

UNIVERSIDAD TECNICA  
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Ingeniería Eléctrica

---

“ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DIELECTRICO DEL  
RECUBRIMIENTO SILICONADO EN AISLADORES  
CERÁMICOS EN APLICACIONES DE ALTA TENSION  
PARA CONDICIONES SEVERAS DE  
CONTAMINACIÓN”

---

David Ignacio Inostroza Espejo

---

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
**INGENIERO ELECTRICISTA**

Profesor Guía

**Dr. Roger Schurch Brandt**

Profesor Correferente

**Dr. Johnny Montaña Chaparro**

28 de julio de 2023

# Agradecimientos

Quisiera agradecer a mis padres Ricardo y María, y a mis hermanos Nicolas y Diego por todo su amor y apoyo incondicional en los momentos difíciles. Es a ellos a quien les dedico este trabajo.

A mis amigos y compañeros de carrera, con los cuales compartí varios años de universidad, largas jornadas de estudios y esfuerzo. Finalmente, todos fueron parte de este esfuerzo para llegar al final de esta etapa.

Al Departamento de Ingeniería Eléctrica (DIE), principalmente a mis profesores guía, en especial al Dr. Roger Schurch Brandt, por su confianza, paciencia, colaboración y consejos que me ayudaron para el desarrollo de esta memoria. Además, agradecer al Dr. Johny Montaña Chaparro por su disposición cada vez que se solicitaba.

También, quiero agradecer a Cristián Andrades, Claudio Ramos y Carlos Minay, apoyos académicos del DIE, quienes estuvieron siempre en todo momento con la mejor disposición y vocación para ayudar en el laboratorio y apoyarme en todo lo que fuese necesario. Con su ayuda, todo fue diferente y más llevadero, muchas gracias.

Agradezco también al Grupo NTI que se acercó al Departamento para hacer los estudios que justificaron esta memoria. En especial a Juan Pablo Oliva por toda la disposición a la entrega de información y recursos cuando fue necesario.

Al Departamento de Ingeniería Mecánica del Campus San Joaquín, por permitirme hacer uso de la cámara de envejecimiento.

Muchas gracias.

# Resumen

Las líneas de transmisión que recorren nuestro país recorren largas distancias y se ven expuestas a diferentes características ambientales como lo es la niebla salina, climas desérticos, de tipo agrícola, entre otros. Teniendo en consideración lo anterior y la situación de escasez hídrica que estamos viviendo, se vuelve un desafío el correcto mantenimiento de los elementos de aislación de nuestro sistema eléctrico. Cada determinado tiempo deben incurrir en los lavados de aislación dado que los agentes contaminantes aumentan la probabilidad de una falla disruptiva en el sistema. Como posible solución, se han desarrollado una serie de recubrimientos que otorgan propiedades hidrofóbicas facilitando el lavado y la autolimpieza de los aisladores, dentro de los más usados podemos encontrar aceites, grasas y siliconas.

Actualmente, por su durabilidad, los más usados son los recubrimientos de silicona del tipo Room Temperature Vulcanizing (RTV). Ante esto, el Grupo NTI, representante oficial y exclusivo de CSL-Silicones, empresa canadiense que ha desarrollado su propio recubrimiento siliconado llamado Si – COAT 570<sup>®</sup>. Para analizar este producto se procede a realizar una serie de ensayos eléctricos, los que se mencionan a continuación: tensión de contorno, corrientes de fuga, grado de hidrofobicidad y medición de descargas parciales. Además de la evaluación a la resistencia a la erosión (*tracking* superficial) siguiendo en gran medida los procedimientos normados para estos ensayos. Estas pruebas se realizan evaluando distintos tipos de ambientes a los cuales se encuentran expuestos los aisladores, y con la idea de prolongar la vida útil de recubrimiento es que se evalúa su desempeño ante el envejecimiento de radiación UV.

Los resultados de los ensayos muestran que el producto Si – COAT 570<sup>®</sup>, presenta igual comportamiento en los ensayos de contorno para distintos tipos de contaminación bajo condición seca, es decir, la tensión de contorno en seco no varía dependiendo el nivel de contaminación. Los aisladores recubiertos tienen un mejor desempeño al momento de la medición de la corriente de fuga y en la clase de hidrofobicidad, el simple hecho de recubrir un aislador de vidrio templado o de cerámica, implica una reducción de las corrientes de fuga en condición seca un 9% y 16%, respectivamente.

En cuanto a la clase de hidrofobicidad, vemos que los aisladores sin recubrimiento, su clase decae desde un HC3 hasta un HC7 (de hidrofóbico a hidrofílico), mientras que los aisladores recubiertos pasan de tener una clase HC1 hasta un HC5 dependiendo del ambiente y condición del aislador. De esta forma queda en evidencia la característica hidrofóbica del recubrimiento en estudio.

De acuerdo con los resultados obtenidos de la medición de descargas parciales, permite identificar un análisis de las características de las descargas en los aisladores recubiertos, en cuanto a la atenuación de las descargas parciales y el valor de carga aparente. Esto quedó demostrado en que los aisladores recubiertos se debió aumentar más la tensión para obtener los mismos niveles de descargas que en aisladores sin recubrimiento.

Respecto a las placas sometidas al ensayo de *tracking* se puede decir que, para los ciclos de envejecimiento: 15, 30 y 45 [ $kWh/m^2$ ] existe un aumento de un 1,1% en la corriente promedio por cada ciclo. Esto da un indicio de que, el recubrimiento siliconado a medida que envejece pierde la característica de encapsulación de los agentes contaminantes y es más propenso a la formación de bandas secas, pero en comparación de aquellas placas que fueron tratadas superficialmente, lavadas y limpiadas con alcohol isopropílico, existe una recuperación de dicha característica y una reducción de dicho fenómeno.

# Abstract

The transmission lines that run through our country cover long distances and are exposed to different environmental characteristics such as salt spray, desert climates, and agricultural climates, among others. Considering the above and the situation of water scarcity that we are experiencing, the correct maintenance of the insulation elements of our electrical system becomes a challenge. Every certain time they must incur in isolation washings since the polluting agents increase the probability of a disruptive failure in the system. As a possible solution, a series of coatings have been developed that provide hydrophobic properties, facilitating washing and self-cleaning of the insulators. Among the most used we can find oils, greases and silicones.

Currently, due to their durability, the most widely used are silicone coatings of the Room Temperature Vulcanizing (RTV) type. Given this, the NTI Group, official and exclusive representative of CSL-Silicones, a Canadian company that has developed its own silicone coating called Si – COAT 570<sup>®</sup>. To analyze this product, a series of electrical tests are carried out, which are mentioned below: flashover voltage, leakage currents, degree of hydrophobicity and measurement of partial discharges. In addition to the evaluation of resistance to erosion (superficial tracking) following to a large extent the standard procedures for these tests. These tests are carried out evaluating different types of environments to which the insulators are exposed, and with the idea of prolonging the useful life of the coating, its performance against UV radiation aging is evaluated.

The results of the tests show that the product Si – COAT 570<sup>®</sup>, presents the same behavior in the flashover tests for different types of contamination under dry condition, that is, the dry flashover stress does not vary depending on the level of pollution. The coated insulators have a better performance when measuring the leakage current and in the hydrophobicity class, the simple fact of coating a tempered glass or ceramic insulator implies a reduction of the leakage currents in a dry condition. 9% and 16%, respectively.

Regarding the class of hydrophobicity, we see that the insulators without coating, their class falls from HC3 to HC7 (from hydrophobic to hydrophilic), while the coated insulators go from having a class HC1 to HC5 depending on the environment and condition. of the insulator. In this way, the hydrophobic characteristic of the coating under study is evident.

According to the results obtained from the measurement of partial discharges, it allows to identify an analysis of the characteristics of the discharges in the coated insulators, in terms of the attenuation of the partial discharges and the apparent load value. This was demonstrated in that the covered insulators had to increase the voltage more to obtain the same levels of discharges as in uncoated insulators.

Regarding the plates subjected to the tracking test, it can be said that, for the aging cycles: 15, 30 and 45 [ $kWh/m^2$ ] there is an increase of 1.1% in the average current for each cycle. This gives an indication that, as the silicone coating ages, it loses the encapsulation characteristic of contaminating agents and is more prone to the formation of dry bands, but in comparison with those plates that were superficially treated, washed and cleaned with alcohol. isopropyl, there is a recovery of said characteristic and a reduction of said phenomenon.

## Contenido

<b>Agradecimientos</b> .....	2
<b>Resumen</b> .....	3
<b>Abstract</b> .....	4
<b>Capítulo 1: Introducción</b> .....	12
<b>1.1 Motivación</b> .....	12
<b>1.2 Objetivos</b> .....	12
<b>1.3 Alcances</b> .....	13
<b>Capítulo 2: Marco teórico</b> .....	14
<b>2.1 Norma IEC 60815-1</b> .....	14
<b>2.1.1 Métodos para la selección y dimensión de un aislador</b> .....	14
<b>2.1.2 Condiciones ambientales</b> .....	16
<b>2.1.3 Evaluación de la severidad de la contaminación del sitio</b> .....	17
<b>2.1.4 Mecanismos de contorno por contaminación</b> .....	19
<b>2.2 Métodos para prevenir el contorno en aisladores</b> .....	22
<b>2.2.1 Diseño de aisladores</b> .....	22
<b>2.2.2 Lavados</b> .....	23
<b>2.2.3 Recubrimientos</b> .....	23
<b>2.3 Norma IEC 62073</b> .....	24
<b>2.3.1 Método de ángulo de contacto</b> .....	24
<b>2.3.2 Método de tensión superficial</b> .....	24
<b>2.3.3 Método <i>spray</i></b> .....	24
<b>2.4 Norma IEC 60270</b> .....	26
<b>2.4.1 Elección del procedimiento de prueba</b> .....	26
<b>2.4.2 Elección del procedimiento de prueba</b> .....	27
<b>2.4.3 Tipos de descargas parciales</b> .....	28
<b>2.5 Descripción y aspectos generales de la norma IEC 60587</b> .....	29
<b>2.5.1 Procedimiento de evaluación</b> .....	30
<b>Capítulo 3: Ensayos y procedimientos experimentales</b> .....	32
<b>3.1 Introducción</b> .....	32
<b>3.2 Objeto de prueba</b> .....	32
<b>3.3 Metodología de ensayo</b> .....	34
<b>3.3.1 Ensayos de tensión de contorno</b> .....	35

3.3.2 Ensayos de medición de corrientes de fuga.....	38
3.3.3 Verificación clase de hidrofobicidad.....	39
3.3.4 Medición de descargas parciales.....	40
3.3.5 Ensayo de tracking superficial.....	40
<b>Capítulo 4: Resultados.....</b>	<b>42</b>
4.1 Tensión de contorneo.....	42
4.2 Corrientes de fuga.....	46
4.2.1 Resultados de aisladores de vidrio en condición seca.....	46
4.2.2 Resultados aisladores de vidrio en condición húmeda.....	48
4.2.3 Resultados aisladores de cerámica en condición seca.....	49
4.2.4 Resultados aisladores de cerámica en condición húmeda.....	51
4.3 Verificación clase de hidrofobicidad.....	53
4.4 Medición de descargas parciales.....	57
4.5 Resultados.....	61
4.5.1 Resumen de las pruebas de tracking.....	71
<b>Capítulo 5: Desempeño del recubrimiento siliconado Si-COAT 570.....</b>	<b>74</b>
5.1. Introducción.....	74
5.2. Mantenimiento.....	74
<b>Capítulo 6: Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros.....</b>	<b>76</b>
6.1. Conclusiones.....	76
6.2. Trabajos futuros.....	77
<b>Bibliografía.....</b>	<b>78</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>79</b>
<b>Apéndice A: Tablas de medición de contorneo en aisladores.....</b>	<b>80</b>
<b>Apéndice B: Tablas de medición de corrientes de fuga en aisladores de vidrio templado ...</b>	<b>89</b>
<b>Apéndice C: Registro temporal y resultado de las placas de vidrio.....</b>	<b>93</b>

## Índice de Figuras

Figura 1: Severidad contaminación tipo A. Relación entre ESDD/NSDD y SPS para aisladores de suspensión. [1].....	19
Figura 2: Severidad contaminación tipo B. Relación entre SES y SPS para aisladores de referencia. [1].....	19
Figura 3: Proceso de contorneo en superficies hidrofóbicas. [4] .....	22
Figura 4: Ejemplos típicos de las superficies con clases de hidrofobicidad 1 al 6. [6] .....	26
Figura 5: Circuito de medición directa para la detección de DP. [7] .....	28
Figura 6: Circuito de medición indirecto para la detección de DP. [7].....	28
Figura 7: Disposición esquemática del ensayo. [12].....	30
Figura 8: Diagrama esquemático del circuito. [12].....	30
Figura 9: Ficha técnica aislador de vidrio clase 100 [kV].....	33
Figura 10: Ficha técnica aislador de cerámica clase 80 [kV].....	33
Figura 11: Circuito de ensayo para tensión de contorneo. ....	35
Figura 12: Efecto lluvia para condiciones de ambientes húmedos.....	36
Figura 13: Imagen referencial de la capa de contaminación en los aisladores.....	37
Figura 14: Disposición de los aisladores en cámara de envejecimiento. ....	37
Figura 15: Mapa de radiación en Chile. [11].....	38
Figura 16: Circuito de medición de corrientes de fuga. ....	39
Figura 17: Disposición física del ensayo.....	41
Figura 18: Tensión de contorneo en aisladores de vidrio templado bajo condición seca. ....	42
Figura 19: Tensión de contorneo en aisladores de vidrio templado bajo condición húmeda.....	43
Figura 20: Tensión de contorneo en aisladores cerámicos bajo condición seca. ....	44
Figura 21: Tensión de contorneo en aisladores cerámicos bajo condición húmeda.....	45
Figura 22: Corrientes de fuga en aisladores de vidrio templado bajo condición seca.....	47
Figura 23: Corriente de fuga en aisladores de vidrio templado bajo condición húmeda. ....	49
Figura 24: Corriente de fuga en aisladores cerámicos bajo condición seca. ....	50
Figura 25: Corriente de fuga en aisladores cerámicos bajo condición húmeda. ....	52
Figura 26: Hidrofobicidad en aisladores de vidrio templado en ambiente de contaminación E1. ....	53
Figura 27: Hidrofobicidad en aisladores de vidrio templado en ambiente de contaminación E4. ....	53
Figura 28: Hidrofobicidad en aisladores de vidrio templado en ambiente de contaminación E5. ....	54
Figura 29: Hidrofobicidad en aisladores de cerámica en ambiente de contaminación E1. ....	54
Figura 30: Hidrofobicidad en aisladores de cerámica en ambiente de contaminación E4. ....	55
Figura 31: Hidrofobicidad en aisladores de cerámica en ambiente de contaminación E5. ....	55
Figura 32: Hidrofobicidad en aisladores de vidrio templado luego de lavado.....	56
Figura 33: Hidrofobicidad en aisladores cerámicos luego de lavado.....	56
Figura 34: Resultados PRPD aislador de vidrio templado sin recubrimiento. ....	58
Figura 35: Resultados PRPD aislador de vidrio templado con recubrimiento.....	59
Figura 36: Resultados PRPD aislador de vidrio templado con recubrimiento envejecido.....	59
Figura 37: Resultados PRPD aislador de cerámica sin recubrimiento. ....	60
Figura 38: Resultados PRPD aislador cerámico con recubrimiento. ....	60
Figura 39: Resultados PRPD aislador cerámico con recubrimiento envejecido. ....	61
Figura 40: Registro temporal de la corriente superficial por la placa. ....	62
Figura 41: Resultado placas de cerámica sin recubrimiento. ....	62
Figura 42: Placa recubierta con el producto a estudiar. ....	63
Figura 43: Registro temporal de la corriente superficial por la placa. ....	63

Figura 44: Resultado placas de cerámica con recubrimiento. ....	64
Figura 45: : Registro de la limpieza de la carbonización de la superficie. ....	64
Figura 46: Resultados placas de cerámica con recubrimiento tras un ciclo de envejecimiento. ....	65
Figura 47: Resultados placas de cerámica con recubrimiento envejecido más tratamiento superficial. ....	65
Figura 48: Resultados placas de cerámica con recubrimiento tras dos ciclos de envejecimiento. ....	66
Figura 49: Resultados placas de cerámica con recubrimiento envejecido más tratamiento superficial. ....	66
Figura 50: Resultados placas de cerámica con recubrimiento tras tres ciclos de envejecimiento. ....	67
Figura 51: Resultados placas de cerámica con recubrimiento envejecido más tratamiento superficial. ....	67
Figura 52: Montaje de la muestra a) Vista de perfil del ensayo. b) Falla en una de las placas. ....	68
Figura 53: Registro temporal de la corriente superficial por la placa de vidrio. ....	68
Figura 54: Resultado placas de vidrio sin recubrimiento. ....	69
Figura 55: Vista de perfil placa de vidrio con recubrimiento. ....	69
Figura 56: Registro temporal de la corriente superficial por la placa. ....	70
Figura 57: Resultado placas de vidrio con recubrimiento. ....	70
Figura 58: Registro termográfico de las placas durante el ensayo. ....	73
Figura 59: Resultados placas de vidrio con recubrimiento tras un ciclo de envejecimiento. ....	93
Figura 60: Resultados placas de vidrio con recubrimiento envejecido más tratamiento superficial. ....	93
Figura 61: Resultados placas de vidrio con recubrimiento tras dos ciclos de envejecimiento. ....	94
Figura 62: Resultados placas de vidrio con recubrimiento envejecido más tratamiento superficial. ....	94
Figura 63: Resultados placas de vidrio con recubrimiento tras tres ciclos de envejecimiento. ....	95
Figura 64: Resultados placas de vidrio con recubrimiento envejecido más tratamiento superficial. ....	95

## Índice de Tablas

Tabla 1: Métodos para la selección y dimensionamiento de aisladores. [1] .....	15
Tabla 2: Ejemplos de ambientes tipos según norma IEC 60815-1. [1] .....	18
Tabla 3: Criterio para la determinación de la clase de hidrofobicidad. [6] .....	25
Tabla 4: Características Silicona Si-COAT 570. [10].....	34
Tabla 5: Caracterización de la contaminación. ....	36
Tabla 6: Resumen clases de hidrofobicidad para aisladores de vidrio templado. ....	56
Tabla 7: Resumen clases de hidrofobicidad para aisladores cerámicos. ....	57
Tabla 8: Clasificación placas de cerámica con recubrimiento al ensayo de tracking.....	71
Tabla 9: Resumen de las corrientes por las placas de cerámica con recubrimiento al ensayo de tracking.....	72
Tabla 10: Clasificación placas de vidrio con recubrimiento al ensayo de tracking. ....	72
Tabla 11: Resumen de las corrientes por las placas de vidrio con recubrimiento al ensayo de tracking.....	73
Tabla 12: Tensión de contorneo en aisladores de vidrio templado en caso base. ....	80
Tabla 13: Tensión de contorneo en aisladores de vidrio templado en ambiente E1. ....	80
Tabla 14: Tensión de contorneo en aisladores de vidrio templado en ambiente E4. ....	81
Tabla 15: Tensión de contorneo en aisladores de vidrio templado en ambiente E5. ....	81
Tabla 16: Tensión de contorneo en aisladores de vidrio templado en ambiente lluvia.....	82
Tabla 17: Tensión de contorneo en aisladores de vidrio templado en ambiente salino. ....	82
Tabla 18: Tensión de contorneo en aisladores de vidrio templado en ambiente E1. ....	83
Tabla 19: Tensión de contorneo en aisladores de vidrio templado en ambiente E4. ....	83
Tabla 20: Tensión de contorneo en aisladores de vidrio templado en ambiente E5. ....	84
Tabla 21: Tensión de contorneo en aisladores cerámicos en caso base. ....	84
Tabla 22: Tensión de contorneo en aisladores cerámicos en ambiente E1. ....	85
Tabla 23: Tensión de contorneo en aisladores cerámicos en ambiente E4. ....	85
Tabla 24: Tensión de contorneo en aisladores cerámicos en ambiente E5. ....	86
Tabla 25: Tensión de contorneo en aisladores cerámicos en ambiente lluvia.....	86
Tabla 26: Tensión de contorneo en aisladores cerámicos en ambiente salino. ....	87
Tabla 27: Tensión de contorneo en aisladores cerámicos en ambiente E1. ....	87
Tabla 28: Tensión de contorneo en aisladores cerámicos en ambiente E4. ....	88
Tabla 29: Tensión de contorneo en aisladores cerámicos en ambiente E5. ....	88
Tabla 30: Medición de corrientes de fuga en aisladores de vidrio templado caso base. ....	89
Tabla 31: Medición de corrientes de fuga en aisladores de vidrio templado en ambiente E1. ....	89
Tabla 32: Medición de corrientes de fuga en aisladores de vidrio templado en ambiente E4. ....	89
Tabla 33: Medición de corrientes de fuga en aisladores de vidrio templado en ambiente E5. ....	89
Tabla 34: Medición de corrientes de fuga en aisladores de vidrio templado en ambiente lluvia.....	90
Tabla 35: Medición de corrientes de fuga en aisladores de vidrio templado en ambiente salino. ....	90
Tabla 36: Medición de corrientes de fuga en aisladores de vidrio templado en ambiente E1. ....	90
Tabla 37: Medición de corrientes de fuga en aisladores de vidrio templado en ambiente E4. ....	90
Tabla 38: Medición de corrientes de fuga en aisladores de vidrio templado en ambiente E5. ....	91
Tabla 39: Medición de corrientes de fuga en aisladores cerámicos caso base. ....	91
Tabla 40: Medición de corrientes de fuga en aisladores cerámicos en ambiente E1. ....	91
Tabla 41: Medición de corrientes de fuga en aisladores cerámicos en ambiente E4. ....	91
Tabla 42: Medición de corrientes de fuga en aisladores cerámicos en ambiente E5. ....	91
Tabla 43: Medición de corrientes de fuga en aisladores cerámicos en ambiente lluvia.....	92

Tabla 44: Medición de corrientes de fuga en aisladores cerámicos en ambiente salino. ....	92
Tabla 45: Medición de corrientes de fuga en aisladores cerámicos en ambiente E1. ....	92
Tabla 46: Medición de corrientes de fuga en aisladores cerámicos en ambiente E4. ....	92
Tabla 47: Medición de corrientes de fuga en aisladores cerámicos en ambiente E5. ....	92

## Abreviaturas y Definiciones

AT:	Alta tensión.
BT:	Baja tensión.
CA:	Corriente alterna.
CC:	Corriente continua.
IEC:	International Electrotechnical Commission.
IEEE:	Institute of Electrical and Electronics Engineers.
S/E:	Subestación.
SEN:	Sistema eléctrico nacional.
ST:	Sistema de transmisión.
RTV:	Room Temperature Vulcanizing.
ATH:	Trihidrato de alúmina.
<i>Flashover:</i>	Contorneo.
SPS:	Gravedad de contaminación del sitio.
ESDD:	Densidad de depósito equivalente de sal.
NSDD:	Densidad de depósito no soluble.
DDGIS:	Índice de medición de depósitos de polvo - soluble.
DDGIN:	Índice de medición de depósitos de polvo - no soluble.
SES:	Salinidad equivalente del sitio.
HVIC:	Recubrimiento de aislación en alta tensión.
HC:	Clasificación de hidrofobicidad.
DP:	Descargas parciales.
PRPD:	Patrón de Descarga con Resolución de Fase.

# Capítulo 1: Introducción

## 1.1 Motivación

Uno de los elementos estructurales de importancia en las redes de transmisión y distribución de energía, son los aisladores presentes en líneas de alta tensión. Estos elementos se ubican a lo largo de las estructuras en las líneas eléctricas, cumpliendo una doble función como lo es el soporte del conductor y aislar el conductor energizado de la torre.

Los aisladores eléctricos se encuentran expuestos a distintas condiciones ambientales tales como: radiación, humedad y contaminación, factores que inciden en las descargas superficiales y en la probabilidad de un contorneo a través de la superficie del aislante. Estos elementos de aislación deben calcularse para soportar la tensión del conductor, contaminación de la zona y sobretensiones evitando el fenómeno de contorneo o “*flashover*” que puede provocar que una línea salga de servicio.

Para prevenir este tipo de fallas se ha apuntado a la prevención mediante el mantenimiento preventivo, esto dado que la contaminación más la humedad aumentan la probabilidad de un contorneo al afectar directamente a la conductividad superficial de la aislación. Con el fin de disminuir los agentes contaminantes, se mantiene por lo general un plan de lavado de los aisladores de manera periódica dependiendo el nivel de contaminación de la zona, y para prolongar el período libre de mantenimiento es que han surgido en el mercado una serie de tratamientos para la superficie.

Sin embargo, la principal pregunta a responder es: ¿Cuándo se debe realizar un mantenimiento? En este campo existe la mayor cantidad de dudas al respecto, esto debido a que diagnosticar el estado de un conjunto de aisladores en base a las variables que inciden en su funcionamiento es una tarea compleja, precisamente por la cantidad de factores externos presentes en el problema. A pesar de la existencia de revisiones del conocimiento general respecto a la contaminación en aisladores, los factores causales del fenómeno de ruptura dieléctrica o del diseño específico de aisladores expuestos a agentes contaminantes y altas tensiones [1], no existe una herramienta que permita anteponerse con exactitud a una posible falla, de manera que cada empresa trabaja acorde a sus estándares y recursos para aplicar un enfoque de mantenimiento concreto.

## 1.2 Objetivos

- Objetivo general:

Analizar el comportamiento dieléctrico del recubrimiento siliconado tipo RTV sobre aisladores cerámicos para condiciones severas de contaminación mediante ensayos eléctricos y su evolución en el tiempo para considerar en el diseño y mantenimiento de aisladores.

- Objetivos específicos:

- a. Implementar un set de pruebas experimentales que permita evaluar el desempeño del recubrimiento siliconado y su evolución para condiciones severas de contaminación.
- b. Identificar las variables que se relacionan con el estado del recubrimiento y su nivel de envejecimiento a partir de los resultados obtenidos en los ensayos.
- c. Proponer un criterio de mantenimiento de los aisladores cerámicos siliconados en cuanto a pertinencia de lavado y periodicidad de este a través de las variables encontradas del set de pruebas.
- d. Estimar el impacto del uso de recubrimientos siliconados en los parámetros de diseño de aisladores en cuanto a la determinación de distancias de fuga relacionados a nivel de contaminación de un sitio.

### **1.3 Alcances**

El trabajo de la presente memoria tiene por alcance determinar el desempeño del recubrimiento siliconado Si – COAT 570<sup>®</sup> bajo una serie de ensayos eléctricos con el fin de tener una idea de su uso en aplicaciones de alta tensión, cabe mencionar que estos resultados no representan una certificación del producto bajo estudio.

Con el propósito de determinar el desempeño del recubrimiento siliconado, en primera instancia, se realizan ensayos de contorneo a los aisladores de cerámica y de vidrio recubiertos con el producto bajo estudio y el impacto del envejecimiento acelerado mediante radiación UV. En estos ensayos, la variables a analizar son la tensión de contorneo y corrientes de fuga de los aisladores, donde a su vez estos resultados serán contrastados con aisladores sin recubrimiento.

En paralelo, y con muestras sometidas a un envejecimiento acelerado en el laboratorio de radiación solar de la Universidad Técnica Federico Santa María, Campus San Joaquín, se efectuarán ensayos de *tracking* superficial para determinar si el recubrimiento contribuye a la resistencia de formación de caminos conductores.

# Capítulo 2: Marco teórico

## 2.1 Norma IEC 60815-1

IEC 60815-1: “Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in pollution condition” [1], o en su traducción al español “Selección y dimensionamiento de aisladores de alta tensión previstos para uso en condiciones de contaminación” que como su propio nombre lo dice, da una guía de como escoger el mejor aislador ante condiciones de contaminación. De la primera parte de esta norma se extraen definiciones, información y principios generales que sirven al lector como introducción al estudio que se realiza en el presente capítulo.

### 2.1.1 Métodos para la selección y dimensión de un aislador

Para seleccionar un determinado tipo de aislador, según los requisitos del sistema y las condiciones ambientales, se recomiendan tres métodos. La aplicación de uno u otro depende de los datos disponibles, el tiempo de ensayo y la economía involucrada en el proyecto.

#### Método 1

En este método, las interacciones entre el medio ambiente y el aislador están bien representadas en una línea operativa o una subestación. También se pueden representar en una estación de prueba.

Se puede considerar aceptable un período de funcionamiento de cinco a diez años. Puede ser un período de tiempo más largo o corto, según la frecuencia y la gravedad de los eventos climáticos y de contaminación.

Para estaciones de prueba, se puede considerar típico un período de investigación de dos a cinco años. Variará dependiendo de la metodología de prueba y la gravedad de la contaminación.

#### Método 2

Para el segundo método, las interacciones entre medio ambiente y el aislador no pueden representarse completamente mediante pruebas de laboratorio.

Para medir la gravedad de contaminación del sitio, se requiere de períodos de al menos un año. Para estimar la gravedad de contaminación del sitio, es necesario realizar una investigación del clima y el medio ambiente. Se requiere identificar y analizar todas las posibles fuentes de contaminación. La estimación no es un proceso inmediato y requiere de varias semanas o meses.

#### Método 3

Con respecto al tercer método, las interacciones entre el medio ambiente y el aislador solo pueden ser representadas en un grado limitado por factores de corrección. Es un método solo de medición y diseño, por tanto, excluye las pruebas.

El método 3 puede ser rápido y económico para el proceso de selección y dimensionamiento, pero puede conducir a una subestimación de la gravedad de contaminación del sitio o a una solución más costosa debido al excesivo diseño.

Se recomienda siempre, en la medida que la circunstancia lo permita, adoptar los métodos 1 o 2. Los tres enfoques se presentan en la Tabla 1 que permiten la selección y dimensionamiento del aislador.

	<b>Método 1 (Experiencia pasada)</b>	<b>Método 2 (Medición y pruebas)</b>	<b>Método 3 (Medición y diseño)</b>								
<b>Método</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se utiliza experiencia de campo o estaciones de prueba existentes en el sitio, sitio cercano o condiciones similares.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Medir/estimar la gravedad de la contaminación del sitio.</li> <li>Seleccionar los aisladores candidatos.</li> <li>Escoger las pruebas de laboratorio.</li> <li>Verificar y ajustar los aisladores candidatos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Medir/estimar la gravedad de la contaminación del sitio.</li> <li>Utilizar estos datos para escoger el tipo y tamaño del aislamiento según su perfil y distancia de fuga.</li> </ul>								
<b>Datos de entrada</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Requerimientos del sistema.</li> <li>Condiciones ambientales.</li> <li>Parámetros del aislador.</li> <li>Desempeño histórico.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Requerimientos del sistema.</li> <li>Condiciones ambientales.</li> <li>Parámetros del aislador.</li> <li>Tiempo y recursos disponibles.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Requerimientos del sistema.</li> <li>Condiciones ambientales.</li> <li>Parámetros del aislador.</li> <li>Tiempo y recursos disponibles.</li> </ul>								
<b>Decisiones</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>¿La aislación existente satisface los requisitos del proyecto y está destinado a utilizar el mismo diseño?</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>¿Hay tiempo para medir la gravedad de contaminación del sitio?</li> </ul>								
	<p style="text-align: center;"><b>SI</b> Utilice el mismo diseño de aislación.</p>	<p style="text-align: center;"><b>NO</b> Utilice un diseño, material o tamaño diferentes.</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;"><b>SI</b> Medir</th> <th style="text-align: center;"><b>NO</b> Estimar</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2"> <ul style="list-style-type: none"> <li>El tipo de contaminación determina el método de prueba de laboratorio.</li> <li>La gravedad de la contaminación del sitio determina los valores de prueba.</li> </ul> </td> </tr> </tbody> </table>	<b>SI</b> Medir	<b>NO</b> Estimar	<ul style="list-style-type: none"> <li>El tipo de contaminación determina el método de prueba de laboratorio.</li> <li>La gravedad de la contaminación del sitio determina los valores de prueba.</li> </ul>		<table border="1"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;"><b>SI</b> Medir</th> <th style="text-align: center;"><b>NO</b> Estimar</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2"></td> </tr> </tbody> </table>	<b>SI</b> Medir	<b>NO</b> Estimar	
<b>SI</b> Medir	<b>NO</b> Estimar										
<ul style="list-style-type: none"> <li>El tipo de contaminación determina el método de prueba de laboratorio.</li> <li>La gravedad de la contaminación del sitio determina los valores de prueba.</li> </ul>											
<b>SI</b> Medir	<b>NO</b> Estimar										
<b>Proceso de selección</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Si es necesario, utilice el perfil y la distancia de fuga de aquí en adelante para adaptar los parámetros del aislamiento existente a la nueva elección utilizando el método 2 o 3.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Seleccionar los candidatos.</li> <li>Probar si los datos de contaminación no están disponibles para los candidatos.</li> <li>Si es necesario, ajuste la selección y tamaño de acuerdo con los resultados de las pruebas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Utilice el tipo de contaminación y clima para seleccionar los perfiles apropiados.</li> <li>Utilizar el nivel de contaminación y los factores de corrección para el diseño del perfil y el material para dimensionar el aislamiento.</li> </ul>								
<b>Precisión</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>La selección tiene una buena precisión.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Una selección con una precisión que varía según el grado de errores y/o atajos en la evaluación de la gravedad de contaminación del sitio y con los supuestos y/o limitaciones de las pruebas de laboratorio.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Una solución posiblemente sobre o subdimensionada en comparación a los otros dos métodos.</li> <li>Una selección con una precisión que varía según el grado de errores y/o atajos en la evaluación de la gravedad de contaminación del sitio y la aplicabilidad de los factores de corrección seleccionados.</li> </ul>								

Tabla 1: Métodos para la selección y dimensionamiento de aisladores. [1]

De la tabla anterior se desprende la importancia que tiene realizar un correcto proceso de evaluación de las condiciones ambientales a la cual estará expuesta la aislación, ya que, dependiendo de la

metodología utilizada, el candidato seleccionado puede no ser el más apropiado, afectando directamente su operación y/o desempeño dieléctrico.

### **2.1.2 Condiciones ambientales**

Hay dos tipos básicos principales de contaminación de aisladores que pueden conducir a contorneo: La contaminación Tipo A y Tipo B. También pueden surgir combinaciones de ambas.

#### **Contaminación Tipo A**

Corresponde a depósitos sólidos con componentes no solubles en la superficie del aislador. Estos depósitos se vuelven conductores en presencia de humedad. La mejor forma de caracterizar este tipo de contaminación es por medio de las mediciones de la densidad equivalente de depósitos de sal (ESDD) sobre la densidad de depósitos de sal no solubles (NSDD), de igual forma con el índice de depósitos de suciedad soluble (DDGIS) sobre el índice de depósitos de suciedad no soluble (DDGIN). La densidad de depósitos de sal de una capa de contaminación puede ser evaluada por medio de la conductividad superficial bajo condiciones de humedad controlada.

La contaminación tipo A se encuentra comúnmente asociada a zonas de interior, desierto o áreas con polución industrial. En algunos casos surge en zonas costeras donde se acumulan capas de sal seca que se humedecen rápidamente por el rocío, niebla o llovizna. Este tipo de contaminación cuenta con dos componentes principales, la contaminación soluble que forma una capa conductora al humedecerse, y la contaminación no soluble que forma una capa adherente para la contaminación soluble, estas se definen como sigue:

- Contaminación soluble:

La contaminación soluble se subdivide en sales altamente solubles, estas se disuelven fácilmente en agua, y sales bajamente solubles, que son difícilmente solubles. La contaminación es medida en términos de la densidad de depósitos de sal (ESDD) en  $[mg/cm^2]$ .

- Contaminación no soluble:

Algunos ejemplos de contaminación no soluble son el polvo, la arena, la arcilla, aceites, entre otros. La contaminación no soluble es medida en términos de la densidad de depósitos no solubles (NSDD) en  $[mg/cm^2]$ .

#### **Contaminación Tipo B**

La contaminación de este tipo se caracteriza por contar con líquidos electrolitos con nula o muy baja cantidad de componentes no solubles depositados en el aislador. Este tipo de contaminación puede ser relacionada con la conductancia o con las mediciones de corrientes de fuga del aislador o cadena de aisladores.

Este tipo de contaminación se encuentra asociada a áreas costeras donde el agua con sal o niebla conductora es depositada en la superficie del aislador. Otros ejemplos de contaminación tipo B son producto de la fumigación de cultivos, niebla con químicos y la lluvia ácida.

La severidad de la contaminación en el sitio, para los casos en que se contamina artificialmente en ensayos de laboratorio, se mide en base a:

- ESDD y NSDD para métodos de capa sólida.
- Salinidad de niebla  $[kg/m^3]$  para métodos de niebla salina.

### **2.1.3 Evaluación de la severidad de la contaminación del sitio**

La severidad del grado de contaminación corresponde al(los) valor(es) máximo(s) de ya sea ESDD y NSDD, SES, o DDGIS y DDGIN. Las mediciones son según el procedimiento que indica la norma en intervalos de tiempo determinado, que, para el caso bajo estudio, corresponde a intervalos de meses. En el caso de presentarse lluvia durante el período de medición, estas deberán repetirse en un intervalo apropiado de tal forma que se pueda determinar el efecto del lavado natural en los aisladores, por ende, la SPS corresponderá al mayor valor registrado durante esta serie de mediciones.

La evaluación del grado de contaminación del sitio se recomienda realizar de la siguiente forma, en orden de confianza decreciente:

- 1) De mediciones in situ.
- 2) De información sobre el comportamiento de los aisladores de línea y subestaciones ya existentes.
- 3) De simulaciones que calculan el nivel de contaminación a partir del clima y otros parámetros ambientales.
- 4) Si no es posible realizar alguna de las maneras anteriores, se propone evaluar cualitativamente a partir de las indicaciones de la Tabla 1.

Adicionalmente, para efectos de normalización, caracterizar la severidad de la contaminación cualitativamente en cinco clases:

1. *Very light* (Muy leve).
2. *Light* (Leve).
3. *Medium* (Moderado).
4. *Heavy* (Alta).
5. *Very heavy* (Muy alta).

Ejemplo	Descripción del ambiente típico
E1	>50 km <sup>a</sup> de cualquier mar, desierto o tierra seca abierta >10 km de fuentes de contaminación artificial <sup>b</sup> Dentro de una distancia más corta de la mencionada arriba, en relación con las fuentes de contaminación, pero: El viento predominante no proviene directamente desde la fuente de contaminación y/o lavado mensual regular por lluvia
E2	10-50 km <sup>a</sup> de cualquier mar, desierto o tierra abierta seca 5-10 km de cualquier fuente de contaminación artificial <sup>b</sup> Dentro de una distancia más corta a la anteriormente mencionada en E1, pero: El viento predominante no proviene directamente desde la fuente de contaminación y/o lavado mensual regular por lluvia
E3	3-10 km <sup>a</sup> de cualquier mar, desierto o tierra abierta seca 1-5 km de cualquier fuente de contaminación artificial <sup>b</sup> Dentro de una distancia más corta a la anteriormente mencionada, pero: El viento predominante no proviene directamente desde la fuente de contaminación y/o lavado mensual regular por lluvia
E4	Más lejos de la fuente de contaminación mencionada en E3, pero La niebla densa o llovizna que ocurre a menudo después de una larga acumulación de contaminación en seco y/o ocurre lluvia con conductividad alta y/o hay un nivel alto de NSDD, entre 5 a 10 veces el ESDD
E5	Dentro de 3 km <sup>c</sup> de cualquier mar, desierto o tierra abierta seca Dentro de 1 km de una fuente de contaminación artificial <sup>b</sup>
E6	Más lejos de la fuente de contaminación mencionada en E5, pero La niebla densa o llovizna que ocurre a menudo después de una larga acumulación de contaminación en seco y/o hay un nivel alto de NSDD, entre 5 a 10 veces el ESDD
E7	Dentro de la misma distancias de las fuentes de contaminación especificadas como alta y: Sometidas directamente al rociado matino o niebla salina densa Sometidas directamente a contaminación de alta conductividad, o polvo tipo cemento de alta densidad sujetos a humedad frecuente por niebla o llovizna Áreas desérticas con una rápida acumulación de arena y sal bajo condensación regular
<sup>a</sup> Durante una tormenta, el nivel de ESDD puede alcanzar un nivel de contaminación mayor. <sup>b</sup> En presencia de grandes ciudades, la influencia de la distancia especificada para el mar, desierto y tierra será mayor. <sup>c</sup> Dependiendo de la topografía del área costera y de la intensidad del viento.	

Tabla 2: Ejemplos de ambientes tipos según norma IEC 60815-1. [1]

Para la contaminación tipo A, podemos identificar el nivel de contaminación según el rango de valores de la Figura 1, referente a aisladores de suspensión. Estos valores se obtienen de la medición en campo, experiencia y en ensayos con contaminación. Este índice corresponde al máximo valor obtenido en mediciones regulares durante un período de tiempo de a lo menos un año, dichos índices son solo aplicables a aisladores de referencia y tienen en consideración su propiedades de acumulación específica.

