UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Ingeniería Eléctrica

Caracterización del comportamiento de aisladores de silicona contaminados frente a diferentes polaridades de tensión continua y fallas físicas

Ethan Stward Anselmi Ramírez

Trabajo para optar al título de:
Ingeniero Civil Electricista

Profesor guía:
Roger Schurch Brandt

Valparaíso, 2 de julio de 2026

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): **X** Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Caracterización del comportamiento de aisladores de silicona contaminados frente a diferentes polaridades de tensión continua y fallas físicas.

Nombre del candidato(a): Ethan Stward Anselmi Ramírez

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Eléctrica

Campus: Casa Central Valparaíso **Departamento:** Departamento de Ingeniería Eléctrica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Roger Schruch brandt, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

X El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por **(marcar una opción)**:

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

_____

_____

_____

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 09/07/2026. **Firma:** _____



Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 09/07/2026 **Firma:** _____



Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

"You got the makings of greatness in you."
-Treasure Planet

Agradecimientos

Hace 6 años no podía imaginar llegar a este punto en el que me encuentro ahora, y sé que habría sido imposible de haber estado solo, por lo que necesito usar este espacio para agradecer a las personas que me acompañaron y aportaron a que todo esto fuera posible.

En primer lugar, dar las gracias a mi familia, quienes han sido mi pilar fundamental en este largo recorrido. Gracias por brindarme siempre las herramientas necesarias para perseguir mis sueños, por su preocupación constante y por haberme convertido en la persona que soy hoy.

A mis amigos, con quienes he compartido risas y momentos inolvidables durante todos estos años. Gracias por haber sido un apoyo constante tanto dentro como fuera de la universidad, siendo fundamentales para superar cada uno de los desafíos que se presentaron en el camino.

Finalmente, a mi pareja, la mujer que amo. Gracias por tu amor sincero y por acompañarme de manera incondicional en los momentos más difíciles, dándome la fuerza para levantarme cuando más lo necesité.

Resumen

El desarrollo de nuevos sistemas de transmisión en corriente continua de alta tensión (HVDC) en Chile, emplazados a lo largo de zonas geográficas con condiciones ambientales extremas, ha consolidado la adopción de aisladores poliméricos de caucho de silicona. Sin embargo, la confiabilidad de estos equipos se ve amenazada por la combinación de un campo eléctrico unidireccional constante, contaminación superficial severa y daños físicos ocasionados por agentes externos en terreno, como el ataque de la fauna local. El presente trabajo de título tiene por objetivo caracterizar el desempeño dieléctrico de aisladores de silicona, evaluando el impacto interactivo de fallas físicas preexistentes, la severidad de la contaminación y la polaridad de la tensión continua aplicada.

Para llevar a cabo este estudio, se utilizaron aisladores comerciales de 15 kV, sobre los cuales se indujeron alteraciones mecánicas controladas en distintos niveles de severidad: cortes cóncavos en los faldones y exposición progresiva del núcleo de fibra de vidrio (FRP). Las probetas fueron sometidas a ensayos experimentales en una cámara de niebla, evaluándose tanto en condición de superficie limpia como bajo contaminación artificial salina de clase E5 (Muy Fuerte). La caracterización se realizó mediante la medición de la tensión de ruptura, el monitoreo temporal de la corriente de fuga y el registro estadístico y espectral de descargas parciales (DP). Adicionalmente, se ejecutó un ensayo exploratorio de envejecimiento termo-ambiental acelerado para evaluar los mecanismos de degradación interfacial a largo plazo.

Los resultados experimentales evidencian una severa sinergia destructiva al combinar daños geométricos con un entorno conductor. En probetas con corte de faldón severo bajo contaminación E5, el umbral de tensión de ruptura experimentó una caída crítica de hasta un 89 %. Asimismo, se comprobó empíricamente una inversión del escenario operativo de mayor riesgo. Mientras que en condiciones secas y limpias, la polaridad positiva impone la menor resistencia al contorneo, la introducción de la película electrolítica establece sistemáticamente la polaridad negativa como la condición más desfavorable.

Por otra parte, se concluyó que la exposición del núcleo de FRP no compromete de manera inmediata la tensión de ruptura, pero su naturaleza hidrofílica gatilla las mayores magnitudes de corriente de fuga y las tasas de repetición de DP más altas del estudio bajo condiciones de humedad. Finalmente, el ciclado de envejecimiento acelerado reveló una alteración radical en los mecanismos de falla, induciendo contorneos internos abruptos que eluden el desarrollo de las señales eléctricas superficiales precursoras. Estos hallazgos proporcionan información técnica fundamental para optimizar los criterios de diseño, diagnóstico y mantenimiento predictivo en infraestructuras HVDC.

Abstract

The development of new High Voltage Direct Current (HVDC) transmission systems in Chile, located across geographical areas with extreme environmental conditions, has consolidated the adoption of silicone rubber polymeric insulators. However, the reliability of these devices is threatened by the combination of a constant unidirectional electric field, severe surface pollution, and physical damage caused by external agents in the field, such as local fauna attacks. The present study aims to characterize the dielectric performance of silicone insulators, evaluating the interactive impact of pre-existing physical faults, pollution severity, and the polarity of the applied DC voltage.

To carry out this study, 15 kV commercial insulators were used, upon which controlled mechanical alterations of varying severity levels were induced: concave skirt cuts and progressive exposure of the fiberglass reinforced plastic (FRP) core. The specimens were subjected to experimental tests in a fog chamber, evaluated under both clean surface conditions and E5 (Very Heavy) artificial saline pollution. Characterization was performed through breakdown voltage measurements, temporal monitoring of leakage current, and statistical and spectral recording of partial discharges (PD). Additionally, an exploratory accelerated thermo-environmental aging test was conducted to evaluate long-term interfacial degradation mechanisms.

The experimental results evidence a severe destructive synergy when geometric damage is combined with a conductive environment. In specimens with a severe skirt cut under E5 pollution, the breakdown voltage threshold experienced a critical drop of up to 89 %. Furthermore, an inversion of the highest-risk operational scenario was empirically proven. While under dry and clean conditions positive polarity imposes the lowest flashover resistance, the introduction of the electrolytic layer systematically establishes negative polarity as the most unfavorable condition.

On the other hand, it was concluded that the exposure of the FRP core does not immediately compromise the breakdown voltage, but its hydrophilic nature triggers the highest leakage current magnitudes and PD repetition rates of the study under moisture conditions. Finally, the accelerated aging cycling revealed a radical alteration in the failure mechanisms, inducing abrupt internal flashovers that bypass the development of precursor surface electrical signals. These findings provide fundamental technical information to optimize design, diagnostic, and predictive maintenance criteria in HVDC infrastructures.

Tabla de contenidos

Glosario de Siglas **10**

1. Introducción **11**

1.1. Efecto de la contaminación 11

1.2. Efecto de la polaridad y distribución de carga en corriente continua 12

1.3. Modos de falla física y degradación en aisladores de silicona 13

1.4. Motivación 14

1.5. Objetivos 15

2. Marco Teórico **17**

2.1. Diferencias en el desempeño bajo excitación AC y DC 17

2.1.1. Captación y acumulación de contaminación 17

2.1.2. Tensión de contorneo y propagación del arco 17

2.2. Contaminación ambiental 18

2.2.1. Tipos generales de entornos ambientales 18

2.2.2. Contaminación tipo A 19

2.2.3. Contaminación tipo B 20

2.2.4. Clasificación de Severidad de la Contaminación del Sitio (SPS) 21

2.3. Tipos de fallas y degradación física en aisladores poliméricos 23

2.3.1. Daños en la superficie externa de la cubierta polimérica 23

2.3.2. Daños en las interfaces y pérdida de adhesión 24

2.3.3. Daños estructurales en el núcleo 25

2.4. Sistemas de detección y diagnóstico de fallas . . . 26
2.4.1. Métodos de inspección en terreno . . . 26
2.4.2. Métodos de laboratorio . . . 27

3. Metodología experimental 29

3.1. Probeta bajo estudio . . . 29
3.2. Simulación de fallas físicas . . . 30
3.2.1. Corte en el faldón del aislador . . . 30
3.2.2. Exposición del núcleo de fibra de vidrio . . . 32
3.3. Procedimiento de contaminación artificial . . . 33
3.3.1. Preparación de la contaminación artificial . . . 34
3.4. Configuración final de las probetas de ensayo . . . 36
3.5. Definición y validación del sistema de medición de descargas parciales . . . 38
3.5.1. Definición del nivel de tensión del ensayo . . . 39
3.6. Ensayos de laboratorio . . . 43
3.6.1. Tensión de ruptura . . . 44
3.6.2. Corriente de fuga . . . 46
3.6.3. Descargas Parciales . . . 48
3.7. Ensayo exploratorio de envejecimiento acelerado . . . 50
3.7.1. Procedimiento del ciclado térmico-ambiental . . . 50

4. Resultados y análisis experimentales 52

4.1. Resultados del ensayo de tensión de ruptura . . . 52
4.2. Resultados del ensayo de corriente de fuga . . . 57

4.2.1. Magnitud de corriente en función de la tensión aplicada 57
4.2.2. Evolución temporal de la corriente de fuga 59
4.3. Resultados del ensayo de descargas parciales 63
4.3.1. Evaluación en condición de superficie limpia 63
4.3.2. Evaluación en condición contaminada 67
4.3.3. Análisis global del comportamiento de descargas parciales 70
4.4. Efecto del envejecimiento acelerado 73
4.4.1. Resultados del ensayo de tensión de ruptura 73
4.4.2. Comportamiento de la corriente de fuga 74

5. Conclusiones y trabajos futuros 79
5.1. Caracterización de las fallas físicas 80
5.1.1. Falla por corte de faldón 80
5.1.2. Falla por exposición de núcleo 81
5.2. Trabajos futuros 83

Anexo A. Tablas de resultados experimentales 86
A.1. Tensión de ruptura 86
A.2. Corriente de fuga - Sin contaminación 88
A.3. Corriente de fuga - Con contaminación 93
A.4. Corriente de fuga - Envejecimiento acelerado 98

Anexo B. Registro fotográfico del montaje experimental 100
B.1. Sistema de contaminación artificial 100
B.2. Instrumentación para la medición de descargas parciales 101

