70)	7,500 (35)	10,000 (44.5)

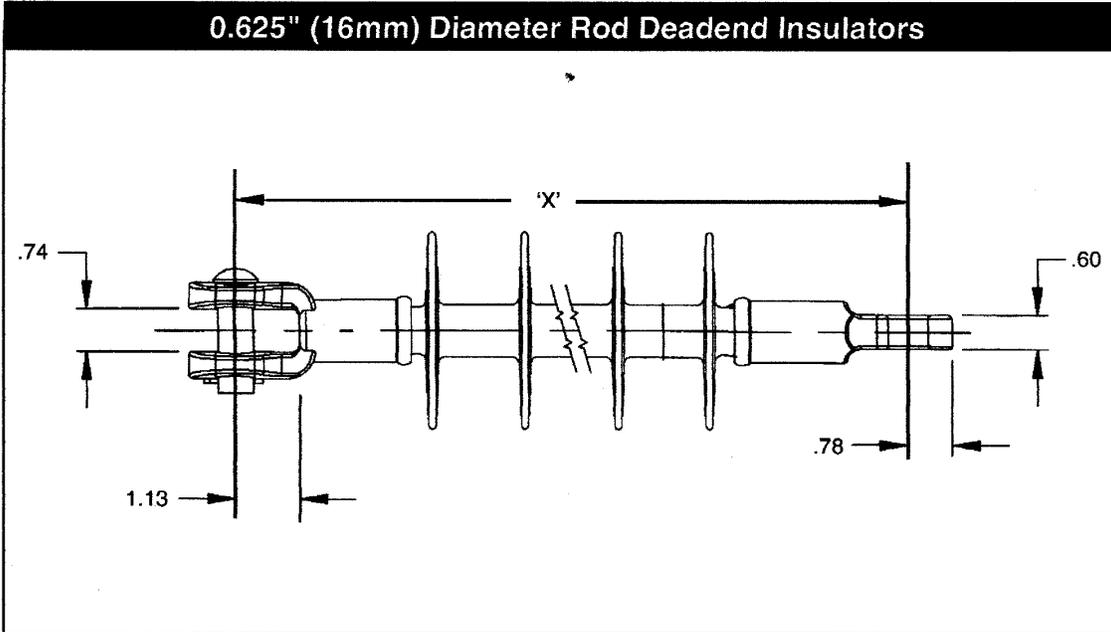
<sup>1</sup>SML - Specified Mechanical Load is the tension load that a Veri<sup>®</sup>Lite insulator can withstand during a 90-second test without failure. SML is comparable to the M&E strength rating of porcelain insulators.

<sup>2</sup>RTL - A Routine Test Load value is equal to 50% of the SML value.

<sup>3</sup>Proof Test - The mechanical tension load applied at the factory to each insulator for ten (10) seconds.

**NOTE:** PDI Type insulators are intended for applications which are within 45° of horizontal - to allow proper shed drainage.

**0.625" (16mm) Diameter Rod Deadend Insulators**



**Electrical Characteristics**

Catalog Numbers	Type	Leakage Distance Inches (mm)	Dry Arc Distance inches (mm)	Flashover ANSI - kV		Critical Flashover ANSI		RIV		Power Arc kA cycles	SL of # of 4-1/4 Bells	Volt*/ Class
				Dry-kV	Wet-kV	Pos-kV	Neg-kV	Test kV	Max. $\mu$ V			
401015-0215	PDI-15	16 (406)	8 (203)	110	75	140	160	15	<10	150	2	15
401015-6215	PDI-15	16 (406)	8 (203)	110	75	140	160	15	<10	150	2	DS-15
401028-0215	PDI-28	26 (660)	12 1/4 (311)	130	110	200	225	20	<10	150	—	25
401028-6215	PDI-28	26 (660)	12 1/4 (311)	130	110	200	225	20	<10	150	—	DS-28
401025-0215	PDI-25	31 (787)	14 (356)	150	130	260	280	30	<10	150	3	25 & 35
401025-6215	PDI-25	31 (787)	14 (356)	150	130	260	280	30	<10	150	3	DS-35
401035-0215	PDI-35	33 (838)	20 (508)	200	160	325	360	30	<10	150	4	35

\*Phase-to-Phase voltage.