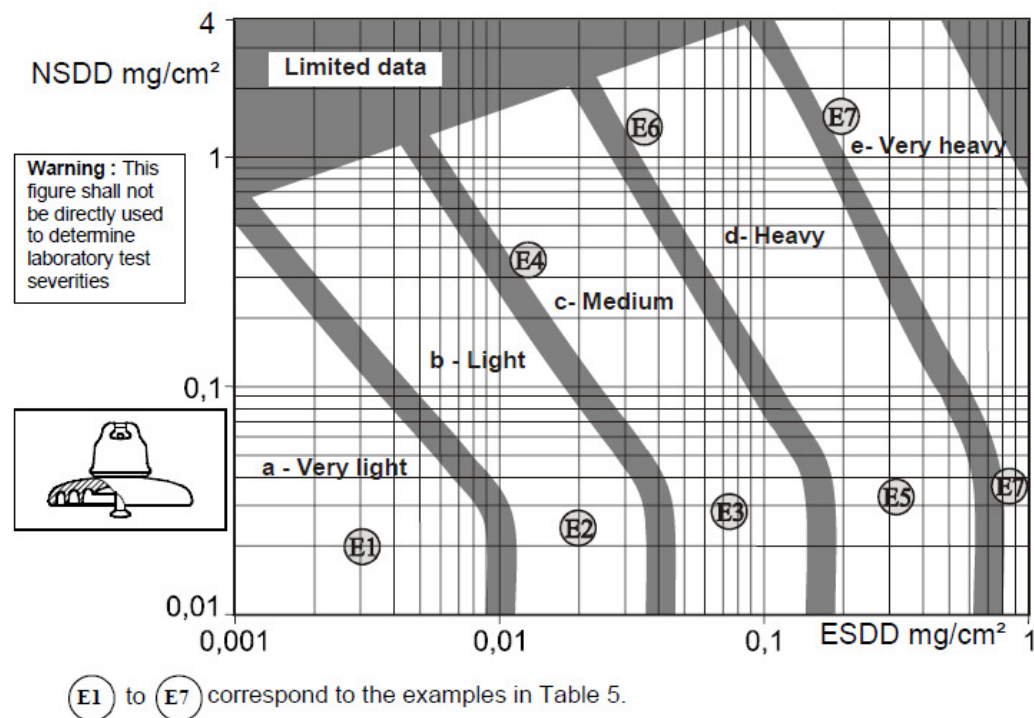


Figura 1: Severidad contaminación tipo A. Relación entre ESDD/NSDD y SPS para aisladores de suspensión. [1]

Para las contaminación tipo B, la Figura 2 muestra la relación entre las mediciones de SES y la clase de SPS para ambos tipos de aisladores de referencia. Los valores que muestran la Figura 2 son basados en la contaminación natural que se deposita en los aisladores.

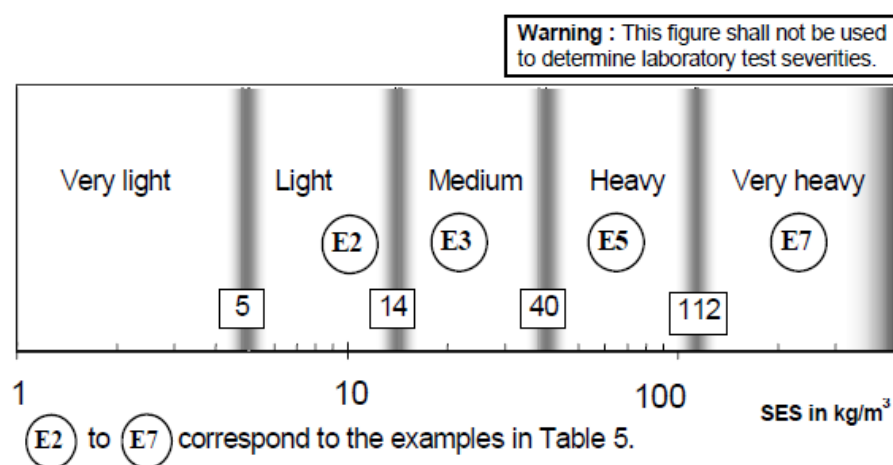


Figura 2: Severidad contaminación tipo B. Relación entre SES y SPS para aisladores de referencia. [1]

#### 2.1.4 Mecanismos de contorneo por contaminación

A continuación, se presenta la explicación de los mecanismos de contorneo según el tipo de contaminación de acuerdo con el Anexo B de la norma IEC 60815-1.

##### 2.1.4.1 Descripción del mecanismo de contorneo por contaminación tipo A

Para entender el método de contaminación tipo A en fenómenos de “flashovers” se dividirá el proceso en seis etapas. El proceso de contorneo estará en función de las propiedades aislantes en la superficie del aislador, donde son reconocidas dos tipos de estas: hidrófilas o hidrófobas; una superficie hidrófila que poseen afinidad por el agua se encuentra generalmente asociada a los aisladores de vidrio y cerámica, mientras que una superficie hidrófoba caracterizada por repeler el agua está asociada a aisladores poliméricos, especialmente los de caucho de silicona. En condiciones de humedad, las superficies hidrofílicas se mojarán por completo por lo que una capa electrolítica cubrirá el aislador.

En cambio, en las superficies hidrófobas, se formarán gotas de agua en la superficie bajo las mismas condiciones.

El proceso para las superficies hidrófilas de los aisladores de materiales cerámico es:

Fase 1: El aislador es cubierto por una capa de contaminación, si la contaminación no es conductora en condiciones secas, es decir de una alta resistencia, se hace necesario un proceso de humectación para que se produzca el fenómeno del contorneo.

Fase 2: La superficie contaminada se humedece, esta humectación puede ser por absorción de humedad, condensación y precipitaciones. Una lluvia fuerte puede lavar parte o la totalidad de los depósitos sin iniciar la descarga disruptiva, o también, puede iniciar un contorneo al formar puentes entre los faldones del aislador. La absorción de humedad puede ocurrir en períodos de alta humedad relativa (>75 % HR) cuando la temperatura del aislador y la del ambiente son la misma. También puede ocurrir condensación cuando la humedad en el aire es menor al punto de rocío, situación que por lo general ocurre durante el amanecer.

Fase 3: Cuando el aislador se encuentra bajo sollicitación de tensión (energizado), se forma una capa de contaminación conductora, las corrientes de fuga fluyen en la superficie y estas comienzan en efecto de calentamiento, a los pocos ciclos de frecuencia industrial (50 [Hz]) se forman bandas secas en la superficie contaminada. Esto ocurre en las zonas donde la densidad de corriente sea mayor.

Fase 4: La capa de contaminación nunca se seca uniformemente, y en algunos lugares la parte conductora es interrumpida por bandas secas que interrumpen el flujo de corrientes de fuga.

Fase 5: La tensión de fase aparece a través de múltiples bandas secas (las cuales son de unos pocos milímetros de ancho) donde producen descargas en el aire, formando puentes entre las bandas secas mediante arcos en serie con la resistencia de la porción conductora y húmeda de la capa de contaminación. Esto genera un aumento de las corrientes de fuga cada vez que se produzca una descarga en este tipo de banda.

Fase 6: Si la parte conductora sigue húmeda y con resistencia baja, los arcos que forman puentes entre las bandas secas se sostienen, y finalmente continúan extendiéndose a lo largo del aislador. Este arco disminuye la resistencia en serie, incrementando la corriente y aumentando la cantidad de puentes en la superficie del aislador. Finalmente, estos puentes se terminan por completar y se genera una falla desde la línea a tierra (contorneo o “*flashover*”).

A medida que aumentan las corrientes de fuga, mayor será la probabilidad de un “*flashover*”, por lo tanto, la resistencia superficial será determinante para la magnitud de la corriente. Esta resistencia se puede calcular suponiendo una distribución y humectación uniforme de la contaminación, usando el factor de forma.

#### **2.1.4.2 Descripción del mecanismo de contorneo por contaminación tipo B**

Los mecanismos de contorneo por contaminación tipo B se subdividen en dos, los cuales son:

##### **1. Niebla conductora:**

La definición de contaminación instantánea tipo B se da cuando se deposita rápidamente una capa de alta conductividad en la superficie del aislador, dando como resultado un aislador que cambia desde un estado limpio y de baja conductividad a un “*flashover*” de corta duración, que posteriormente retoma la baja conductividad una vez sucedido el evento.

La capa conductora de la contaminación instantánea se deposita como un electrolito líquido, como el rociado salino, niebla salina o niebla ácida industrial. Las áreas más críticas son aquellas situadas cerca de plantas químicas, o las cercanas a las costas.

##### **2. Excremento de pájaro:**

El excremento de pájaro es un tipo particular de contaminación tipo B, este forma un camino altamente conductivo (20-40 [ $\Omega/m$ ]) de una longitud tal, que el espacio entre el aire se ve lo

suficientemente reducido para causar un “*flashover*”. En esta caso, la geometría del aislador y sus características juegan una función pequeña, o ninguna, y la mejor solución suele ser medidas para disuadir a la fauna local.

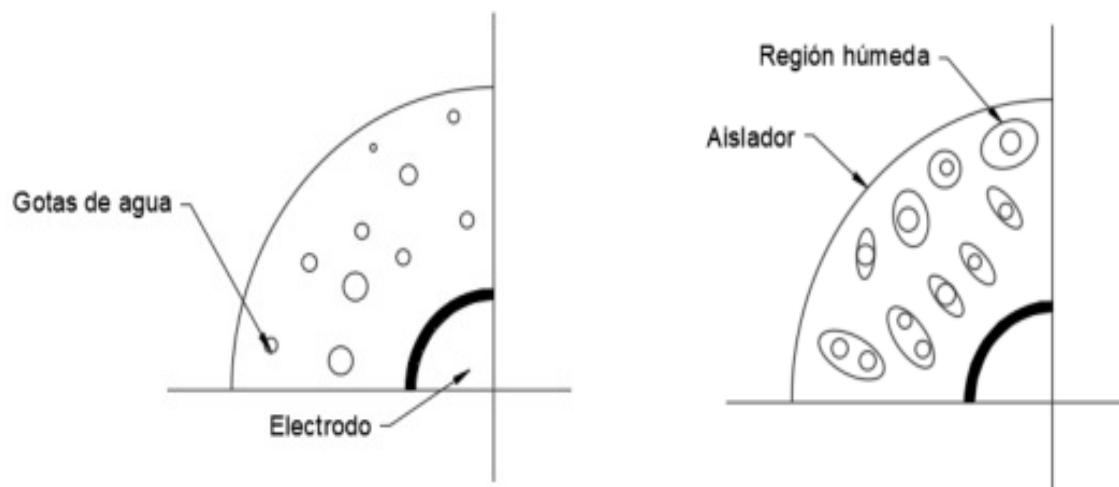
#### **2.1.4.3 Mecanismo de contorneo por contaminación sobre superficies hidrofóbicas**

Debido a la naturaleza dinámica de las superficies hidrófobas, dan como resultado una compleja interacción con la contaminación. En la actualidad no existe un modelo adaptado para los contorneos por contaminación en superficies hidrofóbicas inclusive su mecanismo es distinto. En las superficies hidrofóbicas bajo condiciones húmedas se producen gotas en vez de una capa electrolítica continua, más bien, la contaminación se propaga a través de una delgada capa de aceite y que es disuelta en las gotas de agua, estas se vuelven conductoras tal como se aprecia en las imágenes de la Figura 3.

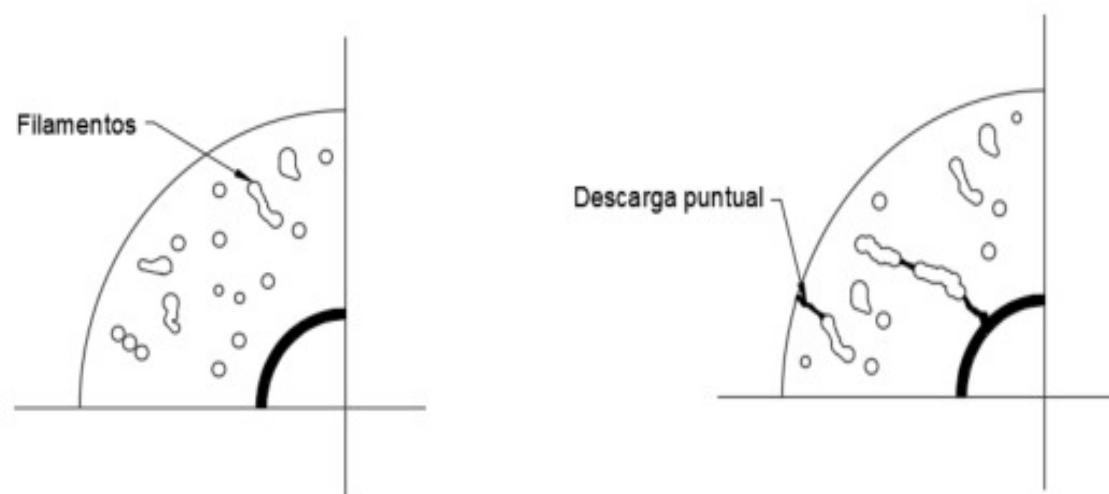
En las zonas con gotas de agua se produce un aumento de la conductividad, estos continúan propagándose hasta el punto en que se juntan con otras áreas conductoras donde comienzan a fluir corrientes de fuga en varios caminos diferentes. El efecto Joule provoca que se sequen algunas áreas provocando un equilibrio entre evaporación y humectación, aquí la baja conductividad en la superficie polimérica persiste entre áreas húmedas.

Las gotas al interactuar con un campo eléctrico comienzan a deformarse alargándose y aplanándose en forma de filamentos a través de la superficie como se muestra en la Figura 3.c, este fenómeno comienza a ocurrir a partir del umbral de los 5,8 [kV/cm] [2]. El proceso produce descargas localizadas distribuidas de manera aleatoria a lo largo de la superficie del aislador tal como se indica en la Figura 3.d.

Posteriormente, las gotas siguen alargándose de tal manera de formar áreas húmedas que eventualmente harán cortocircuito entre las partes conductoras, finalmente un arco atraviesa a lo largo de la superficie conductora formando un “*flashover*” como se muestra en la Figura 4.f [3].

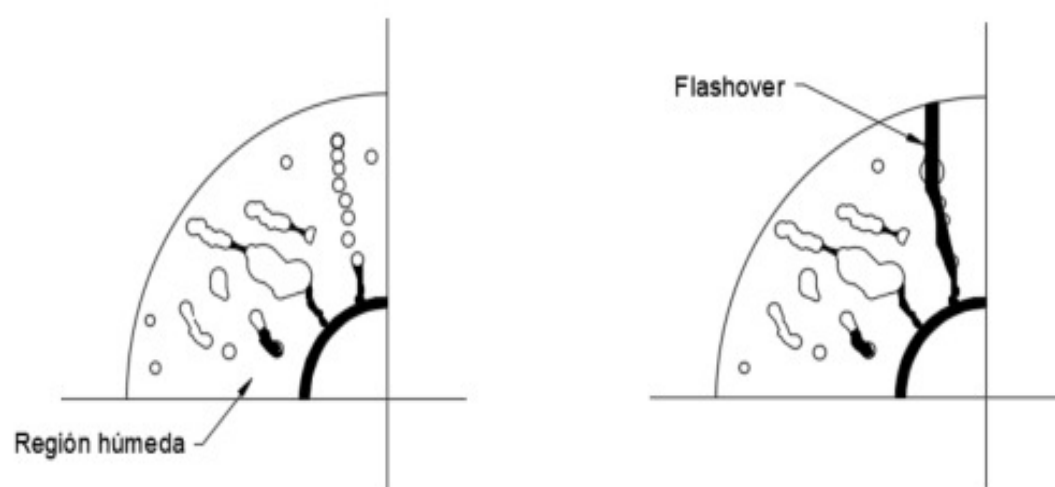


a) Migración de la contaminación a las gotas. b) Movimiento del agua hacia la contaminación seca.



c) Formación de filamentos

d) Intensidad del campo eléctrico genera descargas.



e) Formación de áreas húmedas.

f) Arco atraviesa la superficie causando el flashover.

Figura 3: Proceso de contorneo en superficies hidrofóbicas. [4]

## 2.2 Métodos para prevenir el contorneo en aisladores

Se han desarrollado diferentes métodos para prevenir el contorneo de los aisladores mediante la disminución y retardo del efecto de la contaminación en las cadenas de aisladores, dentro de los cuales se pueden mencionar: el lavado periódico de los aisladores, aplicación de grasas, sobredimensionamiento, diseño e implementación de nuevos materiales, entre otros.

Los diversos métodos y sus éxitos se describen brevemente a continuación:

### 2.2.1 Diseño de aisladores

Desde el desarrollo de aisladores cerámicos, la técnica de diseño de aisladores para condiciones contaminadas ha implicado la modificación del tamaño, espacio y forma de los aislantes o secciones de los aisladores con el fin de obtener la mayor distancia de fuga y distancia de fuga protegida por unidad de longitud del aislador como sea posible. Este enfoque ha producido diseños tales como el aislador de cubeta de niebla para líneas de distribución, aisladores aerodinámicos y de suspensión tipo niebla para líneas de transmisión, y aisladores de poste para estaciones que tienen numerosos cobertizos.

La distancia de fuga ha sido el parámetro de diseño más importante, aunque también son importantes otros parámetros, como el espaciado entre cobertizos, la forma y el diámetro. Por otro lado, el tamaño, la forma y las características de formación de la cerámica están sujetos a limitaciones. Sin embargo, estas limitaciones se han mejorado con la adopción del uso de aisladores de vidrio templado.

Muchos diseños de aisladores se han desarrollado a lo largo de los años; sin embargo, hoy no existen estándares que cubran el diseño o el rendimiento de los aislantes para entornos contaminados, pero si

se da una guía de como seleccionar y dimensionar los aisladores más adecuados para diferentes condiciones ambientales (ver Tabla 1).

La experiencia con varios diseños ha variado mucho dependiendo de las condiciones de la aplicación. En términos generales, los aisladores aún requieren limpieza para evitar el contorneo, aunque con una frecuencia reducida. La guía principal parece ser la instalación de cadenas más largas o aisladores tipo poste más altos para ubicaciones más sucias.

### **2.2.2 Lavados**

El lavado de los aisladores ha demostrado ser una forma efectiva de eliminar la contaminación suelta de las superficies del aislador con la idea de alargar la vida útil y evitar “*flashovers*”. El lavado con agua a presión es muy efectivo para eliminar la sal y otras formas de contaminantes que no se adhieren bien a las superficies del aislador. Aunque hace algunos años el lavado con agua era un método de mantenimiento económico, este no es el caso hoy en día en muchas partes del mundo. Idealmente, los aisladores deben lavarse con agua antes de alcanzar el nivel crítico de contaminación. Como no hay medios disponibles para determinar con precisión cuándo se debe realizar el lavado, se ha utilizado la experiencia pasada en períodos entre contorneos para estimar la frecuencia del lavado. Como resultado, el lavado se realiza con demasiada frecuencia o después del contorneo.

Las empresas lo suelen realizar mediante camiones aljibes que recorren la línea de transmisión con cuadrillas de personas especializadas en dicha labor. Pero esta no es la única manera en la que se lavan los aisladores de una línea de transmisión. Otras maneras se nombran a continuación:

- Dispositivos de agua a presión portátiles: Un operador debe subirse a la torre y aproximarse a la cadena de aisladores para realizar la maniobra.
- Dispositivos montados en helicópteros: Cuando los aisladores son de muy difícil acceso (montañas, quebradas, etc.)

Cabe mencionar que estas tareas de mantenimiento se pueden realizar con línea viva o des-energizada y contando con altos estándares de seguridad.

### **2.2.3 Recubrimientos**

Los recubrimientos que se aplican a los aisladores de vidrio o porcelana son con el propósito de entregar propiedades hidrófobas, la efectividad de estos dependerá de la capacidad de inhibir la formación de capas de agua en la superficie, tener una alta resistencia bajo contaminación, bajas corrientes de fuga y bajar la cantidad de bandas secas. Estos recubrimientos pueden ser dañados por las descargas producidas por el efecto corona y la radiación UV, provocando una pérdida gradual de la hidrofobicidad [5].

#### **2.2.3.1 Recubrimientos de aceite**

Uno de los métodos para reducir el número de “*flashovers*” por contaminación es recubrir el aislador mediante un baño de aceite idealmente para arreglos simples en cadenas de aisladores. Este tipo de recubrimiento entrega un bajo nivel de corrientes de fuga y una muy alta resistencia, el recubrimiento cubre el resto del aislador impregnando los sólidos contaminantes y dejándola con propiedades repelentes al agua. Este tipo de recubrimientos tiene buenos resultados, pero cuando el aceite es contaminado por agua o por otro tipo de suciedad este debe ser reemplazado, sin embargo, la principal causa de pérdida del recubrimiento de aceite resulta ser el viento, por ende, requiere de un constante monitoreo para su re-aplicación.

#### **2.2.3.2 Recubrimientos de grasas**

Al igual que los aceites, las grasas son hidrófobas, es decir repelen el agua. Este tipo de recubrimiento sigue siendo usado dado que transforma la superficie del aislador en hidrofóbica, la cual tiende a crear gotas discretas. En este tipo de recubrimiento la contaminación es encapsulada por aceites de la grasa

y por lo tanto repelente al agua, además las grasas cuentan con la propiedad de disolverse fácilmente con el agua.

### **2.2.3.3 *Silicona vulcanizada a temperatura ambiente (RTV)***

Las grasas necesitan ser reemplazadas regularmente por lo cual surge la necesidad de un recubrimiento con mejores características eléctricas, con mayor resistencia a la radiación UV, con la capacidad de disminuir los arcos en las bandas secas y menor mantención.

Los recubrimientos RTV (“*Room Temperature Vulcanizing*”) son un compuesto líquido polimérico que cuando entra en contacto con el aire se vulcaniza en un hule flexible. Algunos de estos recubrimientos cuentan con compuestos como el Aluminotrihidrato u otro tipo de relleno para aumentar la resistencia al tracking superficial y a la erosión.

Cuando el RTV comienza a contaminarse y pierde algo de su repelencia al agua, este puede lavarse fácilmente. Algunos recubrimientos RTV pueden lavarse con alta presión, pero hay recubrimientos RTV donde se recomienda el lavado a baja presión o inmersión. Una vez limpio, se recobra la hidrofobicidad. Si es necesario el reaplicado, el recubrimiento previo se puede quitar limpiando con un medio abrasivo.

## **2.3 Norma IEC 62073**

IEC 62073: “Guía para la medición de la humedad de la superficie de aisladores” [6], es una guía técnica que incluye métodos que se pueden utilizar para la medición de humectabilidad del material de aisladores compuestos para líneas aéreas, subestaciones y equipos o aisladores de vidrio o cerámicos cubiertos y no cubiertos por un recubrimiento.

Las propiedades humectantes de una superficie por el agua se describen comúnmente mediante los términos hidrofobicidad e hidrofilia. Una superficie hidrófoba repele el agua, mientras que una superficie hidrófila se humedece fácilmente con agua.

En este fenómeno influyen algunos parámetros importantes como tipo de material, rugosidad de la superficie, heterogeneidades de la superficie, composición química y presencia de contaminación.

Para algunos materiales aislantes, sus propiedades de humectación pueden variar con el tiempo debido a la influencia de las condiciones ambientales.

### **2.3.1 Método de ángulo de contacto**

Este método se basa en una medida que implica la evaluación del ángulo de contacto formado entre el borde de una sola gota de agua y la superficie de un material sólido.

Los ángulos de contacto dependen en gran medida de la rugosidad de la superficie y, además los ángulos de contacto medidos en superficies contaminadas pueden diferir significativamente de los medidos en superficies lisas, limpias y planas.

### **2.3.2 Método de tensión superficial**

La determinación de la tensión superficial de la superficie de un aislante se basa en el fenómeno que las gotas de una serie de mezclas líquidas orgánicas, con una tensión superficial que aumenta gradualmente, tiene una capacidad diferente para mojar la superficie del aislante.

Este método es una extensión de la Norma IEC 60674-2. En particular, implica la aplicación de líquidos reactivos en la superficie para determinar un rango de tensión superficial.

### **2.3.3 Método *spray***

Este método se basa en la respuesta que da una superficie al ser humectada con una fina neblina de agua durante un corto período de tiempo. Se evalúa la humectabilidad después de la exposición a la

niebla. Para producir la niebla es necesario una botella rociadora común. En donde el agua no debe contener impurezas que puedan influir en la tensión superficial del agua, como detergentes, disolventes, etc.

El procedimiento consiste en aplicar la niebla a una distancia de  $25 \pm 10$  [cm]. La exposición a la niebla debe ser por un período de 20 a 30 [s], donde la cantidad de agua rociada debe estar entre los 10 y 30 [ml].

La medición debe realizarse de tal manera que se obtenga una imagen clara de la variación de la humectabilidad a lo largo y alrededor del aislador.

La evaluación de la apariencia de la superficie del aislante después de la exposición a la niebla debe identificarse con una de las siete clases de hidrofobicidad que indica la norma. Los criterios para la definición de la clase se definen por la Tabla 3.

<b>HC</b>	<b>Descripción</b>
1	Solo se forman gotas discretas. Su forma, vista de forma perpendicular a la superficie, es prácticamente circular.
2	Solo se forman gotas discretas. La mayor parte de la superficie está cubierta por gotitas con una forma vista de forma perpendicular a la superficie, todavía regular pero que se desvía de la forma circular.
3	Solo se forman gotas discretas. La mayor parte de la superficie está cubierta por gotitas de forma irregular.
4	Se observan tanto gotas discretas como trazas humedecidas de los canales de agua o la película de agua. Menos del 10% del área observada está cubierta por arroyos o película de agua.
5	Se observan tanto gotas discretas como trazas humedecidas de los canales de agua o la película de agua. Mas del 10% pero menos del 90% del área observada está cubierta por canales de agua o película.
6	Más del 90% pero menos del 100% del área observada está cubierta por canales de agua o película (es decir, todavía se observan pequeñas áreas/manchas/trazas no mojadas).
7	Se forma una película de agua continua sobre toda el área observada.

*Tabla 3: Criterio para la determinación de la clase de hidrofobicidad. [6]*

Además, en la Figura 3 se presentan imágenes de referencia que incluyen seis clases de hidrofobicidad. La clase siete (HC7) corresponde a una superficie 100% humedecida donde no se observan áreas sin agua.

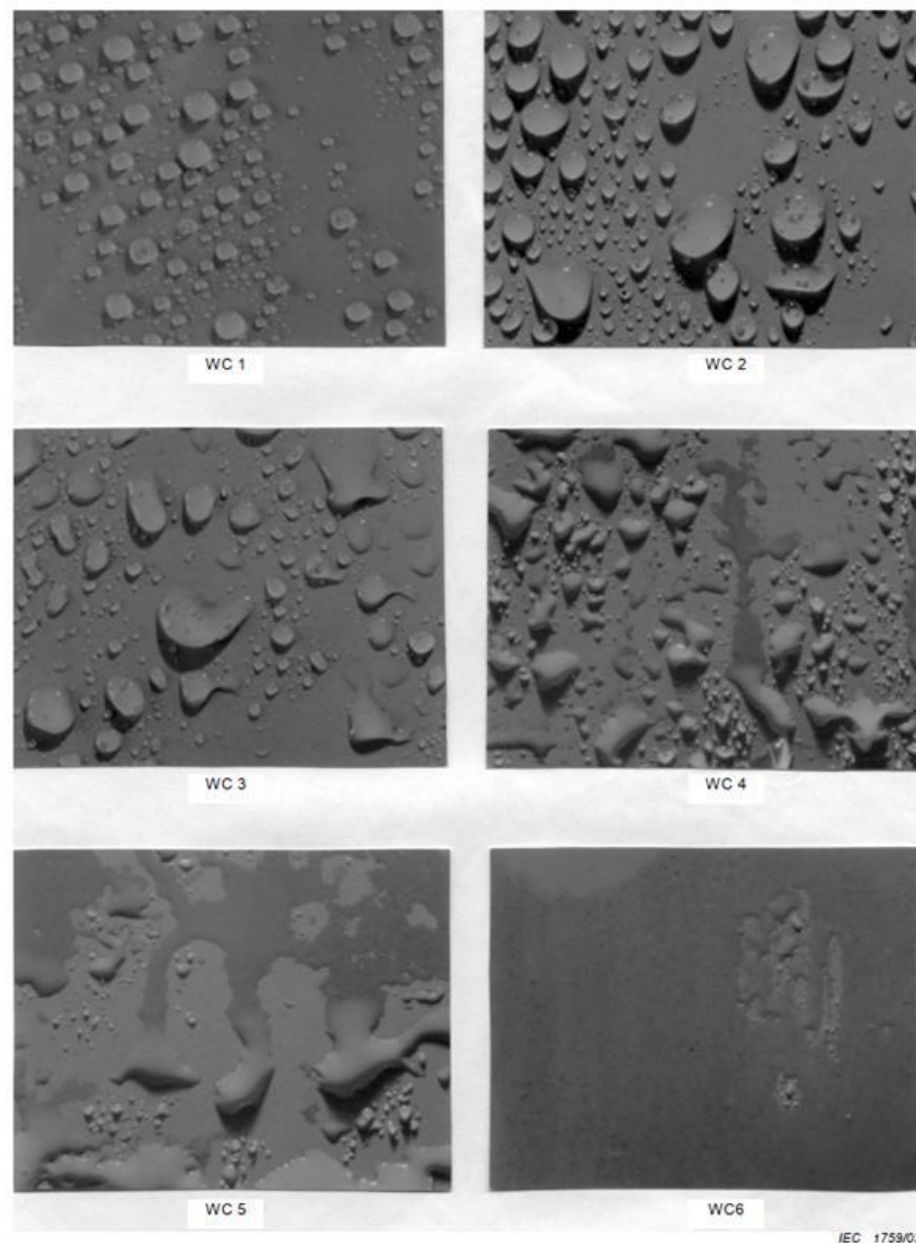


Figura 4: Ejemplos típicos de las superficies con clases de hidrofobicidad 1 al 6. [6]

## 2.4 Norma IEC 60270

La norma IEC 60270: “Técnicas de pruebas de Alta Tensión – Mediciones de descargas parciales” [7] plantea los circuitos que se deben utilizar tanto para la medición como la detección de descargas parciales.

Las Descargas Parciales (DP) se asocian a un fenómeno de degradación local, que genera impulsos de corrientes de magnitudes muy pequeñas y visibles en intervalos de micro y nanosegundos a través del sistema de aislamiento. Como resultado de los impulsos de corriente se tiene la descomposición del dieléctrico y por ende los defectos en el sistema de aislamiento como huecos e irregularidades constructivas tanto dentro como fuera, reduciendo notablemente la vida útil del sistema de aislamiento.

### 2.4.1 Elección del procedimiento de prueba

La especificación de los procedimientos que se utilizarán para tipos particulares de prueba y objetos de prueba es responsabilidad del comité técnico correspondiente. Deben definir cualquier proceso de acondicionamiento preliminar, los niveles y la frecuencia de la tensión de prueba, la tasa de aumento y caída de tensión aplicado, la secuencia y duración de la aplicación de la tensión y la relación de las pruebas de medición de descargas parciales con otras pruebas dieléctricas.

Para ayudar en la preparación de dichas especificaciones de prueba, en 2.4.1 y 2.4.2 se dan ejemplos de procedimientos de prueba para tensión alterna.

### ***2.4.1.1 Determinación de las tensiones de iniciación y extinción de descargas parciales***

Se debe aplicar al objeto de prueba una tensión muy por debajo de la tensión de inicio esperada y aumentarla gradualmente hasta que las descargas alcancen o excedan una magnitud baja especificada. La tensión de prueba en esta magnitud especificada es la tensión de inicio de descarga parcial  $U_i$ . Luego, la tensión se aumenta a un nivel de tensión especificado y luego se reduce gradualmente a un valor en el que las descargas se vuelven menores que la misma magnitud especificada. La tensión de prueba en este límite de descarga es la tensión de extinción de descarga parcial  $U_e$ . Hay que tener en cuenta que tanto el valor de  $U_i$  como el de  $U_e$ , pueden verse afectados por la tasa de aumento/disminución de la tensión, la amplitud y el tiempo de aplicación de la tensión.

En ninguna circunstancia, sin embargo, la tensión aplicada deberá exceder la tensión soportada nominal de frecuencia industrial de corta duración aplicable al aparato bajo prueba.

### ***2.4.1.2 Determinación de la magnitud de descarga parcial a una tensión de prueba específica***

#### ***2.4.1.2.1 Medición sin pre-stress***

La magnitud de la descarga parcial en términos de la cantidad especificada se mide a una tensión específica, que puede estar muy por encima de la tensión de inicio de descarga parcial esperado. La tensión se incrementa gradualmente desde un valor bajo hasta el valor especificado y se mantiene allí durante el tiempo especificado. Como las magnitudes pueden cambiar con el tiempo, la cantidad especificada debe medirse al final de este tiempo.

La magnitud de las descargas parciales también se puede medir y registrar mientras se aumenta o reduce el voltaje o durante todo el período de prueba.

#### ***2.4.1.2.2 Medición con pre-stress***

La prueba se realiza elevando la tensión de prueba desde un valor por debajo de la tensión de prueba de descarga parcial especificado hasta un voltaje especificado que exceda esta tensión. Luego, la tensión se mantiene durante el tiempo especificado y, posteriormente, se reduce gradualmente hasta la tensión de prueba de descarga parcial especificado.

A este nivel de tensión, la tensión se mantiene durante un tiempo específico y, al final de este tiempo, la cantidad de DP especificada se mide en un intervalo de tiempo dado o durante el tiempo especificado.

## **2.4.2 Elección del procedimiento de prueba**

Se requiere de un circuito específico para la detección y medición de descargas parciales en un aislante, dicho circuito debe tener la característica de brindar un camino de baja impedancia para el pulso de corriente que provoca la descarga. La normativa brinda circuitos de medición directa e indirecta para la detección y medición de DP, el circuito directo (Figura 5) se caracteriza por tener la impedancia de medida en serie con el aislante bajo prueba y el circuito indirecto (Figura 6) donde la impedancia de medida se encuentra en serie con el condensador de acoplamiento.

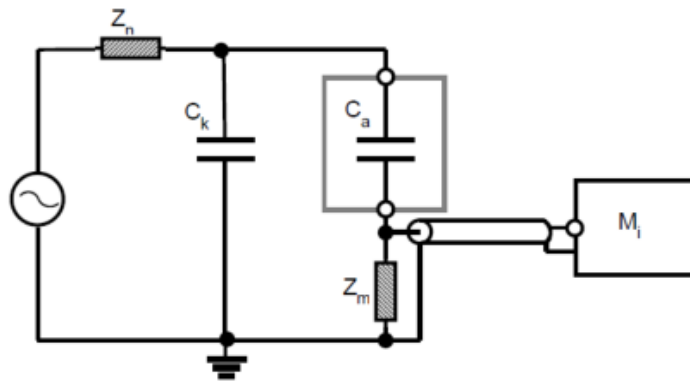


Figura 5: Circuito de medición directa para la detección de DP. [7]

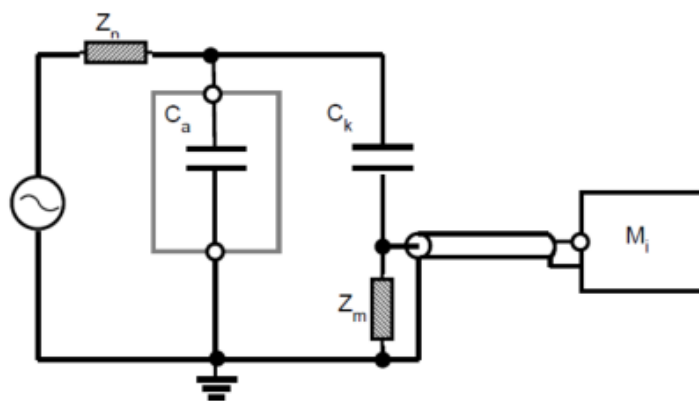


Figura 6: Circuito de medición indirecto para la detección de DP. [7]

### 2.4.3 Tipos de descargas parciales

Según el lugar de ocurrencia las DP se clasifican en tres tipos: descargas internas, descargas superficiales y descargas corona.

- Descargas Parciales Internas

Este tipo de descargas se da en aislamientos de tipo sólido y líquido. En los aislantes sólidos ocurren dentro de huecos o irregularidades con baja rigidez dieléctrica, dichas irregularidades son resultado de fallas constructivas o de operación. En los aislantes líquidos este tipo de descarga ocurre en burbujas.

- Descargas Parciales Superficiales

Este tipo de descarga ocupa lugar en interfaces de dos medios dieléctricos, en nuestro medio casi siempre estos dieléctricos son aislantes y el aire. Ocurre debido a que aparecen componentes tangenciales de campo eléctrico de gran intensidad, también la contaminación y factores ambientales como la humedad incrementan la notoriedad de este tipo de descarga.

- Descargas Parciales Corona

Este tipo de descargas se da en zonas afiladas dentro de gases o dieléctricos líquidos sometidos a un fuerte campo eléctrico, como, por ejemplo, los bordes afilados de las máquinas, tornillos o pernos de los cables.

Un aislador que se encuentre bajo condiciones de contaminación y/o lluvia presenta una disminución en su distancia de fuga, por lo que se podría evidenciar una mayor cantidad de este tipo de descarga.

## 2.5 Descripción y aspectos generales de la norma IEC 60587

Como se explicó en las secciones precedentes, los aisladores que se encuentran propensos a depositar sustancias contaminantes en su superficie, en conjunto de humedad y campo eléctrico, pueden producir descargas parciales en la superficie de esta. El desarrollo de estas descargas origina las llamadas bandas secas, las cuales producen un deterioro progresivo en el material aislante.

En los materiales poliméricos, el camino conductor y posterior deterioro se traduce como una carbonización del material, por ende, evaluar su efecto es primordial para los aisladores que se ven expuestos a contaminación y a este tipo de degradación. Por definición, “*tracking*” es el proceso que produce partes parcialmente conductoras en zonas deterioradas en la superficie del material aislante como resultado de la acción de descargas eléctricas.

Las pruebas de “*tracking*” no son concluyentes respecto a una medición absoluta de éste o de la resistencia de erosión, pero es posible clasificar el material mediante normas como la ASTM D2303 o IEC 60587. Esta última, conocida por ser la prueba de una placa en un plano inclinado de 45°, donde se deja deslizar una sustancia electrolítica por su superficie con el fin de formar un camino de carbonización. Si bien los ensayos de tracking están pensados para materiales poliméricos, se tiene como propósito analizar el recubrimiento siliconado (Si – COAT 570®) bajo este ensayo eléctrico, tal como ya se ha hecho con otros recubrimientos del tipo RTV, de esta forma es posible comprender el efecto de las bandas secas que se forman en los materiales aislantes cuando están en presencia de humedad y contaminación, y la erosión que podría provocar en el recubrimiento.

Con este método se clasifican los materiales principalmente por la tensión máxima aplicada entre los electrodos antes de que fallen por sobrecorriente o, por la longitud de carbonización en el material. Debido a las características que presenta la norma, es la prueba más idónea para evaluar el deterioro del conjunto “superficie-recubrimiento siliconado”

Para esto se utilizan placas de superficie planas de un tamaño de 50 [mm] x 120 [mm] y espesor de 6 [mm]. Los ensayos son realizados con cinco muestras de cada material en un plano de 45° ± 2° de la horizontal, con los electrodos separados a 50 [mm] ± 0,5 [mm] y con una marca de referencia de 25 [mm] desde el electrodo inferior, tal como se indica en la Figura 37. Posteriormente, los electrodos son energizados según el método del ensayo, se deja verter el líquido contaminante a través del papel filtro, permitiendo que el contaminante moje el papel completamente para un flujo continuo en la cara de la muestra de ensayo entre los electrodos. Dicho caudal de líquido contaminante se rige por la tabla de la respectiva norma que especifica el caudal según el nivel de tensión aplicado [8].

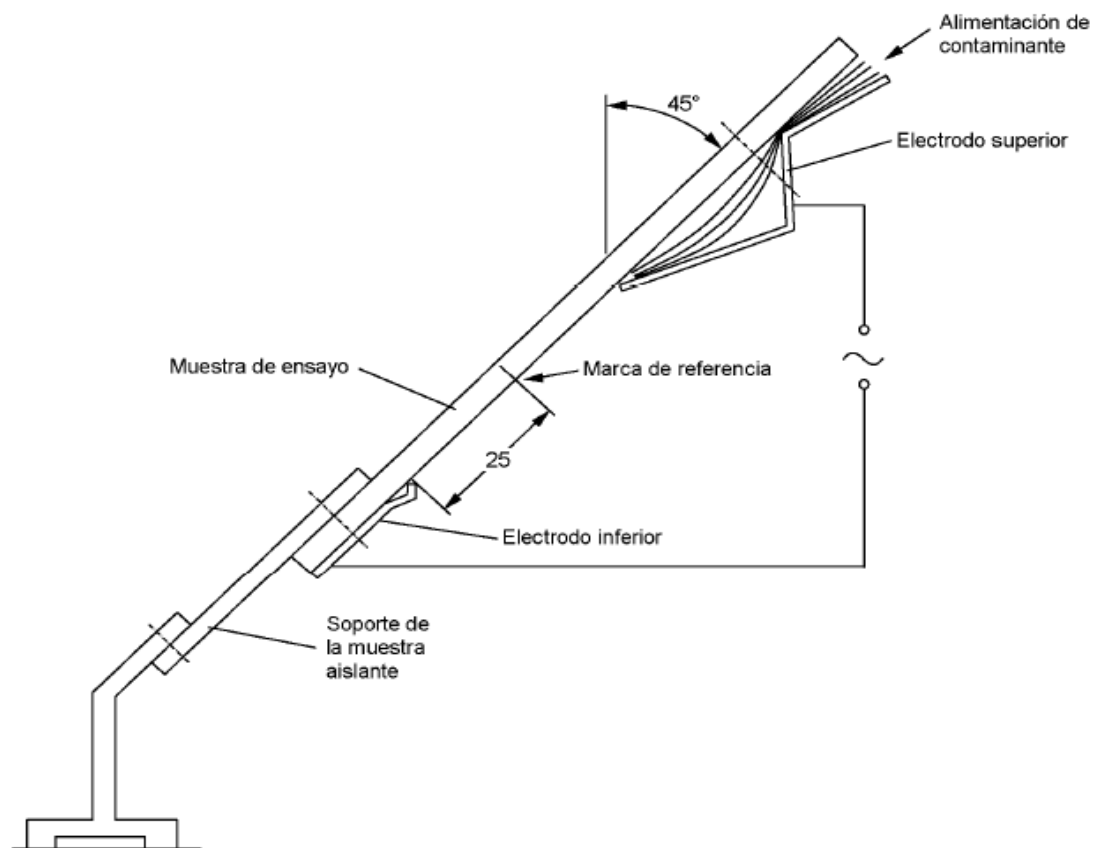
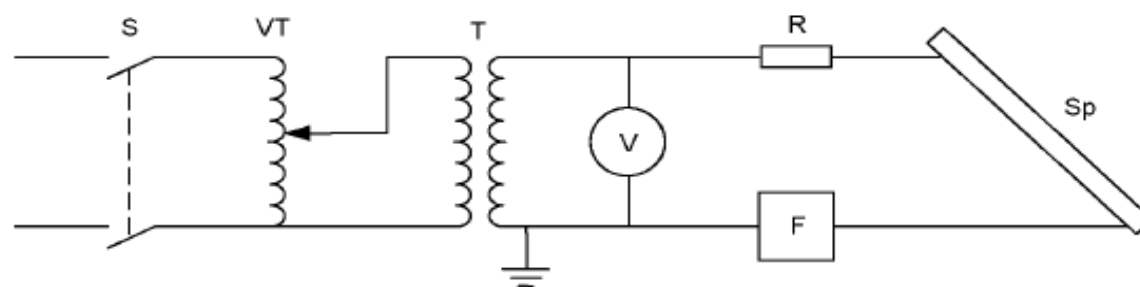


Figura 7: Disposición esquemática del ensayo. [8]

### 2.5.1 Procedimiento de evaluación

El circuito del ensayo se muestra a continuación.