Índice de figuras

1. Comparación de las distancias de aislamiento en sistemas HVAC y HVDC. 12

2. Representación contorneo bajo tensión AC y DC. 18

3. Determinación de la clase de severidad SPS a partir de mediciones de ESDD y NSDD para contaminación Tipo A. 21

4. Determinación de la clase de severidad a partir de la relación entre SES y SPS para contaminación Tipo B. 23

5. Degradación física en la superficie externa del aislador. 24

6. Falla interfacial y exposición del núcleo estructural. 25

7. Fractura frágil en el núcleo de un aislador polimérico. 26

8. Esquema y dimensiones generales del aislador polimérico Silpak AS-15-4FD. 30

9. Detalle geométrico de la falla por corte en el faldón del aislador. 31

10. Detalle geométrico para falla por exposición progresiva del núcleo. 32

11. Trazado geográfico referencial de la línea de transmisión HVDC Kimal-Lo Aguirre. . 34

12. Montaje experimental para la aplicación uniforme de la contaminación artificial. . . 35

13. Probeta de referencia en estado sano con capa de contaminación artificial E5. 37

14. Progresión de la falla por corte cóncavo en los faldones de los aisladores (Nivel E5). 37

15. Progresión de la falla por exposición del núcleo de fibra en los aisladores (Nivel E5). 38

16. Diagrama del setup preliminar para la medición de descargas parciales. 39

17. Evolución de la magnitud de las descargas (Q_{95}) en función del nivel de tensión. . . 41

18. Mapas de tiempo-frecuencia para la probeta de referencia a diferentes niveles de tensión. 42

19. Diagrama del setup experimental para ensayos de tensión de ruptura en corriente continua. 45

20. Setup ensayo en laboratorio. 45

21. Diagrama del setup experimental para la medición de corriente de fuga total. 47

22. Diagrama del setup experimental para la caracterización espectral de descargas parciales. 49

23. Comparación de las tensiones de ruptura promedio según el tipo de falla física y polaridad. 53

24. Relación entre la tensión de ruptura promedio y la distancia de fuga geométrica efectiva. 55

25. Evolución de la magnitud de corriente de fuga según el nivel de tensión, condición superficial y polaridad. 58

26. Evolución temporal de la corriente de fuga. Porcentajes respecto a la tensión de ruptura experimental 60

27. Variabilidad temporal de la corriente de fuga. 62

28. Magnitud de las descargas (Q_{95}) en condición de superficie limpia. 64

29. Comparativa mapas TF en condición de superficie limpia. 66

30. Magnitud de las descargas (Q_{95}) bajo contaminación artificial E5. 68

31. Comparativa mapas TF bajo contaminación E5. 69

32. Relación entre la carga aparente y la tasa de repetición de descargas parciales. . . . 71

33. Tensión de ruptura tras el ciclo de envejecimiento acelerado. 73

34. Evolución de la magnitud de la corriente de fuga total tras el ciclo de envejecimiento acelerado. 75

35. Magnitud de las descargas (Q_{95}) tras el ciclo de envejecimiento acelerado. 76

36. Comparativa mapas TF tras envejecimiento acelerado. 77

Índice de tablas

1. Descripción de entornos típicos según nivel de severidad. 22

2. Proporciones de la mezcla contaminante artificial para severidad E5. 35

3. Conteo de descargas parciales válidas detectadas según el nivel de tensión continua. 40

4. Resumen de las variables y escenarios que componen la matriz experimental. 44

5. Reducción porcentual de la tensión de ruptura promedio respecto al caso base. . . . 54

6. Reducción de la tensión de ruptura provocada exclusivamente por la contaminación E5. 54

7. Tasa de repetición de pulsos, sin contaminación 64

8. Tasa de repetición de pulsos bajo contaminación E5 67

9. Reducción porcentual de la tensión de ruptura promedio tras envejecimiento. 74

10. Tasa de repetición de pulsos post-ciclado de envejecimiento acelerado. 76

11. Perfil diagnóstico y rangos típicos de medición para la falla por corte de faldón. . . 81

12. Perfil diagnóstico y rangos típicos de medición para la falla por exposición de núcleo. 82

Glosario de Siglas

Sigla	Significado en Español	Significado en Inglés
AC	Corriente Alterna	*Alternating Current*
DC	Corriente Continua	*Direct Current*
DP	Descargas Parciales	*Partial Discharges*
ESDD	Densidad de Depósitos de Sal Equivalente	*Equivalent Salt Deposit Density*
FRP	Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio	*Fiberglass Reinforced Plastic*
FTIR	Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier	*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*
HFCT	Transformador de Corriente de Alta Frecuencia	*High Frequency Current Transformer*
HVAC	Corriente Alterna de Alta Tensión	*High Voltage Alternating Current*
HVDC	Corriente Continua de Alta Tensión	*High Voltage Direct Current*
IR	Infrarrojo	*Infrared*
LSR	Goma de Silicona Líquida	*Liquid Silicone Rubber*
MTS	Equipo de Prueba Múltiple	*Multi Test Set*
NSDD	Densidad de Depósitos No Solubles	*Non-Soluble Deposit Density*
SEM	Microscopía Electrónica de Barrido	*Scanning Electron Microscopy*
SES	Salinidad Equivalente del Sitio	*Site Equivalent Salinity*
SiR	Caucho de Silicona	*Silicone Rubber*
SPS	Severidad de Contaminación del Sitio	*Site Pollution Severity*
TF	Tiempo-Frecuencia	*Time-Frequency*
UV	Radiación Ultravioleta	*Ultraviolet Radiation*

1. Introducción

Los sistemas de transmisión de alta tensión en corriente continua (HVDC) han cobrado gran relevancia para el transporte eficiente de energía eléctrica. En esta infraestructura, los aisladores poliméricos, particularmente los fabricados con caucho de silicona (SiR), han desplazado progresivamente a los tradicionales de vidrio y cerámica. Su adopción responde a ventajas operativas destacables, tales como un menor peso estructural, excelente comportamiento frente a la contaminación y una alta hidrofobicidad natural. Sin embargo, la confiabilidad de estos componentes puede verse severamente amenazada por la combinación de condiciones ambientales adversas y las exigencias eléctricas propias de la tensión continua.

A diferencia de las redes de corriente alterna (AC), los sistemas HVDC imponen un campo eléctrico unidireccional y constante sobre el aislamiento. Esta polarización ininterrumpida agudiza la atracción electrostática de partículas presentes en el aire. Como resultado, se produce una acumulación de contaminación asimétrica y considerablemente más rápida sobre la superficie del polímero. Al entrar en contacto con la humedad ambiental, esta capa contaminante altera la distribución del campo eléctrico superficial, promoviendo el desarrollo de corrientes de fuga y modificando los mecanismos tradicionales de degradación del material.

Esta problemática adquiere un carácter crítico cuando los aisladores operan con fallas físicas preexistentes. Daños como grietas, erosión superficial o pérdida de material debido a agentes externos rompen la homogeneidad geométrica del aislante. Bajo el estrés constante de la tensión continua, estas imperfecciones actúan como puntos de alta concentración de campo eléctrico. En consecuencia, estos defectos se convierten en focos propicios para el inicio prematuro de descargas parciales, acelerando el colapso dieléctrico y facilitando la formación de trayectorias de contorneo que comprometen la estabilidad del sistema.

1.1. Efecto de la contaminación

La confiabilidad del aislamiento externo es un pilar fundamental para la seguridad y viabilidad económica de los sistemas eléctricos modernos. La operación bajo un campo eléctrico estacionario (HVDC) genera un estrés continuo que promueve una aglomeración asimétrica de la contaminación, una erosión superficial más severa y exacerba los efectos de la radiación UV sobre la hidrofobicidad en los aisladores poliméricos. En consecuencia, al interactuar con entornos de alta polución, la tensión de descarga disruptiva en condiciones húmedas disminuye drásticamente. Al analizar las distancias de aislamiento requeridas (ver Figura 1), el contraste en los requerimientos de diseño entre las tecnologías AC y DC es evidente.

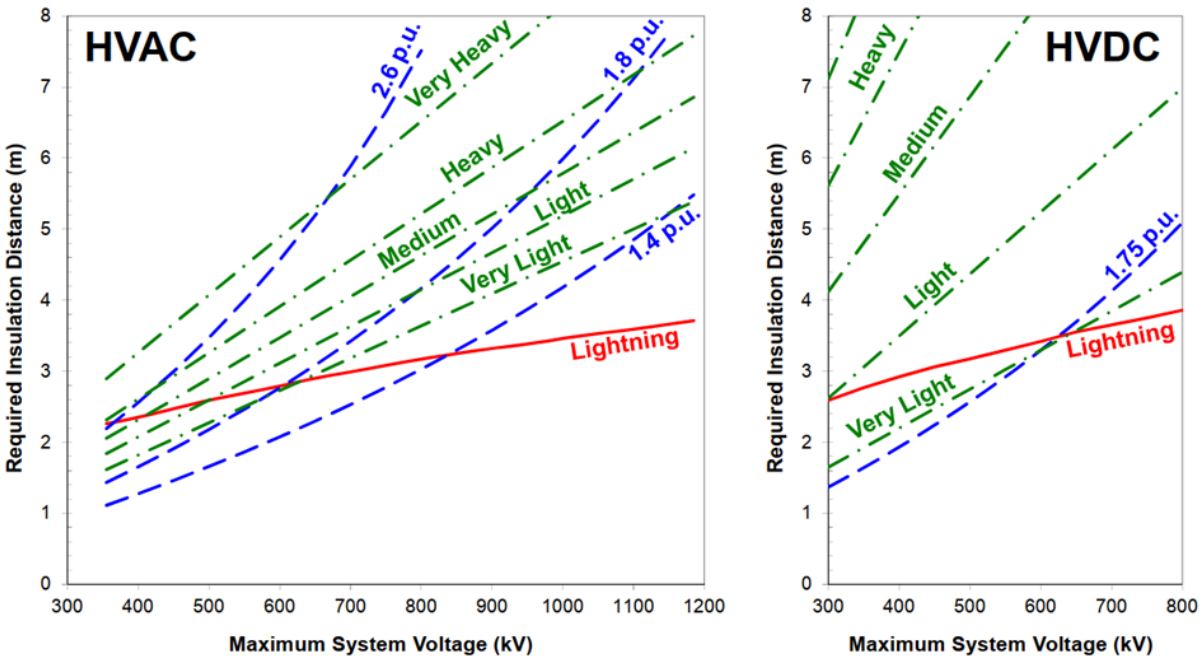


Figura 1: Comparación de las distancias de aislamiento en sistemas HVAC y HVDC [1].

En sistemas HVAC, la longitud geométrica de la cadena está determinada principalmente por las sobretensiones transitorias (descargas atmosféricas o de maniobra). El requerimiento por contaminación suele satisfacerse ajustando el factor de fuga dentro de límites de diseño y perfiles convencionales, sin necesidad de extremar las dimensiones. Por el contrario, la situación en HVDC es radicalmente distinta. En primer lugar, la distancia de fuga requerida para una severidad de contaminación dada es mayor que en AC. En segundo lugar, la magnitud de las sobretensiones de maniobra que el sistema debe soportar es comparativamente menor. Esta combinación convierte a la contaminación superficial en el factor restrictivo determinante para el diseño de los sistemas DC, requiriendo dimensiones de aislamiento excepcionalmente grandes, especialmente en zonas con polución significativa.

1.2. Efecto de la polaridad y distribución de carga en corriente continua

La polaridad de la línea desempeña un papel determinante en la severidad de este proceso. Bajo polaridad negativa, se facilita la emisión de electrones y la formación de descargas parciales en los herrajes y puntos de alta concentración de campo. Esto incrementa la ionización del aire circundante y la posterior deposición de iones sobre la superficie polimérica. Esta acumulación de carga espacial altera drásticamente la distribución del campo eléctrico a lo largo de la cadena de aisladores, distorsionando el perfil de potencial originalmente calculado para condiciones ideales [2].

Consecuentemente, se originan gradientes de potencial localizados capaces de superar la rigidez dieléctrica del aire. Esto desencadena descargas parciales superficiales que actúan como precursoras del contorneo, incluso cuando los niveles de contaminación promedio no son críticos.

A nivel experimental y normativo, tradicionalmente se asume que la polaridad negativa establece el escenario más exigente para los ensayos de aislamiento, debido a la mayor movilidad y eficiencia de los procesos de ionización secundaria bajo esta configuración. Sin embargo, en la actualidad no existe un consenso científico definitivo que garantice que esta polaridad sea siempre la más crítica o la única relevante. El impacto real de la polaridad puede variar significativamente dependiendo del perfil geométrico del aislador, la naturaleza química del contaminante y, muy especialmente, la presencia de fallas físicas estructurales. Por este motivo, la recomendación técnica y metodológica más rigurosa es evaluar el desempeño del aislador bajo ambas polaridades. Este enfoque comparativo permite identificar empíricamente cuál configuración representa el peor caso operativo y asegura un diagnóstico dieléctrico verdaderamente exhaustivo.