**Key to the Catalog Numbers**

**401XXX - X215**

0 = Std. Pin		
1 = Hex Pin†	Voltage Rating kV	Ferrous End-fitting
3 = Standard Pin Rotated End-fitting	0 = Standard Marking	6 = LWIWG Marking
5 = ANSI 52-3 B & S		
6 = IEC 16mm B & S		

SML

**Example:** Cat. #401325-0215 is a Veri\*Lite insulator, 25 kV. Rated with standard pin and rotated end-fitting (ferrous) 15,000 lbs. SML, plus standard markings.

# Anexo B

## B.1. Técnica del ángulo de contacto

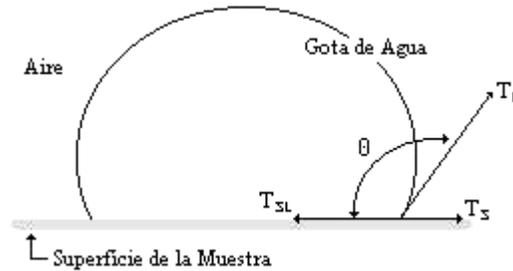
Esta técnica es muy utilizada por su simplicidad, ya que solo se basa en medir el ángulo que se forma entre la superficie de la gota y la superficie del material hidrofóbico. La capacidad de un material para formar una película de agua en su superficie o para resistir a la formación de ésta, se puede medir en términos del ángulo de contacto entre la superficie de una gota de agua y la superficie del material. Las propiedades hidrofóbicas e hidrofílicas de los materiales son determinadas por la tensión de cohesión entre el agua y la superficie del material sólido.

Una gota de líquido sobre la superficie de un sólido tomará una forma dependiendo de las propiedades de la superficie y del tipo de líquido. La magnitud del ángulo de contacto,  $\theta$ , es determinada por un equilibrio entre las fuerzas (T) de cohesión, adhesión y gravitacional en la frontera entre el líquido (L), el sólido (S) y

un segundo fluido, el cual comúnmente es el aire (a) como se muestra en la figura B.1. Este balance de fuerzas es descrito por la ecuación B.1 [43,44,45].

$$T_s - T_{SL} = T_L \times \cos \theta \quad (B.1)$$

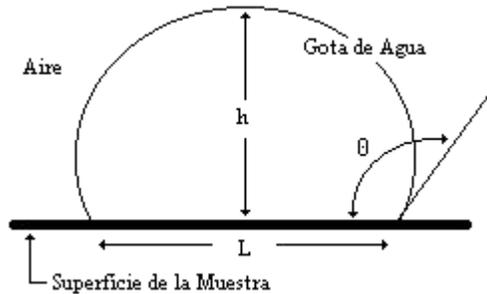
Donde  $T_S$ ,  $T_L$  y  $T_{SL}$  son las tensiones superficiales o algunas veces llamadas energías superficiales libres por unidad de área de las superficies del sólido, líquido y la interfaz sólido-líquido respectivamente. Si  $T_S$  es mayor que  $T_{SL}$ , el  $\cos \theta$  es positivo y  $\theta$  es menor que  $90^\circ$ . En este caso la superficie se humecta. Si  $T_S$  es menor que  $T_{SL}$ , el  $\cos \theta$  es negativo y  $\theta$  es un ángulo obtuso ( $> 90^\circ$ ). En este caso la superficie no será humectada. Las superficies que son fácilmente humectables son denominadas hidrofílicas, mientras que las superficies que se oponen a ser humectadas son denominadas hidrofóbicas.