#### Componentes

S	interruptor de la fuente de alimentación
VT	transformador de relación variable
T	transformador de alta tensión
R	resistencia serie
V	voltímetro
Sp	muestra
F	dispositivo de sobrecorriente, fusible o relé

Figura 8: Diagrama esquemático del circuito. [8]

La tensión por aplicar dependerá directamente del método que ofrece la norma, dado que la norma ofrece dos métodos de evaluación del tracking superficial con niveles de tensión acotados. Los métodos que ofrece la norma para realizar los ensayos son dos: a tensión constante y otro a tensión escalonada. Con ello el método seleccionado para llevar a cabo el ensayo es a tensión constante y el procedimiento se explica a continuación:

Con el contaminante fluyendo por la superficie a una tasa de caudal constante de 0,6 [ml/min], determinado por tabla. Se energiza el circuito y se eleva la tensión hasta 4,5 [kV]. Dicho valor debe ser alcanzado en un tiempo máximo de diez segundos; luego de alcanzar la tensión de ensayo, se

inicia el conteo de duración del ensayo. La tensión se debe mantener constante durante seis horas. Para luego determinar la clasificación del material de la siguiente manera:

- **Clase 1A 0 o 1B 0**

Si alguna placa falla a 2,5 [kV] en menos de 6 [h] según criterio A o B

- **Clase 1A 2,5 o 1B 2,5**

Si alguna placa sobrevive 6 [h] a 2,5 [kV] y si alguna falla a 3,5 [kV] en menos de 6 [h].

- **Clase 1A 3,5 o 1B 3,5**

Si alguna placa sobrevive 6 [h] a 3,5 [kV] y si alguna falla a 4,5 [kV] en menos de 6 [h].

- **Clase 1A 4,5 o 1B 4,5**

Si las cinco placas sobreviven 6 [h] a 4,5 [kV].

La norma ofrece dos criterios para determinar el final del ensayo:

**1. Criterio A:**

El punto final se logra una vez que la corriente a través de la placa excede los 60 [mA] o cuando se muestra un agujero a causa de la erosión intensiva o la muestra se inflama.

**2. Criterio B:**

El punto final se logra cuando el camino conductor alcanza la marca sobre la superficie de la placa que se encuentra a 25 [mm] desde el electrodo inferior, o cuando en la muestra se presenta un agujero debido a la erosión intensiva o la muestra se inflama.

# Capítulo 3: Ensayos y procedimientos experimentales

## 3.1 Introducción

El objetivo del presente capítulo es desarrollar un programa de pruebas sistemáticas que permitan evaluar el comportamiento de los aisladores de vidrio y cerámica ante condiciones medioambientales que degraden y contaminen las muestras bajo estudio, estos objetos de pruebas fueron expuestos a una cámara de envejecimiento donde algunos aisladores contaban con recubrimiento siliconado y otros sin recubrimiento alguno.

Para cumplir con lo anterior, se comienza a evaluar y estudiar el desempeño del recubrimiento siliconado Si – COAT 570<sup>®</sup> ante ensayos de tensión de contorno y medición de corrientes de fuga, esto en contraste con los resultados obtenidos de aquellos aisladores sin y con recubrimiento de silicona aplicado en aisladores de vidrio templado y de cerámica. Los ensayos serán bajo los criterios estipulados en las normas ANSI C.29.1 [9] y ANSI C.29.11 [10] para ambientes secos y húmedos, además de algunos entornos de interés de la Tabla 2. Todo esto efectuados a aisladores de vidrio de suspensión clase 100 [kV] y de cerámica clase 80 [kV].

Siguiendo uno de los métodos de la norma IEC 62073, en específico el método C, se realizarán pruebas de medición del grado de hidrofobicidad de la superficie de los aisladores. Se tendrán como referencias los aisladores con y sin recubrimiento en la condición de limpios y secos. Para luego, tomar registro de acuerdo con el ambiente ensayado.

Además, mediante la medición de descargas parciales y el análisis de estas características en los aisladores a ensayar, se pretende visualizar el efecto del recubrimiento y su desempeño como una herramienta en el diagnóstico de la severidad de la contaminación.

Los ensayos se vuelven a realizar una vez completado el ciclo de envejecimiento al cual se someterán los aisladores, el cual consiste en la exposición continua durante 163 horas de degradación en una cámara de radiación UV, considerando que la variable de alta radiación a la que están expuestos resulta ser la condición más común. Por lo que, dicha variable pasa a jugar un rol importante al momento de querer prolongar la vida útil del recubrimiento aplicado.

## 3.2 Objeto de prueba

El material bajo estudio corresponde a 8 aisladores de vidrio templado y 8 aisladores de cerámica; los primeros fueron proporcionados por el Departamento de Ingeniería Eléctrica a partir de aisladores que se disponen en bodega, estos corresponden a aisladores de suspensión tipo disco de 120 [kN] y de clase 100 [kV] fabricados por Sediver, cuyas características mecánicas y eléctricas se detallan en la Figura 7.

El segundo tipo de aislador correspondiente a material cerámico fue proporcionado por el Grupo NTI, estos elementos igual corresponden a la categoría de suspensión tipo disco de 120 [kN] y de clase 80 [kV] fabricados por PPC Santana, cuyas características se detallan en la Figura 8.

Ambos aisladores serán sometidos al mismo período de degradación, donde algunos de estos contarán con el recubrimiento siliconado tipo RTV bajo estudio.

**DIMENSIONS / DIMENSIONES**  
According to IEC 60305 / Según IEC 60305

IEC designation / Designación IEC	U120BP
Diameter of shell (D) / Diámetro del dieléctrico (D)	280 mm
Spacing (P) / Paso (P)	146 mm
Min. nominal creepage distance / Línea de fuga nominal mini	445 mm
Couplings according to IEC 60120 / Ensamblaje según IEC 60120	Size / Talla 16A
Approximate net weight / Peso neto aproximado	5,5 kg

**MECHANICAL PERFORMANCE / CARACTERÍSTICAS MECANICAS**  
According to IEC 60383 / Según IEC 60383

Min. mechanical failing load / Carga mínima de ruptura mecánica	120 kN
Routine Test Load / Carga de rutina	60 kN
Mechanical impact strength (acc. ANSI C29.1) / Resistencia al impacto	45 N.m

**ELECTRICAL PERFORMANCE / CARACTERÍSTICAS ELECTRICAS**  
According to IEC 60383 / Según IEC 60383

Power frequency withstand voltage / Tensión sostenida a frecuencia industrial dry one minute / en seco un minuto	80 kV
wet one minute / bajo lluvia un minuto	50 kV
Lightning impulse withstand voltage ± / Impulso tipo rayo ±	125 kV
Withstand puncture voltage / Tensión sostenida de perforación	130 kV

According to ANSI C29-2 / Según ANSI C29-2

Low frequency flashover voltage / Tensión de contorno a frecuencia industrial Dry / En seco	100 kV
Wet / Bajo lluvia	60 kV
Critical impulse flashover voltage	
Positive polarity / Polaridad positiva	140 kV
Negative polarity / Polaridad negativa	140 kV
Radio interference test voltage rms / Perturbación radio: Tensión a frequ. Industrial	10 kV
Maxi radio interference (1 MHz/150 Ω) / Máximo perturbación radioeléctrica	50 µV

OC: IM-171-81 - Item 3 - MOLI095

<b>SEDIVER®</b>	SEDIVER SpA Area industriale F2 CAP 83051 Nusco, Italy
INSULATOR TYPE / TIPO DE AISLADOR	F 120P/146 DC
Approved / Aprobado	
Drawing n° /	8D75DEA5F0
Issue / versión :	Date / Fecha 31/10/2019

Code: U120PB146Z(C/F)16ANI

Drawings, sketches and other data contained in this document ("Proprietary Data") are protected by intellectual property laws and international treaty and conventions on intellectual property, and/or shall be treated as confidential information. Proprietary Data shall not be used for any purpose other than as permitted. Any reproduction or disclosure of is subject to prior and written consent. Communication of this document shall not be construed as granting any right, title, license, interest to the Proprietary Data nor as representing an intent to authorize the creation of derivative work based on the Proprietary Data. Proprietary Data as well as any copies must be returned or destroyed, on first request.

Figura 9: Ficha técnica aislador de vidrio clase 100 [kV].

N°	REVISION	DATE	AUT.
----	----------	------	------

**CHARACTERISTICS**

**DIMENSIONS**

Leakage distance	(mm)	320
Dry arcing distance	(mm)	190

**MECHANICAL VALUES**

Comb. M & E strength	(kN)	120
Mechanical impact strength	(N.m)	7
Routine proof test load	(kN)	60
Time load test value	(kN)	67

**ELECTRICAL VALUES**

Low frequency flashover/withstand dry	(kV)	80/70
Low frequency flashover/withstand Wet	(kV)	50/40
Impulse flashover/withstand Positive	(kV)	125/110
Impulse flashover/withstand Negative	(kV)	130/110
Low frequency puncture voltage	(kV)	110
Radio influence voltage data-1000 kHz	(kV)	10
Low frequency test voltage rms to ground - Maximum R.I.V.	(µV)	50

**PACKAGE (aprox.)**

- Content unit piece		6
- Net weight	(kg)	33
- Gross weight	(kg)	39
- Volume	(m <sup>3</sup> )	0,07

**NOTES:**

- 1- Dielectric : Alumina porcelain.
- 2- Colour : Brown or gray.
- 3- Dimensions in mm, general tolerances ±4%.
- 4- Bituminous point on metallic surfaces avoiding contact with cement and stresses duc, to differential expansions.
- 5- Methods test and manufacturing : IEC 120,305,372,383,575.
- 6- Palletized packing, see dwg EDI-020.

5	Ball pin (IEC120-Ø16)	Hi-tension steel-hot dip galvanized
4	Dielectric	Alumina porcelain
3	Fixing	Portland cement
2	Socket cap (IEC120-16A)	Nodular iron-hot dip galvanized
1	Socket Key (Split-pin)	Stainless steel

DENOMINATION:	IDENTIFICATION
SUSPENSION INSULATOR-BALL & SOCKET	REFERENCE
Ø254x146-120kN	DI33C35-ZN
REF.: DI33C35-ZN	REVISION
ORIGIN:	SANTANA DESIGN
(IEC 60305 - U100BL/U120B)	TYPE-CAID

We reserve the right to intellectual property of this document and attachments. No part of this document may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or by any information storage and retrieval system, without the prior written permission of PPC S.A. All rights reserved.

The reproduction of this document turns the copy "NO CONTROLLED" except when the same receives stamp of "CONTROLLED COPY"

Figura 10: Ficha técnica aislador de cerámica clase 80 [kV].

### 3.2.1 Recubrimiento bajo estudio

Los recubrimientos de silicona vulcanizada a temperatura ambiente (RTV) son los más utilizados en el mercado actualmente, por su fácil aplicación y durabilidad. En este caso, el recubrimiento es en base a un polisiloxano que otorga una excelente hidrofobicidad a largo plazo, características eléctricas y resistencia a los rayos UV. Permite además supresión de las corrientes de fuga y la reducción de combustión súbita generalizada relacionada con la contaminación y una larga vida útil. Este producto puede ser aplicado tanto a aisladores nuevos como en aisladores viejos que deban reacondicionarse, este recubrimiento está considerado para ser utilizado en distintos ambientes como el rociado salino, niebla salina, arena industrial (polvo de cemento, cenizas, emisiones ácidas, etc.) y la arena del desierto. Las principales características se detallan en la siguiente tabla:

Propiedad	Recubrimiento
Apariencia	Pintura espesa color gris arcilla
Sólidos	70% por peso, nominal
Viscosidad	1350 ± 350 [cP]
Resistividad de la superficie	1,36 × 10 <sup>16</sup> [ $\Omega/cm$ ]
Estabilidad térmica	-40 a 250 [°C]
Constante dieléctrica	2,74 a 100 [Hz]; 2,63 a 100 [kHz]
Factor de disipación	0,0292 a 100 [Hz]; 0,00494 a 100 [kHz]
Resistencia dieléctrica	276,3 [kV/cm]
Características	Sin degradación por 500 horas de acción acelerada a la intemperie acelerada por UV y rociado salino

Tabla 4: Características Silicona Si-COAT 570. [11]

El método de aplicación del recubrimiento siliconado RTV específica tres formas: brocha, inmersión y sistema “*airless*” (pulverización en seco), este último resulta ser uno de los más usados dado que disminuye las pérdidas por el rápido secado que presenta el producto. Para llevar a cabo este estudio el método de aplicación del recubrimiento RTV por parte del personal del Grupo NTI fue mediante sistema “*airless*”.

### 3.3 Metodología de ensayo

El plan de ensayo se basa en evaluar el desempeño del recubrimiento siliconado en la superficie de los aisladores de vidrio y cerámica ante condiciones severas de contaminación. Para lograr alcanzar este objetivo, se propone realizar un estudio del efecto de exponer la superficie de dichos aisladores siliconados, ante diferentes ambientes donde se ven comúnmente enfrentados, tales como: distintos tipos de contaminación a la intemperie más la radiación UV. Para luego obtener registros de la tensión de contorno y valores de corrientes de fuga bajo condiciones severas de contaminación.

Se realizan ensayos en ambientes húmedos, donde los aisladores serán expuestos a un ambiente contaminado constante generando los ambientes E1, E4 y E5 (ver Tabla 2). Posterior a dicha exposición, se deja secar por al menos 24 horas la capa de contaminación que queda en la superficie de los aisladores. Una vez los aisladores estén completamente secos, se da comienzo al ensayo en cuestión. El objetivo consiste en evaluar el comportamiento ante distintas condiciones de contaminación en seco.

En contraparte, se lleva a cabo este procedimiento en aisladores con recubrimiento siliconado para analizar el comportamiento de este ante diferentes superficies contaminadas del aislador y, también, comparar los resultados con lo obtenido en los aisladores sin recubrimiento.

Una vez completado los ensayos en seco y húmedos de los aisladores sin y con recubrimiento siliconado, estos son montados en la cámara de radiación por un periodo continuo 163 horas

acumulando un nivel de irradiancia de  $15 [kWh/m^2]$ . Cabe mencionar que los aisladores no son energizados al momento de degradar. Sólo se energiza al momento de realizar los ensayos.

Una vez completado con los ensayos post-envejecimiento, los aisladores se someten a un lavado de aislación con el fin de simular el tratamiento de mantenimiento preventivo que estos suelen tener regularmente. Se busca tener una noción de cómo cambiarían las condiciones superficiales de los aisladores con recubrimiento siliconado y envejecidos después de someterlos a un lavado superficial. Posteriormente al lavado, estos son nuevamente sometidos a los ensayos.

El criterio que se toma como evaluación del producto es la variación de la magnitud de tensión de contorno, nivel de corriente de fuga y la clase de hidrofobicidad (HC). Al paso de cada ensayo se hizo una inspección visual y se registró el estado hidrófobo de su superficie; dichas fotografías se comparan con los ejemplos típicos del método spray de la norma IEC 62073, de esta manera se obtiene la HC para cada caso y condición.

Adicionalmente, los valores obtenidos de tensión de contorno deben ser corregidos a condiciones atmosféricas estándar. Para el caso de los ensayos en ambiente húmedo, se realiza solo corrección por densidad de aire (presión y temperatura) y no se corrige por humedad.

En cuanto a la medición de descargas parciales, estas se llevan a cabo en tres etapas: sin recubrimiento, con recubrimiento y posterior al envejecimiento. Una vez que se ha logrado detectar y medir las descargas parciales, el paso siguiente es extraer las características principales del fenómeno y proceder con su clasificación. De esta manera, poder tener una idea respecto al tipo de descarga que se está generando en el aislamiento y la posible fuente que lo ocasiona.

### 3.3.1 Ensayos de tensión de contorno

Los ensayos de contorno se realizarán siguiendo los métodos de la norma ANSI C29.1 y ANSI C29.11, para condición seca y húmeda, respectivamente. Para ello se energiza el aislador sin resistencia limitadora a través de un transformador elevador de tensión que es controlado por un variac desde la cabina del patio de Alta Tensión del laboratorio, de acuerdo con el circuito de la Figura 9, alcanzando en un tiempo de 5 [s] el 75% de la tensión de contorno del aislador según la información entregada por la ficha técnica de los aisladores de vidrio y cerámica en las Figuras 7 y 8, respectivamente. Posteriormente se eleva la tensión lentamente hasta alcanzar la descarga disruptiva, este procedimiento se repetirá diez veces por cada aislador. El valor de tensión de contorno final se obtiene como el promedio aritmético de los diez ensayos realizados.

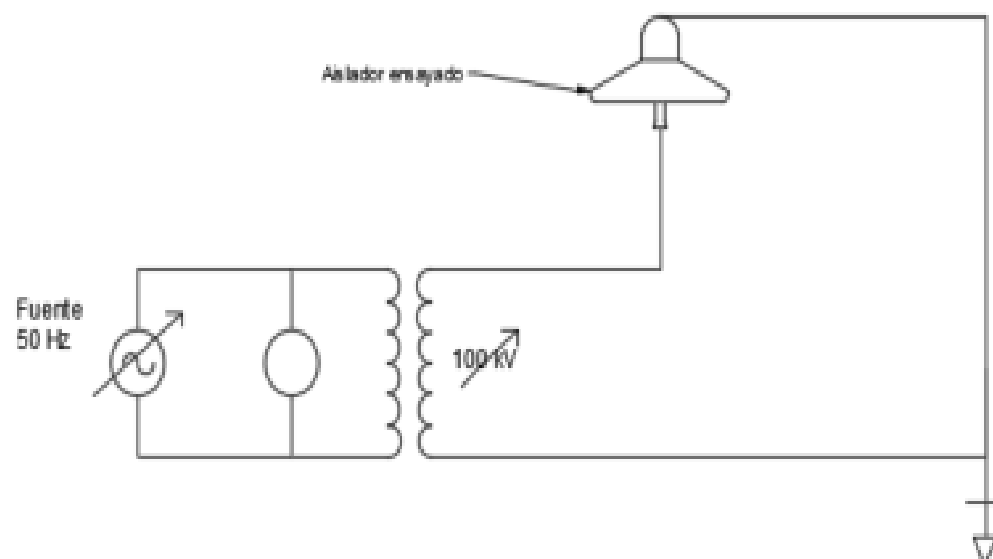


Figura 11: Circuito de ensayo para tensión de contorno.

Para la condición de ambiente húmedo, resulta necesario una bomba hidráulica que permita un ambiente húmedo constante. La aplicación se realizó mediante un circuito de aspersores con la idea de replicar el efecto lluvia, que a tal distancia de separación se formará una niebla alrededor del aislador energizado como se ve en la Figura 10.

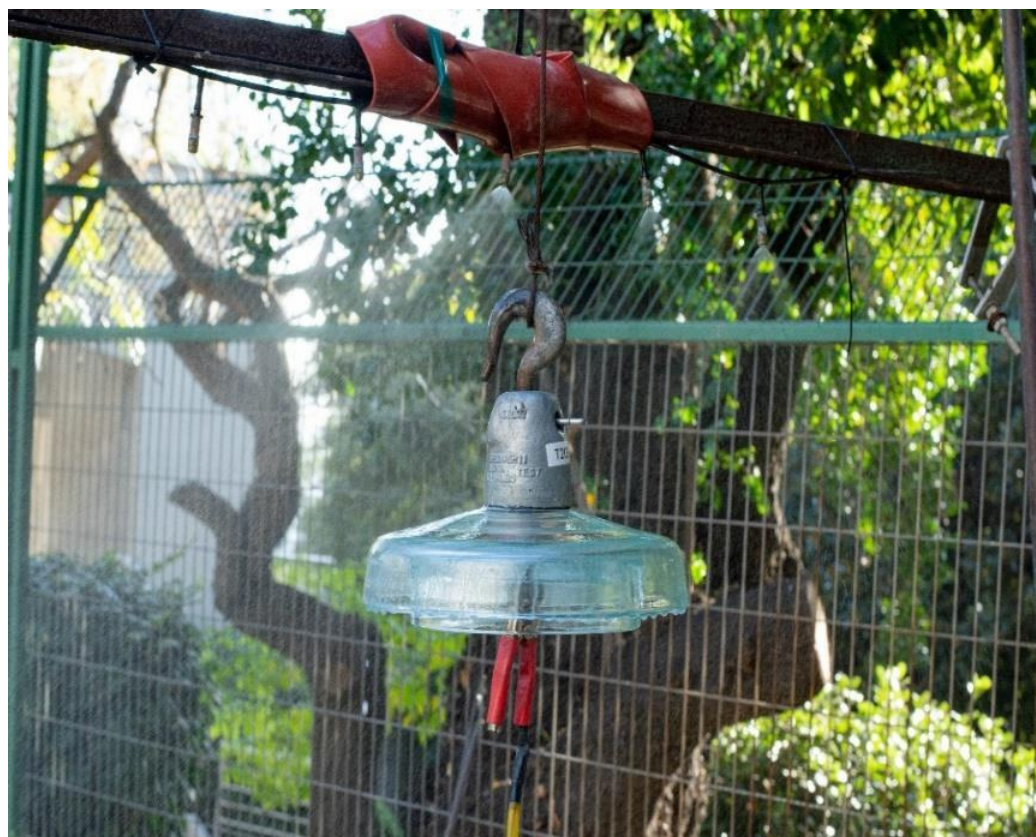


Figura 12: Efecto lluvia para condiciones de ambientes húmedos.

La primera condición de ambiente a realizar es la de carácter húmedo, este se lleva a cabo con agua desmineralizada. Cuyo valor de resistividad registrado al momento de realizar los ensayos fue de 1,81 [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ].

Para la condición de niebla salina, esta se compone de agua y 40 [*gr de sal/l*], esto para representar un ambiente netamente salino y de contaminación severa. Ya que de acuerdo con la Figura 2, dicha concentración representa un ambiente E5.

En cuanto a la elaboración de los otros tipo de ambientes que se indican en la Figura 1 de la sección 2.2.2, se componen de una mezcla de material no soluble, caolín, que comercialmente se consigue bajo el nombre de arcilla blanca, más sal en distintas concentraciones.

Tipo de ambiente	Cantidad de sal [gr/l]	Cantidad de caolín [gr/l]
E1	1	5
E4	10	150
E5	150	12

Tabla 5: Caracterización de la contaminación.

Los resultados de los ambientes de contaminación en la superficie de los aisladores se pueden apreciar en la Figura 11.



a) Aislador bajo contaminación E1. b) Aislador bajo contaminación E4. c) Aislador bajo contaminación E5.

Figura 13: Imagen referencial de la capa de contaminación en los aisladores.

Con el propósito de determinar el comportamiento del recubrimiento siliconado en el tiempo, los aisladores son sometidos ante un envejecimiento acelerado en el equipo Eternal Sun, facilitado por el laboratorio de radiación solar del Departamento de Mecánica de la Universidad. En este equipo podemos simular condiciones ambientales adversas como lo son la radiación UV-A y UV-B más las altas temperaturas.



Figura 14: Disposición de los aisladores en cámara de envejecimiento.

Los ajustes de la cámara de envejecimiento corresponden a la exposición continua por 163 horas de radiación para lograr un acumulado en irradiancia de  $15 \text{ [kWh/m}^2\text{]}$ , dicho dato puede ser interpretado como que la cámara entrega una irradiancia aproximada de  $2,2 \text{ [kWh/m}^2 \text{ /dia}]$ . Durante dicho periodo, la temperatura promedio dentro de la cámara fue de  $60 \text{ [}^\circ\text{C}]$ .

Teniendo en consideración los valores de irradiación promedios representados en la Figura 13 y llevados a valores diarios para diferentes zonas geográficas, los cuales son medidos y registrados por estaciones meteorológicas. Se tiene que, en el norte de Chile, tomando la ciudad de Antofagasta como referencia, donde el valor promedio alcanza los 7 [ $kWh/m^2 / dia$ ], en tan solo 2,14 [*días*] se obtiene igual nivel de envejecimiento. En cambio, en la zona centro, teniendo de referencia la ciudad de Santiago, vemos que de acuerdo con la figura el valor promedio alcanza los 5,5 [ $kWh/m^2 / dia$ ], por ende, en tan solo 2,72 [*días*] se alcanza el mismo nivel de envejecimiento. Y en el caso del sur de Chile, más en específico, la ciudad de Valdivia, vemos que el valor promedio es de 4 [ $kWh/m^2 / dia$ ], por lo tanto, en 3,75 [*días*] obtendríamos igual nivel de envejecimiento.

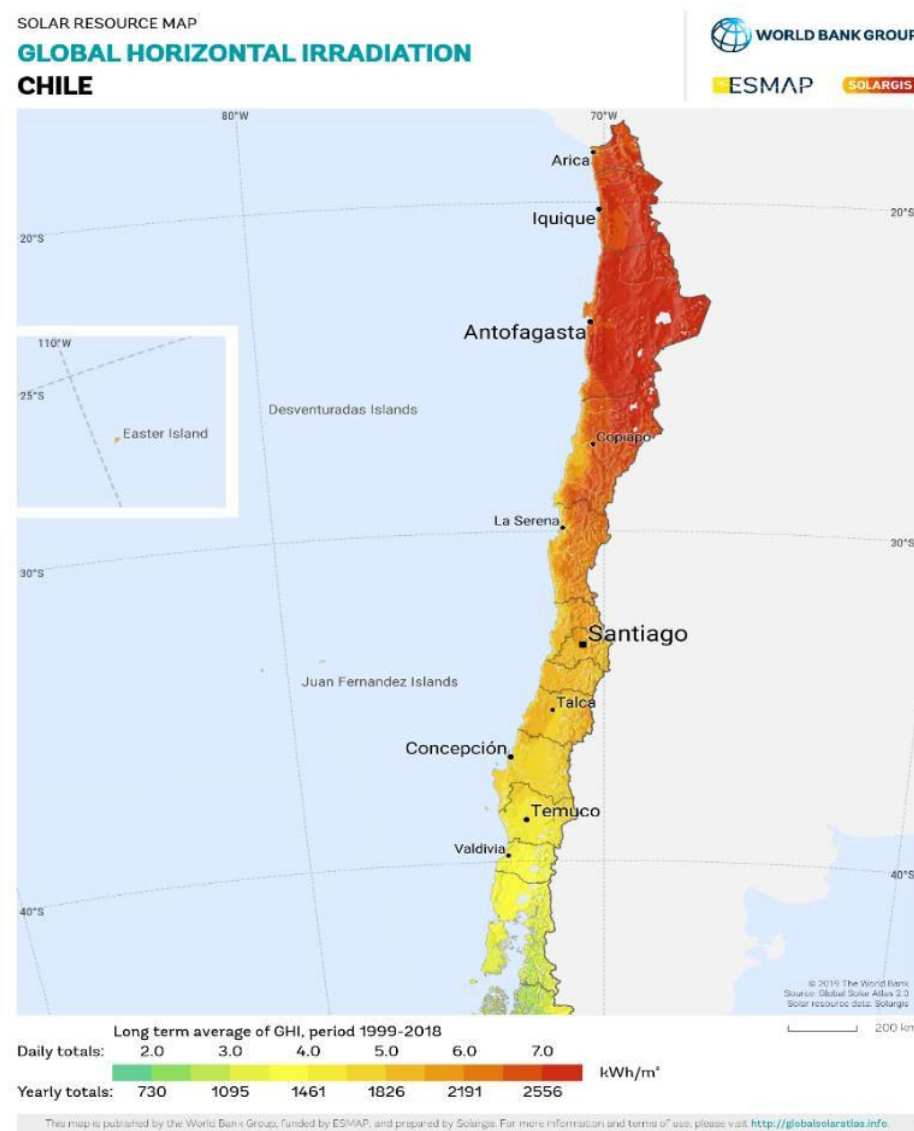


Figura 15: Mapa de radiación en Chile. [12]

Una vez completada con las mediciones post-envejecimiento se procede con el lavado de los aisladores para analizar las propiedades hidrofóbicas que entrega el recubrimiento siliconado. El lavado se realizó con agua y un compresor de X PSI, cabe mencionar que la presión entregada por el equipo no es similar a la cual se trabaja en terreno al momento de realizar un lavado de subestación o línea de transmisión, pero pretende simular la labor de mantenimiento que se realiza a la aislación en los lugares mencionados.

### 3.3.2 Ensayos de medición de corrientes de fuga

Dado que los aisladores al verse sometidos a contaminación son afectados a cambios en su conductividad superficial por los agentes contaminantes, es de interés visualizar como fluctúan las corrientes de fuga ante los distintos ambientes de contaminación y como los tiempos de degradación a la intemperie afecta en los aisladores eléctricos descritos en la metodología de ensayo. Por ello, para lograr la medición de las corrientes de fuga se monta el circuito de la Figura 18.

Cabe mencionar que, para este ensayo no se utilizó una resistencia *shunt* para realizar la medición de corriente del aislador. Esto con el fin de no añadir elementos al circuito que interfieran y/o alteren las mediciones de corrientes de fuga, ya que dichos elementos son muy sensibles al ruido. De esta forma, la resistencia *shunt* escogida para este procedimiento es un multímetro marca KEYSIGHT modelo U1232A, el cual tiene un valor de resistencia de 3.2 [k $\Omega$ ], en la escala de  $\mu$ A. Sin embargo, este valor de resistencia se mantiene constante siempre y cuando no se modifique la escala de corriente durante el ensayo. Con esto, es posible medir de forma inmediata y directa los valores de corriente de fuga en el aislador a través del multímetro.

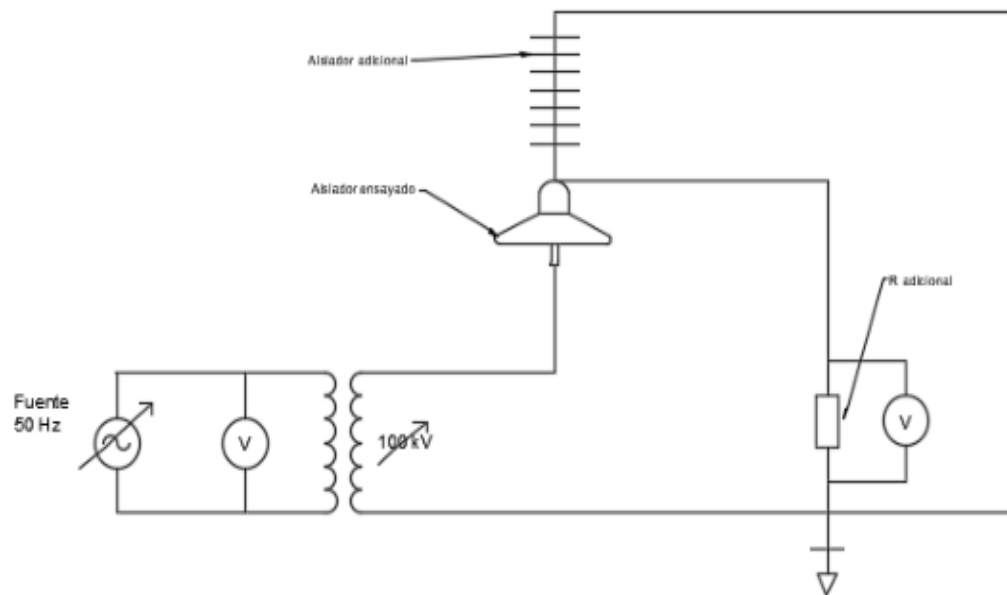


Figura 16: Circuito de medición de corrientes de fuga.

Posteriormente de montar el circuito, se aplican escalones de tensión por medio del variac de la cabina del patio de Alta Tensión del laboratorio, estos son del orden de los 2,5 [V] correspondiente a unos 5 [kV] aproximadamente para el aislador bajo ensayo, teniendo como límite un 40% de la tensión de contorno según cada caso. Cada escalón de tensión se mantiene por alrededor de diez segundos (10 [s]) hasta que el valor de corriente se mantenga relativamente constante y luego, se registra su valor.

Para los ensayos en ambientes húmedos con contaminación constante se requiere nuevamente de la bomba hidráulica y circuito de aspersores para el efecto de lluvia sobre los aisladores.

### 3.3.3 Verificación clase de hidrofobicidad

De acuerdo con la norma IEC 62073, se realizan pruebas para verificar la clase de hidrofobicidad de la superficie de los aisladores. El procedimiento escogido corresponde al “método spray” expuesto en la sección 2.3.3.

El objetivo consiste en evaluar la hidrofobicidad de la superficie de los aisladores al variar el nivel de contaminación de estos.

Cada prueba se realizará en:

- Aisladores de vidrio templado y cerámica contaminados con los entornos E1, E4 y E5. Además, como referencia, se utilizará un aislador completamente limpio.
- Aisladores de vidrio templado y cerámica con recubrimiento siliconado contaminados con los entornos E1, E4 y E5. Además, como referencia, se utilizará un aislador recubierto completamente limpio.

### **3.3.4 Medición de descargas parciales**

Recordando que una de las funciones del aislador es garantizar que no fluya corriente sobre él, entonces cuando fluye corriente por el aislante indica un mal funcionamiento el cual es posible de visualizar mediante chispas más un sonido que indican la presencia de una corriente circulando a través del aislante.

De acuerdo con la norma IEC 60270, en ella se plantean los circuitos para realizar las pruebas de determinación de las tensiones de iniciación y extinción de DP, además de la magnitud de DP a una tensión de prueba en específico.

### **3.3.5 Ensayo de tracking superficial**

Por medio de este ensayo se pretende determinar la clase del recubrimiento según el resultado propio del ensayo, para esto se dispone de muestras tanto de vidrio como cerámica cortadas según las medidas indicadas anteriormente, estos materiales son utilizados para analizar el recubrimiento siliconado Si – COAT 570<sup>®</sup> y su resistencia a la formación de caminos conductores simulando la superficie de los aisladores de vidrio templado y de cerámica usados principalmente en las líneas de los sistemas de transmisión. Para este caso, donde las muestras son de vidrio y cerámica, sólo se tendrá como referencia el tiempo en que falle algunas de las muestras por el criterio A estipulado en la norma, dado que en este tipo de materiales resulta visible la formación de caminos conductores o “bandas secas” más la erosión profunda del recubrimiento mismo.

Adicional a la evaluación del recubrimiento siliconado en placas de vidrio y de cerámica, una cantidad de placas fueron sometidas a un envejecimiento acelerado por medio del equipo Eternal Sun, cuyas características fueron descritas en la sección 3.3.1.

Con el propósito de analizar el comportamiento del recubrimiento siliconado en el tiempo, es que se definen tres ciclos de análisis; 163 horas, 326 horas y 489 horas, los cuales corresponden a una, dos y tres semanas, respectivamente. En dichos periodos, la irradiancia solar acumulada por las placas de vidrio y cerámica es de 15, 30 y 45 [ $kWh/m^2$ ], respectivamente. Es necesario mencionar que el envejecimiento no es solo bajo el efecto de la radiación UV, sino que también debido al calor presente en la cabina debido al propio calor que disipan las lámparas. El registro indicó que la temperatura promedio al interior de cabina era de 60 [°C].

Una vez finalizado cada periodo de envejecimiento, de las diez placas expuestas por cada periodo y de material, cinco de ellas serán tratadas antes de ensayar. Donde el tratamiento consiste en humedecer y refregar su superficie con una esponja para luego ser limpiada con un paño de microfibra y alcohol isopropílico. El tratamiento expuesto anteriormente busca medir el grado de degradación producto del impacto de la radiación UV en el recubrimiento siliconado.

Tanto las placas de vidrio como cerámica son montadas a través de dos electrodos de acero inoxidable de 0,5 [mm] de espesor y soportadas por un material aislante con el fin de aislar la placa del resto del circuito de ensayo.

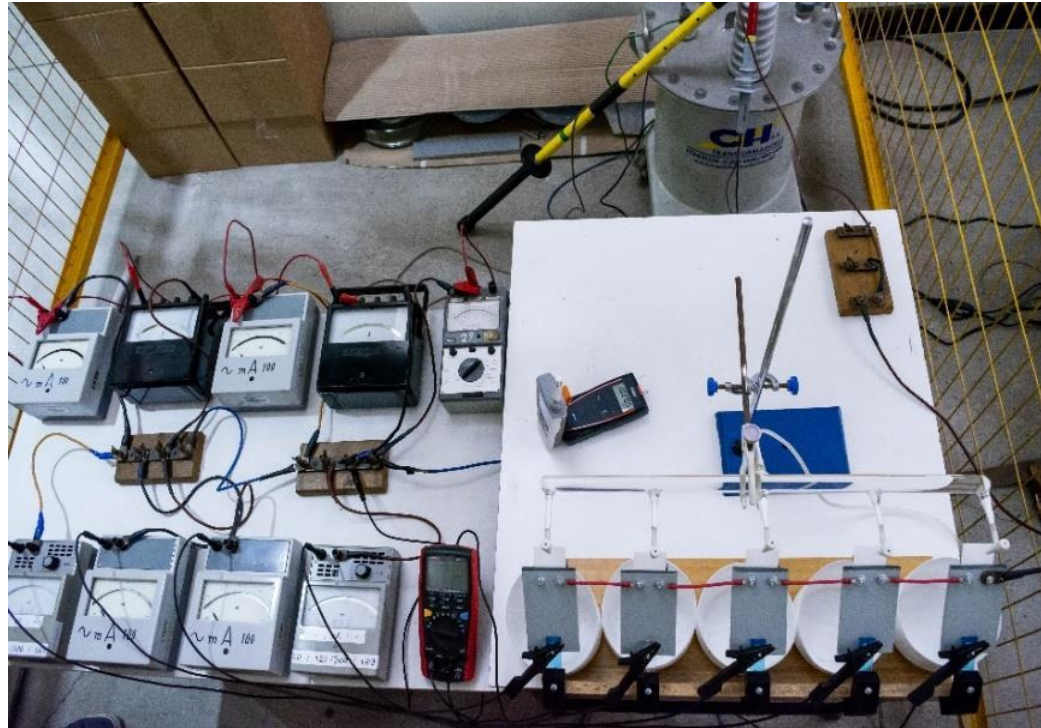


Figura 17: Disposición física del ensayo.

El circuito general del ensayo se muestra en la Figura 39, donde se aprecia un transformador monofásico de 12 [kVA] que permite elevar la tensión de la red a la necesaria para el ensayo. La cual se mide por medio de una punta de tensión con razón de transformación 1:1000. Dado que por las placas no pueden circular más de 60 [mA], se debe limitar la corriente mediante una resistencia y por ende ser monitoreada en cada momento del ensayo ya que, si alguna de ellas logra superar dicho valor se da por finalizado el ensayo según el criterio A. Por ello se conecta un multítester donde se registra cada diez segundos la medición gracias al software integrado en el mismo dispositivo de medición que tiene por nombre, UT71C\_D\_E Interface Program, para tener un conteo de duración del ensayo y corriente por la placa.

Para la distribución del líquido contaminante, este se hace circular por medio de una manguera hasta un manifold con cinco (5) salidas mediante una bomba peristáltica que permite ajustar el caudal para la razón a la cual debe gotear el líquido sobre el papel filtro de acuerdo con lo estipulado por la norma. El líquido contaminante se compone como una solución contaminante de cloruro de amonio al 0.1% y Tritón X-100 al 0,02% de concentración en masa en agua destilada. Su resistividad llegó a 4,34 [ $\Omega\text{m}$ ] a 15,7 [ $^{\circ}\text{C}$ ], pero al momento de ensayar la primera ronda de placas, se obtuvo una resistividad de 4,36 [ $\Omega\text{m}$ ] a 18,7 [ $^{\circ}\text{C}$ ]. Resulta necesario llevar un registro de la resistividad de la solución contaminante cada cierto tiempo con la finalidad de no tener cambios en la resistividad.

# Capítulo 4: Resultados

## 4.1 Tensión de contorno

De acuerdo con el procedimiento expuesto anteriormente, se presentan en las Figuras 18 y 19 las tensiones de contorno promedio normalizadas para cada ambiente de contaminación depositada sobre la superficie de los aisladores de vidrio en seco y húmedo, respectivamente. Es importante destacar que, se presentan los valores normalizados para poder compararlos entre ellos, debido a que todos los ensayos no se realizan bajo las mismas condiciones ambientales.

En la sección de Anexos, al final de este documento, se presentan los valores registrados y el promedio de la tensión de contorno obtenido según cada ambiente para construir las figuras presentadas en la siguiente sección.