1.3. Modos de falla física y degradación en aisladores de silicona

A pesar de sus notables propiedades dieléctricas, la goma de silicona posee una naturaleza mecánica blanda. Esta característica la hace vulnerable a daños físicos durante las etapas de transporte, montaje y operación. En los sistemas de transmisión chilenos, un problema operativo recurrente en zonas rurales y de alta montaña es el ataque por fauna local. El picoteo de aves, los ataques de otros animales y el vandalismo provocan desgarros, perforaciones y pérdida de material en los faldones del aislador [3].

Este daño físico induce una degradación dieléctrica multifactorial. Por un lado, la alteración del perfil reduce la distancia de fuga geométrica, lo que disminuye la tensión crítica de contorneo (U_r) [4]. Por otro lado, las irregularidades del material dañado actúan como trampas para la contaminación y la humedad. Estas cavidades dificultan el lavado natural y generan puntos de alta concentración de estrés eléctrico debido a las discontinuidades geométricas.

La severidad de estos daños puede evolucionar hasta la pérdida total de la cubierta y la violación de la integridad en la interfaz entre la carcasa y el núcleo. Esto provoca la exposición directa del núcleo de fibra de vidrio reforzada (FRP). Esta condición representa una falla funcional de extrema criticidad, ya que a diferencia de la silicona, el núcleo de FRP posee una naturaleza hidrofílica que le permite absorber humedad rápidamente, degradando de forma irreversible la resistencia del aislamiento longitudinal.

En la interfaz donde convergen el aire, la silicona y el núcleo expuesto, se genera un punto triple

dieléctrico. La diferencia de permitividad entre estos tres medios provoca un aumento masivo del estrés eléctrico tangencial. Bajo la influencia de la tensión continua y la humedad, estas descargas catalizan la formación de ácidos que atacan la matriz del núcleo. Esto desencadena un proceso de fractura frágil, originado por el agrietamiento por corrosión bajo tensión en el núcleo de fibra de vidrio. Este fenómeno representa el escenario más adverso para la estabilidad del sistema, donde la degradación química sumada a la carga mecánica, da como resultado un agrietamiento transversal que progresa sistemáticamente hasta que la sección restante del núcleo ya no puede soportar la carga aplicada. La criticidad de este fenómeno está plenamente documentada; de hecho, en bases de datos del Electric Power Research Institute (EPRI), la fractura frágil llegó a representar el 51.1 % de los 221 modos de falla catastrófica registrados en este tipo de aisladores [5].

Si bien en normativas técnicas se tipifican exhaustivamente estas fallas y decretan su inaceptabilidad operativa, su enfoque es estrictamente cualitativo. Las normativas actuales no cuantifican la magnitud real de la degradación eléctrica en comparación con un aislador en estado sano. Además, la falta de metodologías establecidas o herramientas efectivas para detectar la gravedad de estos daños ralentiza su plena implementación práctica. En la actualidad, no existe una metodología empírica o generalmente aceptada que determine con exactitud la caída del umbral de contorneo, el aumento de las corrientes de fuga tras un corte en el faldón, o la detección oportuna de defectos en desarrollo bajo estrés DC [5].

1.4. Motivación

La transición energética y la descarbonización de la matriz eléctrica en Chile han impulsado un cambio de paradigma en la infraestructura de transporte de energía. Proyectos estratégicos de gran envergadura, como la línea de transmisión HVDC Kimal–Lo Aguirre, han consolidado la adopción de tecnologías avanzadas, destacando el uso de aisladores poliméricos de caucho de silicona (SiR) por sus propiedades hidrofóbicas y ligereza. No obstante, la operación de estos componentes en sistemas de corriente continua (DC) introduce desafíos técnicos complejos y fenómenos eléctricos que difieren significativamente de los sistemas convencionales de alterna, particularmente en lo que respecta al mecanismo de contorneo y la influencia crítica de la polaridad de la tensión aplicada.

En el contexto geográfico nacional, el trazado de las nuevas líneas HVDC representa un desafío de ingeniería sin precedentes debido a la diversidad climática del territorio. Diversos análisis de las zonas de emplazamiento indican que una fracción sustancial de los corredores eléctricos atraviesa entornos desérticos y costeros caracterizados por una severidad de contaminación de clase E5 (Muy Fuerte). La interacción entre la alta radiación UV y la deposición cíclica de aerosoles salinos, fenómeno típico de la camanchaca, acelera la degradación química del polímero. Estos factores no

solo comprometen la hidrofobicidad superficial del material, sino que incrementan drásticamente el riesgo de corrientes de fuga disruptivas bajo un estrés de tensión continua constante.

A pesar de la existencia de lineamientos normativos internacionales como la IEC 60815-4 [6] e IEC 61245 [7], persiste una brecha en el conocimiento técnico especializado sobre la fenomenología de la falla en aisladores que presentan daños físicos preexistentes. Las normativas actuales suelen centrarse en componentes en condiciones íntegras, dejando vacíos sobre cómo defectos específicos, como cortes en los faldones o exposición del núcleo, interactúan con el campo eléctrico DC y la polaridad. La evidencia técnica sugiere que los aisladores poliméricos pueden desarrollar modos de falla incipientes y de difícil detección visual, cuya evolución pone en riesgo tanto la confiabilidad dieléctrica como la integridad estructural de la cadena de aislación.

Ante este escenario, resulta imperativo desarrollar investigaciones experimentales que reproduzcan con fidelidad las condiciones críticas de operación. La presente memoria surge de la necesidad de caracterizar el comportamiento eléctrico de aisladores SiR bajo tensión continua, considerando explícitamente la presencia de contaminación severa y la inducción controlada de defectos físicos. Los resultados de este estudio pretenden aportar información técnica de alto valor para el diagnóstico, modelado y mantenimiento preventivo, contribuyendo directamente a fortalecer la resiliencia y seguridad de las infraestructuras HVDC esenciales para el desarrollo energético del país.

1.5. Objetivos

Objetivo general:

- Caracterizar el desempeño de aisladores de silicona (SiR) contaminados bajo excitación en corriente continua (DC), analizando la influencia de la polaridad de la excitación y el impacto de fallas físicas preexistentes en el material a partir del comportamiento de las descargas parciales, la formación de contorneos y la medición de corrientes de fuga.

Objetivos específicos:

- Seleccionar los tipos de fallas a estudiar en aisladores compuestos de silicona, considerando su origen, gravedad y ubicación, para analizar su influencia en la formación de contorneos.
- Generar probetas a partir de la modificación de aisladores de silicona utilizados en sistemas de alta tensión, según los tipos de falla seleccionados, para conformar el set de objetos de ensayo en la experimentación.
- Evaluar, mediante ensayos experimentales en cámara de niebla, el efecto combinado de la polaridad de la tensión continua y de las fallas físicas a estudiar, sobre el desempeño eléctrico

de aisladores de silicona contaminados, utilizando como indicadores la corriente de fuga, formación de contorneos y tensión de iniciación de descargas parciales.

- Caracterizar los tipos de fallas en los aisladores estudiados a partir de los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio, como base para su clasificación y análisis de severidad.

2. Marco Teórico

2.1. Diferencias en el desempeño bajo excitación AC y DC

Existen diferencias fundamentales en el desarrollo del contorneo al comparar sistemas de corriente continua (DC) y corriente alterna (AC) [1]. Estas divergencias impactan directamente en el diseño del aislamiento exterior y se fundamentan en dos factores críticos: la dinámica de captación de la contaminación superficial y la magnitud de la tensión de ruptura dieléctrica.

2.1.1. Captación y acumulación de contaminación

Bajo condiciones de excitación en corriente alterna, la deposición de material contaminante sobre la superficie del aislador ocurre principalmente por acción aerodinámica. Las partículas son transportadas por el viento y se asientan dependiendo del flujo de aire alrededor del perfil geométrico, mientras que en áreas libres de viento precipitan por gravedad. En este contexto, la presencia o ausencia de tensión eléctrica en el aislador tiene un impacto marginal en la cantidad de suciedad depositada.

Sin embargo, en aisladores energizados en corriente continua, la presencia de un campo eléctrico estático altera significativamente este proceso. El campo continuo ejerce una fuerza de atracción permanente sobre las partículas suspendidas en el entorno, un efecto que resulta particularmente predominante a bajas velocidades de viento. Como consecuencia, un aislador DC tiende a acumular un nivel considerablemente mayor de contaminación superficial en comparación con su contraparte AC instalada en la misma área. Los reportes técnicos indican que la relación de acumulación entre DC y AC puede variar en factores que van desde 1 hasta 10 [1].

2.1.2. Tensión de contorneo y propagación del arco

Esta reducción en el límite dieléctrico se explica por la propagación del arco de banda seca (*dry band arc*). En tensión alterna, la naturaleza oscilatoria de la onda obliga al arco a extinguirse y reencenderse tras cada cruce por cero, lo que limita su crecimiento y fomenta que se propague adherido a la superficie del aislador. Por el contrario, la excitación continua carece de estos cruces por cero, permitiendo una descarga estable, mientras que los arcos en DC tienden a separarse de la superficie polimérica y propagarse libremente a través del aire entre las aletas, tal como se ilustra en la Figura 2. Por este motivo, el diseño optimizado de perfiles para aisladores DC exige un mayor espaciamiento entre faldones para mitigar la propagación del arco por el aire y evitar un camino directo entre las caras del perfil [8] [9] [10].

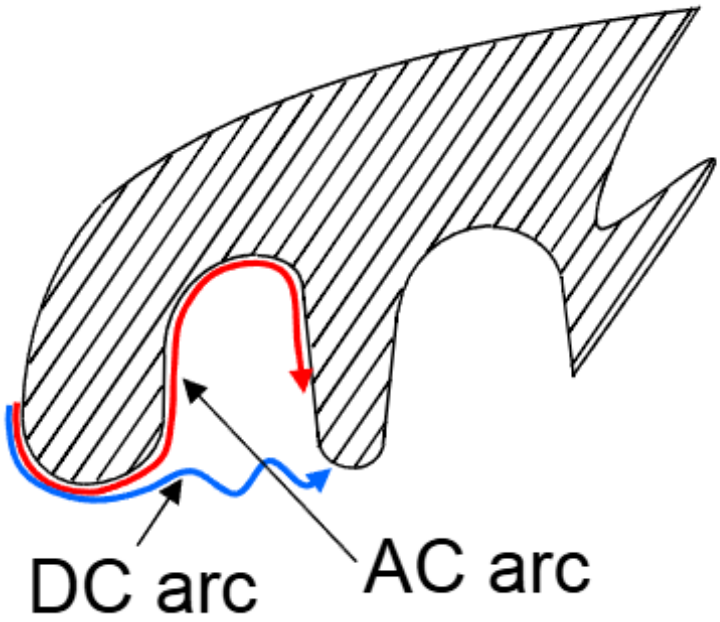


Figura 2: Representación contorneo bajo tensión AC y DC [1].

2.2. Contaminación ambiental

La contaminación superficial constituye uno de los factores más críticos en el diseño, selección y operación del aislamiento externo en los sistemas eléctricos de potencia. Debido a su exposición permanente a la intemperie, los aisladores acumulan progresivamente una capa de depósitos ambientales sobre su cubierta. En estado completamente seco, esta capa de polución es eléctricamente inerte y no compromete el desempeño dieléctrico del componente. No obstante, la interacción con la humedad ambiental, ya sea en forma de lluvia ligera, rocío, niebla o condensación, promueve la disolución de las partículas salinas depositadas. Este proceso forma una película electrolítica continua que reduce drásticamente la resistencia superficial del polímero, facilitando el flujo de corrientes de fuga que pueden desencadenar descargas parciales y, eventualmente, el contorneo total de la cadena.