**Figura B. 1.** Balance de fuerzas en la interfaz Sólido / líquido en una gota de agua sobre una superficie sólida.

El ángulo  $\theta$  puede ser calculado de acuerdo con la ecuación B.2, donde “L” es la longitud de la base de la gota, y “h” es su altura, como puede apreciarse en la figura B.2 [46].

$$\frac{2h}{L} = \tan \frac{\theta}{2} \quad (\text{B.2})$$



**Figura B. 2.** Obtención del ángulo de contacto  $\theta$  a través de la ecuación B.2.

## B.2. Adquisición de las imágenes de las gotas sobre la superficie del aislador

La adquisición es el proceso de obtención de la escena a través del censor (CCD) de una cámara de video. Para la adquisición de las imágenes de las gotas sobre la superficie del aislador se usó una cámara de video SONY modelo CCD-TRV57, la cual cuenta con un zoom de 360X, lo que nos permitió tener un buen acercamiento en las imágenes, un ejemplo de estas imágenes se muestra en la figura B.3.



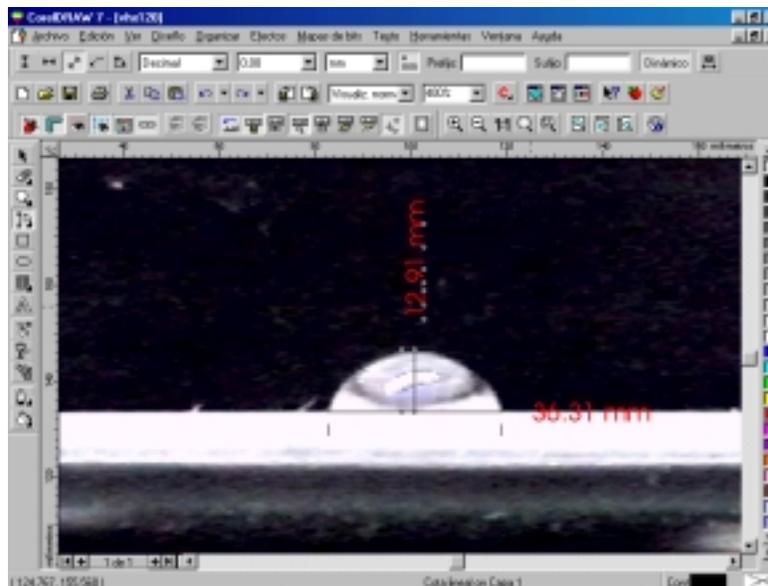
**Figura B. 3.** Ejemplo de la adquisición de una imagen de una gota de agua sobre la superficie del aislador.

### B.2.1. Digitalización de las imágenes

La digitalización de las imágenes obtenidas se llevaron a cabo empleando el software de la tarjeta de adquisición de video AIMS Video-Highway Xtreme (VHX), versión 2.20. La cual realiza el muestreo de las imágenes en el formato .JPG, con un tamaño de 640 x 480 píxeles, y con un modo de color de 24 bits de color RGB (red – green – black).

### B.2.2. Obtención del ángulo de contacto

Una vez que se digitalizaban las imágenes, estas eran analizadas por medio del software CorelDRAW 7.0, figura B.4.



**Figura B. 4.** Aspecto del software CorelDraw, se muestra la imagen de una gota sobre la superficie del aislador, donde la altura de la gota en la imagen ampliada es de 12.91 mm, con una longitud de 36.31 mm.

Este software de procesamiento de imágenes fue desarrollado por la corporación Corel Corporation, se utilizó para reforzar las imágenes obtenidas y también para poder medir la longitud y la altura de las gotas.

Una vez que se determinaba la altura y longitud de cada gota, con ayuda de la ecuación B.2 se determinaba el valor del ángulo de contacto que forma la gota con la superficie del aislador. Por lo tanto la gota de la figura B.4 tiene un ángulo de contacto:

$$\theta = \text{Tan}^{-1} \frac{2(12.91)}{36.31} \times 2 = 70.8^{\circ}$$