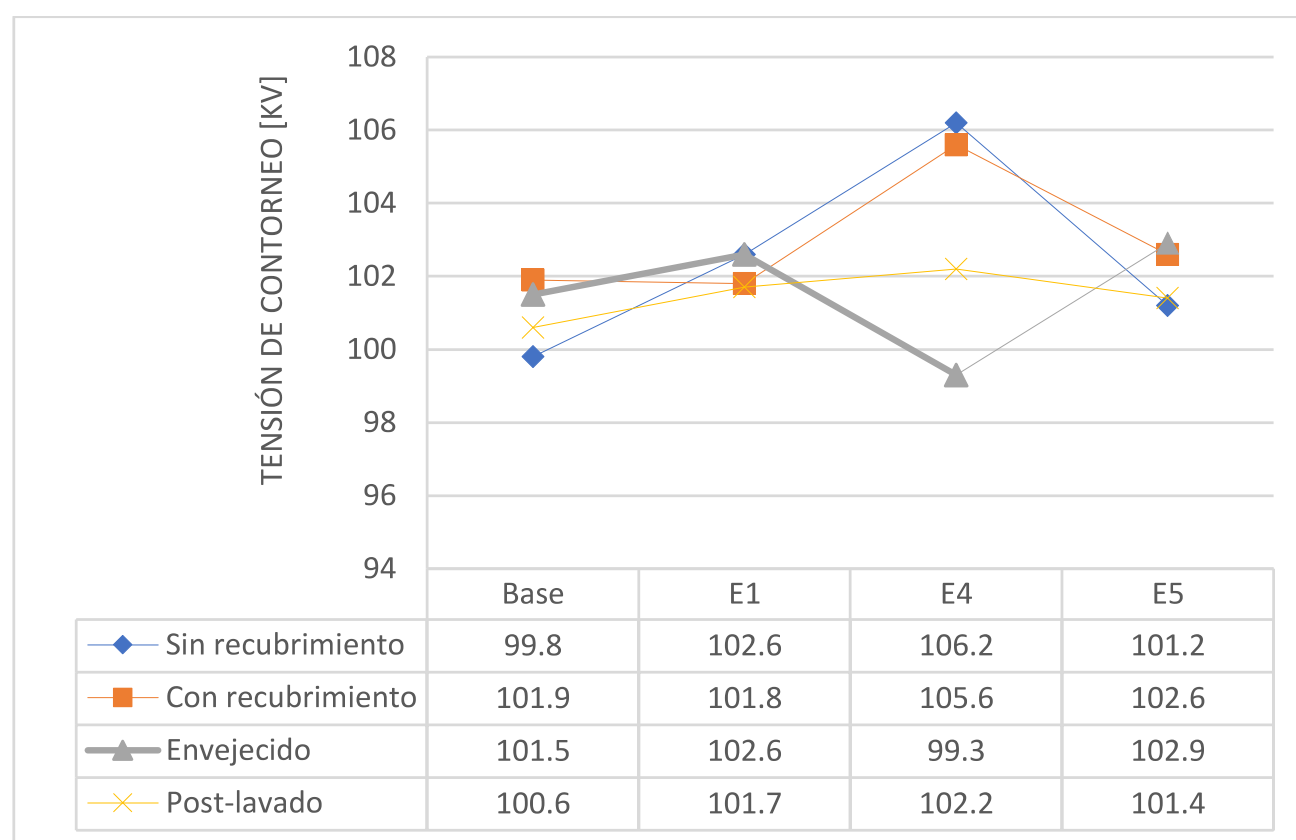


Figura 18: Tensión de contorno en aisladores de vidrio templado bajo condición seca.

Con respecto a los resultados obtenidos, se observa que el valor de tensión de contorno para los diferentes ambientes de contaminación en seco es similar entre las distintas condiciones ensayadas y que cumple con el valor de la ficha técnica.

Con respecto a las variaciones en el valor de tensión de contorno en aisladores sin recubrimiento ante las capas de contaminación de los ambientes ensayados en comparación al caso base, se tiene en E1 un valor 2,8% mayor, en E4 un valor 6,4% mayor y en E5 un valor 1,4% mayor.

Observando los resultados obtenidos para los aisladores con recubrimiento, se observa que el caso base presenta un valor de tensión de contorno de 101,9 [kV]. En relación con el aislador contaminado con una capa de contaminación del ambiente E1, se tiene un valor de tensión de contorno 0,09% menor en comparación al caso base, lo cual es despreciable. El aislador contaminado con una capa de contaminación del ambiente E4, a pesar de presentar valor de tensión de contorno mayor que el caso base, se tiene una tendencia similar y se obtiene un valor de tensión de contorno de 3,6% mayor. Analizando el aislador contaminado con una capa de contaminación del ambiente E5, se tiene un valor de tensión de contorno 0,6% mayor en comparación al caso base.

Luego del envejecimiento acelerado realizado a los aisladores, los valores de tensión de contorno obtenidos en los distintos ambientes son similares a su condición previa ensayada, a excepción del ambiente E4 que presenta una mayor diferencia. Dicha diferencia parecería ser debido a que el alto nivel de NSDD presente en la capa de contaminación en la superficie del aislador, forma un camino preestablecido (“banda seca”) para que se genere la ruptura.

Finalmente, una vez realizado el lavado de los aisladores se vuelven a ensayar los aisladores y el comportamiento sigue siendo el mismo. Donde la eliminación de las capas de contaminación de su superficie lleva al aislador a recuperar la especificación según ficha técnica.

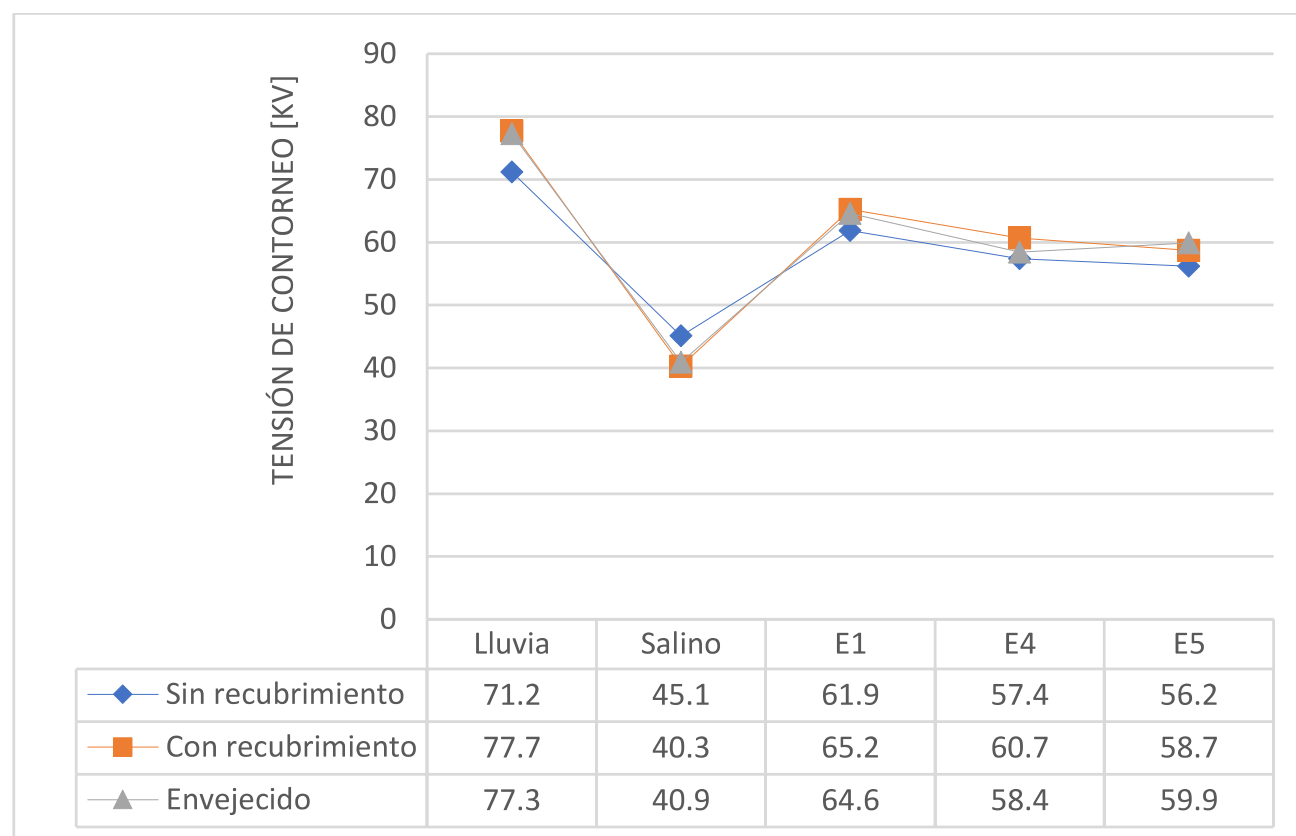


Figura 19: Tensión de contorno en aisladores de vidrio templado bajo condición húmeda.

A partir de los resultados obtenidos de los ensayos en condición húmeda, se aprecia que considerando el dato sin recubrimiento y teniendo como referencia la condición seca del aislador de vidrio templado, para la condición de lluvia existe una reducción del 33,76% en la tensión de contorno. Mientras que, para un ambiente netamente salino la tensión de contorno se ve reducida en un 54,80%, esto se justifica por ser un ambiente mucho más conductor.

El ambiente E1 tiene un valor de tensión de contorno de 13% menor en comparación al caso de lluvia. Parece razonable lo obtenido, teniendo en cuenta que el entorno E1 presenta una gravedad de contaminación del sitio calificada como “*very light*”. Con respecto al ambiente E4, se obtiene un valor de tensión de contorno un 19,4% menor en comparación con el caso de lluvia, teniendo en cuenta además que el ambiente E4 es calificado con una gravedad de contaminación del sitio como “*medium*”.

Finalmente, el ambiente E5, el cual tiene un nivel de ESDD muy alto en comparación con todos los demás ambientes y está calificado con una gravedad de contaminación del sitio como “*heavy*”, se obtiene un valor de contorno un 21% menor en comparación con el caso de lluvia. Lo anterior es altamente a tener en consideración, teniendo en cuenta la variación en el valor de tensión de contorno entre un ambiente húmedo solo con agua en comparación con uno muy contaminado y de características muy conductiva.

Comparando los resultados obtenidos para los aisladores con recubrimiento, se observa que el caso de lluvia presenta un valor de tensión de contorno de 77,7 [kV]. Esta condición húmeda representa una disminución del 23,7% respecto al caso del aislador en seco. Mientras que para el ambiente salino la disminución porcentual de la tensión de contorno en comparación al aislador en seco alcanza un 60%.

En relación con el aislador contaminado con una capa de contaminación del ambiente E1, se tiene un valor de tensión de contorno 16% menor en comparación al caso de lluvia. El aislador contaminado con una capa de contaminación del ambiente E4 se tiene una tendencia similar y se obtiene un valor de tensión de contorno de 21,8% menor. Analizando el aislador contaminado con una capa de contaminación del ambiente E5, se tiene un valor de tensión de contorno 24,5% menor en comparación al caso de lluvia.

Luego del envejecimiento acelerado realizado a los aisladores, los valores de tensión de contorno obtenidos en los distintos ambientes son similares con diferencias muy pequeñas tanto menor como mayor respecto a la condición con recubrimiento.

Del mismo modo, se presentan las Figuras 20 y 21 los valores de las tensiones de contorno promedio normalizadas según el tipo de ambiente en aisladores cerámicos en condición seca y húmeda, respectivamente.

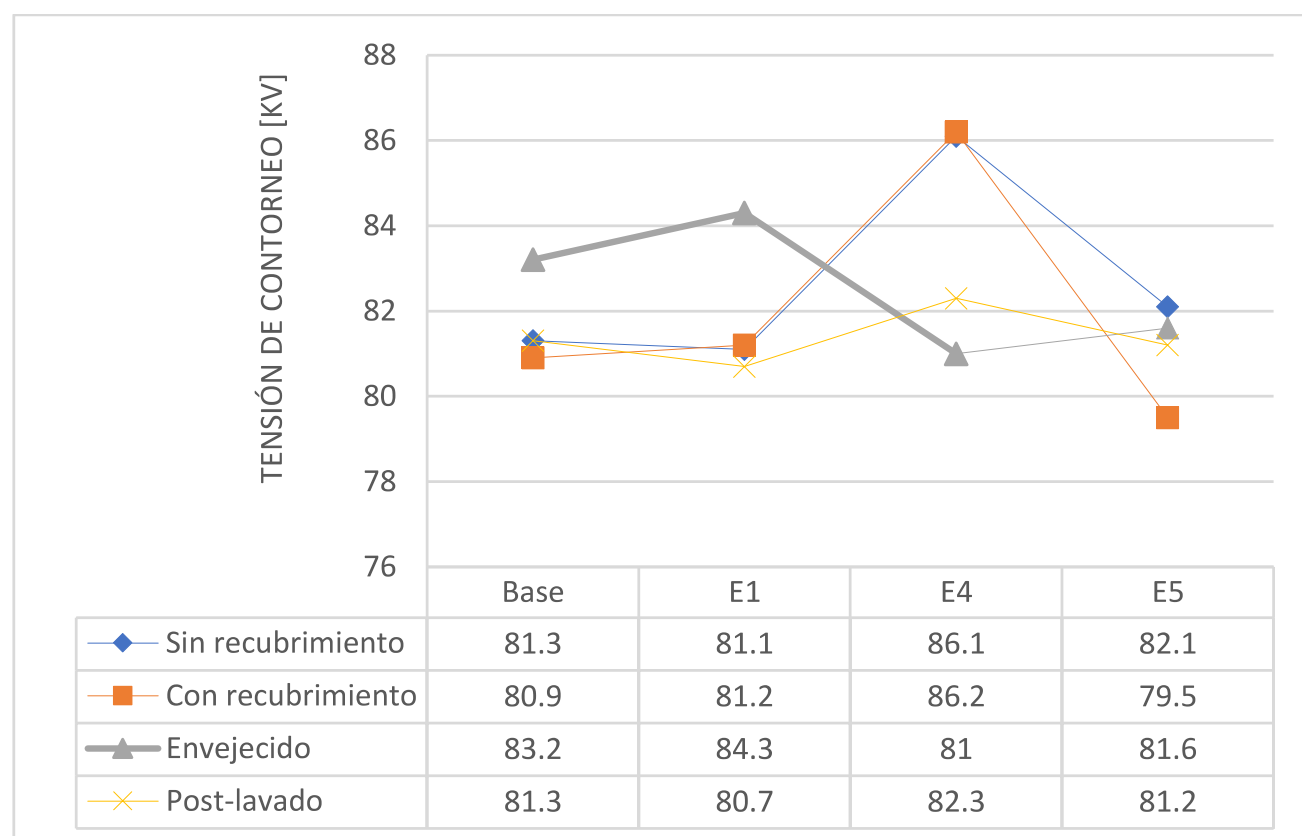


Figura 20: Tensión de contorno en aisladores cerámicos bajo condición seca.

A partir de los resultados obtenidos se observa que el valor de tensión de contorno para los diferentes ambientes de contaminación en seco resulta más o menos similar entre las distintas condiciones ensayadas y que cumple con el valor de la ficha técnica, salvo algunas condiciones en particular.

Con respecto a las variaciones en el valor de tensión de contorno en aisladores sin recubrimiento ante las capas de contaminación de los ambientes ensayados en comparación al caso base, se tiene en E1 un valor 0,2% menor, en E4 un valor 5,9% mayor y en E5 un valor 0,9% mayor.

Observando los resultados obtenidos para los aisladores con recubrimiento, se observa que el caso base presenta un valor de tensión de contorno de 80,9 [kV]. En relación con el aislador contaminado

con una capa de contaminación del ambiente E1, se tiene un valor de tensión de contorno 0,3% mayor en comparación al caso base, lo cual es casi despreciable. El aislador contaminado con una capa de contaminación del ambiente E4, a pesar de presentar valor de tensión de contorno mayor que el caso base, se tiene una tendencia similar y se obtiene un valor de tensión de contorno de 6,5% mayor. Analizando el aislador contaminado con una capa de contaminación del ambiente E5, se tiene un valor de tensión de contorno 1,7% menor en comparación al caso base.

Luego del envejecimiento acelerado realizado a los aisladores, los valores de tensión de contorno obtenidos en los distintos ambientes son diferentes a las condiciones previas ensayadas, a excepción del ambiente E5 que si presento un similar resultado. En cuanto a las diferencias que se producen respecto a los otros ambiente, para la condición base y el ambiente E1 pareciera que las condiciones ambientales del día del ensayo influyeron en dicho resultado. Mientras que en el ambiente E4 de igual manera el nivel de NSDD asociado a la capa de contaminación en la superficie del aislador forma un camino preestablecido para la ruptura.

Finalmente, una vez realizado el lavado de los aisladores se vuelven a ensayar los aisladores y el comportamiento sigue siendo el mismo. Donde la eliminación de las capas de contaminación de su superficie lleva al aislador a recuperar su condición de diseño en seco.

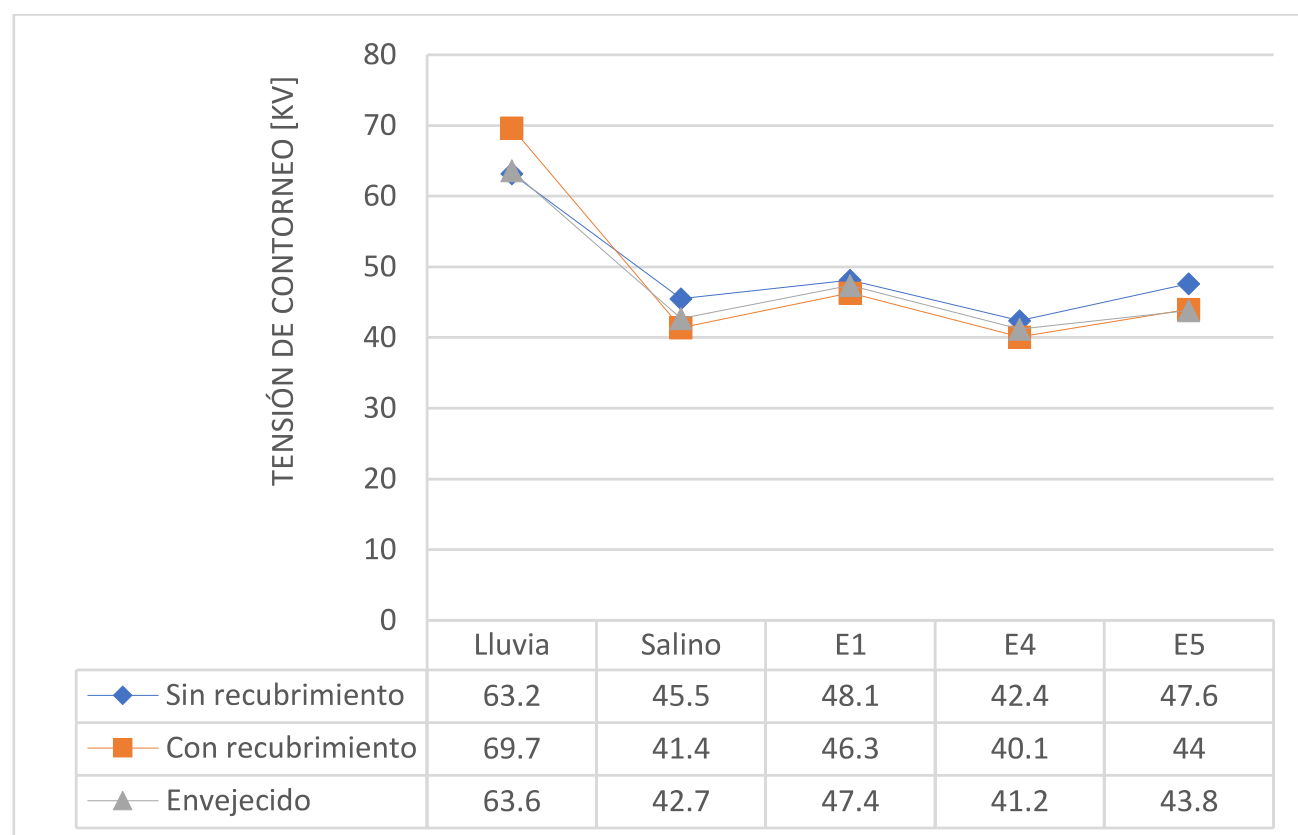


Figura 21: Tensión de contorno en aisladores cerámicos bajo condición húmeda.

A partir de los resultados de los aisladores cerámicos, se aprecia que considerando el dato sin recubrimiento y teniendo como referencia la condición seca del aislador, para la condición de lluvia existe una reducción del 22,2% en la tensión de contorno. Mientras que, para un ambiente netamente salino la tensión de contorno se ve reducida en un 44%, esto se justifica por ser un ambiente mucho más conductor.

Ya en un ambiente E1 se tiene un valor de tensión de contorno de 23,9% menor en comparación al caso de lluvia. Con respecto al ambiente E4, se obtiene un valor de tensión de contorno un 32,9% menor en comparación con el caso de lluvia, teniendo en cuenta la calificación de dicho ambiente como “medium”. Finalmente, el ambiente E5 calificado con una gravedad de contaminación del sitio

como “*heavy*”, se obtiene un valor de contorno un 24,6% menor en comparación con el caso de lluvia.

Ahora revisando los resultados obtenidos de los aisladores con recubrimiento, se observa que el caso de lluvia presenta un valor de tensión de contorno de 69,7 [kV]. Esta condición húmeda representa una disminución del 13,8% respecto al caso del aislador en seco. Mientras que para el ambiente salino la disminución porcentual de la tensión de contorno en comparación al aislador en seco alcanza un 48,8%.

En relación con el aislador contaminado con una capa de contaminación del ambiente E1, se tiene un valor de tensión de contorno 33,5% menor en comparación al caso de lluvia. El aislador contaminado con una capa de contaminación del ambiente E4 se tiene una tendencia similar y se obtiene un valor de tensión de contorno de 42,4% menor. Analizando el aislador contaminado con una capa de contaminación del ambiente E5, se tiene un valor de tensión de contorno 36,8% menor en comparación al caso de lluvia.

De igual forma, luego del envejecimiento acelerado los valores de tensión de contorno obtenidos en los distintos ambientes son similares con diferencias muy pequeñas tanto menor como mayor respecto a la condición con recubrimiento.

Finalmente, como resultado de los ensayos en seco para los aisladores de vidrio templado y de cerámica se desprende que, la tendencia resulta más o menos constante comparando el caso base y las capas de contaminación de los entornos E1, E4 y E5 en las distintas condiciones ensayadas. Por lo tanto, el nivel de contaminación presente en los ambientes, al variar el nivel de contaminación, no parece tener mayor influencia en el valor de tensión de contorno en aisladores.

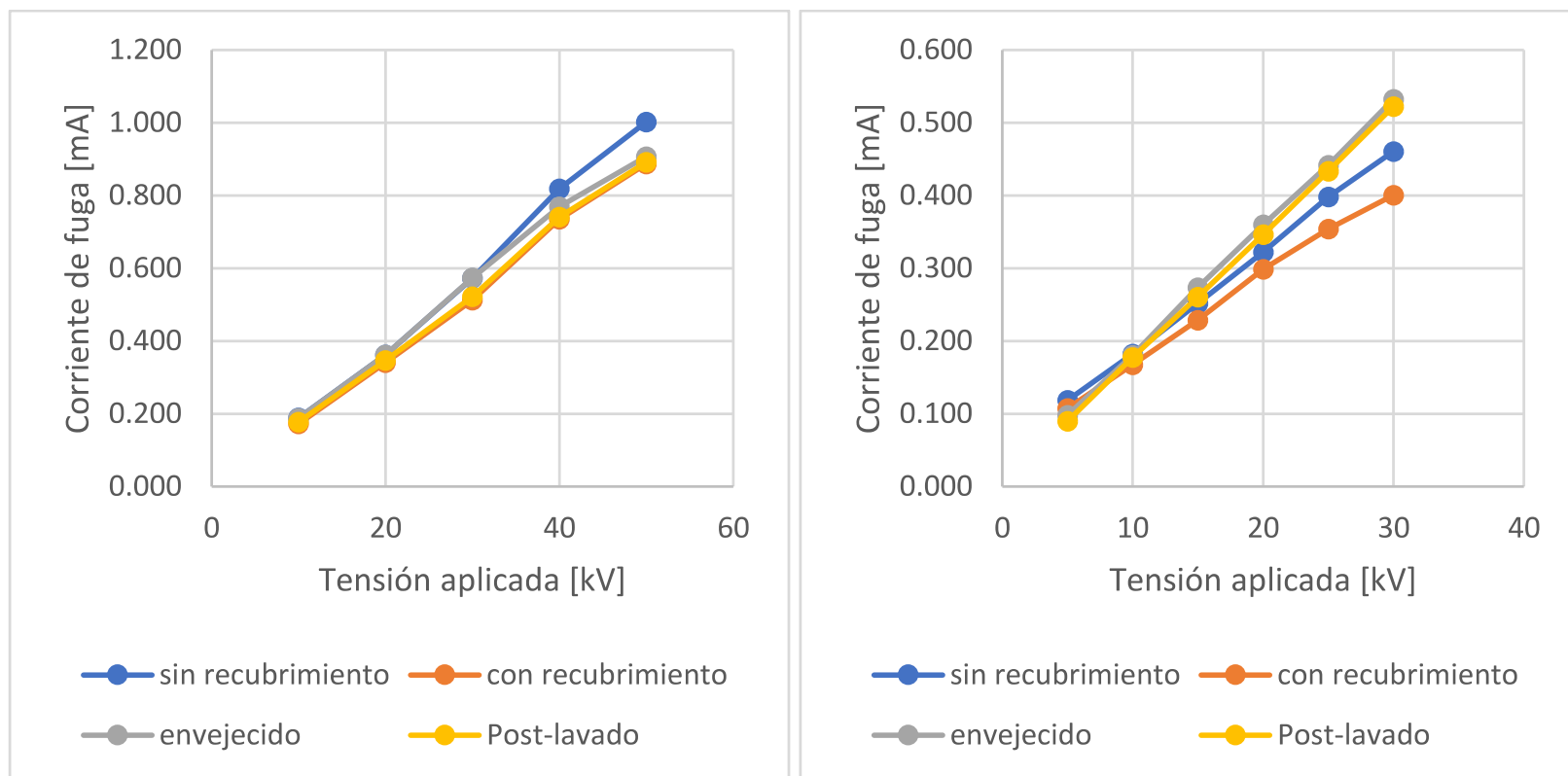
En cuanto al desempeño de los aisladores de vidrio templado y de cerámica en condición húmeda, se desprende que la tendencia resulta en una disminución del valor de tensión de contorno según las capas de contaminación de los entornos E1, E4 y E5. Por lo tanto, el nivel de contaminación presente en un ambiente húmedo, al variar el nivel de contaminación, tiene influencia en el valor de tensión de contorno en aisladores.

## **4.2 Corrientes de fuga**

De acuerdo con el procedimiento expuesto anteriormente, a continuación, se presentan las figuras que muestran la evolución del valor de corrientes de fuga en función de la tensión aplicada para cada tipo de ambiente y para tipo de aislador sin y con recubrimiento. Además, en la sección de Anexos, al final de este documento, se presentan todos los valores de corrientes de fuga de cada ambiente para construir los gráficos mostrados en esta sección.

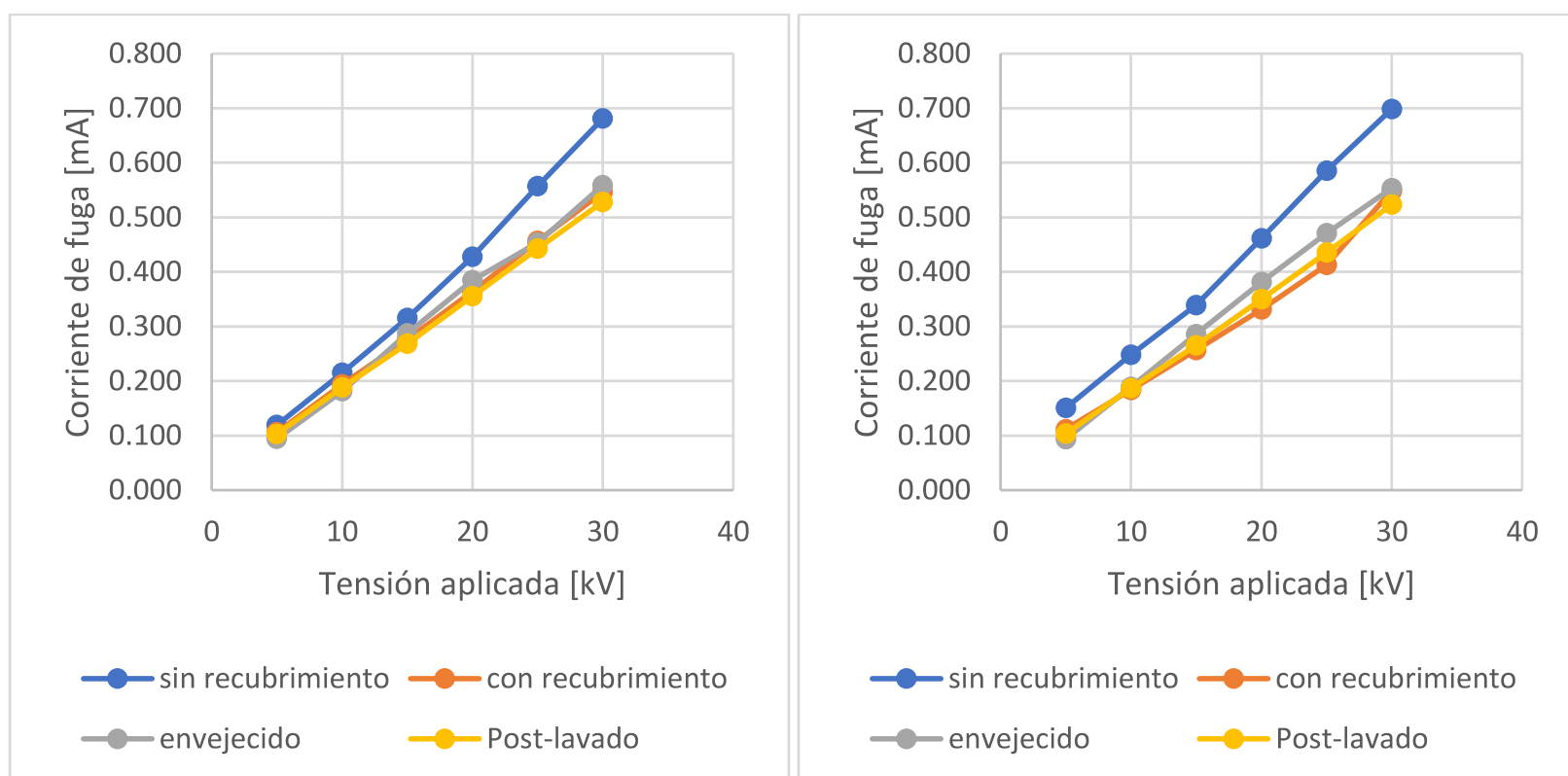
### **4.2.1 Resultados de aisladores de vidrio en condición seca**

En la Figura 22 se expone, por separado, la evolución de la corriente de fuga para cada aislador que presenta una capa de contaminación seca de cada ambiente. De esta forma, resulta más sencillo evaluar los resultados entre aisladores que cuentan con el recubrimiento y otros sin el recubrimiento. Además del efecto del envejecimiento acelerado y una vez que fueron lavados y vueltos a ensayar.



a) Corriente de fuga caso base.

b) Corriente de fuga caso E1.



c) Corriente de fuga caso E4.

d) Corriente de fuga caso E5.

Figura 22: Corrientes de fuga en aisladores de vidrio templado bajo condición seca.

Las gráficas que se muestran en la Figura 22 permiten analizar el comportamiento de las corrientes de fuga en los ambientes de contaminación generados y el impacto que se tiene en la superficie de los aisladores de vidrio templado. La tendencia entre los distintos ambientes resulta ser muy similar, esto se atribuye a que principalmente en la condición de estado seco existe una actuación por parte del recubrimiento de encapsular la contaminación, debido a esto es la leve diferencia que presenta los resultados sin y con recubrimiento. Dicha diferencia se puede cuantificar en una disminución promedio de las corrientes de fuga de un 9% en los aisladores con recubrimiento para el caso base.

Analizando las Figuras 22.c y 22.d donde las concentraciones de los componentes de contaminación aumentan en consideración respecto al caso de la Figura 22.b, existe un mejor comportamiento en

aquellos aisladores que cuentan con recubrimiento. De hecho, la disminución de las corrientes de fuga en los ambientes E1, E4 y E5 son de 9,7%, 14,3% y 25,9% respectivamente.

Los resultados de la Figura 19 que muestran las corrientes de fuga en los aisladores de vidrio templado en condición seca tras el lavado no han sido significativamente distintos respecto a su estado previo, manteniéndose en todo momento con resultados inferiores a la condición de envejecido y levemente superior a su estado inicial con recubrimiento.

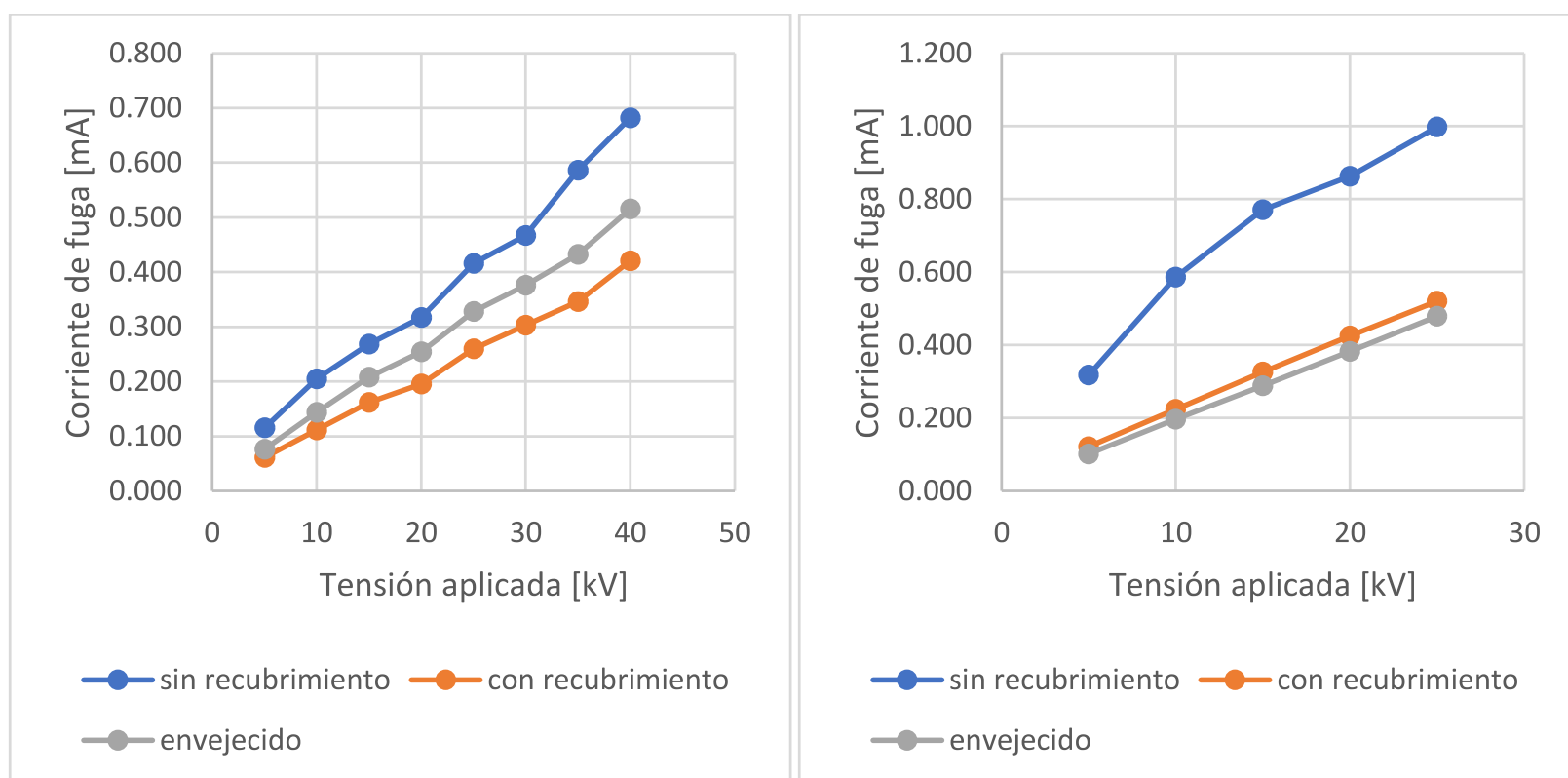
#### 4.2.2 Resultados aisladores de vidrio en condición húmeda

En la Figura 23 se expone, de igual forma por separado, la evolución de la corriente de fuga para cada ambiente húmedo ensayado. De esta forma, resulta sencillo comparar los resultados entre aisladores.

Los ensayos en condiciones húmeda-salina aumentan las corrientes de fuga en comparación a las condiciones secas, esto a su vez conlleva un aumento en descargas parciales, lo que dificulta las mediciones en escalones de tensión más alto.

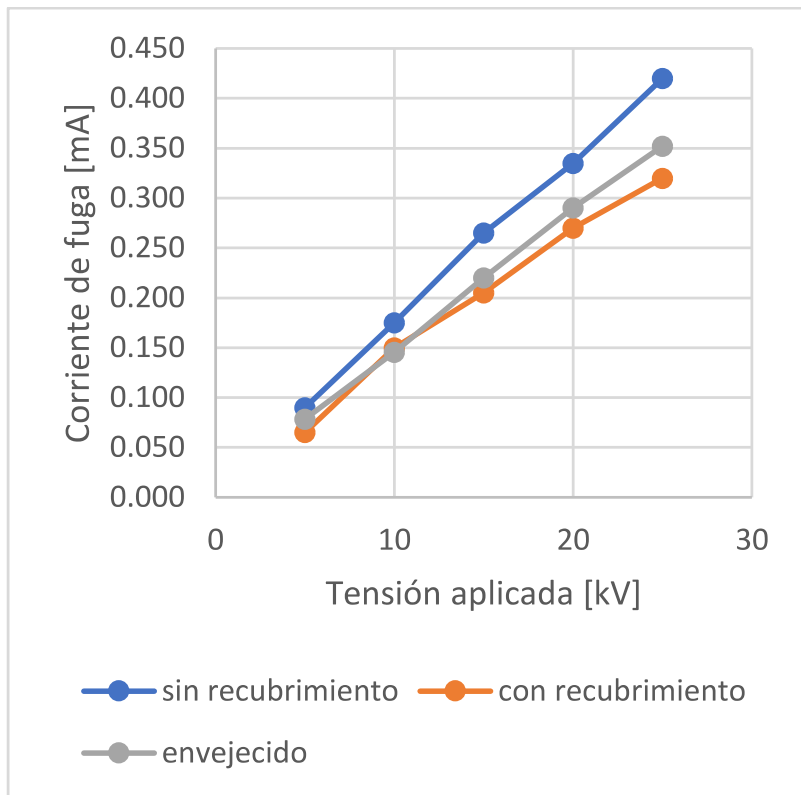
Revisando todos los resultados de las gráficas de la Figura 23, vemos que los aisladores recubiertos y luego de ser envejecidos poseen un comportamiento muy similar y mejor que el aislador sin recubrimiento, esto gracias a las propiedades hidrofóbicas que entrega el recubrimiento siliconado favoreciendo el lavado de los agentes contaminantes.

El análisis a partir de cada gráfica presentada en la Figura 23 es categórico. Utilizar el recubrimiento siliconado en aisladores de vidrio templado expuestos a condiciones húmedas reduce, en todos los ambientes estudiados, los niveles de corriente de fuga. Para las condiciones de lluvia y ambiente salino las corrientes de fuga se reducen en un 40% y 56%, respectivamente. Mientras que para los ambientes E1, E4 y E5 los aisladores recubiertos redujeron las corrientes en un 21%, 48% y 25%, respectivamente. Por lo que es totalmente recomendable su uso, desde el punto de vista de la reducción de la corriente de fuga.

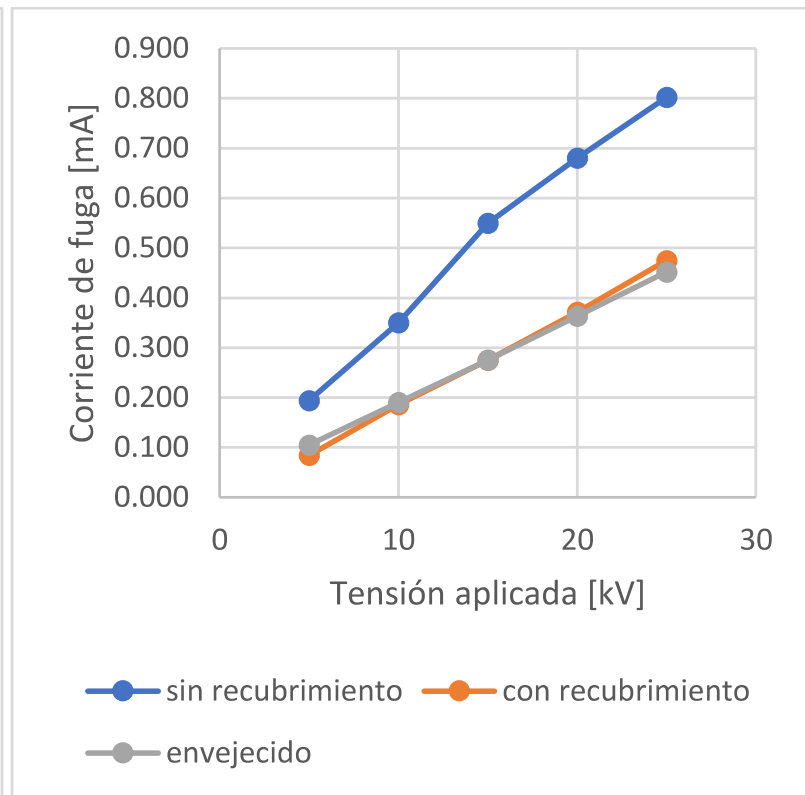


a) Corriente de fuga caso lluvia.