2.2.1. Tipos generales de entornos ambientales

La severidad de los depósitos depende del entorno geográfico. La norma IEC describe cinco tipos de ambientes que definen las características de contaminación de una región:

- **Entornos desérticos:** Áreas áridas con sequías prolongadas. El viento transporta sales de disolución lenta con un alto nivel de NSDD (Tipo A). El lavado natural es ineficiente por la

escasez de lluvia. El riesgo de falla aumenta significativamente con la formación de rocío.

- **Entornos costeros:** Zonas ubicadas hasta a 50 km de la costa. Reciben polución rápida por rocío marino y niebla conductiva (Tipo B). También acumulan partículas arrastradas por el viento (Tipo A). El lavado natural suele ser efectivo gracias a la rápida disolución de las sales.
- **Entornos industriales:** Áreas cercanas a fuentes de emisión. Acumulan partículas conductoras y gases disueltos (Tipo B), además de polvos de disolución lenta (Tipo A). Presentan un NSDD de nivel medio a alto. La efectividad del lavado natural depende netamente del contaminante.
- **Entornos agrícolas:** Zonas de cultivo intensivo. Están expuestas al polvo del arado (Tipo A) y a la fumigación directa (Tipo B). La contaminación incluye químicos, sales del suelo y excrementos. Presentan un NSDD medio a alto. El lavado natural es generalmente efectivo.
- **Entornos de interior:** Áreas geográficas con un nivel bajo de contaminación. No tienen fuentes de emisión cercanas claramente identificables.

De acuerdo con las normativas internacionales, los ambientes contaminantes se clasifican según el mecanismo de deposición y la naturaleza del agente, distinguiéndose principalmente dos tipos fundamentales que llevan al colapso dieléctrico:

2.2.2. Contaminación tipo A

Este tipo de contaminación se caracteriza por una dinámica de desarrollo en dos etapas bien diferenciadas: la deposición en seco y la posterior humectación. En una primera fase, las partículas sólidas transportadas por el viento (tales como polvo, arena, cenizas o emisiones industriales secas) se asientan sobre la superficie del aislador. En los sistemas de transmisión HVDC, esta etapa de acumulación se ve severamente acelerada debido a que el campo eléctrico unidireccional y constante actúa como un filtro electrostático, atrayendo las partículas suspendidas en el aire con mayor eficacia que en los sistemas de alterna. En su estado seco, esta capa contaminante presenta una impedancia sumamente alta y no afecta el desempeño dieléctrico.

La etapa crítica ocurre durante la humectación. Cuando factores climáticos de baja intensidad como la neblina o lloviznas finas interactúan con el aislador, el agua disuelve los componentes iónicos de la capa depositada. Para evaluar rigurosamente el impacto de esta mezcla, la normativa internacional (particularmente la IEC 60815-1 [11]) divide los depósitos en dos parámetros cuantificables:

- **Densidad de Depósitos de Sal Equivalente (ESDD):** Cuantifica exclusivamente la fracción soluble de la contaminación (compuesta comúnmente por cloruros, sulfatos y nitratos). Al disolverse, estas sales liberan los iones que transforman el agua pura en un electrolito altamente conductor. Para estandarizar las mediciones a nivel global, el nivel de conductividad encontrado se expresa en función de la masa de cloruro de sodio puro (NaCl) que produciría ese mismo efecto eléctrico, medido en mg/cm^2. Es, en esencia, el promotor principal de la corriente de fuga.
- **Densidad de Depósitos No Solubles (NSDD):** Representa el material inerte y no conductor presente en la polución, como la arcilla o el polvo de sílice. Aunque no aporta iones a la mezcla, su rol físico es devastador para el aislamiento. El NSDD actúa como una matriz porosa que absorbe y retiene la humedad sobre la cubierta de silicona durante periodos prolongados. Además, engrosa la capa física de contaminación, lo que dificulta enormemente el lavado natural por lluvias intensas e inhibe la capacidad de recuperación hidrofóbica del polímero. La norma establece que su medición también se exprese en mg/cm^2.

2.2.3. Contaminación tipo B

A diferencia del mecanismo de dos fases del tipo A, la contaminación de tipo B representa un proceso de deposición y humectación simultáneo. En este escenario, el agente contaminante ya se encuentra en solución acuosa o posee una conductividad eléctrica intrínseca al momento de impactar e instalarse sobre el perfil del aislador.

Este fenómeno es característico de zonas geográficas expuestas a neblinas salinas muy densas (como la camanchaca costera), rociado directo del oleaje marino, lluvias ácidas, o nubes de vapor industrial cargadas con compuestos químicos en suspensión. Al impactar sobre el caucho de silicona, especialmente si este ya presenta desgaste o microfisuras por la radiación UV, el contaminante líquido cubre la superficie, superando rápidamente el ángulo de contacto hidrofóbico del material.

La particularidad más peligrosa de la contaminación tipo B es su dinámica temporal. Al no requerir de un proceso paulatino de disolución de sales secas, provoca una caída abrupta y casi instantánea de la resistencia superficial del aislador. Esto se traduce en picos de corriente de fuga repentinos y de gran amplitud, los cuales aceleran la rápida formación de bandas secas inestables. En consecuencia, en sistemas sometidos a contaminación tipo B, el colapso dieléctrico y el contorneo definitivo pueden ocurrir sin las señales precursoras de descargas parciales graduales que suelen observarse en la contaminación tipo A.

2.2.4. Clasificación de Severidad de la Contaminación del Sitio (SPS)

Para estandarizar el dimensionamiento del aislamiento, la norma IEC 60815 define cinco categorías de Severidad de Contaminación del Sitio (*Site Pollution Severity* o SPS), que abarcan desde entornos muy limpios hasta condiciones extremas.

En áreas predominadas por contaminación Tipo A, la clasificación se determina cruzando los valores empíricos medidos de ESDD y NSDD mediante nomogramas normalizados, tal como se ilustra en la Figura 3.

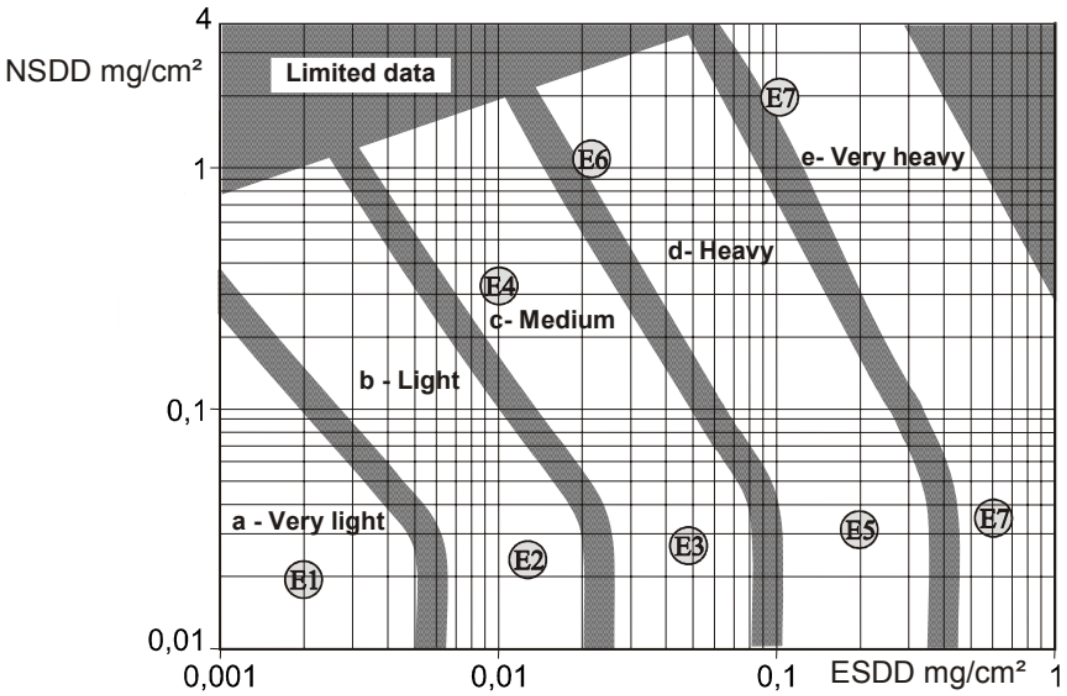


Figura 3: Determinación de la clase de severidad SPS a partir de mediciones de ESDD y NSDD para contaminación Tipo A [11].

Cada una de estas clases impone exigencias geométricas distintas (mayores distancias de fuga) para garantizar la confiabilidad del sistema. En la Tabla 1 se describen cualitativamente los entornos geográficos típicos asociados a cada nivel de severidad. Es importante destacar que infraestructuras emplazadas en el desierto costero del norte de Chile, como las zonas aledañas a Iquique, representan uno de los escenarios más adversos a nivel global, combinando arenas no solubles con la intensa neblina salina (camanchaca), situándolas directamente en la categoría de severidad máxima (E5).

Tabla 1: Descripción de entornos típicos según el nivel de severidad [11].

Nivel	Descripción de entornos típicos
E1	>50 km de cualquier mar, desierto o terreno seco abierto. >10 km de fuentes de contaminación artificial. A una distancia menor de las fuentes de contaminación mencionadas, pero: ◦ El viento predominante no proviene directamente de estas fuentes. ◦ Y/o existe un lavado regular por lluvias mensuales.
E2	$10-50$ km del mar, desierto o terreno seco abierto. $5-10$ km de fuentes de contaminación artificial. A una distancia menor de las fuentes de contaminación que en E1, pero: ◦ El viento predominante no proviene directamente de estas fuentes. ◦ Y/o existe un lavado regular por lluvias mensuales.
E3	$3-10$ km del mar, desierto o terreno seco abierto. $1-5$ km de fuentes de contaminación artificial. A una distancia menor de las fuentes de contaminación mencionadas, pero: ◦ El viento predominante no proviene directamente de estas fuentes. ◦ Y/o existe un lavado regular por lluvias mensuales.
E4	A mayor distancia de las fuentes de contaminación que lo mencionado en E3, pero: ◦ Ocurre niebla densa (o llovizna) a menudo después de una larga estación seca de acumulación de contaminación. ◦ Y/o se presentan lluvias intensas de alta conductividad. ◦ Y/o hay un alto nivel de NSDD (entre 5 y 10 veces el ESDD).
E5	≤ 3 km del mar, desierto o terreno seco abierto. ≤ 1 km de fuentes de contaminación artificial.
E6	A mayor distancia de las fuentes de contaminación que lo mencionado en E5, pero: ◦ Ocurre niebla densa (o llovizna) a menudo después de una larga estación seca de acumulación de contaminación. ◦ Y/o hay un alto nivel de NSDD (entre 5 y 10 veces el ESDD).
E7	A la misma distancia de las fuentes de contaminación especificadas para áreas “fuertes” (E4) y: ◦ Sometidas directamente a rocío marino o niebla salina densa. ◦ O sometidas directamente a contaminantes de alta conductividad, o polvo tipo cemento con alta densidad, con humectación frecuente por niebla o llovizna. ◦ Áreas desérticas con rápida acumulación de arena y sal, y condensación regular.

En el caso de la contaminación de tipo B, la clase de severidad del sitio (SPS) se determina a partir de mediciones de la Salinidad Equivalente del Sitio (SES). La correspondencia entre los niveles de SES y la clasificación SPS se detalla en la Figura 4.