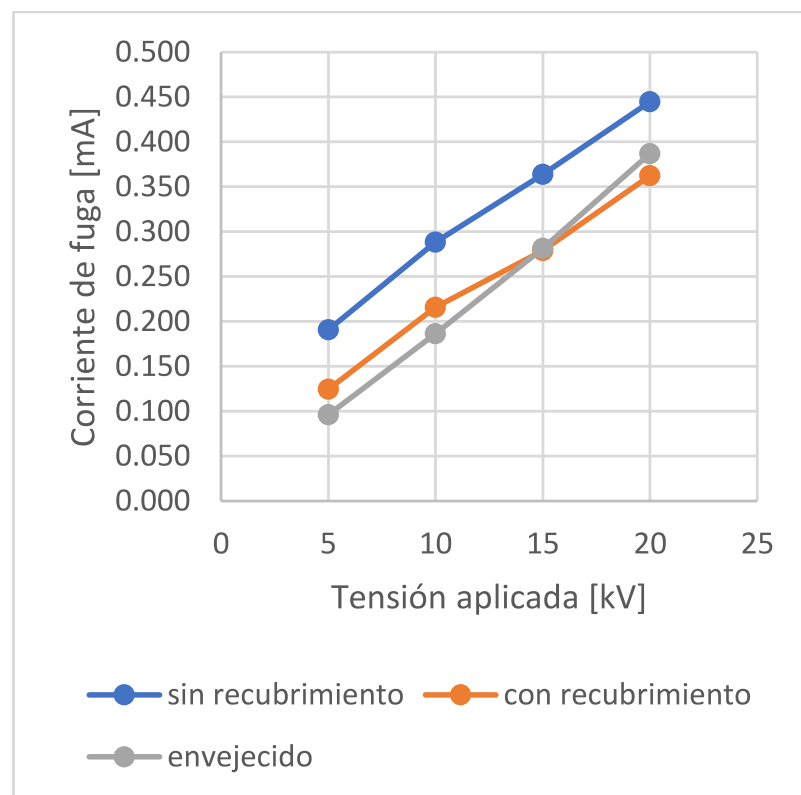
b) Corriente de fuga caso salino.



c) Corriente de fuga caso E1.



d) Corriente de fuga caso E4.

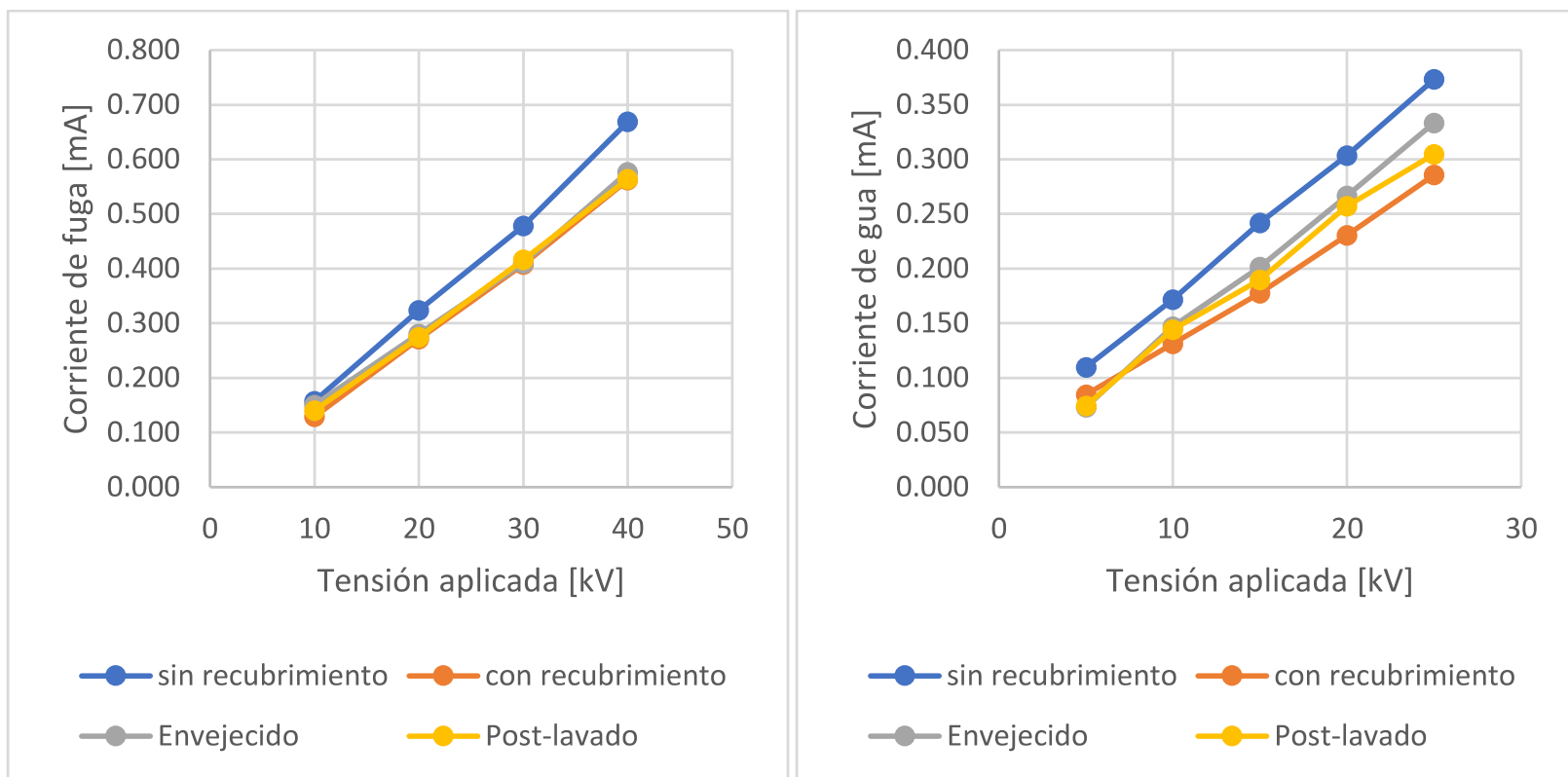


e) Corriente de fuga caso E5.

Figura 23: Corriente de fuga en aisladores de vidrio templado bajo condición húmeda.

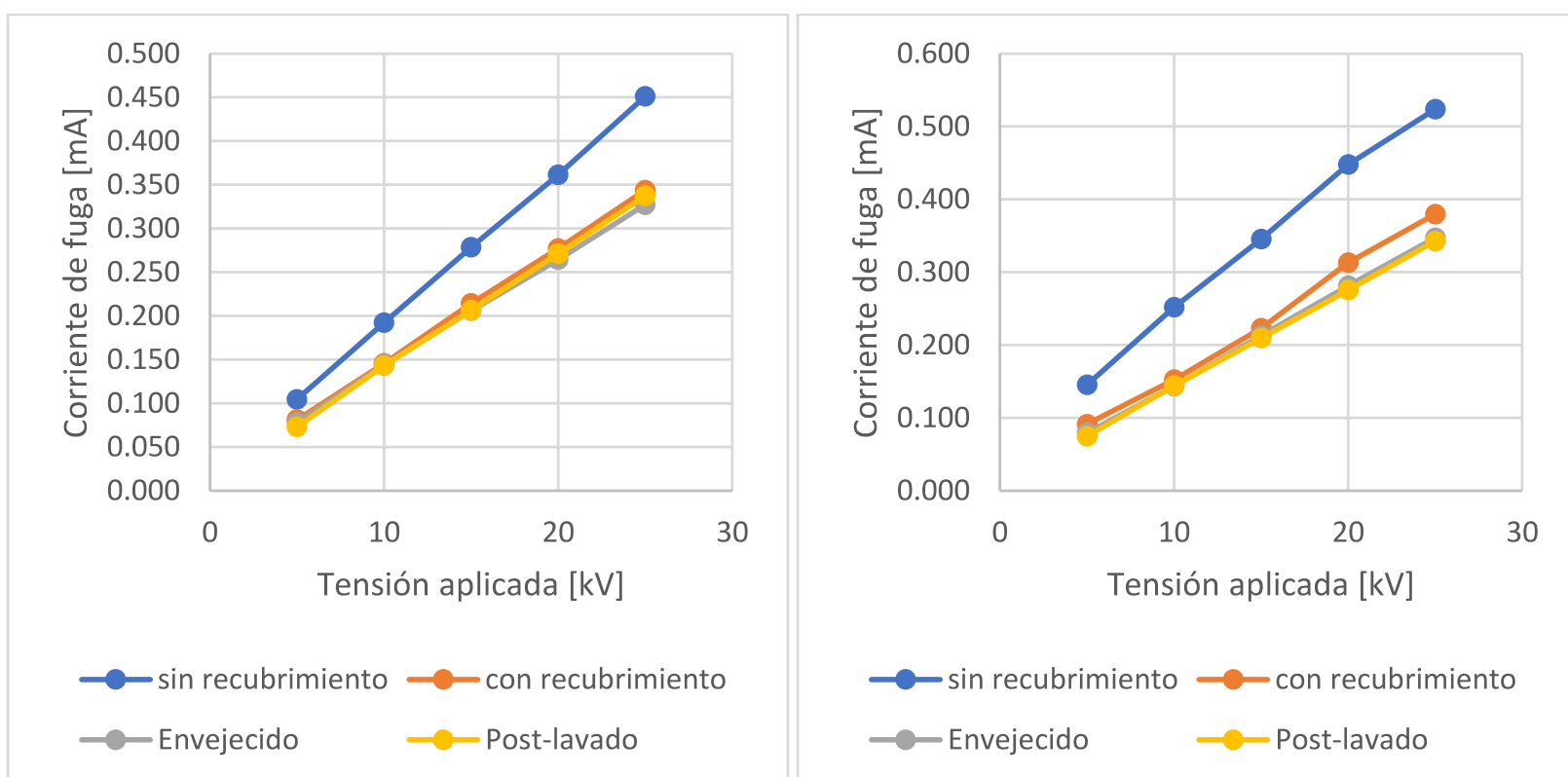
#### 4.2.3 Resultados aisladores de cerámica en condición seca

Siguiendo el mismo análisis anterior, en la Figura 24 se expone la evolución de la corriente de fuga para cada aislador de cerámica ensayado en función de la tensión aplicada y que presenta una capa de contaminación seca de cada ambiente replicado.



a) Corriente de fuga caso base.

b) Corriente de fuga caso E1.



c) Corriente de fuga caso E4.

d) Corriente de fuga caso E5.

Figura 24: Corriente de fuga en aisladores cerámicos bajo condición seca.

Los resultados de la Figura 24 indican que, si bien de manera general en todos los escalones de tensión la tendencia resulta ser muy similar, en aquellos aisladores con recubrimiento, resultaron con niveles de corrientes de fuga menores en comparación al no tener recubrimiento. En el caso base, el hecho de recubrir un aislador impacta de tal manera que las corrientes de fuga en condición seca se redujeron en un 16%. Mientras que los ambientes ensayados, un 24% se redujo la corriente para un ambiente E1, un 23% en un ambiente E4 y un 33% en un ambiente E5.

Bajo este concepto de comparación, las propiedades hidrofóbicas del recubrimiento aportan a las características *anti-soiling*, lo que implica un aumento en la eficiencia de la limpieza de aisladores.

En el caso de aisladores ensayados una vez que fueron lavados, la medición de la corriente de fuga permite determinar el estado de las propiedades hidrofóbicas de la superficie del aislador una vez removida la capa contaminante depositada.

#### 4.2.4 Resultados aisladores de cerámica en condición húmeda

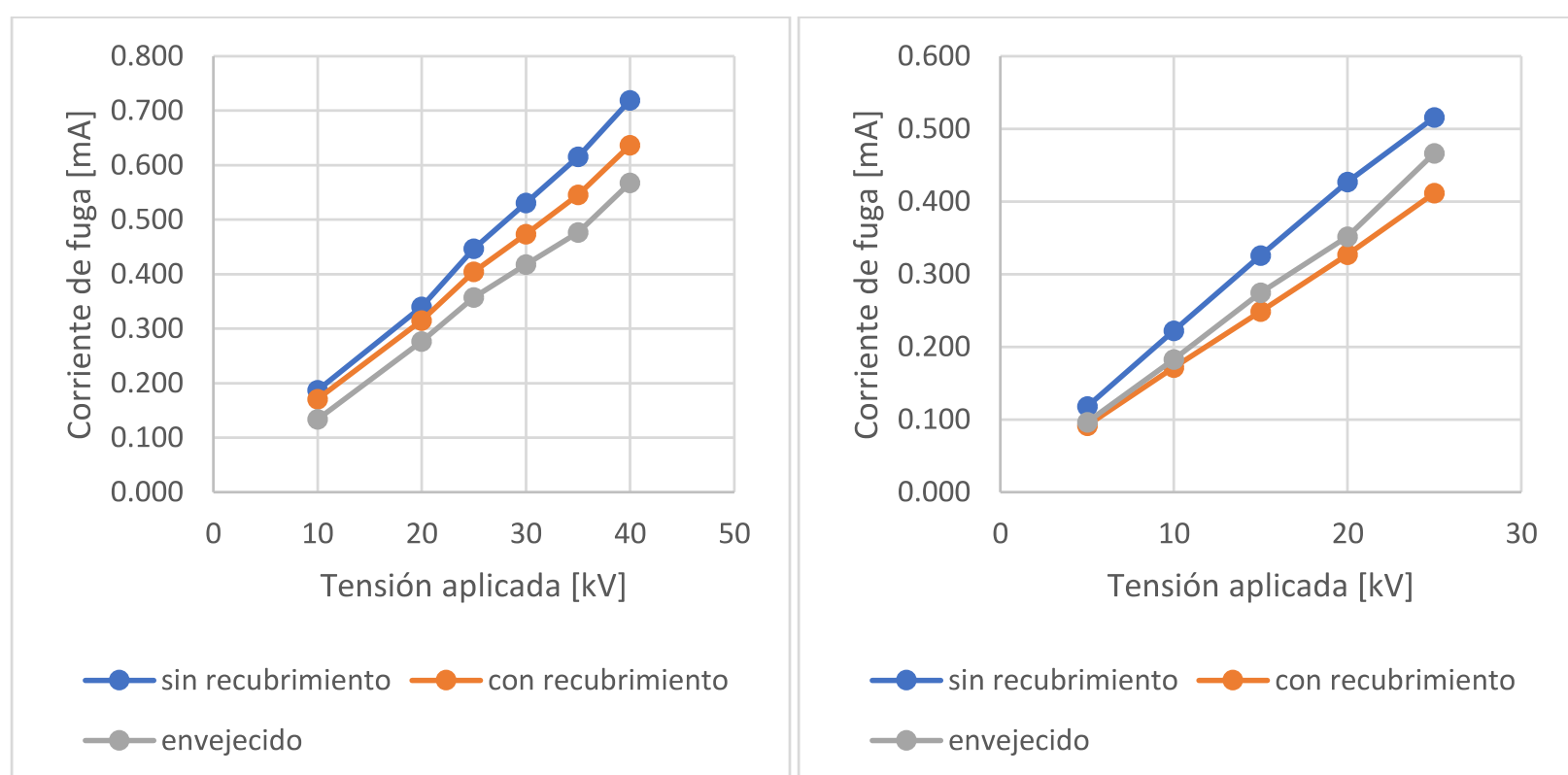
En la Figura 25 se exponen, también por separado, la evolución de la corriente de fuga para cada ambiente húmedo ensayado.

Observando los datos obtenidos de cada ambiente, se tiene un comportamiento que se puede describir como lineal, donde en aisladores sin recubrimiento, la corriente de fuga presenta mayores valores para cada escalón de tensión aplicado en comparación a los aisladores con recubrimiento.

Los resultados de los ambientes salinos y E5, los cuales se caracterizan por la presencia en altas concentraciones de sal, lo que implica un ambiente mucho más conductivo, se obtienen niveles de corriente de fuga mayores con respecto a los otros ambientes ensayados.

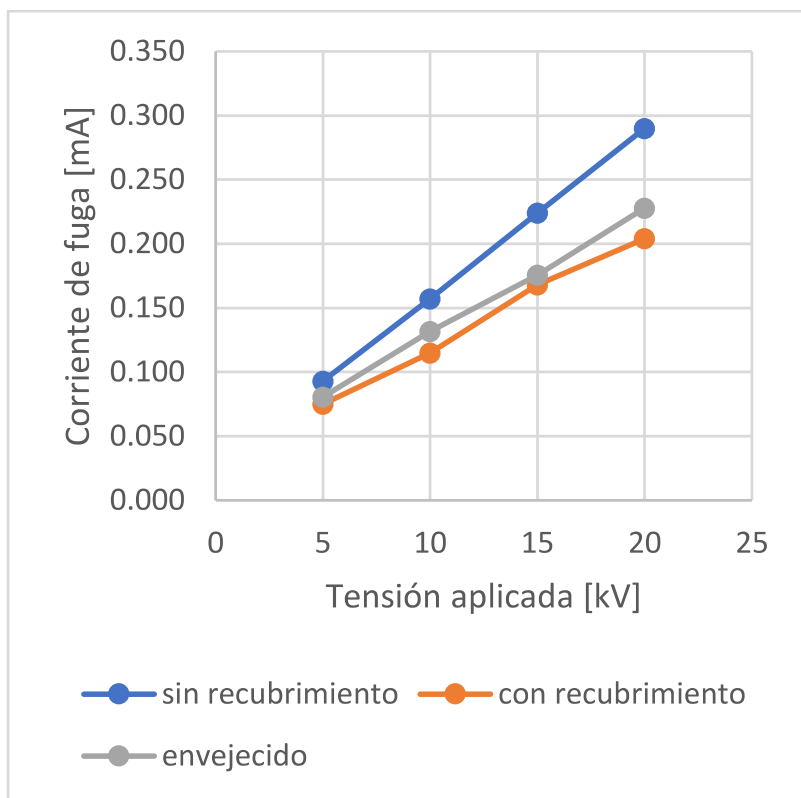
Mientras que en los ambientes E1 y E4, donde hay una mayor presencia de componentes no solubles, los resultados obtenidos fueron muy similares entre sí.

Los resultados de la Figura 25 indican que independiente el ambiente húmedo generado, existe una disminución en las corrientes de fuga para aquellos aisladores con recubrimiento siliconado, el cual alcanzó valores de corriente de fuga del orden de un 10% menor que en comparación al sin recubrimiento en caso de lluvia. En la presencia de ambientes húmedos con un alta concentración de sal como lo son los ambientes salinos y E5, las corrientes se redujeron en un 22% y 20%, respectivamente. Mientras que, en los ambientes ensayados con una alta concentración de componentes no solubles, como lo son los ambientes E1 y E4, los niveles en las corrientes de fuga se reducen en promedio un 25% y 21%, respectivamente.

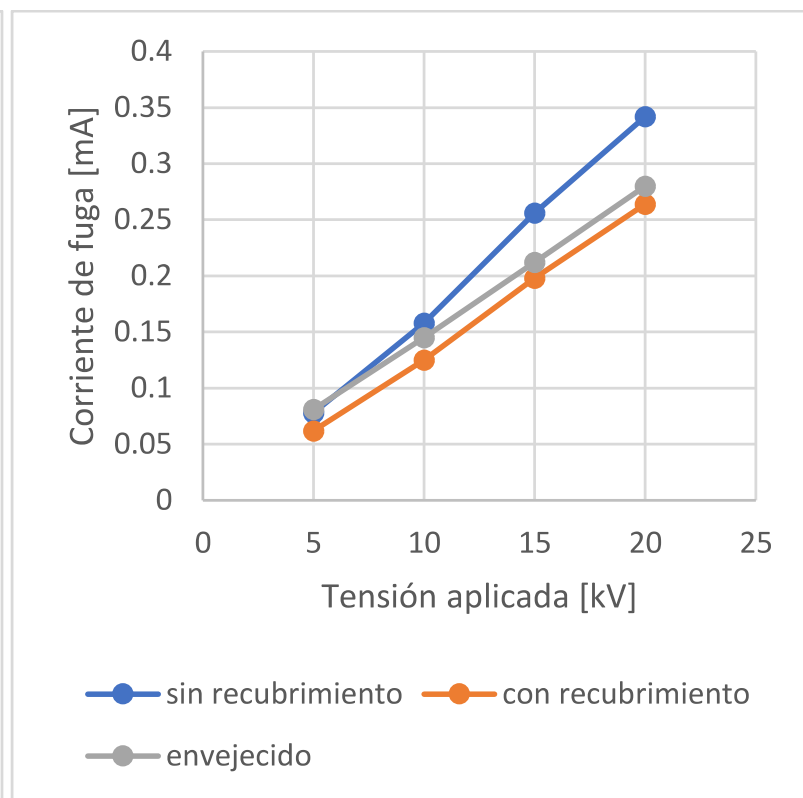


a) Corriente de fuga caso lluvia.

b) Corriente de fuga caso salino.



c) Corriente de fuga caso E1.



d) Corriente de fuga caso E4.



e) Corriente de fuga caso E5.

Figura 25: Corriente de fuga en aisladores cerámicos bajo condición húmeda.

De las gráficas de la Figura 22 y 24, que corresponden a las corrientes de fuga en aisladores de vidrio y de cerámica en condición seca, respectivamente. Igual existe evidencia de una reducción en los niveles de corriente de fuga en condiciones ya que, ante la aplicación del recubrimiento siliconado a los aisladores ensayados, vemos una reducción de un 9% de las corrientes de fuga en aisladores de vidrio templado. Mientras que en aisladores cerámicos dicha reducción puede alcanzar un 16%.

En cambio, a partir de cada gráfica bajo condición húmeda presentada en la Figura 23 como en la Figura 25, resulta categórico el impacto de utilizar el recubrimiento siliconado en aisladores de vidrio templado y cerámicos que se ven más expuestos a condiciones húmedas, debido a que existe una

reducción considerable, en torno a un 20% en todos los ambientes estudiados, del valor de la corriente de fuga.

Teniendo a primera vista estos resultados, es que resulta totalmente recomendable su aplicación.

### 4.3 Verificación clase de hidrofobicidad

En la Figura 26 se expone la prueba de hidrofobicidad en aisladores de vidrio que fueron expuestos al ambiente contaminado E1. En el aislador sin recubrir (Figura 26.a) se tiene un HC6, en donde aún existen gotas, sin la formación completa sobre la superficie de una película completa de agua. Una clase HC2 se obtiene en el aislador con recubrimiento (Figura 26.b), observando que sobre la superficie se forman en su mayoría gotas discretas, en donde algunas de ellas se desvían de la forma circular. Para el caso envejecido, se obtiene una clase HC3.



a) Aislador sin recubrimiento.

b) Aislador con recubrimiento.

c) Aislador envejecido.

Figura 26: Hidrofobicidad en aisladores de vidrio templado en ambiente de contaminación E1.

En la Figura 27 se presentan los resultados de la prueba de hidrofobicidad en aisladores que fueron expuestos al ambiente contaminado E4. En el aislador sin recubrir (Figura 27.a) se tiene un HC6, ya que no se logra formar por completo una película completa de agua. En el aislador con recubrimiento (Figura 27.b) se tiene una clase HC4, observando que la superficie está cubierta por canales de agua y todavía se tienen pequeñas áreas no mojadas. Mientras que el aislador que fue envejecido presenta una clase HC5.



a) Aislador sin recubrimiento.

b) Aislador con recubrimiento.

c) Aislador envejecido.

Figura 27: Hidrofobicidad en aisladores de vidrio templado en ambiente de contaminación E4.

En la Figura 28 se presentan los resultados de la prueba de hidrofobicidad en aisladores que fueron expuestos al ambiente contaminado E5. En el aislador sin recubrir (Figura 28.a) se tiene un HC7, en donde se forma una película completa de agua. A diferencia del aislador con recubrimiento (Figura 28.b), que se tiene una clase HC3. En el aislador con recubrimiento envejecido (Figura 28.c) se tiene una clase HC4, observando que sobre la superficie se depositan algunas gotas discretas, pero con presencia de algunos canales de agua humedecidos.



a) Aislador sin recubrimiento.

b) Aislador con recubrimiento.

c) Aislador envejecido.

Figura 28: Hidrofobicidad en aisladores de vidrio templado en ambiente de contaminación E5.

A continuación, se exponen la pruebas de hidrofobicidad en aisladores cerámicos que fueron expuestos al ambiente contaminado E1, E4 y E5. En primer lugar, se tiene el ambiente E1 donde en el aislador sin recubrir (Figura 29.a) se tiene un HC5, en donde aún existen gotas, sin la formación completa sobre la superficie de una película completa de agua. Una clase HC2 se obtiene en el aislador con recubrimiento (Figura 29.b), observando que sobre la superficie se forman en su mayoría gotas discretas, en donde algunas de ellas se desvían de la forma circular. Para el caso envejecido, se obtiene una clase HC3.



a) Aislador sin recubrimiento.

b) Aislador con recubrimiento.

c) Aislador envejecido.

Figura 29: Hidrofobicidad en aisladores de cerámica en ambiente de contaminación E1.

En la Figura 30 se presentan los resultados de la prueba de hidrofobicidad en aisladores que fueron expuestos al ambiente contaminado E4. En el aislador sin recubrir (Figura 30a) se tiene un HC6, ya que no se logra formar por completo una película completa de agua. En el aislador con recubrimiento (Figura 30.b) se tiene una clase HC4, observando que la superficie está cubierta por canales de agua

y todavía se tienen pequeñas áreas no mojadas. Mientras que el aislador que fue envejecido presenta una clase HC5.



a) Aislador sin recubrimiento.

b) Aislador con recubrimiento.

c) Aislador envejecido.

Figura 30: Hidrofobicidad en aisladores de cerámica en ambiente de contaminación E4.

Finalmente, en la Figura 31 se presentan los resultados de la prueba de hidrofobicidad en aisladores que fueron expuestos al ambiente contaminado E5. En el aislador sin recubrir (Figura 31.a) se tiene un HC5, en donde no se alcanza a formar una película completa de agua. A diferencia del aislador con recubrimiento (Figura 31.b), que se tiene una clase HC3. En el aislador con recubrimiento envejecido (Figura 31.c) se tiene una clase HC4, observando que sobre la superficie se depositan algunas gotas discretas, pero con presencia de algunos canales de agua humedecidos.



a) Aislador sin recubrimiento.

b) Aislador con recubrimiento.

c) Aislador envejecido.

Figura 31: Hidrofobicidad en aisladores de cerámica en ambiente de contaminación E5.

Luego de realizado los ensayos, se procedió con el lavado de los aisladores para determinar la clase de hidrofobicidad luego del efecto de los diferentes ambientes de contaminación y envejecimiento al cual fueron sometidos. Para el caso de los aisladores de vidrio, en aquel sin recubrimiento (Figura 32.a) se tiene una clase HC3. A diferencia del aislador con recubrimiento (Figura 32.b) que tiene una clase HC1.



a) Aislador sin recubrimiento.

b) Aislador con recubrimiento.

Figura 32: Hidrofobicidad en aisladores de vidrio templado luego de lavado.

Mientras que, el resultado de los aisladores cerámicos luego del lavado se ve en la Figura 33. Aquel aislador sin recubrimiento tiene una clase HC3 (Figura 33.a). Mientras que el aislador con recubrimiento tiene una clase HC1 (Figura 33.b). De esta forma vemos una recuperación en la hidrofobicidad del recubrimiento siliconado.



a) Aislador sin recubrimiento.

b) Aislador con recubrimiento.

Figura 33: Hidrofobicidad en aisladores cerámicos luego de lavado.

A partir de los resultados obtenidos, se presenta en las Tablas 6 y 7 el resumen de las clases de hidrofobicidad obtenidas para cada aislador y para cada tipo de superficie contaminada, incluyendo el caso base y posterior al lavado.

Tipo de superficie	Grado de contaminación del sitio SPS	HC sin recubrimiento	HC con recubrimiento	HC con recubrimiento envejecido
Limpia	-	HC3	HC1	HC2
Ambiente E1	<i>Very light</i>	HC6	HC2	HC3
Ambiente E4	<i>Medium</i>	HC6	HC4	HC5
Ambiente E5	<i>Heavy</i>	HC7	HC3	HC4
Post-lavado	-	HC3	HC1	HC1

Tabla 6: Resumen clases de hidrofobicidad para aisladores de vidrio templado.

Tipo de superficie	Grado de contaminación del sitio SPS	HC sin recubrimiento	HC con recubrimiento	HC con recubrimiento envejecido
Limpia	-	HC3	HC1	HC2
Ambiente E1	<i>Very light</i>	HC5	HC2	HC3
Ambiente E4	<i>Medium</i>	HC6	HC4	HC5
Ambiente E5	<i>Heavy</i>	HC5	HC3	HC4
Post-lavado	-	HC3	HC1	HC1

Tabla 7: Resumen clases de hidrofobicidad para aisladores cerámicos.

Con respecto a los aisladores que no tienen recubrimiento, se determinó que, por muy leve que sea el tipo de contaminación, E1 en específico, la superficie del aislador pierde toda su capacidad de repeler el agua y se forma una película completa de agua. Lo anterior ocurre sin importar qué tan contaminada esté la superficie, ya que, con todos los ambientes, se obtuvo una clase de hidrofobicidad HC5 o superior. El único caso en que ocurrió algo diferente, fue la prueba en donde la superficie estaba completamente limpia y posterior al lavado, sin embargo, se determinó un HC3, con gotas en su superficie de forma irregular.

Los resultados obtenidos en aisladores con recubrimiento son completamente diferentes. Por una parte, en el caso base se determinó una clase de hidrofobicidad HC1, en otras palabras, la superficie repele y encapsula el agua, permitiendo que la superficie no se moje completamente. Por otro lado, al aumentar el nivel de contaminación de la superficie, en E1 se obtuvo un HC2, en donde el material activo del recubrimiento responde de buena manera encapsulando las partículas contaminantes y permitiendo también que la superficie no se moje completamente.

En la superficie del aislador recubierto y contaminado con E4, se obtuvo un HC4, en donde parte de la superficie se encontraba con una película de agua. Es de suponer que este fenómeno ocurre por la alta presencia de caolín en la superficie del aislador, por lo que, la contaminación no soluble parece tener un efecto negativo en el desempeño del recubrimiento.

Mientras que, en el análisis a la superficie con contaminación E5, el aislador con recubrimiento responde de manera correcta, pero de todas formas se observan algunos canales de agua que no logran ser repelidos por el material, debido a la presencia de una gran cantidad de sal.

Luego, aquellos aisladores que fueron envejecidos presentan un decaimiento en su clase de hidrofobicidad, es decir, la superficie se acerca más a ser hidrofílica. Pero luego vemos que dicha característica se recupera una vez realizado el lavado de aislación.

De esta forma, con los resultados obtenidos, vemos que el recubrimiento siliconado en los aisladores de vidrio y cerámica mejora la hidrofobicidad respecto a los aisladores sin recubrir. Dicho resultado se ve reflejado en los diferentes ambientes de contaminación ensayado.

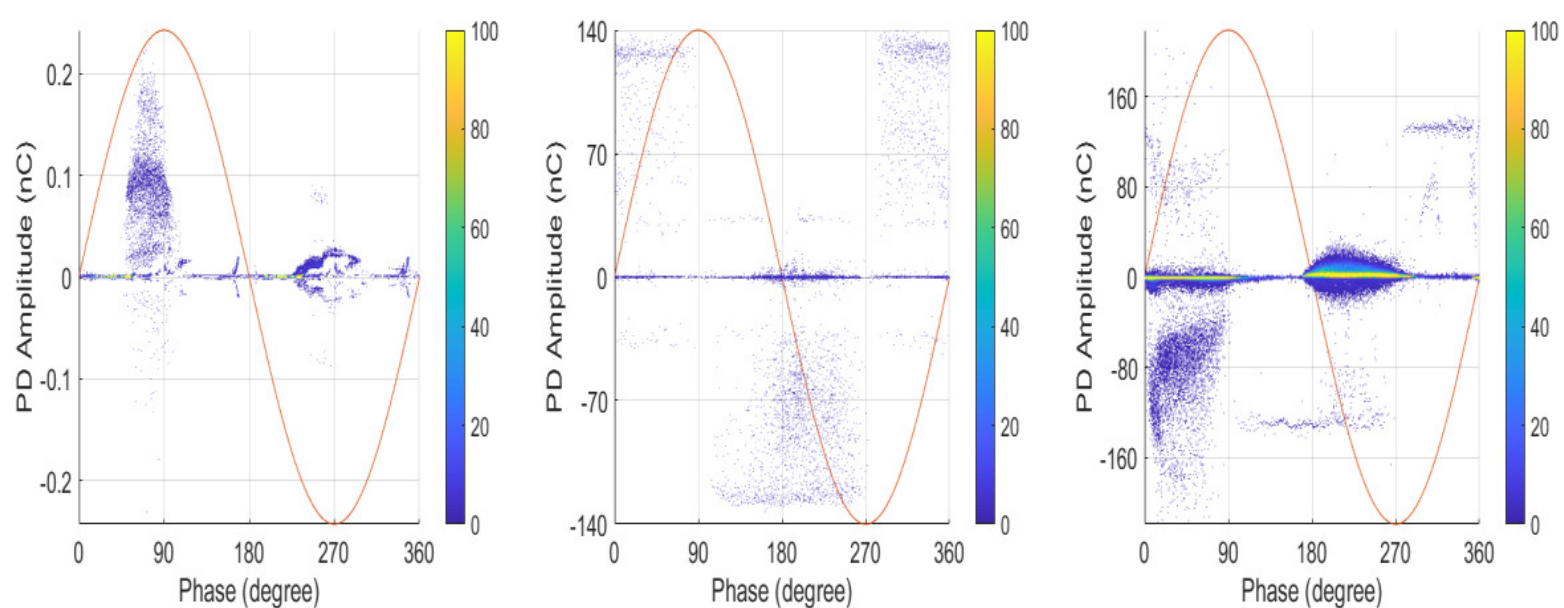
#### 4.4 Medición de descargas parciales

A continuación, se muestra el análisis PRPD (patrón de descarga con resolución de fase) el cual representa el comportamiento de la descarga. Hay que tener en consideración que todas las descargas parciales se comportan de manera diferente y por ende tienen sus patrones de descarga distintivos. De esta forma, resulta necesario conocer el tipo de descarga parcial para tomar las acciones correctivas correspondientes.

Cabe mencionar que todos los ensayos se realizaron sin la aplicación de ningún tipo de contaminación y en condiciones de superficie seca.

Inicialmente se ensayó el aislador de vidrio templado sin recubrimiento, se le aplicó tensión y de forma gradual se fue aumentando hasta que las descargas alcanzaron cierta notoriedad. Para este caso se registró una tensión de iniciación de 21,3 [kV]. Luego de haber aumentado la tensión por sobre dicho valor, se fue reduciendo de la misma forma hasta un valor de 16,3 [kV], para el cual las descargas se dejaban de apreciar, dicho valor se registró como la tensión de extinción de DP.

La forma de onda sinusoidal utilizada en el patrón de PD se utiliza como señal de referencia de fase, por medio de ella podemos identificar que la mayoría de las descargas se ubican en el primer y tercer cuadrante, característica que define a las descargas de tipo superficial.



a) Patrón de DP durante iniciación. b) Patrón de DP durante extinción. c) Patrón de DP a 60 [kV].

Figura 34: Resultados PRPD aislador de vidrio templado sin recubrimiento.

El patrón de DP obtenido a 60 [kV] se muestra en la Figura 34.c, podemos distinguir que las mayores magnitudes en la amplitud de las DP no sobrepasan el 20% de la densidad de descargas, mientras que aquellas de mayor densidad porcentual son de baja amplitud.

Luego se continuó con el aislador de vidrio templado con recubrimiento, bajo esta condición los parámetros de tensión de iniciación y de extinción tuvieron variación. En la tensión de iniciación, para lograr tener un mismo nivel de magnitud de las descargas registradas en la condición sin recubrimiento, dicho valor prácticamente alcanzó los 50 [kV], mientras que la tensión de extinción fue 47,2 [kV]. Vemos que ambos valores superan a los registrados en el caso anterior, de esta forma, resulta notorio el efecto del recubrimiento siliconado en la atenuación de las descargas.

En cuanto al patrón y magnitud de las descargas a 60 [kV], primero vemos una mayor concentración de las descargas en el primer y tercer cuadrante. Y segundo, en cuanto a las densidades de DP, vemos una disminución en términos porcentuales de las descargas.

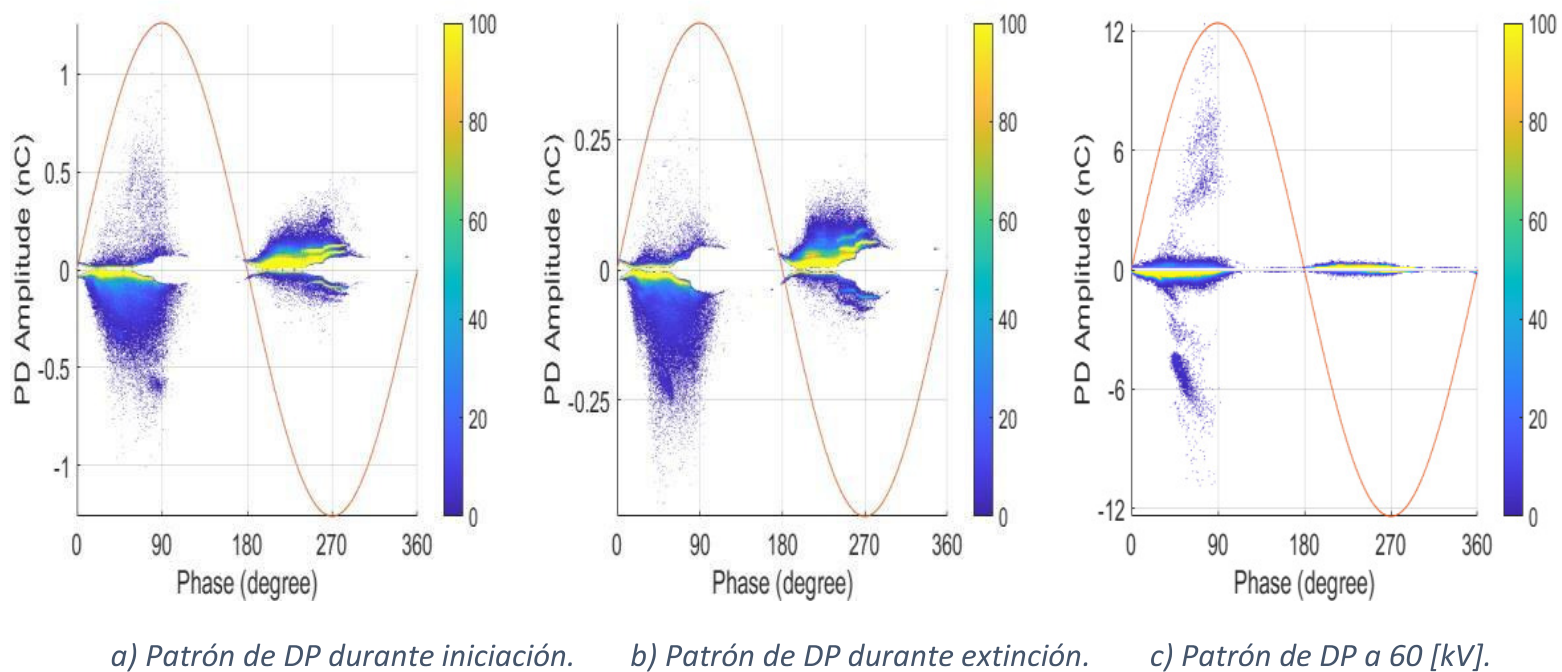


Figura 35: Resultados PRPD aislador de vidrio templado con recubrimiento.

Finalmente, se termina la comparación con el aislador de vidrio con recubrimiento envejecido. Bajo esta condición la tensión de iniciación y de extinción fueron de 35,3 y 33,3 [kV], respectivamente. Vemos una disminución en comparación al caso anterior, superficie limpia y seca, debido a los cambios en la humedad relativa al momento del envejecimiento y luego del ensayo, resulta en una superficie más conductora que provoca el aumento en las descargas.

El resultado del patrón de DP a 60 [kV] una vez llevado a cabo el envejecimiento del aislador recubierto muestra el efecto asociado a la humedad de la superficie. Queda en evidencia un aumento en la densidad de DP debido al cambio de esta condición ambiental, la cual pasa a jugar un rol importante en la formación de DP.