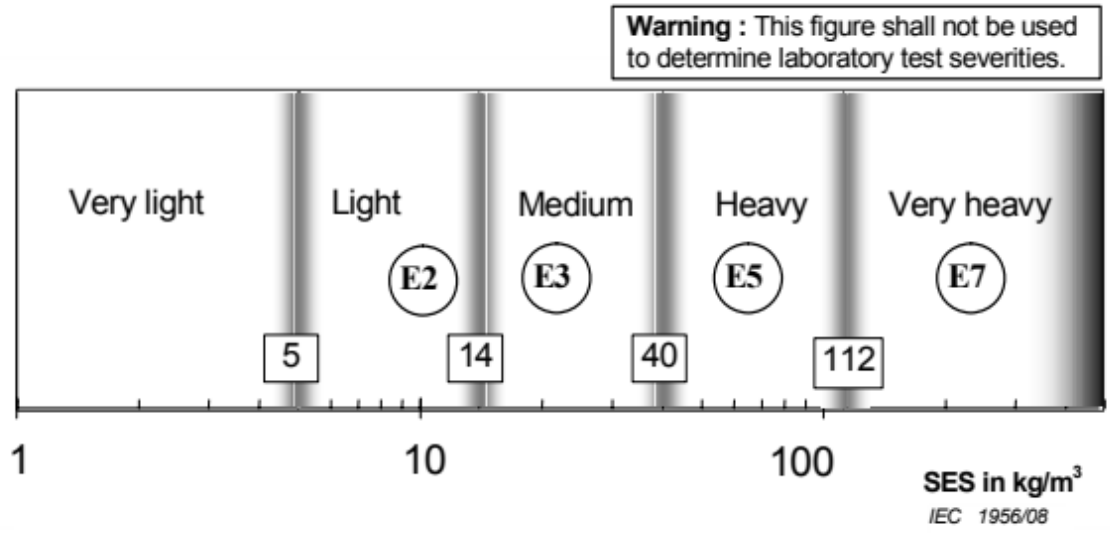


Figura 4: Determinación de la clase de severidad a partir de la relación entre SES y SPS para contaminación Tipo B [11].

2.3. Tipos de fallas y degradación física en aisladores poliméricos

Los aisladores poliméricos compuestos presentan mecanismos de falla significativamente diferentes a los de los aisladores de cerámica o vidrio. Las fallas físicas más comunes se pueden clasificar en tres grandes grupos según la zona del equipo a la que afectan: la superficie externa, las interfaces o el núcleo estructural [5].

2.3.1. Daños en la superficie externa de la cubierta polimérica

Estos daños pueden ser el resultado de ataques químicos o el indicio de un daño interno subyacente (como el tracking en el núcleo), lo cual puede derivar en la ruptura del aislador y requerir su reemplazo inmediato.

- **Degradación fisicoquímica y estructural:** Entre los principales defectos se incluyen la erosión, el tizado, la pérdida de hidrofobicidad, las perforaciones, grietas de diversos tipos, así como la rotura o pérdida de pedazos de los faldones.
- **Daño mecánico por fauna:** Las aves de gran tamaño pueden dañar la superficie al arrancar

o rebanar trozos de los faldones poliméricos, una acción facilitada por la baja resistencia al desgarro de algunos materiales como la goma de silicona líquida (LSR) [12]. Estadísticamente, estos daños tienden a concentrarse en las primeras una o dos unidades cercanas al lado de alta tensión y, en más del 80 % de los casos, presentan una forma aproximadamente circular debido al movimiento que hacen al picotear [13].

- **Contaminación biológica:** La presencia de biopelículas es también un factor de daño, ya que conduce a un aumento de la conductividad superficial, retiene la humedad y facilita ataques químicos directos sobre el polímero.



Figura 5: Ejemplo de degradación superficial severa en la cubierta de silicona de un aislador polimérico, evidenciando pérdida de material en los faldones [14].

2.3.2. Daños en las interfaces y pérdida de adhesión

La interfaz, que une el núcleo estructural (FRP), la cubierta y los herrajes metálicos, es uno de los puntos más críticos del aislador. La pérdida de integridad en esta zona desencadena los siguientes problemas:

- **Intrusión de humedad y descargas internas:** La degradación facilita el ingreso de agua y contaminantes, propiciando corrientes de fuga y descargas parciales que carbonizan el material desde su interior.
- **Erosión interfacial y exposición del núcleo:** Las descargas sostenidas producen orificios de electroerosión que logran perforar la cubierta. Esto expone el núcleo de FRP al ambiente, y dada su naturaleza hidrofílica, acelera drásticamente el deterioro dieléctrico bajo condiciones de humedad o contaminación.

- **Zonas de transferencia de carga:** Una falla progresiva en la interfaz con las uniones metálicas, encargadas de soportar la tensión mecánica de la línea, compromete el sellado y puede provocar el deslizamiento o desprendimiento total del herraje.



Figura 6: Falla interfacial severa en un aislador polimérico, evidenciando la perforación de la cubierta protectora y la consiguiente exposición del núcleo de fibra de vidrio (FRP) al medio ambiente [14].

2.3.3. Daños estructurales en el núcleo

Las fracturas del núcleo constituyen el tipo de daño más crítico, dado que pueden provocar la caída del conductor a tierra y un aumento repentino de la carga mecánica sobre las estructuras de soporte. Existen distintos mecanismos de desarrollo para estas fallas:

- **Fractura normal:** Ocurre cuando el aislador es sometido a una carga mecánica superior a la estipulada en su diseño. Como resultado, las fibras de vidrio y la matriz de resina epoxi se separan y se rompen en pedazos.
- **Fractura frágil (*Brittle fracture*):** También conocida como agrietamiento por corrosión bajo tensión del núcleo de fibra de vidrio. Se desencadena por un ataque químico sobre la varilla, donde los iones de boro se lixivian y la matriz de resina circundante se hidroliza. En combinación con la carga mecánica, esto produce grietas transversales que avanzan hasta que la sección restante del núcleo es incapaz de soportar el peso. Según registros de EPRI, este fenómeno representa el 51,1 % de todas las fallas analizadas.

- **Fractura tipo pudrición (*Decay-like fracture*):** Es un mecanismo identificado en generaciones más nuevas de aisladores, donde el núcleo de polímero reforzado con fibra (FRP) sufre una degradación tan extrema que adquiere un aspecto similar al de la madera podrida. Sus características macroscópicas incluyen el tizado y la separación entre la fibra de vidrio y la resina epoxi, la formación de orificios horizontales por electroerosión (iniciados desde la interfaz núcleo-cubierta), y un sobrecalentamiento anormal previo al colapso final del equipo.



Figura 7: Colapso mecánico debido a una fractura frágil (*brittle fracture*) en el núcleo de fibra de vidrio (FRP), mostrando un corte transversal limpio característico de esta falla [15].

2.4. Sistemas de detección y diagnóstico de fallas

La multiplicidad de modos de falla en aisladores poliméricos ha hecho evidente la necesidad de contar con herramientas y métodos efectivos para diagnosticar su condición y estimar su vida útil remota. Los métodos de diagnóstico documentados en la literatura se clasifican principalmente según si requieren o no la remoción del equipo de la línea de transmisión [3].

2.4.1. Métodos de inspección en terreno

Estas técnicas permiten evaluar tanto aisladores individuales como la condición general de la línea de transmisión sin interrumpir el servicio operativo. Entre las tecnologías más destacadas se encuentran:

- **Inspección visual y multiespectral:** El método más comúnmente utilizado es la inspección visual mediante binoculares. Para superar sus limitaciones, se complementa con cámaras infrarrojas (IR) que permiten detectar alteraciones de temperatura asociadas a descargas o ingreso de humedad bajo la cubierta. Adicionalmente, el uso de cámaras ultravioleta (UV) es fundamental para detectar descargas de corona y tracking superficial en etapas tempranas.
- **Evaluación de hidrofobicidad:** Es una técnica diagnóstica sencilla y rentable para su aplicación en terreno. Consiste en humedecer la superficie del aislador y comparar el patrón de las gotas formadas con superficies de referencia estandarizadas. De acuerdo con la norma IEC 62073 [16], esta escala de humectabilidad varía desde un estado completamente hidrofóbico (Clase 1) hasta un estado hidrofílico continuo (Clase 6).
- **Medición de campo eléctrico:** Este método mapea el perfil del campo eléctrico a lo largo de la longitud del aislador. La existencia de cambios repentinos o desviaciones respecto al gradiente esperado puede indicar defectos internos, tales como el ingreso de humedad, agrietamientos del núcleo o la pérdida de adhesión en las interfaces.
- **Inspección acústica:** Esta técnica se fundamenta en la detección de ondas mecánicas generadas por la liberación instantánea de energía durante las descargas eléctricas. El ruido ultrasónico derivado de las descargas superficiales ofrece la ventaja de ser inmune a las interferencias electromagnéticas del entorno.
- **Evaluación de corrientes de fuga y herramientas de alta frecuencia:** Existen sistemas que utilizan transformadores de corriente ubicados en los herrajes metálicos para evaluar las corrientes de fuga. Asimismo, se han desarrollado herramientas probadoras de alta frecuencia y alta tensión aplicadas directamente sobre la cubierta polimérica para medir las propiedades dieléctricas o conductivas de secciones específicas del equipo.
- **Inspecciones avanzadas (Rayos X y espectroscopía láser):** Las imágenes de rayos X pueden ayudar a detectar daños mecánicos internos en la matriz del núcleo (FRP) o vacíos que son imposibles de visualizar externamente. Por otro lado, la espectroscopía de fluorescencia inducida por láser permite la detección remota (hasta 60 metros) de contaminación biológica mediante el análisis del espectro lumínico emitido por las moléculas excitadas en la superficie del polímero.

2.4.2. Métodos de laboratorio

Cuando los aisladores son retirados del servicio para un análisis detallado, se someten a pruebas exhaustivas para determinar el origen profundo de la degradación.

- **Investigación eléctrica:** Contempla la medición directa de las características eléctricas del equipo dañado, tales como el registro de la corriente de fuga y las pruebas de tensión de ruptura.
- **Investigación mecánica y detección acústica:** Analizar las propiedades mecánicas es esencial para predecir fallas como la extracción de herrajes o la rotura del núcleo. Estas pruebas suelen ir acompañadas de la detección de emisiones acústicas mientras el equipo se somete a carga mecánica, lo que ayuda a identificar la rotura de fibras o delaminaciones internas.
- **Análisis físico-químico y de materiales:** Incluye la evaluación de hidrofobicidad tras envejecimiento acelerado, las clasificaciones de severidad de contaminación, y el examen detallado de la capa superficial. Para detectar la tasa de oxidación y degradación en la superficie de polímeros, una de las pruebas más empleadas es la Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR), junto a otras técnicas como la microscopía electrónica de barrido (SEM).

3. Metodología experimental

En esta sección se detalla la metodología experimental diseñada para establecer un marco estructurado que permita caracterizar el desempeño eléctrico de los aisladores de silicona bajo condiciones operativas críticas.