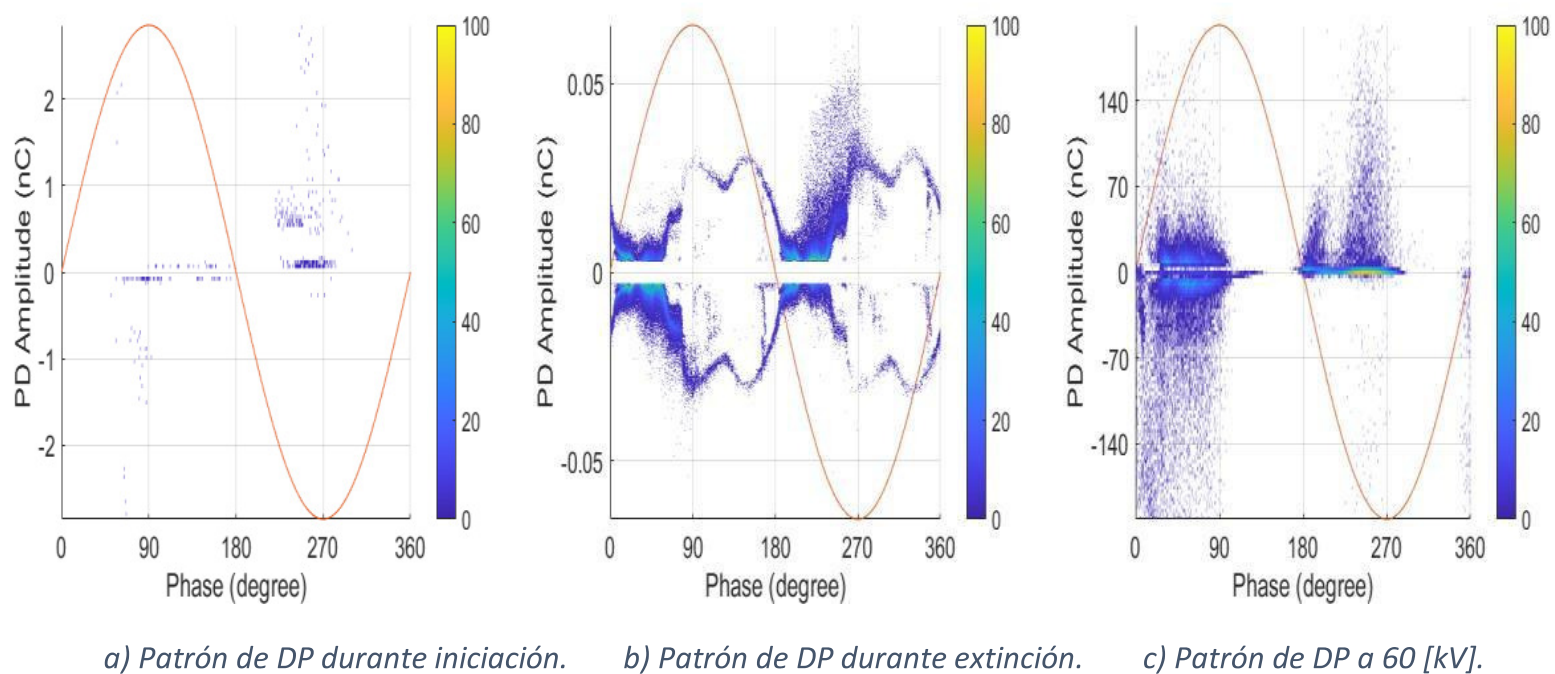


Figura 36: Resultados PRPD aislador de vidrio templado con recubrimiento envejecido.

Repitiendo la medición de descargas parciales en aisladores cerámicos, en un primer caso tenemos el aislador de cerámica sin recubrimiento para el cual se registró una tensión de iniciación de 20 [kV], mientras que la tensión de extinción fue de 21,6 [kV]. La ubicación de las mayores densidades de DP nos indica nuevamente que el tipo de descarga en el aislador de cerámica sin recubrimiento es de carácter superficial.

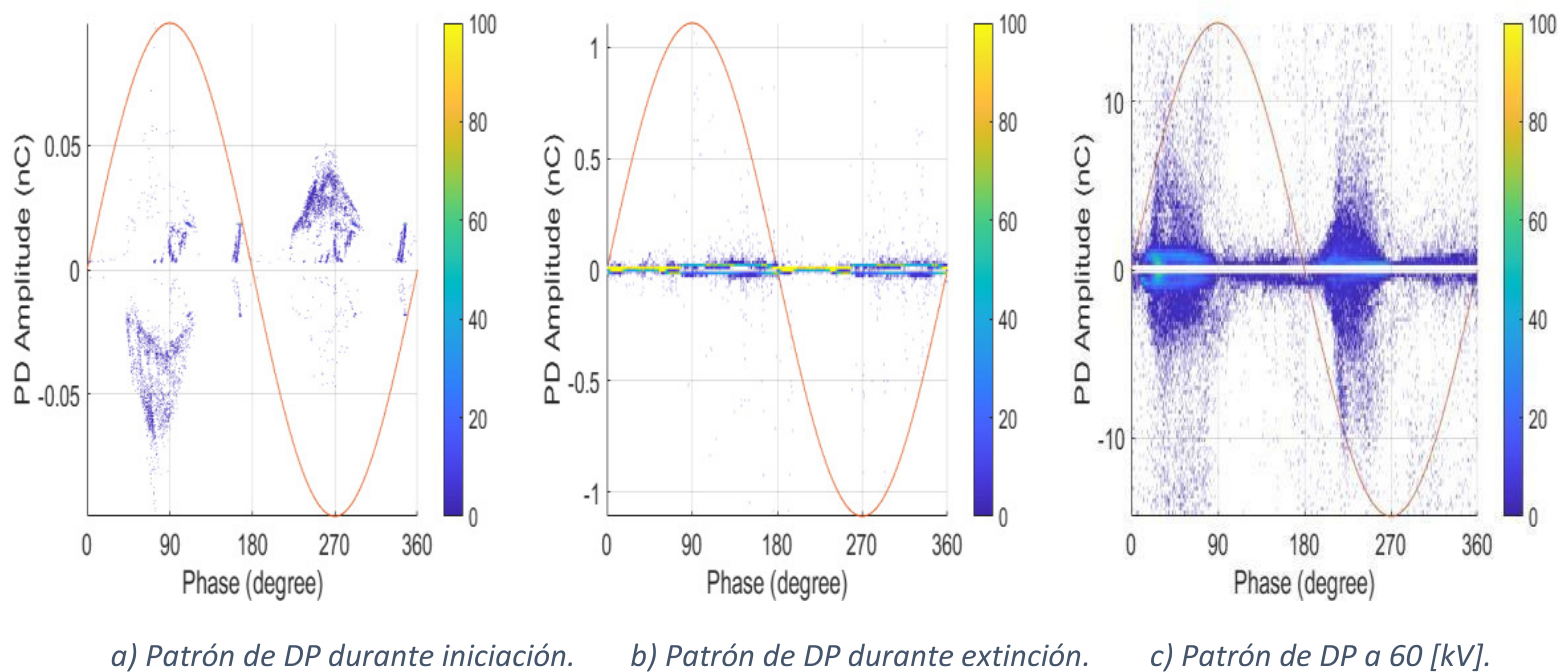


Figura 37: Resultados PRPD aislador de cerámica sin recubrimiento.

Luego de recubrir el aislador de cerámica con el producto y realizar la medición de descargas parciales vemos un aumento en los parámetros estudiados. Bajo esta condición la tensión de iniciación fue de 44,6 [kV] y la tensión de extinción de 43,6 [kV]. Nuevamente queda en evidencia el efecto del recubrimiento siliconado en el aislador cerámico, ya que se debe aplicar un mayor nivel de tensión para lograr los niveles de iniciación y extinción de descargas.

Al momento de analizar el patrón de DP a 60 [kV] del aislador cerámico con recubrimiento en términos de la magnitud de la densidad de DP y compararlo con la condición sin recubrimiento, debido a la condición de humedad de la superficie, en un aislador sin recubrimiento se genera un aumento en la conductividad de la superficie lo que conduce a más caminos de fuga y, como resultado, en un aumento de las corrientes de fuga.

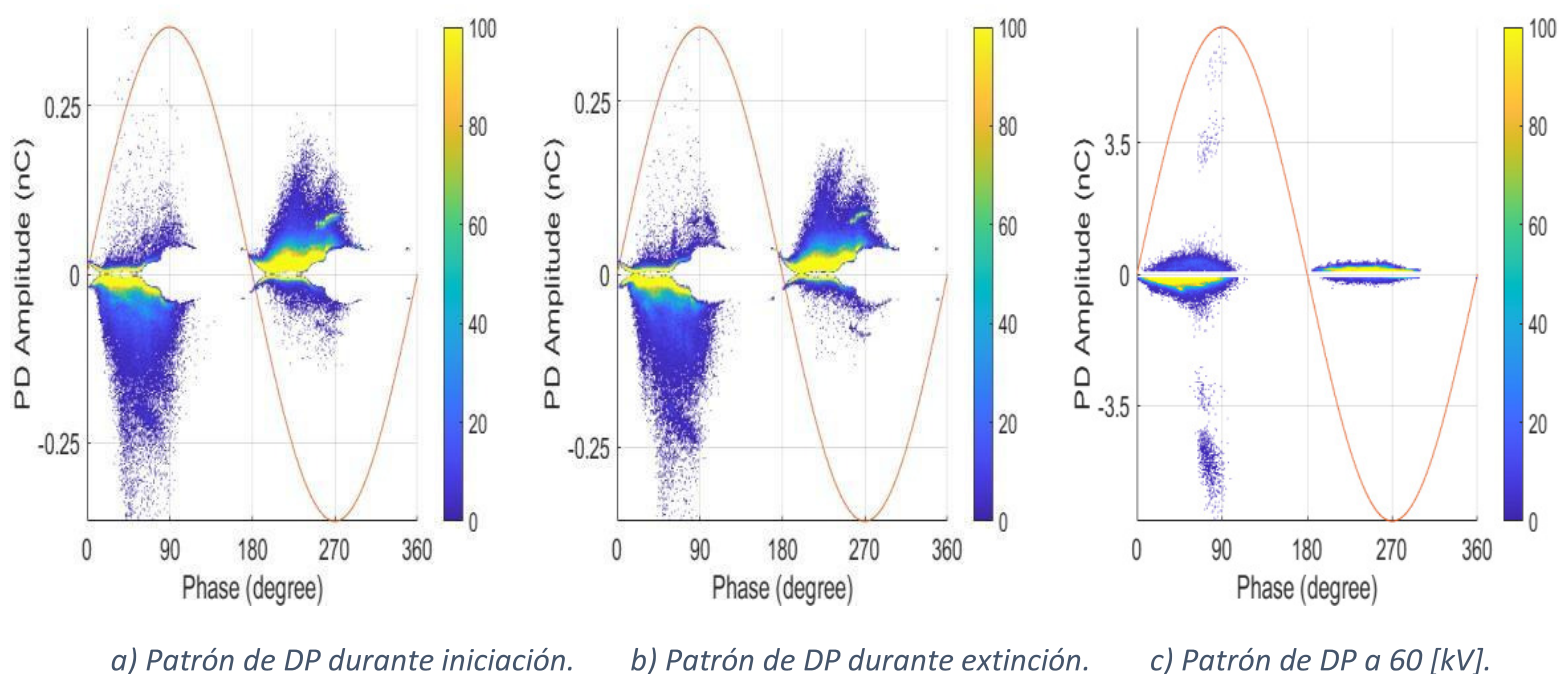


Figura 38: Resultados PRPD aislador cerámico con recubrimiento.

Finalmente, los resultados para el aislador cerámico con recubrimiento envejecido muestran que la detección de las primeras descargas que determinan la tensión de iniciación fue a los 30 [kV]. Mientras que el proceso inverso, la atenuación y no percepción de las descargas y, por tanto, la determinación de la tensión de extinción ocurrió a los 31,6 [kV].

Se puede interpretar del patrón de DP a 60 [kV] para el aislador cerámico con recubrimiento envejecido que la cantidad de pulsos de DP crece en ambos sentidos, además de que el volumen de los pulsos de DP aumenta a medida que se acerca a la tensión de contorno, lo que se entiende como una clara señal de identificación en la compresión del proceso de contorno.

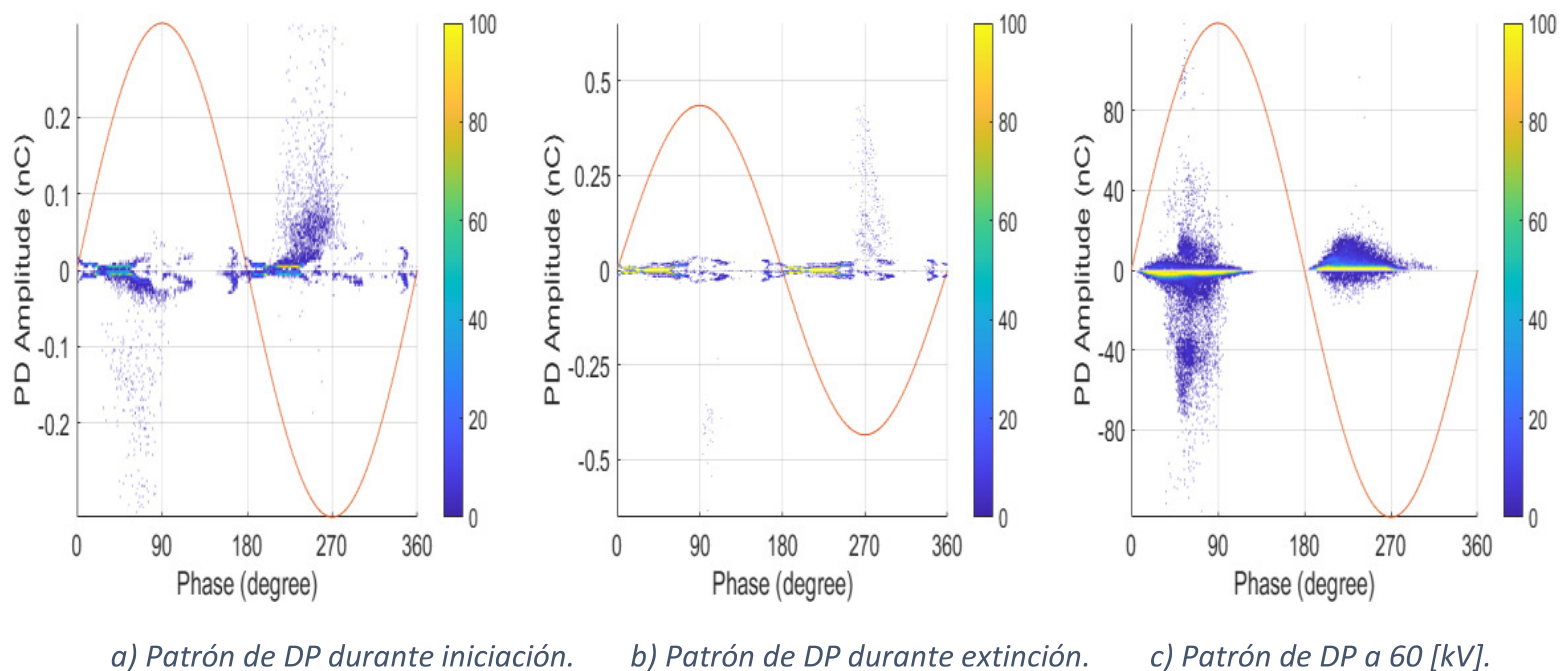


Figura 39: Resultados PRPD aislador cerámico con recubrimiento envejecido.

A modo de resumen de la medición de descargas parciales en aisladores de vidrio templado y de cerámica sin y con recubrimiento, además de la componente de envejecimiento, se puede concluir del efecto positivo en la aplicación del recubrimiento siliconado en los aisladores estudiados debido a la atenuación en los niveles de descargas.

Estos primeros resultados del ensayo de medición de descargas parciales parecen indicar que las variaciones en los patrones de DP están relacionadas a la contaminación de los aisladores.

Queda claro que, debido al tipo de descarga tipo superficial, el recubrimiento siliconado queda mayormente expuesto a erosión y degradación de la superficie. Teniendo en cuenta la aplicación al aire libre que tienen en su uso estos aisladores, donde están más expuestos tensiones eléctricas, mecánicas, térmicas y de tipo ambiental, factores que aceleran el envejecimiento y la degradación de la superficie recubierta. Por lo tanto, el desarrollo de “flashover” en los aisladores se puede identificar de manera clara y fácil mediante el análisis al patrón de descarga parcial.

## 4.5 Resultados

Se inicia con placas de cerámica sin recubrimiento a una tensión de 4,5 [kV]. La idea de esta prueba es verificar si existe daño significativo a este nivel de tensión. Para la cual se alcanzó a estar un poco más de tres (3) horas cuando, debido a la humectación interna de la cerámica la placa falló generando un cortocircuito, esto se vio reflejado en que las lecturas de los equipos de medición se quedaron fijas en un valor, dicho valor aproximado era de 22 [mA].

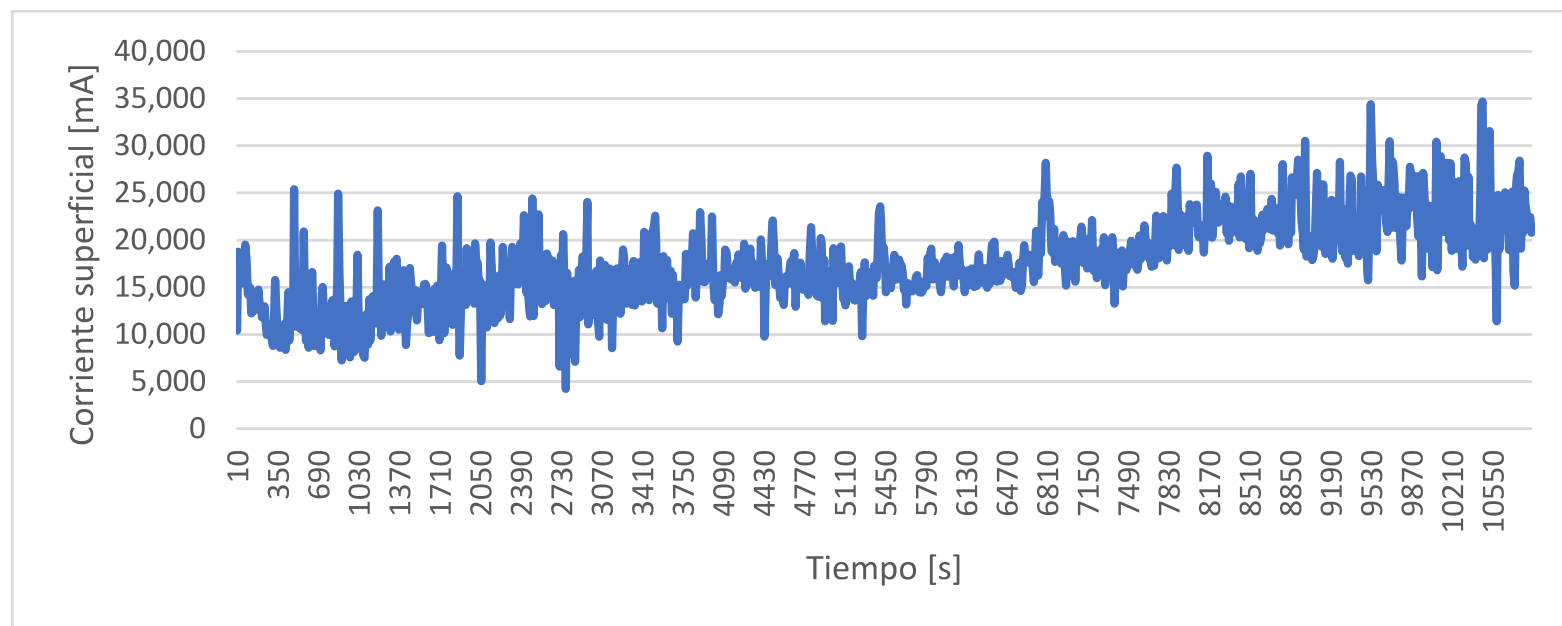


Figura 40: Registro temporal de la corriente superficial por la placa.

De la Figura 40, que corresponde al registro temporal de la corriente superficial por la placa hasta el momento de la falla, se obtiene un valor de corriente superficial de 17,564 [mA] como promedio y llegando a alcanzar un valor de 34,688 [mA] como máximo.



Figura 41: Resultado placas de cerámica sin recubrimiento.

Resulta evidente de la Figura 41 la no carbonización de la superficie, salvo una pequeña marca de los dientes del electrodo inferior. Esto al igual que en el caso de vidrio sin recubrimiento, se debe a la estructura inorgánica del material, que en el caso de la cerámica la materia prima es la arcilla.

Las placas siguientes cuentan con la aplicación del recubrimiento siliconado mediante la técnica “*airless*”, donde al igual que en su aplicación en los aisladores, debe cumplir con un estándar y rango de espesor de la capa de recubrimiento, es por esto, que se corta una sección del recubrimiento como muestra para el control de espesor obteniéndose un valor de 339 [micrones]. Valor que se encuentra dentro de los rangos óptimos de espesor de capa de recubrimiento siliconado. El resultado de la placa recubierta se encuentra en la Figura 42.



Figura 42: Placa recubierta con el producto a estudiar.

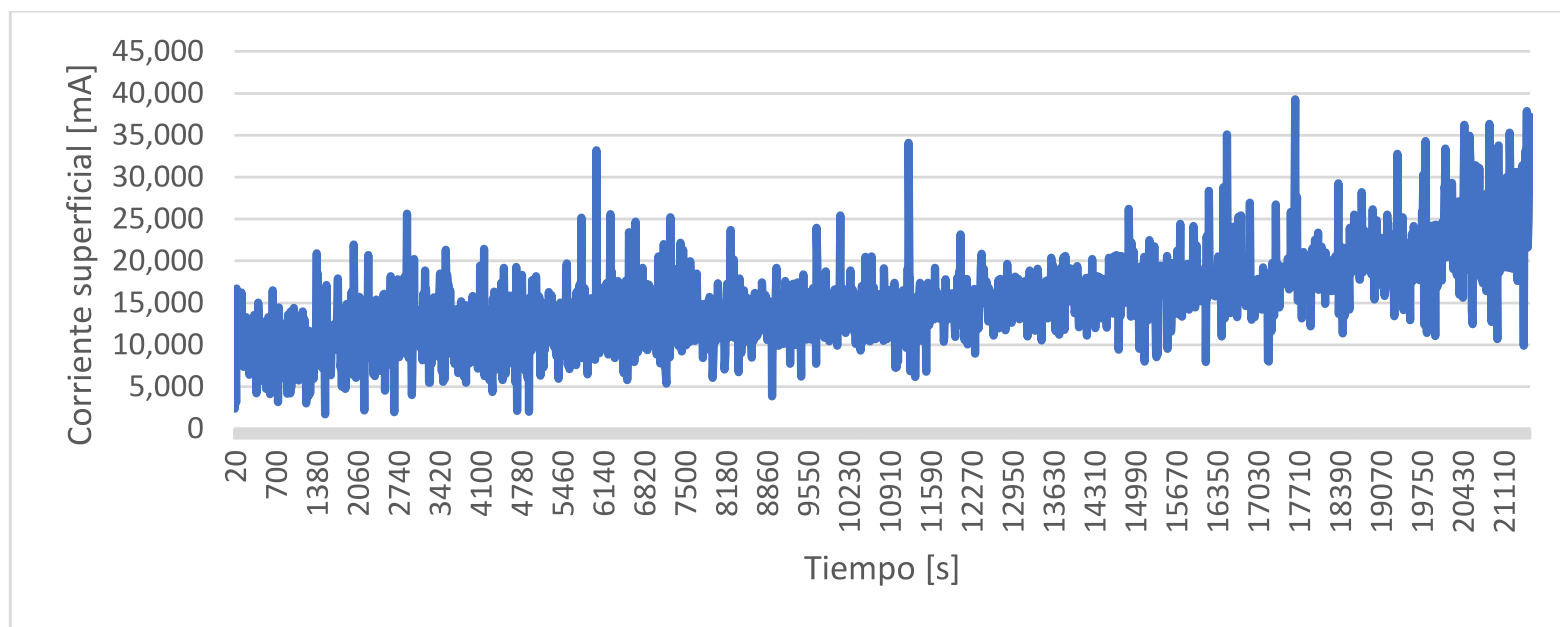


Figura 43: Registro temporal de la corriente superficial por la placa.

De la Figura 43 se obtiene un valor de corriente superficial promedio de 15,207 [mA] alcanzando un valor máximo de 39,285 [mA]. A medida que transcurre el ensayo, existe una tendencia al aumento en el valor de corriente superficial que se puede explicar debido a la carbonización de la superficie.



*Figura 44: Resultado placas de cerámica con recubrimiento.*

Vemos en la Figura 44 que al caer la gota por la superficie establece un canal por donde fluye el líquido contaminante, eliminando la aleatoriedad en el escurrimiento del líquido por la superficie debido a las propiedades hidrofóbicas del recubrimiento, de esta forma concentrando las descargas por un solo lugar.

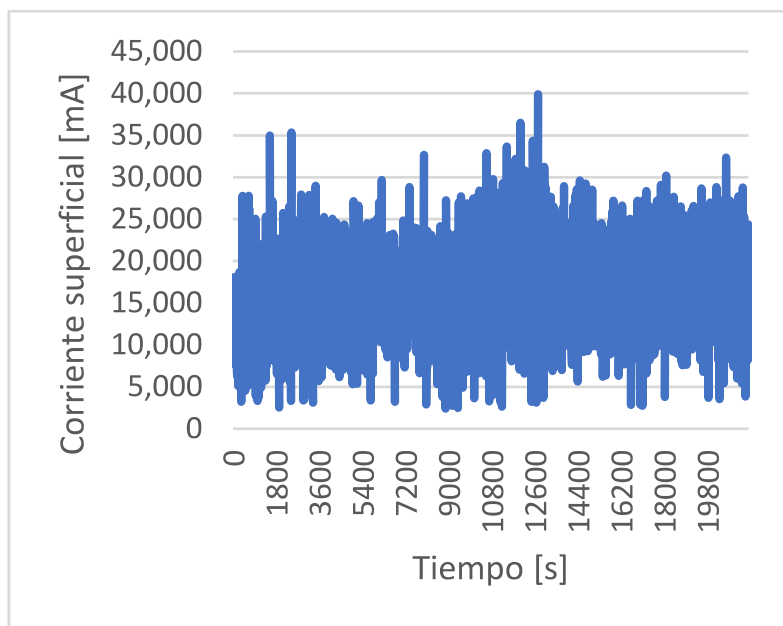
Una vez finalizado el ensayo se esperó hasta el día siguiente para limpiar la carbonización en una de las placas. En la Figura 45 se aprecia la huella que dejó la contaminación en la superficie del recubrimiento, donde principalmente se destaca que no existe una perforación del recubrimiento, pero si la presencia de erosión de la superficie.

Luego utilizando un reloj comparador se toma registro de la erosión provocada en la superficie, el valor registrado en esta primera condición fue de 0,07 [mm] (70 [micrones]).

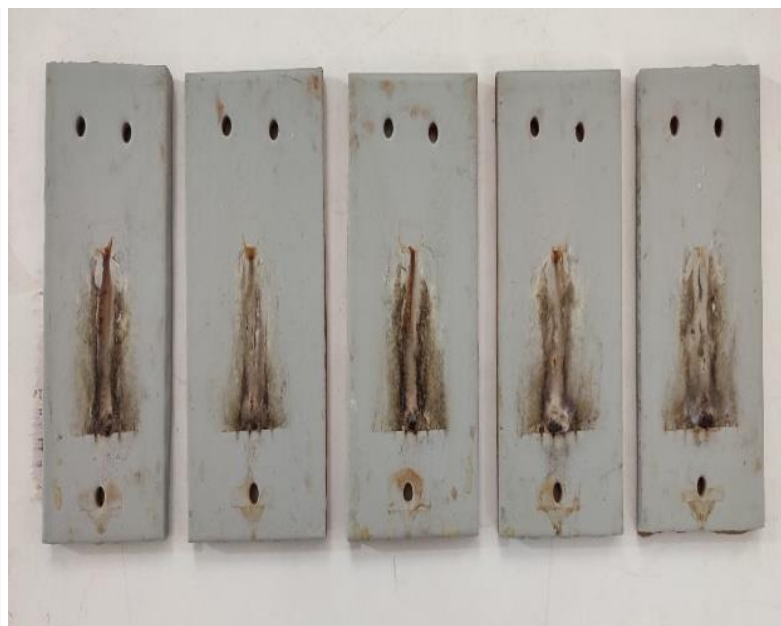


*Figura 45: : Registro de la limpieza de la carbonización de la superficie.*

La siguiente ronda de placas ensayadas cuenta con el primer ciclo de envejecimiento acelerado y al momento de retirar las placas y realizar una inspección visual, no existe evidencia de pérdida de adherencia del recubrimiento en la superficie, tampoco una decoloración del recubrimiento.



a) Registro temporal de la corriente superficial.

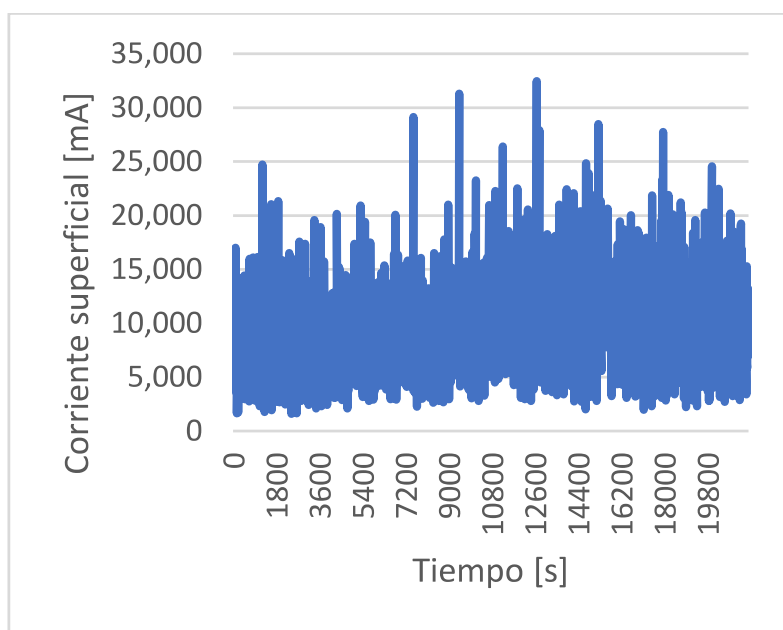


b) Resultado de las placas.

Figura 46: Resultados placas de cerámica con recubrimiento tras un ciclo de envejecimiento.

De los resultados expuestos en la Figura 46 se obtiene un valor de corriente superficial promedio de 16,856 [mA] alcanzando un valor máximo de 39,904 [mA]. Mientras que, bajo esta condición, el registro en la profundidad de erosión fue de 0,31 [mm] (310 [micrones]).

De igual forma se quiere ver si existe diferencia en los resultados en aquellas placas que fueron tratadas en su superficie previo al montaje en la estructura soportante. Los resultados del ensayo se muestran en la Figura 47.



a) Registro temporal de la corriente superficial.



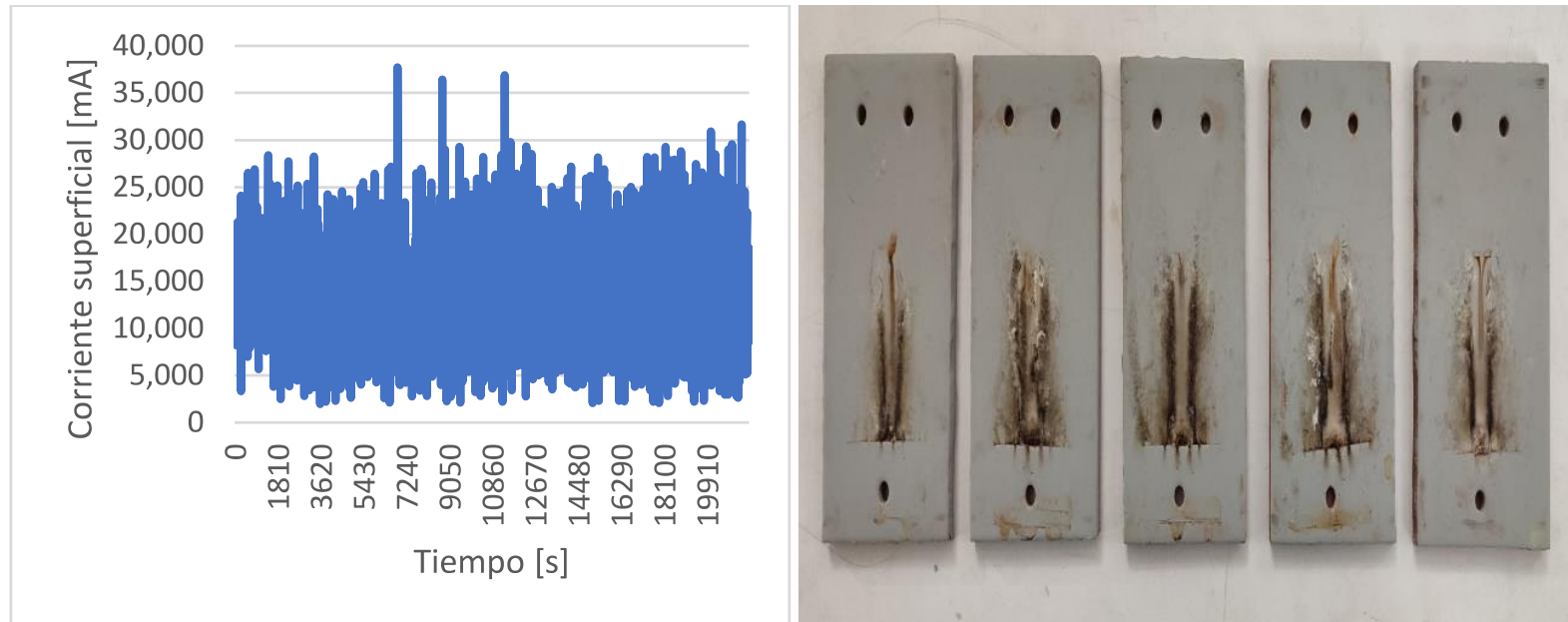
b) Resultado de las placas.

Figura 47: Resultados placas de cerámica con recubrimiento envejecido más tratamiento superficial.

Del registro temporal de la corriente superficial por la placa una vez completada las seis horas de ensayo, se obtiene un valor de corriente superficial promedio de 10,482 [mA] alcanzando un valor máximo de 32,461 [mA]. Lo que representa una disminución en dichos valores respecto a su par ensayado.

Los patrones de carbonización siguen siendo similares a los vistos anteriormente, la diferencia recae en la erosión del recubrimiento ya que existe una disminución del valor registrado donde se alcanzó una profundidad de 0,30 [mm] (300 [micrones]).

Continuando con la metodología de ensayo, la siguiente ronda de placas de cerámica cuenta con dos ciclos de envejecimiento, lo que radica en que la irradiancia registrada en dicho periodo fue de 30 [kWh/m<sup>2</sup>].

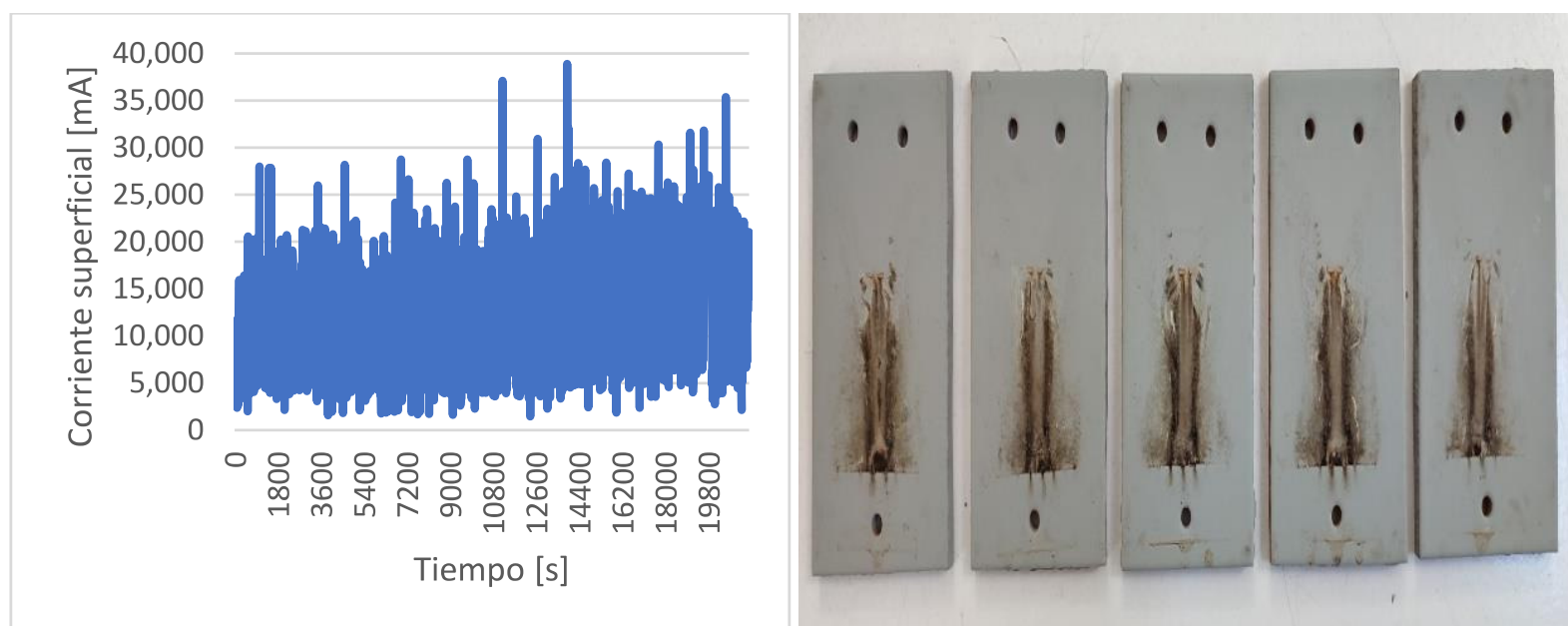


a) Registro temporal de la corriente superficial.

b) Resultado de las placas.

Figura 48: Resultados placas de cerámica con recubrimiento tras dos ciclos de envejecimiento.

Los resultados de la Figura 48, muestran que del registro temporal de la corriente superficial se obtiene un valor de corriente promedio de 13,705 [mA] alcanzando un valor máximo de 37,717 [mA].



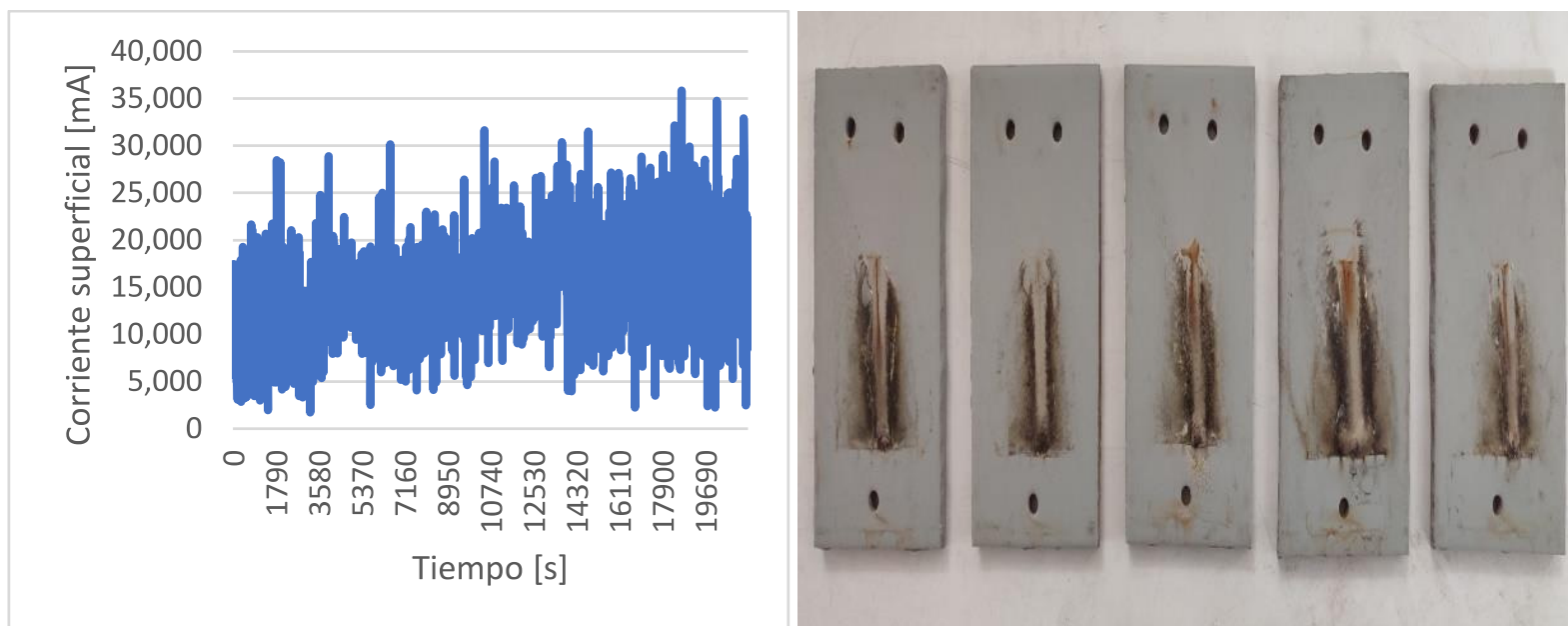
a) Registro temporal de la corriente superficial.

b) Resultado de las placas.

Figura 49: Resultados placas de cerámica con recubrimiento envejecido más tratamiento superficial.

Mientras que en la Figura 49, tenemos los resultados de las placas una vez tratadas de manera superficial. Del registro temporal de la corriente superficial se obtiene un valor promedio de 12,492 [mA] alcanzando un valor máximo de 38,890 [mA]. Vemos nuevamente el efecto del tratamiento superficial en la placa ya que existe una disminución en el valor de corriente superficial promedio.

Y finalizando con el plan de ensayos, aquellas placas de cerámica que cuentan con tres ciclos de envejecimiento.

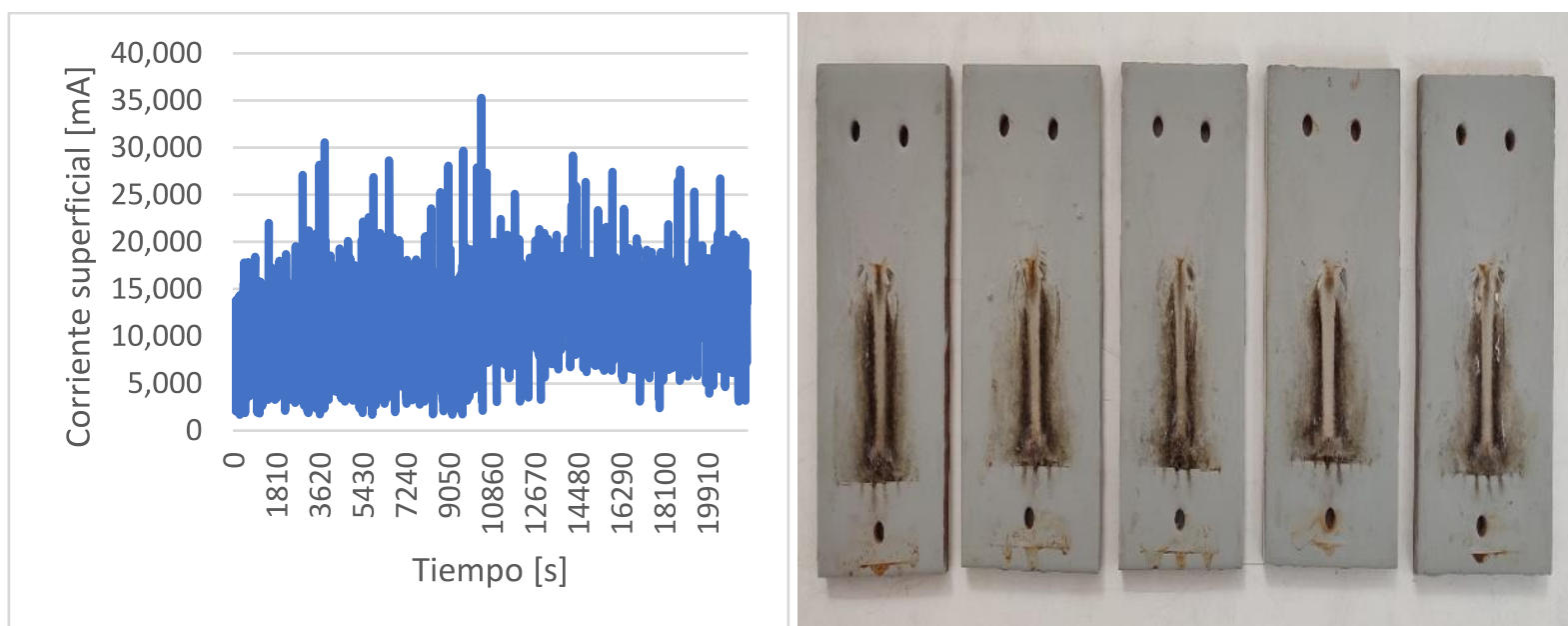


a) Registro temporal de la corriente superficial.

b) Resultado de las placas.

Figura 50: Resultados placas de cerámica con recubrimiento tras tres ciclos de envejecimiento.

Del registro temporal de la corriente superficial, Figura 50.a, se obtiene un valor de corriente promedio de 15,373 [mA] alcanzando un valor máximo de 35,854 [mA]. Queda en evidencia un desgaste del recubrimiento debido al aumento en el valor de la corriente promedio respecto a los casos anteriores. En cuanto a los resultados de las placas, Figura 50.b, se vuelven a repetir los mismos patrones de carbonización.



a) Registro temporal de la corriente superficial.

b) Resultado de las placas.

Figura 51: Resultados placas de cerámica con recubrimiento envejecido más tratamiento superficial.

Finalmente, en la comparación con las muestras tratadas superficialmente, los resultados de la Figura 51 indican que, una vez transcurridas las seis horas de ensayo, del registro temporal de corriente superficial se obtuvo un valor de corriente promedio de 11,440 [mA] alcanzando un valor máximo de 35,279 [mA]. Reafirmando lo visto en los casos donde se trató la superficie, se disminuye en el valor de corriente promedio y el nivel de erosión de la superficie.

Una vez completado el estudio de las placas de cerámica, se lleva a cabo la misma metodología de trabajo, pero aplicada a placas de vidrio. Los principales resultados se detallan a continuación:

De igual forma la primera ronda de placas, que servirán como placas de testigo para comparar con aquellas que serán recubiertas, son sometidas a una tensión de 4,5 [kV] con la idea de verificar si existe daño significativo a este nivel de tensión. En la cual se alcanzó a estar un poco más de dos horas y media de exposición cuando una de las muestras se partió en dos como se aprecia en la Figura 33.b. Cabe decir que la falla se encuentra asociada al estrés eléctrico que, en conjunto a la acción del líquido contaminante, fueron los detonantes de la rotura de la placa de vidrio. En cuanto a la carbonización de la superficie, debido a que el vidrio posee una estructura molecular inorgánica, es por este motivo que no se tiene como resultado una carbonización en su superficie.

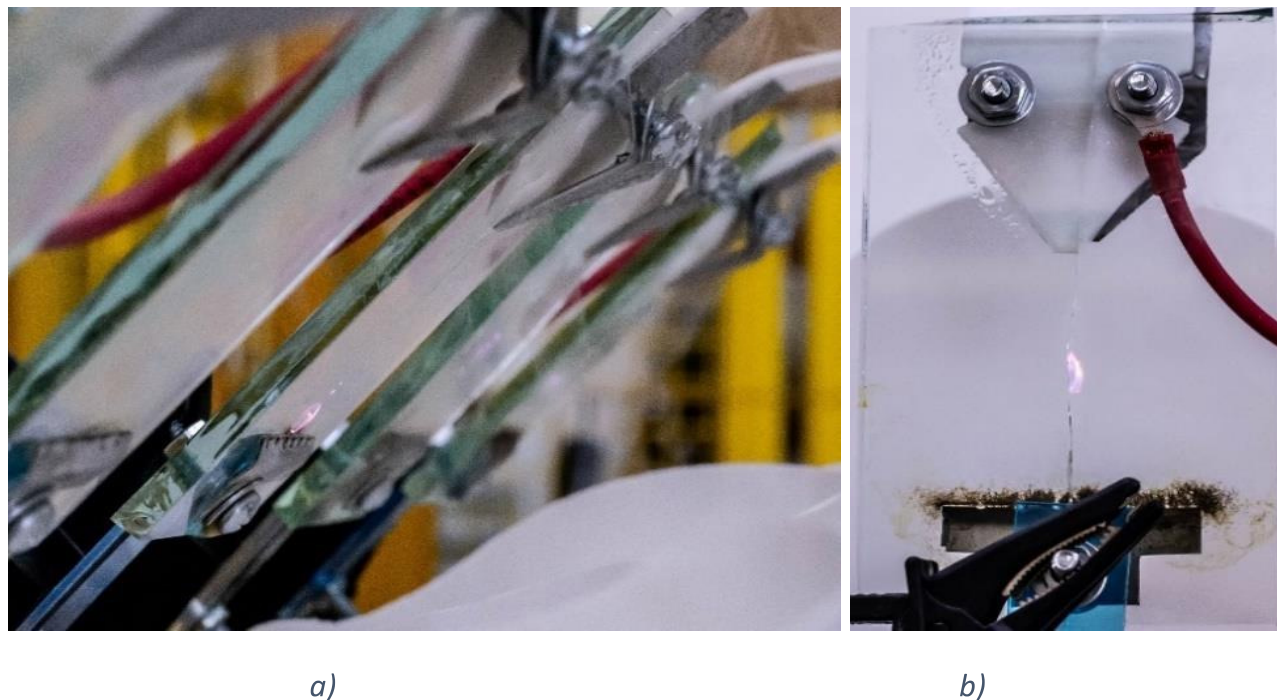


Figura 52: Montaje de la muestra a) Vista de perfil del ensayo. b) Falla en una de las placas.

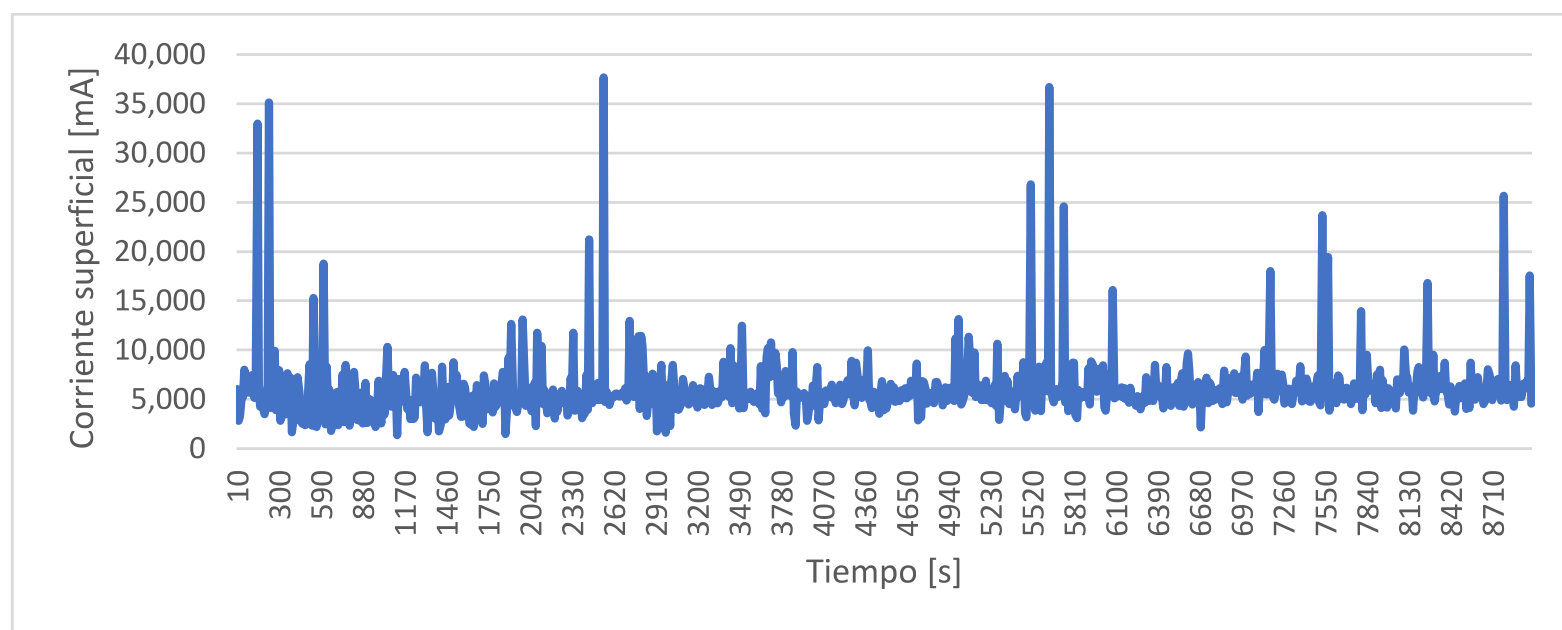
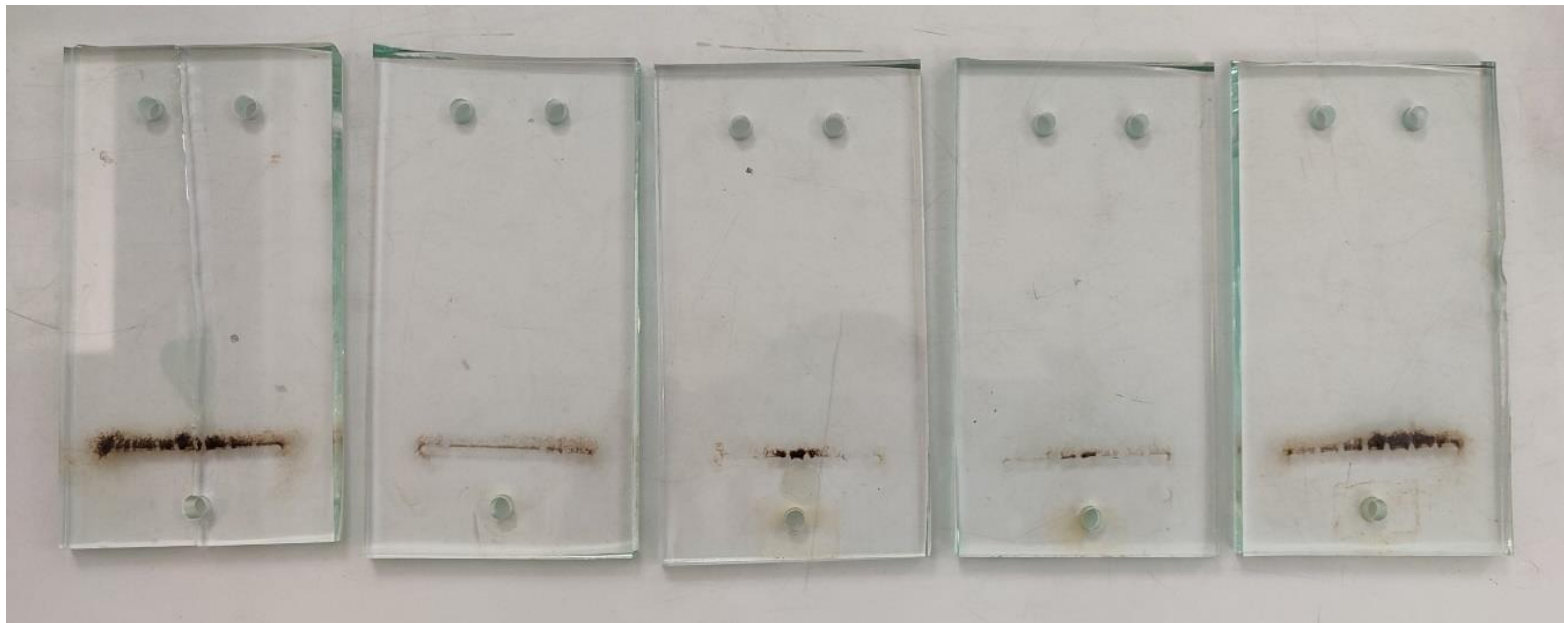


Figura 53: Registro temporal de la corriente superficial por la placa de vidrio.

En cuanto al registro temporal de la corriente superficial por la placa hasta el momento de la fractura de una de las placas (ver Figura 53), el valor de corriente superficial promedio era de 6,031 [mA] llegando a alcanzar un valor máximo de 37,680 [mA].



*Figura 54: Resultado placas de vidrio sin recubrimiento.*

Al ser un ensayo a tensión sostenida, no quedó sedimento seco sobre la superficie, por lo que no dejó una capa de rugosidad tan significativa como se apreciara en los casos siguientes (Anexo C), pero si quedaron marcados los dientes del electrodo inferior como se muestra en la Figura 54.

Mediante la misma técnica de pintado se procede a recubrir las placas que serán ensayadas para ver el efecto del recubrimiento siliconado en el material de vidrio y su comportamiento ante el envejecimiento acelerado. De igual forma que para las placas de cerámica, se pide que las placas de vidrio cumplan con la medida estándar y rango de espesor que debe tener la capa de recubrimiento siliconado, de esta forma se toma una muestra de una de las placas y se registran 359 [micrones].



*Figura 55: Vista de perfil placa de vidrio con recubrimiento.*

Luego de realizado el ensayo, se pueden notar diferencias respecto al primer caso. Una primera diferencia es el comportamiento de la corriente, donde presenta un rango de corrientes de operación. La segunda diferencia es que la placa presenta menos marcas de los dientes del electrodo inferior y, debido a que las gotas caen siempre en el mismo lugar (se forma un canal) y no de manera aleatoria sobre la superficie como en el caso sin recubrimiento, formando así un sitio de descarga localizada

desde el electrodo inferior al superior, dejando un camino visible de tracking. El resultado visual sobre las placas se muestra en la Figura 57.

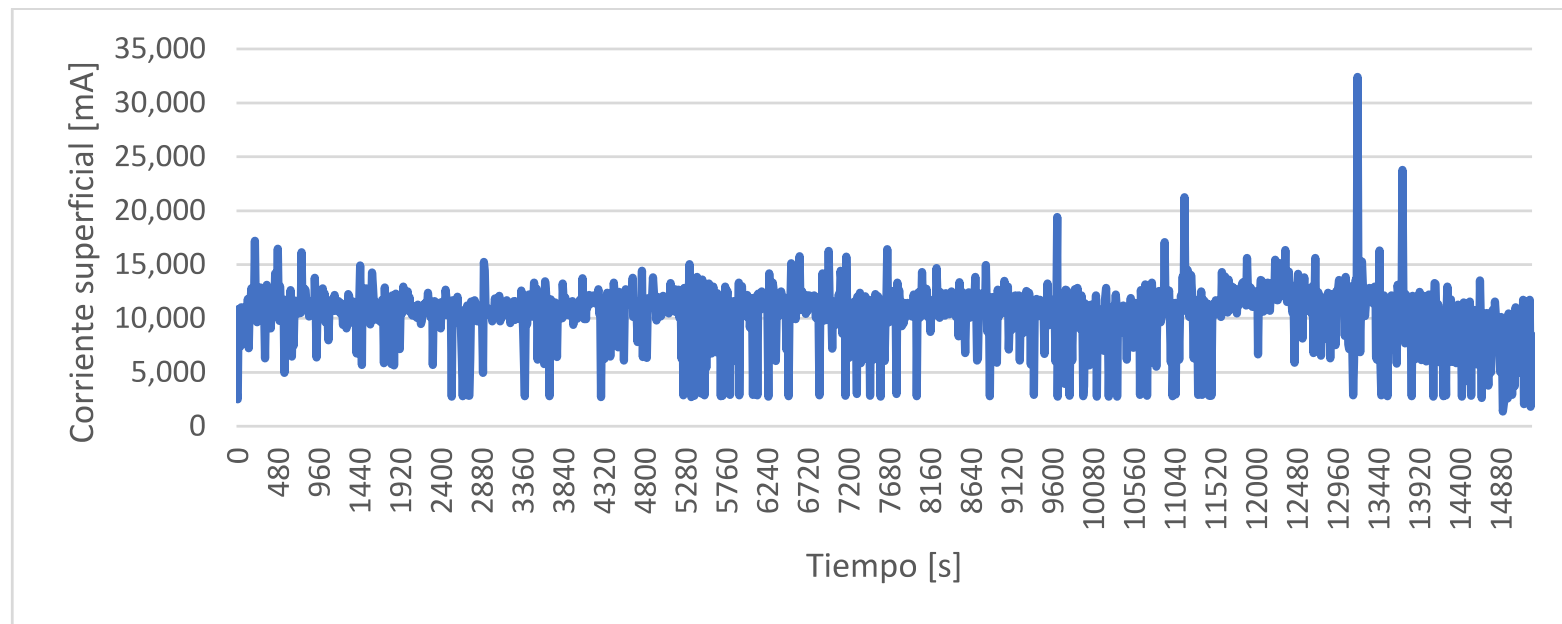


Figura 56: Registro temporal de la corriente superficial por la placa.

Cabe destacar el comportamiento de las descargas sobre la superficie a una tensión de 4,5 [kV], se hacen más extensas y se producen entre los bordes del canal que deja la gota en el recubrimiento (ver Figura 55), dejando una huella más ancha y notoria que el caso sin recubrimiento. Este es el resultado de la carbonización del líquido contaminante en conjunto con el producto. Puede que la capa del recubrimiento y su comportamiento de carbonización combata la erosión sobre el vidrio con estas “costras de carbonización”, ya que las descargas se producen sobre esta en vez de la superficie del vidrio. Sin embargo, este relieve podría ser un “arma de doble filo” debido a que, al quitar la aleatoriedad de las descargas, en vez de degradar la superficie en general, éstas degradan un lugar específico que dependiendo en la calidad del producto y el espesor de la capa de recubrimiento pueden promover finalmente a la perforación del material.

Del registro temporal de la Figura 56 se obtuvo un valor promedio de 10,482 [mA], logrando pequeños momentos transitorios de mayor intensidad como llegando a alcanzar un máximo de 32,408 [mA], pero sin sobrepasar los 60 [mA].



Figura 57: Resultado placas de vidrio con recubrimiento.

De esta forma se continua con los demás ensayos que requieren de un mayor tiempo de envejecimiento en la cámara para luego poder ser analizados. El registro temporal y resultado de las placas una vez finalizado el tiempo de ensayo se encuentran en la sección de Anexos, Apéndice C para ser más específicos.

Teniendo como referencia esta condición el siguiente resultado corresponde a las placas de vidrio envejecidas bajo un ciclo. Para este ensayo las placas recubiertas se dejaron envejecer en la cámara de radiación UV durante 163 horas, acumulando un nivel de irradiancia de 15 [kWh/m<sup>2</sup>].

Al momento de retirar las placas de la estructura soportante y realizar una inspección visual de las placas post-envejecimiento, no se aprecia desgaste del material y tampoco muestras de una decoloración en la pintura del recubrimiento.

Los resultados de degradación fueron similares, presentando mayor grado de rugosidad y mayores valores de corrientes respecto a las muestras con recubrimiento. Además, el relieve de carbonización en los dientes del electrodo inferior es más pronunciado. Esto último se debe a que, al presentar cierta degradación, el producto es más propenso a perder su adherencia a la superficie y mientras avanza el ensayo, el producto degradado que pierde su adherencia se aloja en los dientes del electrodo inferior, formando así una costra de aspecto carbonoso tras sufrir las descargas. Por lo anterior resulta en un valor de 0,36 [mm] (360 [micrones]) de erosión.

#### 4.5.1 Resumen de las pruebas de tracking

En esta sección se presenta la comparación de resultados finales para cada uno de los casos estudiados de las placas de vidrio y cerámica. Los primeros casos ensayados corresponden a la comparación de las placas ante la aplicación del recubrimiento, mientras que los demás casos estudiados fueron ante la comparación de diferentes ciclos de envejecimiento y de tratamiento superficial.

El sometimiento de las placas a la cámara de envejecimiento implica que estuvieron expuestas a dos condiciones de degradación. Una condición asociada a la exposición de radiación UV, conocida como foto-degradación y una segunda condición debido a la temperatura al interior de la cámara, termo-descomposición.

En todas las placas de este material hubo fallas por criterio B de la norma, donde el camino carbonizado alcanzó y sobrepasó la marca de referencia de 25 [mm] desde el electrodo inferior.

Para el caso de las placas de cerámica, la condición que presentó un mayor deterioro de la superficie fue tras tres semanas de exposición, donde se alcanzó un valor de 0,38 [mm] (380 [micrones]) de profundidad de erosión, prácticamente hubo una pérdida total de la capa de recubrimiento en un punto de la superficie, dejando la superficie de cerámica a la vista.

Condición	Clasificación
Con recubrimiento	Clase 1B 4,5 – 0,07
Primer ciclo de envejecimiento	Clase 1B 4,5 – 0,31
Primer ciclo de envejecimiento más lavado	Clase 1B 4,5 – 0,30
Segundo ciclo de envejecimiento	Clase 1B 4,5 - 0,36
Segundo ciclo de envejecimiento más lavado	Clase 1B 4,5 – 0,28
Tercer ciclo de envejecimiento	Clase 1B 4,5 – 0,38
Tercer ciclo de envejecimiento más lavado	Clase 1B 4,5 – 0,28

Tabla 8: Clasificación placas de cerámica con recubrimiento al ensayo de tracking.

En cuanto a los valores de corriente promedio y máxima para las distintas condiciones de placas de cerámica, también ocurre que tras los ciclos de envejecimiento existe un aumento del valor promedio de corriente, se podría decir que existe una tasa de aumento a medida que se envejece el recubrimiento, pero la cual se ve recuperada una vez tratada la superficie.

Condición	Corriente promedio [mA]	Corriente máxima [mA]
Sin recubrimiento	17,564	34,688
Con recubrimiento	15,207	39,285
Primer ciclo de envejecimiento	16,856	39,904
Primer ciclo de envejecimiento más lavado	10,240	32,461
Segundo ciclo de envejecimiento	13,705	37,717
Segundo ciclo de envejecimiento más lavado	12,492	38,890
Tercer ciclo de envejecimiento	15,373	35,854
Tercer ciclo de envejecimiento más lavado	11,440	35,279

*Tabla 9: Resumen de las corrientes por las placas de cerámica con recubrimiento al ensayo de tracking.*

De los resultados obtenidos de los ensayos realizados a las placas de vidrio, se puede decir que el escenario que más afectó en el deterioro de las placas fue la degradación bajo radiación UV tras la primera semana de exposición, Sin embargo, se puede decir que el recubrimiento si protege la superficie de la placas, debido a que las placas que se envejecieron recubiertas y que luego fueron tratadas en su superficie sufrieron una menor erosión que aquellas placas que fueron ensayadas directamente post-envejecimiento. A pesar de esto, tuvieron similar característica de erosión (orificios con forma similar).

Condición	Clasificación
Con recubrimiento	Clase 1B 4,5 – 0,16
Primer ciclo de envejecimiento	Clase 1B 4,5 – 0,36
Primer ciclo de envejecimiento más lavado	Clase 1B 4,5 – 0,33
Segundo ciclo de envejecimiento	Clase 1B 4,5 – 0,34
Segundo ciclo de envejecimiento más lavado	Clase 1B 4,5 – 0,22
Tercer ciclo de envejecimiento	Clase 1B 4,5 – 0,32
Tercer ciclo de envejecimiento más lavado	Clase 1B 4,5 – 0,28

*Tabla 10: Clasificación placas de vidrio con recubrimiento al ensayo de tracking.*

Respecto a la corriente promedio y máxima registrada para las distintas condiciones de placas de vidrio (ver Tabla 11), existe un aumento del valor promedio a medida que se avanza con los ciclos de envejecimiento y en cambio el valor máximo tiende a ser constante. Aquellas placas que fueron tratadas superficialmente, se pueden decir que tuvieron un mejor desempeño debido a una recuperación por parte de la hidrofobicidad.

Condición	Corriente promedio [mA]	Corriente máxima [mA]
Sin recubrimiento	6,031	37,680
Con recubrimiento	10,482	32,408
Primer ciclo de envejecimiento	12,156	39,653
Primer ciclo de envejecimiento más lavado	11,363	29,475
Segundo ciclo de envejecimiento	13,062	40,364
Segundo ciclo de envejecimiento más lavado	11,048	36,540
Tercer ciclo de envejecimiento	15,620	39,095
Tercer ciclo de envejecimiento más lavado	11,435	29,454

*Tabla 11: Resumen de las corrientes por las placas de vidrio con recubrimiento al ensayo de tracking.*

Estos niveles en las corrientes superficiales, tanto en las placas de cerámica como de vidrio, elevan la temperatura de la superficie como se muestra en la Figura 58, favoreciendo de esta forma la erosión y degradación del material.



*Figura 58: Registro termográfico de las placas durante el ensayo.*

# Capítulo 5: Desempeño del recubrimiento siliconado Si-COAT 570

## 5.1. Introducción

La vida útil del recubrimiento siliconado es un factor importante para las empresas de Distribución o Transmisión, las cuales deben incurrir en gastos para el mantenimiento preventivo y predictivo de los sistemas de aislación. Los gastos por lavado de los aisladores versus la aplicación del recubrimiento terminan siendo más altos en el mediano plazo.

De acuerdo a la IEEE 957 [13], al considerar una instalación energizada la principal técnica de mantenimiento preventivo es el lavado de aislación con agua desmineralizada aislante, de baja conductividad, de acuerdo a la norma debe realizarse a alta presión, con el objetivo de retirar suciedad acumulada de la superficie del aislador la cual puede hacer perder sus características dieléctricas, y por tanto generar una eventual ruptura dieléctrica (*"flashover"*) o incluso una explosión, lo que se traduce finalmente en una interrupción del servicio.

Por lo anterior, y con el objetivo de que la calidad del suministro dependa de la capacidad de minimizar la cantidad de interrupciones del servicio, los planes de mantenimiento preventivo apuntan a la seguridad de los sistemas realizando lavado de aisladores desde camiones grúas, utilizando mangueras a alta presión y a través de líquidos de baja conductividad. Es por esto que los recubrimientos presentes en el mercado aseguran un período mucho más extenso libre de mantenimiento e inclusive hasta en un par de años, con una vida útil desde su aplicación de alrededor de diez años, esto genera un ahorro de millones en comparación a los gastos por agua desmineralizada y toda la logística que implica efectuar un lavado, dependiendo de otras variables tales como la situación geográfica, climatología y contaminación de la zona.

## 5.2. Mantenimiento

De acuerdo con los resultados obtenidos de los diferentes ensayos realizados a los aisladores con recubrimiento siliconado, vemos que los principales parámetros que muestran un mejoramiento y determinan un mejor desempeño son:

- Disminución de la corriente de fuga.

En la aplicación del recubrimiento siliconado a los aisladores ensayados existe un aumento en la resistencia de aislamiento superficial lo que se refleja en la disminución de los niveles registrados de corriente de fuga. Los resultados obtenidos para los aisladores de vidrio templado y de cerámica muestran que por el hecho de contar con el producto ya los niveles de corriente de fuga en promedio se reducen un 9% y 16%, respectivamente analizando netamente el caso base. Esto se vería representado en una disminución de la temperatura de la superficie del aislador de forma de contrarrestar la erosión y degradación del recubrimiento siliconado.

- Mejoramiento de la clase de hidrofobicidad.

Con los resultados de la verificación de la clase de hidrofobicidad podemos concluir que el recubrimiento en una primera instancia presenta altas características hidrofóbicas y de *anti-soiling*, esto es de vital importancia y de carácter esencial para un recubrimiento de aisladores expuestos a ambientes de contaminación. Por otro lado, el recubrimiento de silicona se beneficia de sus propiedades hidrofóbicas, tal como se aprecia en la sección 3.3.3, no logrando bajar en ninguna de las condiciones ensayadas de HC5, inclusive tras el lavado su hidrofobicidad corresponde a HC1.

- Mejor desempeño en aisladores recubiertos ante la medición de descargas parciales.

Los resultados obtenidos del análisis PRPD sobre los aisladores con recubrimiento siliconado muestran una atenuación en cuanto a los niveles de descarga y valor de carga aparente. Por lo tanto, podría identificarse la gravedad o severidad de la contaminación de un sitio a partir de la lectura del patrón de descargas parciales. [14]

Teniendo en consideración los puntos anteriores, es que hace sentido replantearse la pertinencia de los lavados de aislación y la periodicidad de estos. Cabe mencionar que con los resultados obtenidos no es posible determinar un tiempo específico o un plazo determinado en el cual se deban realizar los mantenimientos predictivos de la aislación, ya que no se evaluaron condiciones previas a la ocurrencia de una falla.

Lo que sí se puede decir es que, ante una mejora en los parámetros antes mencionados, la frecuencia de lavado de aisladores según distintos ambientes de contaminación, se podría recalcular sus periodicidades. Por ejemplo, es conocido que el lavado de aislación en las líneas de transmisión a lo largo de nuestro país se desarrolla cada dos, cuatro o seis meses, incluso hasta en un año dependiendo de la zona en específico. Por ende, dichos periodos se pueden aplazar al aplicar el producto en aisladores de vidrio templado y de cerámica ya en operación o que se quiera cambiar por aisladores nuevos ya recubiertos.

Ante la ausencia de un desarrollo de un dispositivo que entregue en tiempo real la medida de corriente de fuga a través de un aislador, la forma más efectiva como monitoreo ante el grado de contaminación en la superficie del aislador es mediante la detección de emisiones de descargas parciales o análisis de señales eléctricas, estas tecnologías se encuentran relacionadas a ultrasonidos, radiofrecuencias o radiación ultravioleta.

# Capítulo 6: Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros

## 6.1. Conclusiones

Tras realizar una serie de ensayos eléctricos, se desprende que el desempeño dieléctrico del recubrimiento siliconado presenta un mejor desempeño bajo condiciones húmedas respecto a la condición en seco. Los resultados del ensayo de tensión de contorno pese a que no muestran una diferencia en cuanto al valor, nos permite dimensionar en cuanto disminuye esta variable para los ambientes húmedos ensayados.

Por otro lado, los resultados de las condiciones secas para aisladores de vidrio templado y cerámica con recubrimiento siliconado resultan con pequeñas diferencias en cuanto al desempeño en comparación a aquellos sin recubrimiento, pero con diferencias de unos pocos *kilovolts* del orden de los 2 [kV], lo que representa una variación de más menos 2 a 2,5% en la magnitud de la tensión de contorno. Se puede desprender que, a modo general, el producto no genera mejoras significativas en términos de un mejor desempeño de la tensión de contorno para condiciones secas. Sin embargo, las grandes diferencias se aprecian bajo condiciones de humedad y de alta contaminación, ya sea cada una por si sola o ambas en simultaneo.

Referente a las corrientes de fuga, los resultados para el recubrimiento siliconado en el caso base indican una mejora en las propiedades dieléctricas, disminuyendo un 9% las corrientes de fuga en aisladores de vidrio templado en condición seca respecto a los aisladores sin recubrimiento, y un 16% en aisladores cerámicos. Dependiendo de la condición bajo estudio, donde las diferencias son más apreciables en los ensayos húmedos de alta salinidad, vemos que se pueden llegar a dar niveles de reducción de las corrientes de fuga en el orden de un 20 y 25%.

En cuanto a los resultados obtenidos una vez se completaron los ciclos de envejecimiento, estos no demuestran un gran deterioro principalmente a que el tiempo de degradación no resultó ser del todo determinante.

Con respecto a la verificación del grado de hidrofobicidad determinado en la superficie contaminada de aisladores con y sin recubrimiento, fue posible observar que el recubrimiento siliconado mejora el nivel de hidrofobicidad de la superficie al variar el nivel de contaminación. Sin embargo, hay que tener especial cuidado en entornos en donde se deposita una importante cantidad de material soluble y no soluble, ya que ante la circulación de corrientes de fuga se está más propenso a la formación de bandas secas. Además, se observó que, para todos los tipos de superficies contaminadas, los aisladores sin recubrimiento se mojan completamente y no repelen de ninguna forma el agua, pudiendo tener consecuencias negativas en su operación. Por otra parte, los resultados obtenidos en el aislador recubierto contaminado con el ambiente E4, el cual presenta un alto nivel de material no soluble, indicaron una clase de hidrofobicidad HC4, en donde gran parte de la superficie se encontraba humedecida. Es de suponer que este fenómeno podría ocurrir debido a la alta presencia de caolín en la superficie del aislador, por lo que, el material no soluble pareciera tener un efecto negativo en el desempeño del recubrimiento ante la formación de bandas secas.

En cuanto al análisis de descargas parciales, en este trabajo se presentan los resultados experimentales provenientes de pruebas realizadas en aisladores de vidrio templado y de cerámica sin y con recubrimiento siliconado además de envejecidos, para visualizar el efecto del recubrimiento en estudio en las mediciones de descargas parciales.

De acuerdo con el patrón de DP, los valores de las cargas aparentes y la razón entre estos valores en las ondas de semiciclo positivo y negativo están estrechamente relacionadas con la condición de la superficie del aislador, ya que en base a los parámetros de magnitud y de densidad de las descargas parciales se podrían utilizar como indicadores del nivel de contaminación y una posible situación de contorno.

Los resultados de los ensayos de *tracking* superficial fueron bastantes positivos cumpliendo con el objetivo propuesto de evaluar la resistencia a la degradación del recubrimiento para ambos tipos de aisladores ante descargas superficiales mediante procedimientos normalizados usando placas de material de vidrio y de cerámica.

Finalmente, en todas las placas se alcanzó una carbonización por sobre los 25 [mm] desde el electrodo inferior, esto quiere decir, que todas fallan según el criterio B, en vez de alcanzar 60 [mA] durante el ensayo según el criterio A. Por ende, se clasifica el recubrimiento siliconado Si – COAT 570<sup>®</sup> como de clase 1B 4.5 – 0,07. Lo que corresponde a que fue ensayado con una tensión de 4.5 [kV] durante seis horas (6 [hr]) y que sobrepasó la marca de carbonización de 25 [mm] y la erosión fue de 0,07 [mm] o 70 [micrones].

En resumen, el recubrimiento siliconado disminuye significativamente el tracking superficial tras su aplicación, además otorga propiedades hidrofóbicas al aislamiento eléctrico, esto permite que tras un lavado de aislación se obtengan mejores resultados de limpieza de la superficie contaminada. Las propiedades del producto se aprecian mayormente en los resultados de corrientes de fuga más que en la tensión de contorno, donde los resultados no sufrieron grandes variaciones.

## 6.2. Trabajos futuros

Finalmente, luego de todo lo desarrollado a lo largo de esta trabajo se pueden realizar las siguientes recomendaciones para trabajos futuros:

- Diseñar una cámara de envejecimiento acelerado para aisladores o materiales en general, que cuente con un sistema de estrés eléctrico y que permita incluir otras variables las cuales afectan el desempeño y la vida útil de los aisladores.
- Contrastar y completar los resultados con otra de clase de aislador y ambientes de contaminación.
- Analizar descargas parciales ante diferentes ambientes de contaminación para la obtención de más patrones de DP como forma de detección de la gravedad de contaminación en un aislador.
- Realizar el ensayo de tracking bajo tensión continua y distinta polaridad, debido a que actualmente se encuentra en desarrollo de construcción largas líneas de transmisión en corriente continua, por lo que resulta necesario la realización de este tipo de estudios.

## Bibliografía

- [1] I. 60815-1, "Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions – Part 1: Definitions, information and general principles," 2018.
- [2] A. J. Phillips, D. J. Childs, and H. M. Schneider, "Aging of non-ceramic insulators due to corona from water drops," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 14, no. 3, pp. 1081–1086, 1999.
- [3] W. Farzaneh, Masoud & Chisholm, "Insulators for Icing and Polluted Environments." 2009.
- [4] B. G. Karady. M, Shah. R, "Flashover mechanism of silicone rubber composite insulators," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 10, no. 5, pp. 1965–1971, 1995.
- [5] R. S. Gorur: "Protective Coatings For Improving Contamination Performance Of Outdoor High Voltage Ceramic Insulators", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 10, no. 2. pp. 924–933, 1995, doi: 10.1109/61.400837.
- [6] I. 62073, "Guidance on the measurement of wettability of insulator surfaces," vol. 2003.
- [7] I. 60270, "High-voltage test techniques - Partial discharge measurements," 2000.
- [8] I. 60587, "Electrical insulating materials used under severe ambient conditions – Test methods for evaluating resistance to tracking and erosion," 2003.
- [9] A. N. Standard, "Test Methods for Electrical Power Insulators," vol. 1988, no. July, 2013.
- [10] A. N. Standard, "for Composite Suspension Insulators for Overhead Transmission Lines - Tests," vol. 1989, 2001.
- [11] C. Silicones inc, "Hoja de información técnica," 2013, [Online]. Available: <http://www.gruponti.cl/productos/recubrimiento-eléctrico-para-equipos-e-insumos-de-aislación-si-coat-570-hvic>.
- [12] G. S. Atlas, "Global Horizontal Irradiation - Chile." World Bank Group, [Online]. Available: <https://globalsolaratlas.info/map?c=-32.324276,-73.740234,4&r=CHL>.
- [13] IEEE: "Guide for the Application, Maintenance, and Evaluation of Room-Temperature Vulcanizing (RTV) Silicone Rubber Coatings for Outdoor Ceramic Insulators", in IEEE Std 1523-2018.
- [14] S. Chandrasekar, C. Kalaivanan, G. C. Montanari, and A. Cavallini: "Partial discharge detection as a tool to infer pollution severity of polymeric insulators", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 17, no. 1, pp. 181–188, 2010.

# Anexos

## Apéndice A: Tablas de medición de contorno en aisladores

Los diferentes valores de tensión de contorno que fueron medidos en el patio de Alta Tensión de la universidad se obtuvieron a partir de la medición en la cabina, donde luego este valor se modifica según la siguiente ecuación de la recta:

$$V = 2,0421 * V_{cabina}$$

Estos resultados deben ser corregidos a valores normalizados a 25 [°C], 1013 [mbar] (760 [mmHg]) y 65 % de humedad relativa (HR), según lo estipulado en la norma ANSI C29.1.

Según las mediciones obtenidas a través de la ecuación de la recta y corregidas por la norma, los resultados son los siguientes:

### Medición de tensión de contorno en aisladores de vidrio templado en condición seca

Estado	Sin recubrimiento		Con recubrimiento		Envejecido		Lavado	
N° medición	V_rup [kV]	V_corr [kV]	V_rup [kV]	V_corr [kV]	V_rup [kV]	V_corr [kV]	V_rup [kV]	V_corr [kV]
1	100	99,4	104	103,1	100	99,6	100	99,4
2	100	99,4	102	101,2	104	103,5	102	101,4
3	102	101,4	98	97,2	102	101,5	100	99,4
4	102	101,4	104	103,1	102	101,5	102	101,4
5	100	99,4	102	101,2	104	103,5	102	101,4
6	102	101,4	102	101,2	102	101,5	100	99,4
7	100	99,4	104	103,1	100	99,6	102	101,4
8	100	99,4	106	105,1	104	103,5	102	101,4
9	98	97,8	104	103,1	100	99,6	100	99,4
10	100	99,4	102	101,2	102	101,5	102	101,4
Promedio		99,8		101,9		101,5		100,6

Tabla 12: Tensión de contorno en aisladores de vidrio templado en caso base.

Estado	Sin recubrimiento		Con recubrimiento		Envejecido		Lavado	
N° medición	V_rup [kV]	V_corr [kV]	V_rup [kV]	V_corr [kV]	V_rup [kV]	V_corr [kV]	V_rup [kV]	V_corr [kV]
1	104	105,7	102	103,6	102	103,6	104	103,1
2	102	103,6	102	103,6	100	101,6	104	103,
3	102	103,6	102	103,6	102	103,6	100	99,2
4	104	105,7	100	101,6	102	103,6	102	101,2
5	100	101,6	104	105,7	100	101,6	102	101,2
6	100	101,6	98	99,6	100	101,6	100	99,2
7	100	101,6	98	99,6	100	101,6	102	101,2
8	98	99,6	100	101,6	102	103,6	106	105,1
9	98	99,6	100	101,6	102	103,6	104	103,1
10	102	103,6	96	97,5	100	101,6	102	101,2
Promedio		102,6		101,8		102,6		101,7

Tabla 13: Tensión de contorno en aisladores de vidrio templado en ambiente E1.

Estado	Sin recubrimiento		Con recubrimiento		Envejecido		Lavado	
N° medición	V_rup [kV]	V_corr [kV]	V_rup [kV]	V_corr [kV]	V_rup [kV]	V_corr [kV]	V_rup [kV]	V_corr [kV]
1	104	106,6	106	108,7	102	101,2	100	102,5
2	104	106,6	100	102,5	98	97,3	98	100,5
3	102	104,6	106	108,7	102	101,2	100	102,5
4	106	108,7	104	106,6	100	99,3	100	102,5
5	100	102,5	104	106,6	100	99,3	100	102,5
6	110	112,8	106	108,7	102	101,2	102	104,6
7	104	106,6	100	102,5	98	97,3	98	100,5
8	102	104,6	102	104,6	100	99,3	100	102,5
9	102	104,6	100	102,5	98	97,3	100	102,5
10	102	104,6	102	104,6	100	99,3	100	102,5
Promedio		106,2		105,6		99,3		102,2

Tabla 14: Tensión de contorno en aisladores de vidrio templado en ambiente E4.