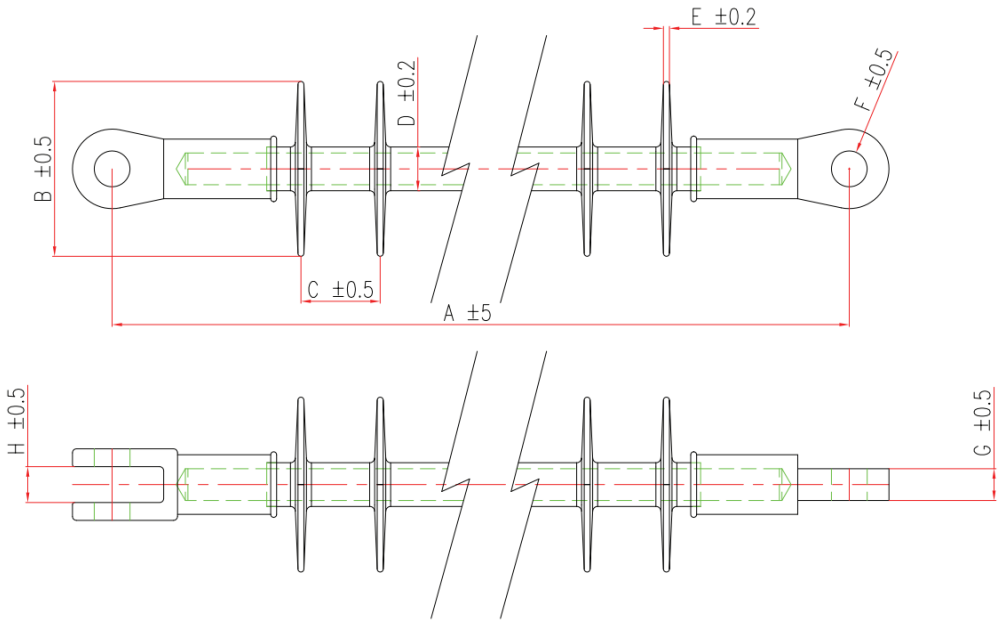
Para lograr lo anterior, primero se detallarán las características técnicas de las probetas seleccionadas. Luego, se explicará el procedimiento utilizado para introducir fallas físicas controladas en la superficie del polímero. Estas modificaciones estructurales buscan emular el daño típico provocado por agentes externos en el terreno. Asimismo, se describirá el método estandarizado que se empleará para la aplicación de contaminación artificial severa sobre la cubierta de los aisladores.

Posteriormente, se expondrá la configuración de los ensayos de laboratorio en cámara de niebla bajo excitación DC. Este entorno controlado permitirá evaluar el impacto combinado de la polaridad de la fuente y los defectos preexistentes en el material.

3.1. Probeta bajo estudio

Para el desarrollo experimental, se seleccionó el aislador polimérico **AS-15-4FD**. Este dispositivo corresponde a un aislador de tipo suspensión/retención diseñado para una clase de tensión de **15 kV**.

Su construcción consta de un núcleo de fibra de vidrio (FRP) recubierto por goma de silicona (SiR), con un perfil de 4 faldones que proporciona una distancia de fuga nominal de 387 mm. En la Figura 8 se presentan sus dimensiones y características visuales.



Modelo	A	B(∅)	C	D(∅)	E	F(∅)	G	H
AS-15-4FD	320	89	40	21,7	3	18	14	18,5

Figura 8: Esquema y dimensiones generales del aislador polimérico Silpak AS-15-4FD [17].

3.2. Simulación de fallas físicas

Para evaluar el impacto de los daños estructurales en el desempeño dieléctrico, se implementó un procedimiento de alteración controlada sobre un grupo de probetas intactas. Las fallas seleccionadas buscan emular los deterioros más críticos observados en las líneas de transmisión en terreno. Específicamente, se recrearon los daños causados por la fauna local, como el picoteo de aves, afectando los faldones de los aisladores o dañando directamente el recubrimiento protector del núcleo.

El proceso de simulación se dividió en dos escenarios principales de falla. Cada escenario representa un nivel distinto de gravedad y altera de forma particular la geometría y las propiedades del aislador.

3.2.1. Corte en el faldón del aislador

El primer tipo de falla simulada consistió en la remoción parcial de material en los faldones de goma de silicona. Este defecto tiene un doble impacto físico: reduce la distancia de fuga geométrica

efectiva e introduce aristas vivas que actúan como puntos de alta concentración de campo eléctrico.

Para replicar el desgarro típico provocado por el ataque de aves, se realizaron cortes controlados utilizando plantillas a medida. Con el fin de evaluar distintos niveles de severidad, se diseñaron tres casos de estudio, cuyas dimensiones y geometría se ilustran en la Figura 9. Las dimensiones de las muescas se calcularon con el objetivo de dividir equitativamente la distancia radial existente entre el núcleo y el borde exterior del faldón. En consecuencia, se extrajeron secciones circulares con radios de 11,22 mm, 22,43 mm y 33,65 mm. Cabe destacar que el tercer caso, correspondiente al corte de mayor profundidad, llega a dejar el núcleo del aislador expuesto al ambiente exterior.

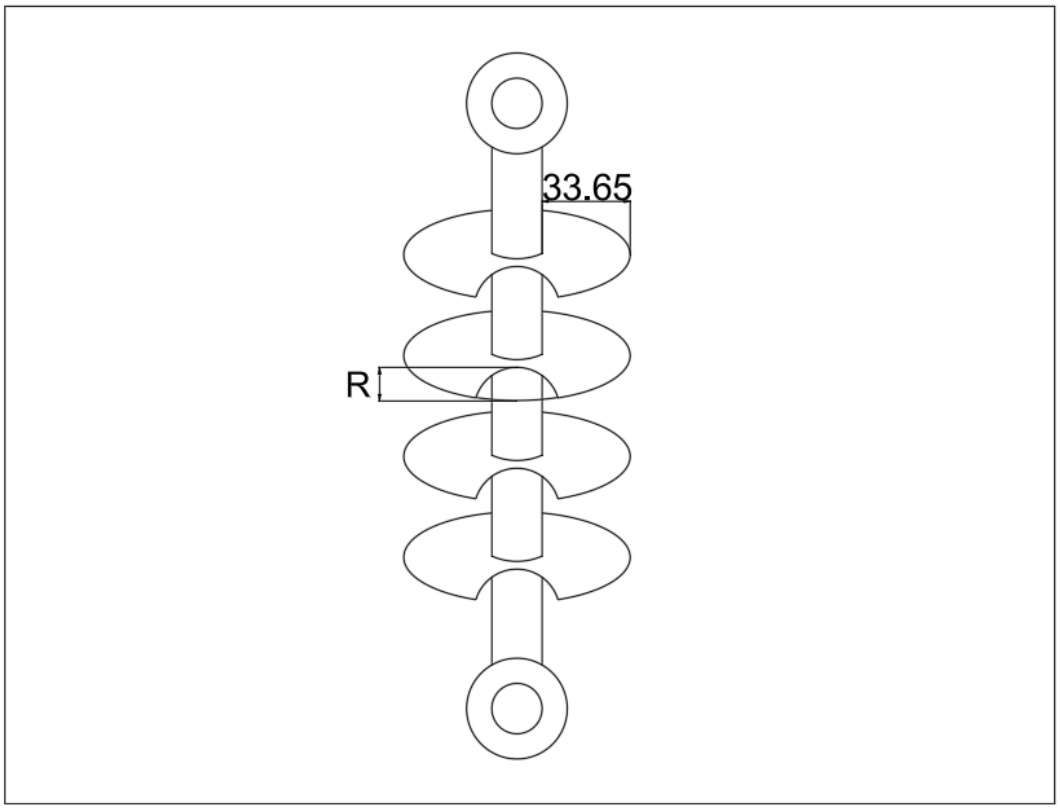


Figura 9: Detalle geométrico de la falla por corte en el faldón del aislador.

Estos cortes se aplicaron en dirección opuesta a la curvatura natural del faldón, generando muescas cóncavas con un acabado superficial completamente liso. Además, el procedimiento se repitió en cada uno de los faldones del dispositivo. Resulta fundamental señalar que todas las incisiones quedaron perfectamente alineadas en el mismo eje vertical. Esta disposición geométrica es crítica, ya que facilita la formación de un camino directo para el escurrimiento de la humedad y favorece el desarrollo ininterrumpido de corrientes de fuga.

3.2.2. Exposición del núcleo de fibra de vidrio

El segundo escenario representa una condición de falla de criticidad extrema, caracterizada por la pérdida total de la cubierta polimérica. Esta situación expone el núcleo de fibra de vidrio directamente a las condiciones ambientales y al estrés eléctrico. El objetivo de esta probeta es estudiar experimentalmente el fenómeno del punto triple dieléctrico (descrito en el marco teórico) y la rápida pérdida de aislamiento debido a la naturaleza intrínsecamente hidrofílica del núcleo de FRP.

La simulación de esta falla se llevó a cabo retirando segmentos de la funda de silicona a lo largo del vástago del aislador. Dado que el modelo bajo estudio posee cuatro faldones, el perfil cuenta con tres secciones intermedias continuas. Para evaluar la progresión del daño, se diseñaron tres configuraciones experimentales, las cuales se presentan esquemáticamente en la Figura 10. Estas consistieron en la remoción progresiva de una, dos y tres secciones, respectivamente. Cada segmento extraído posee una longitud aproximada de 40 mm.

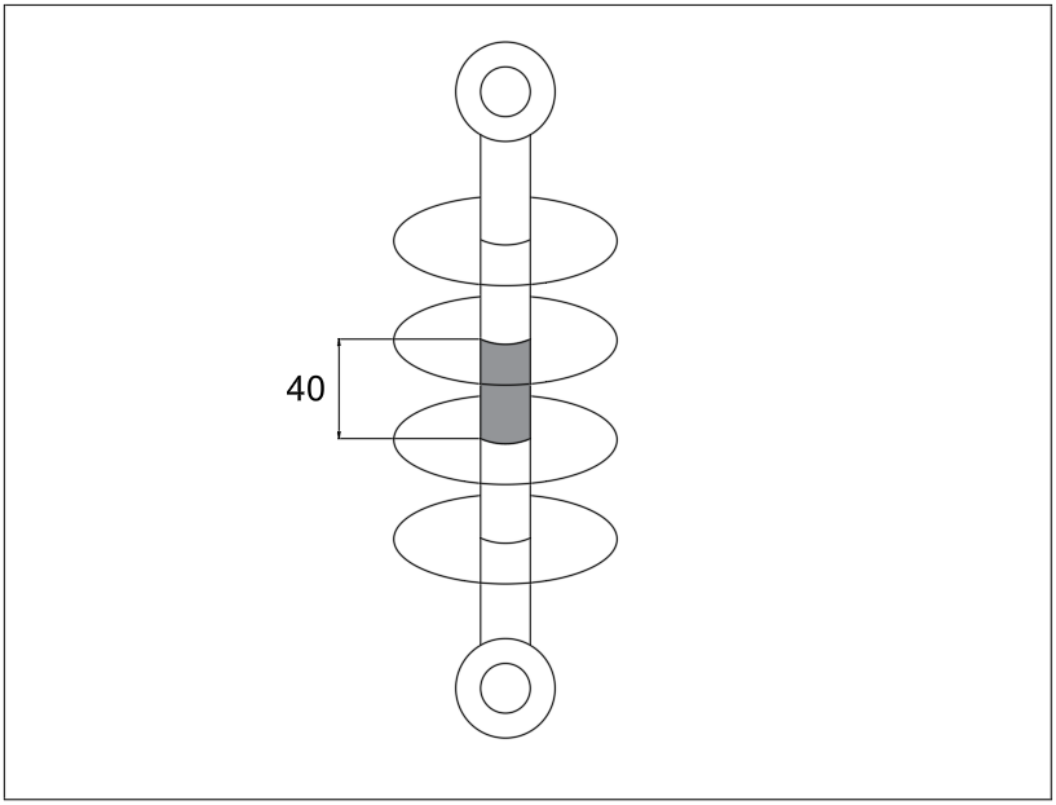


Figura 10: Detalle geométrico para falla por exposición progresiva del núcleo.