Estado	Sin recubrimiento		Con recubrimiento		Envejecido		Lavado	
N° medición	V_rup [kV]	V_corr [kV]	V_rup [kV]	V_corr [kV]	V_rup [kV]	V_corr [kV]	V_rup [kV]	V_corr [kV]
1	104	105,4	100	101,4	106	104,3	102	100,4
2	102	103,4	104	105,4	108	106,3	100	98,4
3	98	99,3	100	101,4	106	104,3	100	98,4
4	102	103,4	102	103,4	104	102,3	102	100,4
5	102	103,4	98	99,3	100	98,4	106	104,3
6	100	101,4	102	103,4	104	102,3	106	104,3
7	96	97,3	104	105,4	106	104,3	104	102,3
8	98	99,3	100	101,4	102	100,4	106	104,3
9	100	101,4	102	103,4	104	102,3	102	100,4
10	96	97,3	100	101,4	106	104,3	102	100,4
Promedio		101,2		102,6		102,9		101,4

Tabla 15: Tensión de contorno en aisladores de vidrio templado en ambiente E5.

**Medición de tensión de contorno en aisladores de vidrio templado en condición húmeda**

Estado	Sin recubrimiento		Con recubrimiento		Envejecido	
N° medición	V_rup [kV]	V_corr [kV]	V_rup [kV]	V_corr [kV]	V_rup [kV]	V_corr [kV]
1	70	70,6	76	77,9	75	76,8
2	66	66,6	76	77,9	76	77,9
3	75	75,7	76	77,9	75	76,8
4	71	71,6	77	78,9	77	78,9
5	65	65,6	77	78,9	76	77,9
6	68	68,6	77	78,9	76	77,9
7	75	75,7	75	76,8	75	76,8
8	71	71,6	75	76,8	76	77,9
9	72	72,6	75	76,8	74	75,8
10	73	73,7	75	76,8	75	76,8
Promedio		71,2		77,7		77,3

Tabla 16: Tensión de contorno en aisladores de vidrio templado en ambiente lluvia.

Estado	Sin recubrimiento		Con recubrimiento		Envejecido	
N° medición	V_rup [kV]	V_corr [kV]	V_rup [kV]	V_corr [kV]	V_rup [kV]	V_corr [kV]
1	42	42,3	40	40,0	43	43,0
2	44	44,3	40	40,0	46	45,9
3	45	45,3	39	39,0	45	44,9
4	45	45,3	42	42,0	40	40,0
5	47	47,3	39	39,0	40	40,0
6	45	45,3	41	41,0	46	45,9
7	45	45,3	40	40,0	41	41,0
8	47	47,3	41	41,0	38	38,0
9	43	43,3	39	39,0	36	36,0
10	45	45,3	42	42,0	34	34,0
Promedio		45,1		40,3		40,9

Tabla 17: Tensión de contorno en aisladores de vidrio templado en ambiente salino.

Estado	Sin recubrimiento		Con recubrimiento		Envejecido	
N° medición	V_rup [kV]	V_corr [kV]	V_rup [kV]	V_corr [kV]	V_rup [kV]	V_corr [kV]
1	61	62,5	62	64,7	62	64,7
2	62	63,5	62	64,7	62	64,7
3	59	60,4	64	66,8	64	66,8
4	60	61,4	64	66,8	62	64,7
5	60	61,4	62	64,7	61	63,7
6	61	62,5	62	64,7	62	64,7
7	61	62,5	64	66,8	61	63,7
8	60	61,4	62	64,7	61	63,7
9	59	60,4	62	64,7	62	64,7
10	61	62,5	60	62,7	62	64,7
Promedio		61,9		65,2		64,6

Tabla 18: Tensión de contorno en aisladores de vidrio templado en ambiente E1.

Estado	Sin recubrimiento		Con recubrimiento		Envejecido	
N° medición	V_rup [kV]	V_corr [kV]	V_rup [kV]	V_corr [kV]	V_rup [kV]	V_corr [kV]
1	57	58,2	55	56,1	58	58,5
2	55	56,1	60	61,2	57	57,5
3	55	56,1	62	63,3	58	58,5
4	56	57,2	60	61,2	58	58,5
5	55	56,1	61	62,3	57	57,5
6	58	59,2	59	60,2	59	59,6
7	55	56,1	59	60,2	59	59,6
8	55	56,1	60	61,2	58	59,5
9	57	58,2	59	60,2	58	58,5
10	59	60,2	60	61,2	57	57,5
Promedio		57,4		60,7		58,4

Tabla 19: Tensión de contorno en aisladores de vidrio templado en ambiente E4.

Estado	Sin recubrimiento		Con recubrimiento		Envejecido	
N° medición	V_rup [kV]	V_corr [kV]	V_rup [kV]	V_corr [kV]	V_rup [kV]	V_corr [kV]
1	55	56,2	60	62,3	60	61,3
2	55	56,2	57	58,2	55	56,2
3	54	55,2	57	58,2	58	59,3
4	57	58,2	58	59,3	58	59,3
5	50	51,1	59	60,3	60	61,3
6	56	57,2	56	57,2	58	59,3
7	56	57,2	57	58,2	59	60,3
8	55	56,2	58	59,3	59	60,3
9	56	57,2	56	57,2	60	61,3
10	56	57,2	57	58,2	59	60,3
Promedio		56,2		58,7		59,9

Tabla 20: Tensión de contorneo en aisladores de vidrio templado en ambiente E5.

### Medición de tensión de contorneo en aisladores cerámicos en condición seca

Estado	Sin recubrimiento		Con recubrimiento		Envejecido		Lavado	
N° medición	V_rup [kV]	V_corr [kV]	V_rup [kV]	V_corr [kV]	V_rup [kV]	V_corr [kV]	V_rup [kV]	V_corr [kV]
1	82	81,4	82	81,4	82	83,4	82	81,4
2	81	80,4	82	81,4	81	82,4	80	79,4
3	82	81,4	79	78,4	82	83,4	81	80,4
4	80	79,4	82	81,4	82	83,4	82	81,4
5	81	80,4	81	80,4	84	85,4	81	80,4
6	83	82,4	83	82,4	81	82,4	83	82,4
7	83	82,4	80	79,4	81	82,4	82	81,4
8	81	80,4	82	81,4	82	83,4	84	83,4
9	83	82,4	83	82,4	80	81,4	81	80,4
10	83	82,4	81	80,4	83	84,4	83	82,4
Promedio		81,3		80,9		83,2		81,3

Tabla 21: Tensión de contorneo en aisladores cerámicos en caso base.

Estado	Sin recubrimiento		Con recubrimiento		Envejecido		Lavado	
N° medición	V_rup [kV]	V_corr [kV]	V_rup [kV]	V_corr [kV]	V_rup [kV]	V_corr [kV]	V_rup [kV]	V_corr [kV]
1	76	77,2	83	84,3	82	83,3	82	81,4
2	80	81,3	79	80,3	84	85,3	80	79,4
3	78	79,3	77	78,2	82	83,3	81	80,4
4	80	81,3	80	81,2	82	83,3	82	81,4
5	82	83,3	83	84,3	82	93,3	81	80,4
6	82	83,3	75	76,2	85	86,3	83	82,4
7	78	79,3	77	78,2	81	82,3	82	81,4
8	80	81,3	85	86,4	84	85,3	81	80,4
9	82	83,3	82	83,3	84	85,3	81	80,4
10	80	81,3	78	79,3	84	85,3	80	79,4
Promedio		81,1		81,2		84,3		80,7

Tabla 22: Tensión de contorno en aisladores cerámicos en ambiente E1.

Estado	Sin recubrimiento		Con recubrimiento		Envejecido		Lavado	
N° medición	V_rup [kV]	V_corr [kV]	V_rup [kV]	V_corr [kV]	V_rup [kV]	V_corr [kV]	V_rup [kV]	V_corr [kV]
1	83	85,1	85	87,1	81	80,4	84	83,4
2	83	85,1	84	86,1	83	82,4	84	83,4
3	83	85,1	80	82,0	82	81,4	81	80,4
4	85	87,1	85	87,1	83	82,4	85	84,4
5	83	85,1	84	86,1	81	80,4	81	80,4
6	85	87,1	84	86,1	83	82,4	84	83,4
7	85	87,1	84	86,1	82	81,4	82	81,4
8	85	87,1	85	87,1	81	80,4	82	81,4
9	85	87,1	85	87,1	80	79,4	83	82,4
10	83	85,1	85	87,1	80	79,4	83	82,4
Promedio		86,1		86,2		81,0		82,3

Tabla 23: Tensión de contorno en aisladores cerámicos en ambiente E4.

Estado	Sin recubrimiento		Con recubrimiento		Envejecido		Lavado	
N° medición	V_rup [kV]	V_corr [kV]	V_rup [kV]	V_corr [kV]	V_rup [kV]	V_corr [kV]	V_rup [kV]	V_corr [kV]
1	80	81,1	76	77,0	85	83,6	82	81,4
2	80	81,1	80	81,1	80	78,7	80	79,4
3	80	81,1	78	79,1	84	82,6	81	80,4
4	81	82,1	80	81,1	86	84,6	82	81,4
5	84	85,1	73	74,0	83	81,7	81	80,4
6	80	81,1	76	77,0	84	82,6	82	81,4
7	79	80,1	79	80,1	82	80,7	82	81,4
8	83	84,1	82	83,1	81	79,7	84	83,4
9	81	82,1	80	81,1	82	80,7	80	79,4
10	82	83,1	80	81,1	82	80,7	83	82,4
Promedio		82,1		79,5		81,6		81,2

Tabla 24: Tensión de contorno en aisladores cerámicos en ambiente E5.

### Medición de tensión de contorno en aisladores cerámicos en condición húmeda

Estado	Sin recubrimiento		Con recubrimiento		Envejecido	
N° medición	V_rup [kV]	V_corr [kV]	V_rup [kV]	V_corr [kV]	V_rup [kV]	V_corr [kV]
1	56	57,3	66	67,3	61	62,2
2	57	58,3	64	65,2	63	64,2
3	63	64,4	68	69,3	64	65,2
4	64	65,4	66	67,3	60	61,1
5	61	62,4	68	69,3	60	61,1
6	64	65,4	70	71,3	66	67,3
7	62	63,4	70	71,3	65	66,2
8	64	65,4	74	75,4	64	65,2
9	62	63,4	68	69,3	60	61,1
10	65	66,5	70	71,3	61	62,2
Promedio		63,2		69,7		63,6

Tabla 25: Tensión de contorno en aisladores cerámicos en ambiente lluvia.

Estado	Sin recubrimiento		Con recubrimiento		Envejecido	
N° medición	V_rup [kV]	V_corr [kV]	V_rup [kV]	V_corr [kV]	V_rup [kV]	V_corr [kV]
1	44	44,1	43	43,2	45	45,2
2	45	45,1	41	41,2	42	42,2
3	46	46,1	41	41,2	45	45,2
4	44	44,1	41	41,2	41	41,2
5	45	45,1	40	40,2	43	43,2
6	45	45,1	40	40,2	44	44,2
7	47	47,1	42	42,2	44	44,2
8	45	45,1	44	44,2	40	40,2
9	46	46,1	40	40,2	40	40,2
10	47	47,1	40	40,2	41	41,2
Promedio		45,5		41,4		42,7

Tabla 26: Tensión de contorneo en aisladores cerámicos en ambiente salino.

Estado	Sin recubrimiento		Con recubrimiento		Envejecido	
N° medición	V_rup [kV]	V_corr [kV]	V_rup [kV]	V_corr [kV]	V_rup [kV]	V_corr [kV]
1	48	49,2	50	51,2	46	47,1
2	46	47,1	46	47,1	46	47,1
3	47	48,1	45	46,1	47	48,1
4	48	49,2	45	46,1	47	48,1
5	48	49,2	46	47,1	47	48,1
6	46	47,1	45	46,1	46	47,1
7	48	49,2	45	46,1	46	47,1
8	47	48,1	44	45,1	45	46,1
9	46	47,1	43	44,0	47	48,1
10	46	47,1	44	45,1	46	47,1
Promedio		48,1		46,3		47,4

Tabla 27: Tensión de contorneo en aisladores cerámicos en ambiente E1.

Estado	Sin recubrimiento		Con recubrimiento		Envejecido	
N° medición	V_rup [kV]	V_corr [kV]	V_rup [kV]	V_corr [kV]	V_rup [kV]	V_corr [kV]
1	40	40,8	40	40,8	41	41,4
2	42	42,9	40	40,8	41	41,4
3	40	40,8	38	38,8	41	41,4
4	43	43,9	40	40,8	40	40,4
5	43	43,9	38	38,8	41	41,4
6	42	42,9	39	39,8	42	42,4
7	40	40,8	40	40,8	41	41,4
8	41	41,8	38	38,8	41	41,4
9	42	42,9	40	40,8	40	40,4
10	42	42,9	40	40,8	40	40,4
Promedio		42,4		40,1		41,2

Tabla 28: Tensión de contorno en aisladores cerámicos en ambiente E4.

Estado	Sin recubrimiento		Con recubrimiento		Envejecido	
N° medición	V_rup [kV]	V_corr [kV]	V_rup [kV]	V_corr [kV]	V_rup [kV]	V_corr [kV]
1	46	47,0	44	45,0	42	42,9
2	45	46,0	44	45,0	43	43,9
3	49	50,1	44	45,0	43	43,9
4	46	47,0	43	43,9	44	45,0
5	45	46,0	44	45,0	42	42,9
6	47	48,0	43	43,9	44	45,0
7	48	49,0	43	43,9	43	43,9
8	48	49,0	44	45,0	43	43,9
9	46	47,0	40	40,9	42	42,9
10	46	47,0	42	42,9	43	43,9
Promedio		47,6		44,0		43,8

Tabla 29: Tensión de contorno en aisladores cerámicos en ambiente E5.

## Apéndice B: Tablas de medición de corrientes de fuga en aisladores de vidrio templado

Resultados en aisladores de vidrio templado en condición seca

V. divisor [kV]	Sin recubrimiento		Con recubrimiento		Envejecido		Post-lavado	
	I fuga [uA]	I fuga [mA]	I fuga [uA]	I fuga [mA]	I fuga [uA]	I fuga [mA]	I fuga [uA]	I fuga [mA]
10	188,8	0,189	172,4	0,172	188,2	0,188	177,3	0,177
20	362,5	0,363	340,9	0,341	362,1	0,362	346,4	0,346
30	573	0,573	513,3	0,513	574,2	0,574	522,6	0,523
40	818,3	0,818	735,6	0,736	769,4	0,769	741,2	0,741
50	1002,6	1,003	887,4	0,887	907,4	0,907	891,7	0,892

Tabla 30: Medición de corrientes de fuga en aisladores de vidrio templado caso base.

V. divisor [kV]	Sin recubrimiento		Con recubrimiento		Envejecido		Post-lavado	
	I fuga [uA]	I fuga [mA]	I fuga [uA]	I fuga [mA]	I fuga [uA]	I fuga [mA]	I fuga [uA]	I fuga [mA]
5	118,4	0,118	107,4	0,107	98,3	0,098	89,8	0,090
10	182,3	0,182	167,7	0,168	180,7	0,181	177,3	0,177
15	251,7	0,252	228,9	0,229	273,4	0,273	260,4	0,260
20	322,2	0,322	298,5	0,299	360,2	0,360	346,4	0,346
25	398,4	0,398	353,8	0,354	441,6	0,442	433,7	0,434
30	460,7	0,461	400,6	0,401	532,5	0,533	522,6	0,523

Tabla 31: Medición de corrientes de fuga en aisladores de vidrio templado en ambiente E1.

V. divisor [kV]	Sin recubrimiento		Con recubrimiento		Envejecido		Post-lavado	
	I fuga [uA]	I fuga [mA]	I fuga [uA]	I fuga [mA]	I fuga [uA]	I fuga [mA]	I fuga [uA]	I fuga [mA]
5	119,2	0,119	106,1	0,106	94,1	0,094	103,2	0,103
10	214,7	0,215	193,9	0,194	181,0	0,181	188,6	0,189
15	315,8	0,316	276,6	0,277	287,1	0,287	268,1	0,268
20	427,7	0,428	364,4	0,364	384,7	0,385	355,2	0,355
25	556,8	0,557	456,4	0,456	453,7	0,454	442,8	0,443
30	681,1	0,681	546,3	0,546	558,9	0,559	528,3	0,528

Tabla 32: Medición de corrientes de fuga en aisladores de vidrio templado en ambiente E4.

V. divisor [kV]	Sin recubrimiento		Con recubrimiento		Envejecido		Post-lavado	
	I fuga [uA]	I fuga [mA]	I fuga [uA]	I fuga [mA]	I fuga [uA]	I fuga [mA]	I fuga [uA]	I fuga [mA]
5	150,6	0,151	111,7	0,112	93,6	0,094	103,4	0,103
10	247,8	0,248	183,5	0,184	188,8	0,189	186,8	0,187
15	338,7	0,339	256,4	0,256	285,9	0,286	265,5	0,266
20	461,3	0,461	331,2	0,331	381,2	0,381	350,3	0,350
25	585,6	0,586	413,1	0,413	470,9	0,471	435,4	0,435
30	698,5	0,699	548,7	0,549	553,3	0,553	523,3	0,523

Tabla 33: Medición de corrientes de fuga en aisladores de vidrio templado en ambiente E5.

## Resultados en aisladores de vidrio templado en condición húmeda

V. divisor [kV]	Sin recubrimiento		Con recubrimiento		Envejecido	
	I fuga [uA]	I fuga [mA]	I fuga [uA]	I fuga [mA]	I fuga [uA]	I fuga [mA]
5	115,1	0,115	61,15	0,061	76,2	0,076
10	205,1	0,205	111,55	0,112	143,4	0,143
15	268,7	0,269	161,35	0,161	207,8	0,208
20	317,2	0,317	195,85	0,196	254,6	0,255
25	416,3	0,416	259,85	0,260	328,3	0,328
30	467,1	0,467	303,35	0,303	376,2	0,376
35	585,9	0,586	346,05	0,346	432,2	0,432
40	682,2	0,682	420,7	0,421	515,4	0,515

Tabla 34: Medición de corrientes de fuga en aisladores de vidrio templado em ambiente lluvia.

V. divisor [kV]	Sin recubrimiento		Con recubrimiento		Envejecido	
	I fuga [uA]	I fuga [mA]	I fuga [uA]	I fuga [mA]	I fuga [uA]	I fuga [mA]
5	317,5	0,318	121,6	0,122	101,5	0,102
10	586,2	0,586	223,8	0,224	196,6	0,197
15	771,1	0,771	326,4	0,326	288,3	0,288
20	863,4	0,863	425,1	0,425	382,3	0,382
25	997,8	0,998	520,1	0,520	478,9	0,479

Tabla 35: Medición de corrientes de fuga en aisladores de vidrio templado en ambiente salino.

V. divisor [kV]	Sin recubrimiento		Con recubrimiento		Envejecido	
	I fuga [uA]	I fuga [mA]	I fuga [uA]	I fuga [mA]	I fuga [uA]	I fuga [mA]
5	90	0,090	65	0,065	78,6	0,079
10	175	0,175	150	0,150	145,6	0,146
15	265	0,265	205	0,205	220	0,220
20	335	0,335	270	0,270	290,3	0,290
25	420	0,420	320	0,320	352,1	0,352

Tabla 36: Medición de corrientes de fuga en aisladores de vidrio templado en ambiente E1.

V. divisor [kV]	Sin recubrimiento		Con recubrimiento		Envejecido	
	I fuga [uA]	I fuga [mA]	I fuga [uA]	I fuga [mA]	I fuga [uA]	I fuga [mA]
5	194	0,194	84	0,084	105	0,105
10	350	0,350	186	0,186	190	0,19
15	550	0,550	275	0,275	275	0,275
20	680	0,680	371	0,371	363	0,363
25	802	0,802	475	0,475	452	0,452

Tabla 37: Medición de corrientes de fuga en aisladores de vidrio templado en ambiente E4.

V. divisor [kV]	Sin recubrimiento		Con recubrimiento		Envejecido	
	I fuga [uA]	I fuga [mA]	I fuga [uA]	I fuga [mA]	I fuga [uA]	I fuga [mA]
5	190,6	0,191	124,4	0,124	96	0,096
10	288,4	0,288	215,8	0,216	186,2	0,186
15	363,8	0,364	279,1	0,279	281,4	0,281
20	444,8	0,445	362,3	0,362	387,1	0,387

Tabla 38: Medición de corrientes de fuga en aisladores de vidrio templado en ambiente E5.

### Resultados en aisladores cerámicos en condición seca

V. divisor [kV]	Sin recubrimiento		Con recubrimiento		Envejecido		Post-lavado	
	I fuga [uA]	I fuga [mA]	I fuga [uA]	I fuga [mA]	I fuga [uA]	I fuga [mA]	I fuga [uA]	I fuga [mA]
10	157,4	0,157	129,1	0,129	150,6	0,151	140,5	0,141
20	323,5	0,324	271,5	0,272	280,5	0,281	274,4	0,274
30	478,0	0,478	407,7	0,408	410,1	0,410	416,4	0,416
40	668,7	0,669	562,3	0,562	576,7	0,577	563,9	0,564

Tabla 39: Medición de corrientes de fuga en aisladores cerámicos caso base.

V. divisor [kV]	Sin recubrimiento		Con recubrimiento		Envejecido		Post-lavado	
	I fuga [uA]	I fuga [mA]	I fuga [uA]	I fuga [mA]	I fuga [uA]	I fuga [mA]	I fuga [uA]	I fuga [mA]
5	109,8	0,110	84,7	0,085	73,2	0,073	74,3	0,074
10	171,6	0,172	131,1	0,131	146,9	0,147	144,2	0,144
15	241,8	0,242	177,7	0,178	201,4	0,201	189,7	0,190
20	303,7	0,304	230,6	0,231	266,6	0,267	257,2	0,257
25	373,2	0,373	285,7	0,286	333,4	0,333	304,7	0,305

Tabla 40: Medición de corrientes de fuga en aisladores cerámicos en ambiente E1.

V. divisor [kV]	Sin recubrimiento		Con recubrimiento		Envejecido		Post-lavado	
	I fuga [uA]	I fuga [mA]	I fuga [uA]	I fuga [mA]	I fuga [uA]	I fuga [mA]	I fuga [uA]	I fuga [mA]
5	104,7	0,105	81,2	0,081	77,8	0,078	73,1	0,073
10	192,4	0,192	145,5	0,146	144,2	0,144	143,3	0,143
15	278,8	0,279	214,3	0,214	205,9	0,206	206,3	0,206
20	361,6	0,362	277,3	0,277	264,2	0,264	271,1	0,271
25	451,1	0,451	344	0,344	327,3	0,327	337,2	0,337

Tabla 41: Medición de corrientes de fuga en aisladores cerámicos en ambiente E4.

V. divisor [kV]	Sin recubrimiento		Con recubrimiento		Envejecido		Post-lavado	
	I fuga [uA]	I fuga [mA]	I fuga [uA]	I fuga [mA]	I fuga [uA]	I fuga [mA]	I fuga [uA]	I fuga [mA]
5	145,3	0,145	91,5	0,092	79,2	0,079	74,8	0,075
10	251,7	0,252	152,7	0,153	143,8	0,144	144,1	0,144
15	345,3	0,345	223,3	0,223	213,3	0,213	209,8	0,210
20	447,6	0,448	313,4	0,313	281,1	0,281	275,6	0,276
25	523,6	0,524	379,6	0,380	347,2	0,347	342,8	0,343

Tabla 42: Medición de corrientes de fuga en aisladores cerámicos en ambiente E5.

## Resultados en aisladores cerámicos en condición húmeda

V. divisor [kV]	Sin recubrimiento		Con recubrimiento		Envejecido	
	I fuga [uA]	I fuga [mA]	I fuga [uA]	I fuga [mA]	I fuga [uA]	I fuga [mA]
10	187	0,187	170,9	0,171	133,6	0,134
20	340,2	0,340	314,8	0,315	276,4	0,276
25	446,6	0,447	404,4	0,404	357,5	0,358
30	531,1	0,531	473,5	0,474	417,6	0,418
35	615,8	0,616	545,9	0,546	476,8	0,477
40	719,4	0,719	636,8	0,637	567,9	0,568

Tabla 43: Medición de corrientes de fuga en aisladores cerámicos en ambiente lluvia.

V. divisor [kV]	Sin recubrimiento		Con recubrimiento		Envejecido	
	I fuga [uA]	I fuga [mA]	I fuga [uA]	I fuga [mA]	I fuga [uA]	I fuga [mA]
5	117,8	0,118	91,8	0,092	96,4	0,096
10	222,4	0,222	171,5	0,172	182,6	0,183
15	325,7	0,326	248,4	0,248	274,4	0,274
20	427,2	0,427	326,9	0,327	351,4	0,351
25	515,8	0,516	411,7	0,412	466,6	0,467

Tabla 44: Medición de corrientes de fuga en aisladores cerámicos en ambiente salino.

V. divisor [kV]	Sin recubrimiento		Con recubrimiento		Envejecido	
	I fuga [uA]	I fuga [mA]	I fuga [uA]	I fuga [mA]	I fuga [uA]	I fuga [mA]
5	93	0,093	75	0,075	80,6	0,081
10	157	0,157	115	0,115	131,7	0,132
15	224	0,224	168	0,168	175,5	0,176
20	290	0,290	204	0,204	227,9	0,228

Tabla 45: Medición de corrientes de fuga en aisladores cerámicos en ambiente E1.

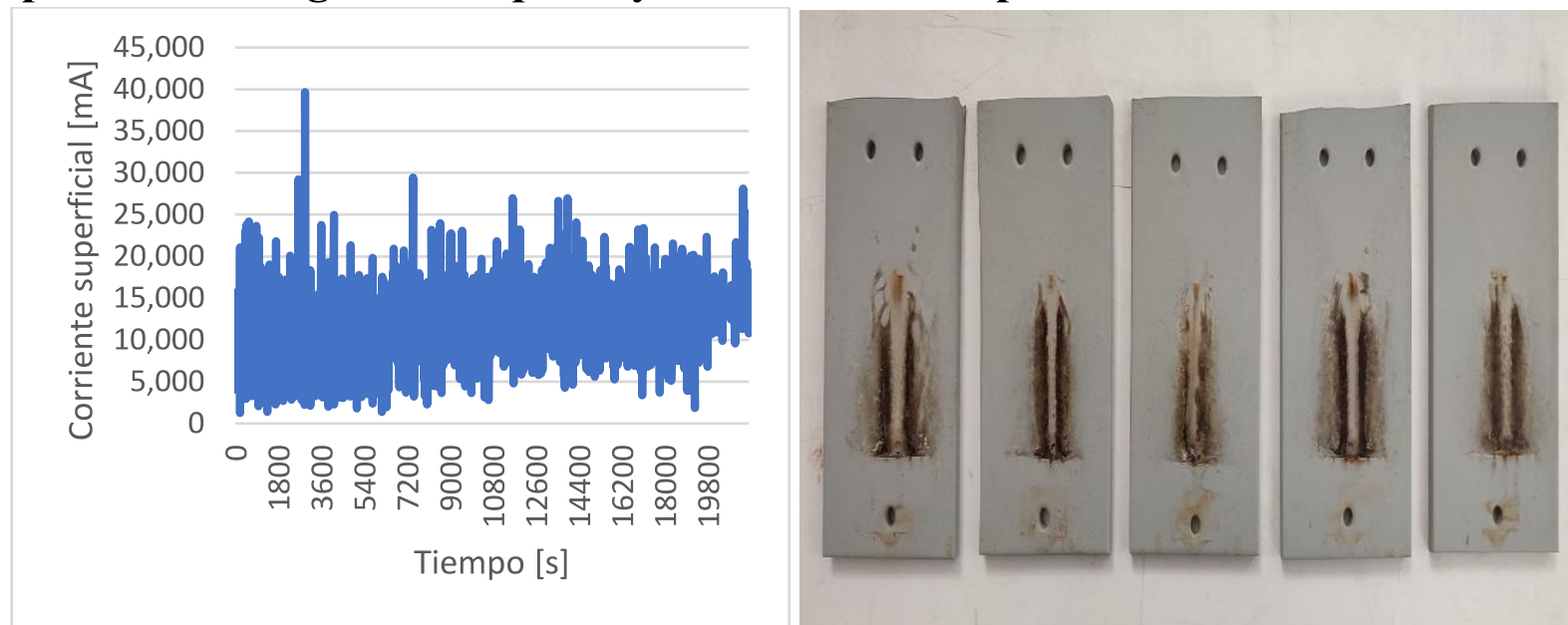
V. divisor [kV]	Sin recubrimiento		Con recubrimiento		Envejecido	
	I fuga [uA]	I fuga [mA]	I fuga [uA]	I fuga [mA]	I fuga [uA]	I fuga [mA]
5	78	0,078	62	0,062	81	0,081
10	158	0,158	125	0,125	145	0,145
15	256	0,256	198	0,198	212	0,212
20	342	0,342	264	0,264	280	0,280

Tabla 46: Medición de corrientes de fuga en aisladores cerámicos en ambiente E4.

V. divisor [kV]	Sin recubrimiento		Con recubrimiento		Envejecido	
	I fuga [uA]	I fuga [mA]	I fuga [uA]	I fuga [mA]	I fuga [uA]	I fuga [mA]
5	122,8	0,123	94,5	0,095	81,6	0,082
10	203,4	0,203	159,3	0,159	145	0,145
15	279,6	0,280	223,5	0,224	210	0,210
20	365,3	0,365	298,3	0,298	280	0,280

Tabla 47: Medición de corrientes de fuga en aisladores cerámicos en ambiente E5.

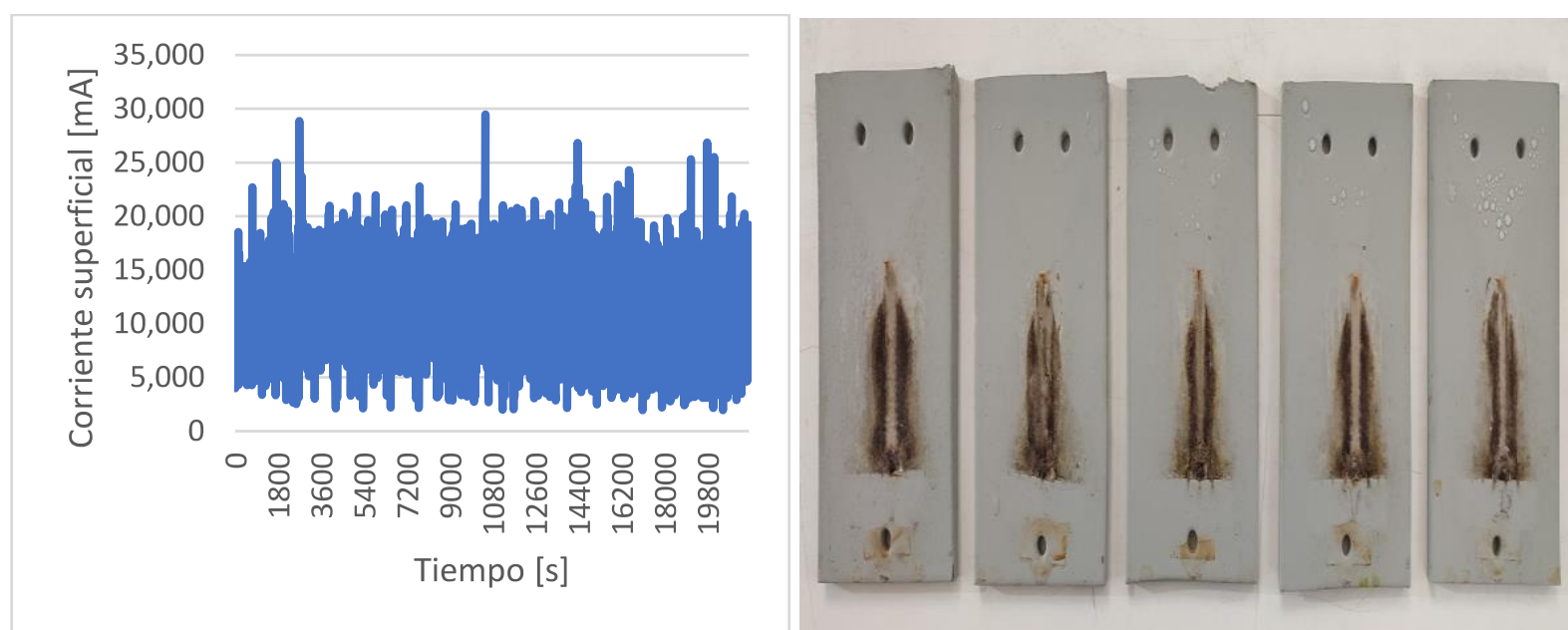
## Apéndice C: Registro temporal y resultado de las placas de vidrio



a) Registro temporal de la corriente superficial.

b) Resultado de las placas.

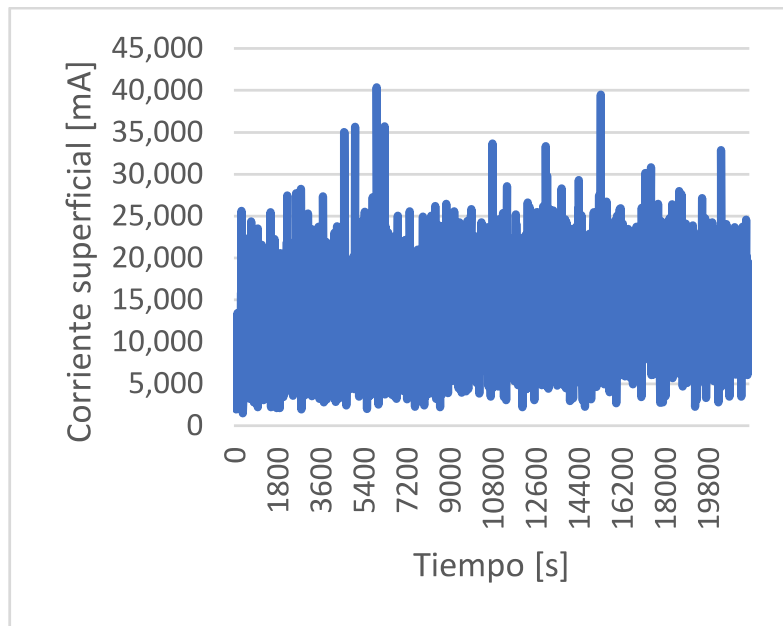
Figura 59: Resultados placas de vidrio con recubrimiento tras un ciclo de envejecimiento.



a) Registro temporal de la corriente superficial.

b) Resultado de las placas.

Figura 60: Resultados placas de vidrio con recubrimiento envejecido más tratamiento superficial.

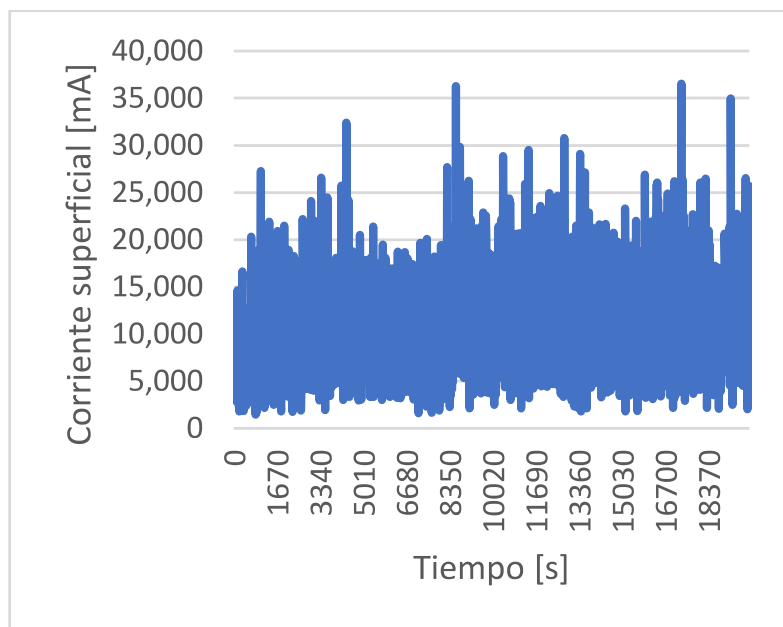


a) Registro temporal de la corriente superficial.



b) Resultado de las placas.

Figura 61: Resultados placas de vidrio con recubrimiento tras dos ciclos de envejecimiento.

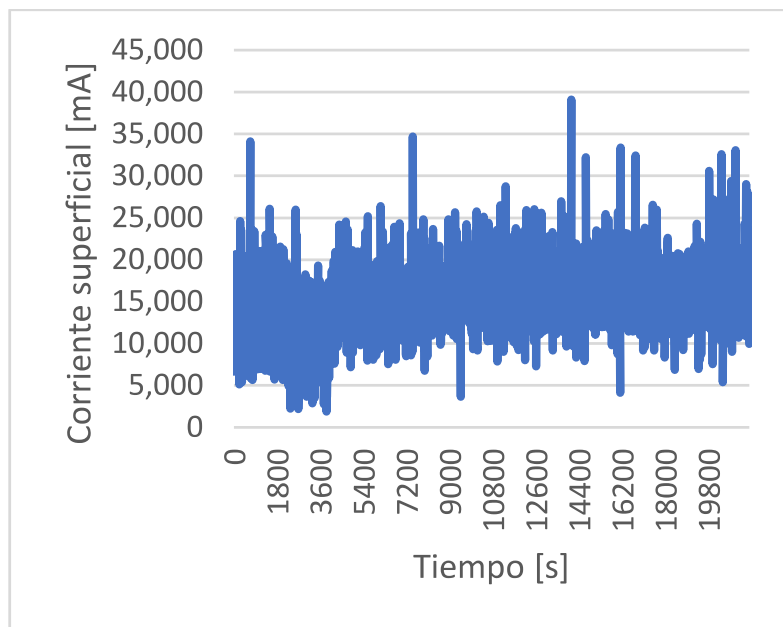


a) Registro temporal de la corriente superficial.



b) Resultado de las placas.

Figura 62: Resultados placas de vidrio con recubrimiento envejecido más tratamiento superficial.

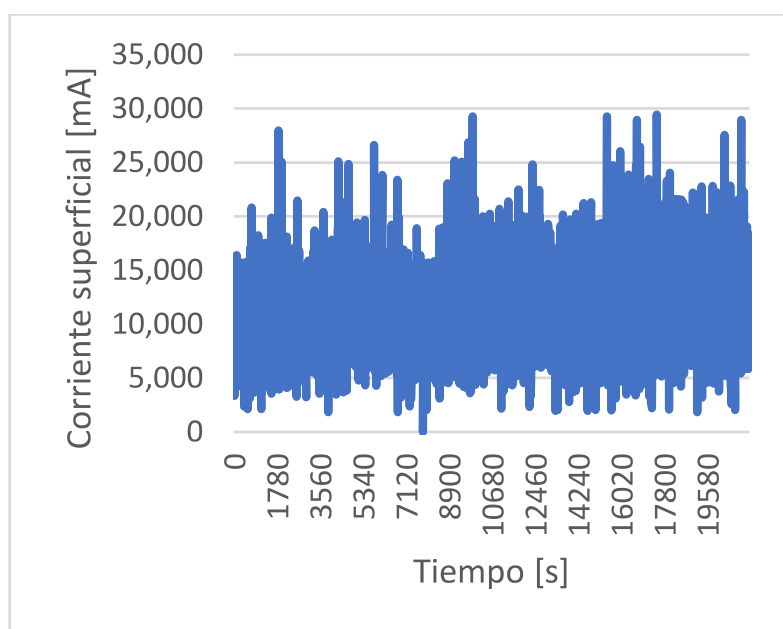


a) Registro temporal de la corriente superficial.

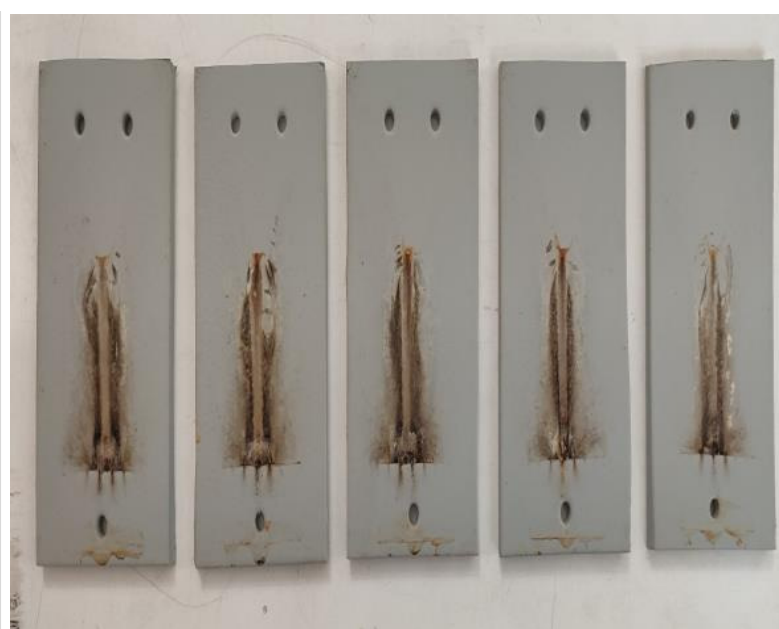


b) Resultado de las placas.

Figura 63: Resultados placas de vidrio con recubrimiento tras tres ciclos de envejecimiento.



a) Registro temporal de la corriente superficial.



b) Resultado de las placas.

Figura 64: Resultados placas de vidrio con recubrimiento envejecido más tratamiento superficial.