La extracción del material se realizó mediante cortes circunferenciales hasta dejar completamente a la vista la matriz de fibra de vidrio. Durante este procedimiento, se trabajó con extrema precaución

para asegurar que la superficie del núcleo no sufriera rayones profundos que alteraran su integridad mecánica original.

3.3. Procedimiento de contaminación artificial

Los ensayos experimentales de este trabajo se diseñaron tomando como referencia operativa el trazado de la futura línea de transmisión HVDC Kimal-Lo Aguirre. Debido a su vasta extensión territorial, esta infraestructura atraviesa zonas geográficas que presentan múltiples perfiles climáticos y ambientales. Ante esta variabilidad, fue necesario definir un escenario estandarizado para las pruebas de laboratorio. Por consiguiente, se determinó utilizar un nivel de severidad de contaminación de clase E5 (Muy Fuerte) para la totalidad de las probetas contaminadas.

Esta decisión metodológica se fundamenta en dos criterios principales. En primer lugar, una proporción significativa del trazado de la línea recorre la extensión del desierto de Atacama. En estas áreas, la constante acumulación de material particulado y la presencia cíclica de niebla salina configuran un entorno predominantemente E5. Por lo tanto, adoptar este nivel de exigencia actúa como un promedio representativo de las condiciones más severas y recurrentes que enfrentará la red a lo largo de su vida útil.

En segundo lugar, desde una perspectiva estrictamente experimental, la aplicación de un nivel de contaminación severo resulta analíticamente ventajosa. Un entorno salino intensifica el desarrollo de las corrientes de fuga superficiales y acelera la formación de bandas secas. Esta magnificación de los fenómenos eléctricos permite evaluar de manera notoria la eficacia dieléctrica del aislador, resultando especialmente útil para contrastar el desempeño robusto del caso base frente al deterioro acelerado que imponen las fallas físicas.



Figura 11: Trazado geográfico referencial de la línea de transmisión HVDC Kimal-Lo Aguirre [18].

3.3.1. Preparación de la contaminación artificial

Para emular las condiciones de la clase de severidad E5, se adoptó el método de capa sólida, tomando como referencia los lineamientos técnicos de la norma IEC 61245 [7]. La mezcla contaminante artificial se formuló utilizando tres componentes estandarizados. En primer lugar, se empleó cloruro de sodio para representar la fracción soluble y conductora. En segundo lugar, se utilizó polvo de caolín para simular la fracción inerte y no conductora. Finalmente, ambos elementos sólidos se diluyeron en agua destilada.

Para garantizar el nivel de polución requerido, las proporciones de la solución se establecieron según lo detallado en el trabajo de M. Illanes [19]. Los valores de la concentración se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2: Proporciones de la mezcla contaminante artificial para severidad E5.

Tipo de entorno	**Concentración de Sal [g/l]**	**Concentración de Caolín [g/l]**	**ESDD [mg/cm^2]**	**NSDD [mg/cm^2]**	**Relación ESDD/NSDD**
E5	20	2	0,212	0,032	6,5

Como etapa preliminar al proceso de contaminación, se realizó una limpieza exhaustiva de cada una de las probetas utilizando agua y detergente comercial neutro. Este procedimiento tuvo como objetivo eliminar cualquier residuo o impureza oleosa de fábrica que pudiese comprometer la adhesión de la mezcla o alterar la humectabilidad durante los ensayos experimentales.

Para garantizar una aplicación homogénea de la solución, el recubrimiento de las probetas se realizó en el interior de una cabina de acrílico de 110 x 110 x 170 cm, cuyo esquema de montaje se presenta en la Figura 12. Esta estructura se encuentra equipada con cuatro microjets, interconectados mediante un sistema de tuberías de PVC. Para lograr la pulverización de la mezcla directamente sobre el aislador, se empleó una bomba hidráulica encargada de presurizar el circuito.

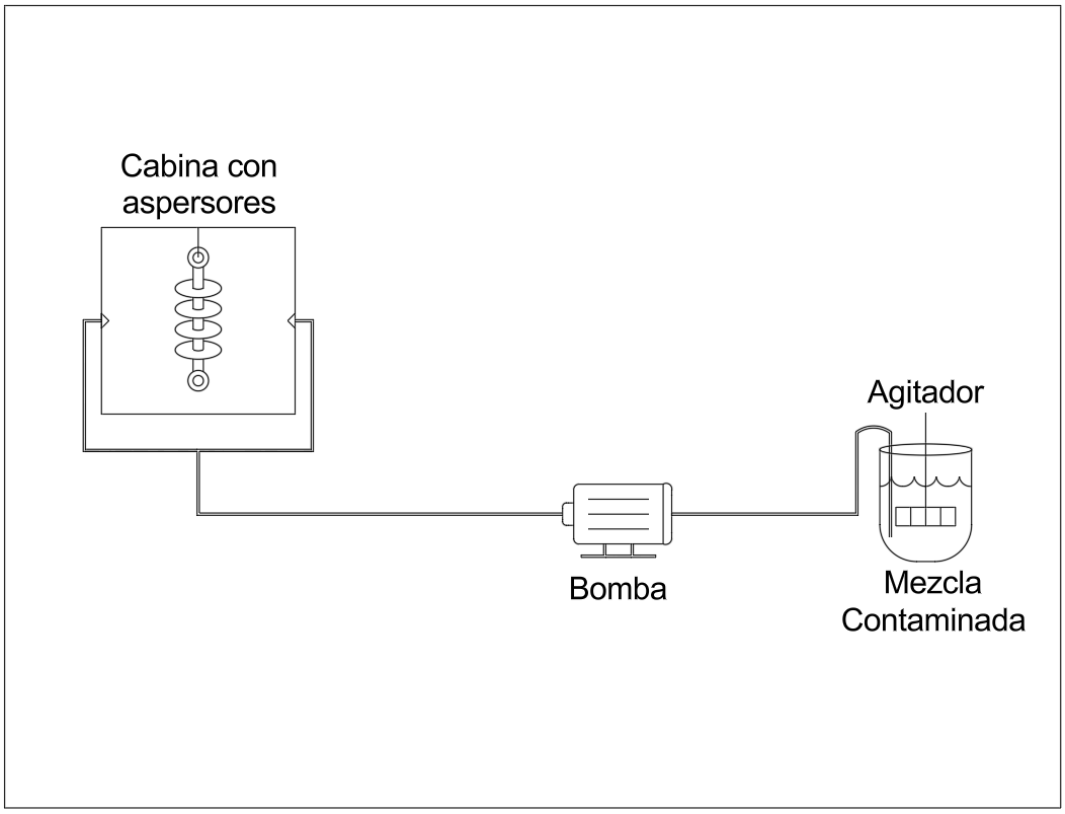


Figura 12: Montaje experimental para la aplicación uniforme de la contaminación artificial.

Previo al rociado de cada probeta, fue necesario purgar el sistema de inyección haciendo circular aproximadamente 5 L de la mezcla contaminante. Una vez completada la purga, se procedió con la aplicación efectiva. Durante esta etapa, se utilizó un volumen aproximado de 15 L de solución por cada aislador. Este procedimiento riguroso permitió saturar equitativamente las caras superior e inferior de los faldones, el vástago central y las cavidades irregulares generadas por los defectos mecánicos.

Finalizado el proceso de rociado, los aisladores fueron posicionados verticalmente y sometidos a un periodo de secado natural a temperatura ambiente durante un mínimo de 8 horas. Esta etapa de reposo garantiza la evaporación total del agua y la fijación mecánica de la capa sólida sobre el polímero. De este modo, las probetas quedaron en estado óptimo para su ingreso a la cámara de niebla.

3.4. Configuración final de las probetas de ensayo

Una vez completados secuencialmente los procedimientos de inducción controlada de fallas físicas, limpieza y posterior aplicación de la capa contaminante artificial, se consolidó el set definitivo de objetos de prueba. Este conjunto consta de un total de siete aisladores: una probeta de referencia (evaluada sana y luego contaminada) que establece el caso base de comparación, y seis probetas alteradas geométricamente. Estas últimas incorporan los defectos clasificados en niveles de severidad leve, intermedia y severa para cada tipología de daño (cortes cóncavos en faldones y exposición del núcleo).

A continuación, se presentan las evidencias fotográficas de la condición visual final de las probetas antes de su ingreso a la cámara de niebla. En primer lugar, la Figura 13 exhibe el caso base. Posteriormente, las Figuras 14 y 15 detallan la progresión de los daños estructurales. En todas las capturas es posible apreciar el contraste entre la alteración de la silicona y la distribución homogénea de la capa salina E5, la cual presenta un aspecto blanquecino, opaco y seco.



Figura 13: Probeta de referencia en estado sano con capa de contaminación artificial E5.



(a) Falla leve



(b) Falla intermedia



(c) Falla severa

Figura 14: Progresión de la falla por corte cóncavo en los faldones de los aisladores (Nivel E5).



(a) Falla leve (b) Falla intermedia (c) Falla severa

Figura 15: Progresión de la falla por exposición del núcleo de fibra en los aisladores (Nivel E5).

3.5. Definición y validación del sistema de medición de descargas parciales

En una primera instancia, la configuración experimental contempló el uso simultáneo del analizador OMICRON y un osciloscopio para la medición conjunta de las descargas parciales y la tensión aplicada. La captura de la señal de voltaje se realizaba a través de un divisor resistivo acoplado al circuito, tal como se esquematiza en la Figura 16. Sin embargo, las pruebas preliminares revelaron que la presencia física de este componente era una fuente de descargas parciales. Además, al operar exclusivamente bajo excitación de tensión continua, la medición sincronizada del voltaje resulta prescindible, puesto que no existe un cruce por cero ni un ángulo de fase periódico al cual asociar temporalmente la ocurrencia de las descargas.

Bajo la premisa metodológica de eliminar cualquier elemento auxiliar que no fuera estrictamente necesario, se decidió prescindir del divisor resistivo. Esta misma filosofía de mínima intervención fundamentó la elección del Transformador de Corriente de Alta Frecuencia (HFCT) como sensor de pulsos, ya que su naturaleza de medición indirecta permite acoplarse a la línea de tierra sin necesidad de añadir conexiones galvánicas al circuito principal.

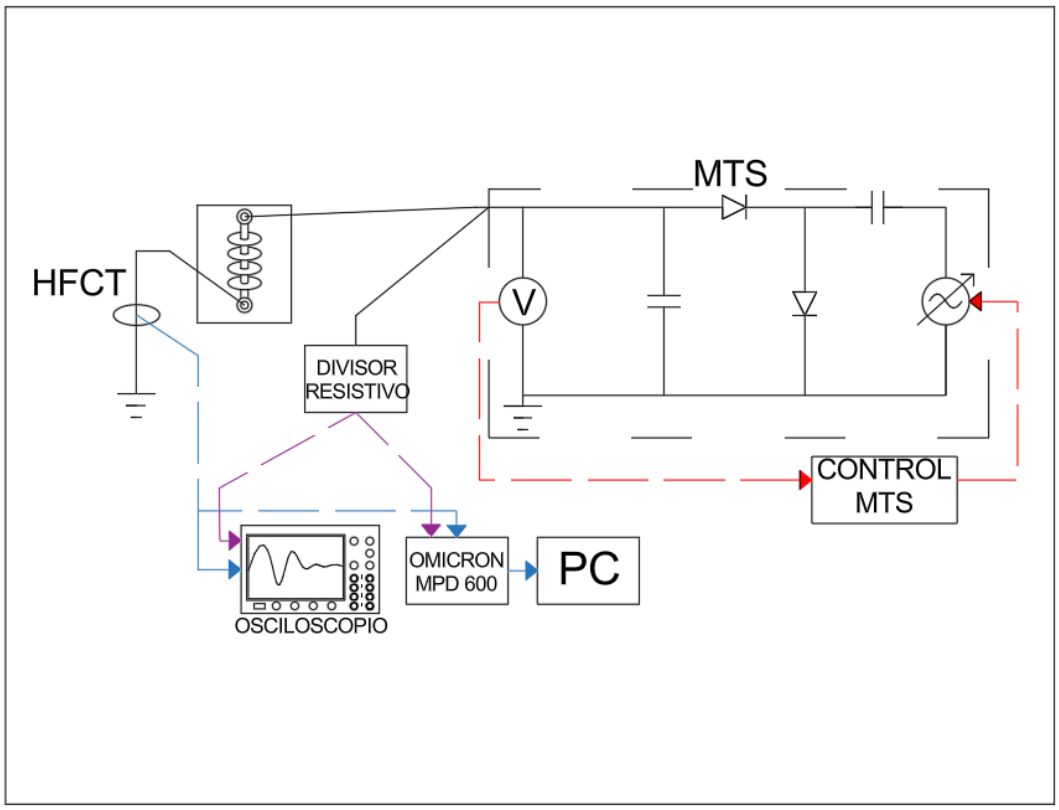


Figura 16: Diagrama del setup preliminar para la medición de descargas parciales.

Definida la arquitectura del montaje, el siguiente paso consistió en caracterizar el nivel de interferencia electromagnética utilizando el software del equipo OMICRON. Para ello, se energizó el circuito de alta tensión sin conectar la probeta, replicando las condiciones operativas y ambientales del ensayo definitivo. El monitoreo de esta actividad basal permitió visualizar el ruido inherente a la instalación. A partir de este registro, se logró definir una cota inferior de confiabilidad para las mediciones, estableciendo un umbral de ruido de fondo de 100 pC. En consecuencia, cualquier pulso registrado durante la experimentación debe superar este margen estadístico para ser validado empíricamente como una descarga parcial genuina del aislador. Una vez determinado este umbral crítico, se procedió a configurar el nivel de disparo (*trigger*) del osciloscopio bajo los mismos parámetros de amplitud.

3.5.1. Definición del nivel de tensión del ensayo

Con el objetivo de estandarizar los ensayos de descargas parciales, se realizó un barrido de tensión incremental sobre la probeta base sin contaminación, registrando la actividad eléctrica en intervalos de 10 kV, partiendo desde 30 kV hasta alcanzar los 70 kV y manteniendo cada escalón durante 5 minutos. Este procedimiento permite identificar empíricamente la evolución de la relación señal-ruido y establecer el nivel de excitación ideal para el resto del set experimental.

Para cuantificar esta evolución, la Tabla 3 detalla el número total de descargas parciales validadas por ambos instrumentos de medición en cada escalón de voltaje, tras aplicar el filtro digital para discriminar el ruido de fondo inferior a 100 pC.

Tabla 3: Conteo de descargas parciales válidas detectadas según el nivel de tensión continua.

Nivel de Tensión	**Detección de pulsos**	
	OMICRON	**Osciloscopio**
30 kV	0	0
40 kV	0	0
50 kV	45	33
60 kV	294	343
70 kV	1891	760

Para discernir si el incremento exponencial de pulsos a altas tensiones correspondía a una degradación real del aislador o a una saturación por ruido externo, se analizó la magnitud de las descargas utilizando el parámetro estadístico Q_{95} a partir de las mediciones del OMICRON. Este indicador filtra eventos atípicos y evalúa la magnitud predominante de las descargas. Los resultados se presentan en la Figura 17.

Al cruzar los datos de la tabla con el comportamiento del Q_{95}, se evidencia un fenómeno de saturación del sistema de medición. En los niveles de 50 kV y 60 kV, aunque la tasa de repetición de pulsos es baja, el parámetro Q_{95} alcanza valores 2.650 y 2.200 pC, respectivamente. Esto indica la presencia de descargas genuinas localizadas en la superficie del polímero.

Por el contrario, al alcanzar los 70 kV, el analizador OMICRON registra alrededor de 1.900 pulsos, pero el valor de Q_{95} colapsa bruscamente a magnitudes cercanas a los 640 pC. Esto demuestra que la inmensa mayoría de los pulsos detectados a este nivel corresponden a señales de muy baja magnitud. Físicamente, este comportamiento confirma que, al superar este umbral, se activa un intenso efecto corona en los herrajes del circuito de alta tensión, el cual, sumado al ruido electromagnético inherente al equipo MTS, inunda el sistema con interferencia que enmascara la descargas parciales que realmente provienen de la probeta.

Esta saturación estadística se corrobora visualmente al analizar las capturas espectrales (mapas de tiempo-frecuencia) obtenidas desde el osciloscopio. En la Figura 18 se presentan los mapas

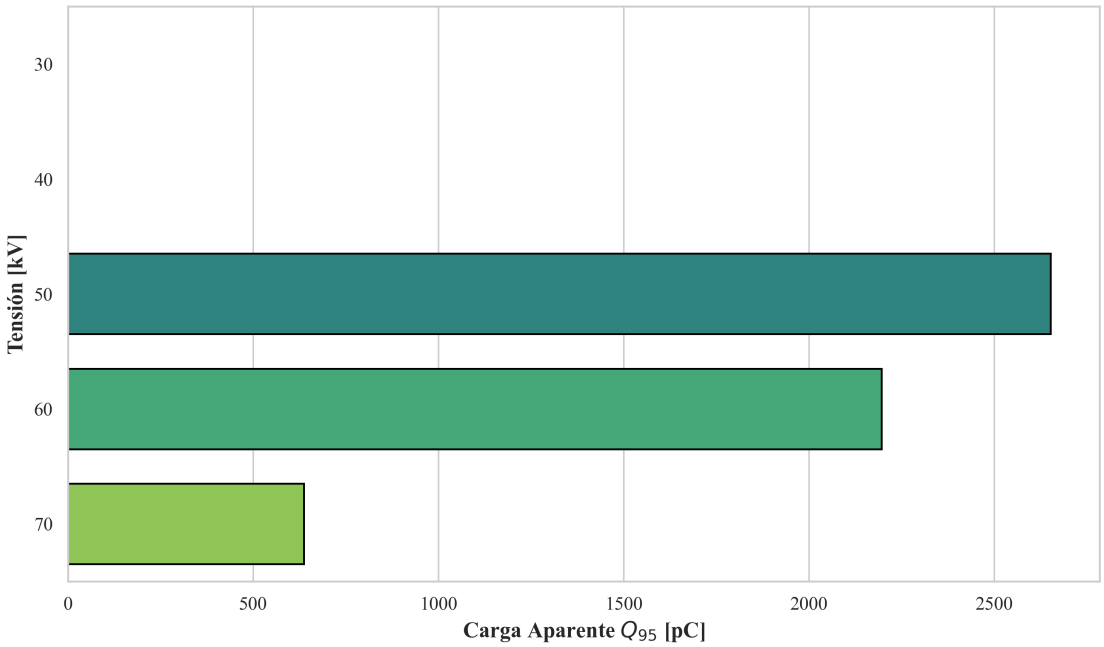


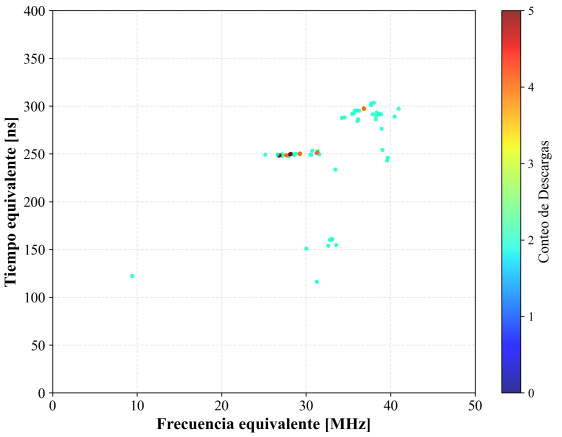
Figura 17: Evolución de la magnitud de las descargas (Q_{95}) en función del nivel de tensión.

correspondientes a los niveles de tensión de 50 kV, 60 kV y 70 kV, donde se aprecia la evolución de las descargas parciales y la irrupción de las componentes de ruido.

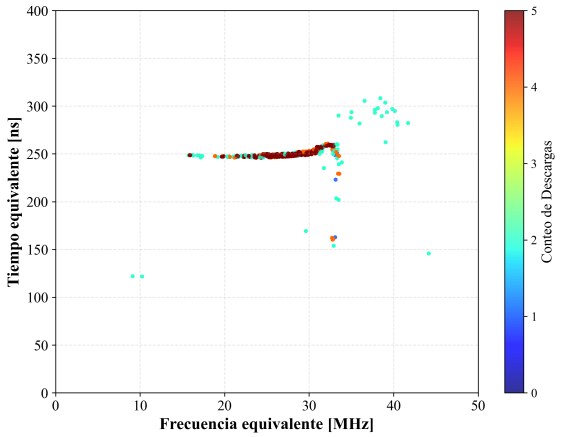
Al observar detalladamente las capturas, resulta evidente que en los niveles de 50 kV y 60 kV la actividad de las descargas de la probeta sana se concentra de forma discreta en un clúster característico y bien definido, ubicado alrededor de los 40 MHz de frecuencia equivalente y los 300 ns de tiempo equivalente. Adicionalmente, se distingue la formación de una línea horizontal rígida anclada en los 250 ns, la cual se extiende en banda ancha desde los 15 hasta los 35 MHz. Esta geometría rectilínea podría corresponder a un transitorio electromagnético sistemático del circuito de excitación, como el ruido de conmutación de los rectificadores de la fuente MTS o una reflexión en el cableado.

Sin embargo, al alcanzar los 70 kV, este patrón se distorsiona severamente. La irrupción masiva de una densa nube de puntos ahoga el gráfico, producto de la activación de un intenso efecto corona en los herrajes y la amplificación del ruido de alta frecuencia propio del equipamiento.

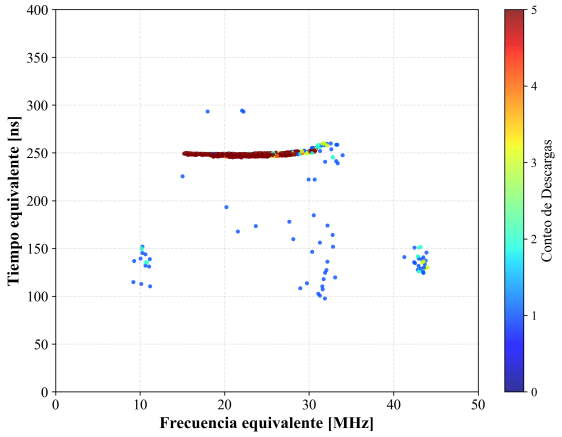
A partir de este diagnóstico, se concluye que la tensión de ensayo para las mediciones de DP debe fijarse de manera relativa para cada grupo de probetas como un porcentaje de su respectiva tensión de ruptura. Esta estrategia asegura someter a los aisladores al mayor estrés posible que garantice una medición estable, manteniendo la operación por debajo de los 70 kV para evitar que el ruido de fondo sature la respuesta real del material.



(a) Nivel de 50 kV



(b) Nivel de 60 kV



(c) Nivel de 70 kV

Figura 18: Mapas de tiempo-frecuencia para la probeta de referencia a diferentes niveles de tensión.

3.6. Ensayos de laboratorio

La evaluación experimental del desempeño dieléctrico de los aisladores se estructuró en dos escenarios de prueba principales. Estos escenarios se diferenciaron, fundamentalmente, por la condición superficial de las probetas y el entorno físico de operación.

El primer escenario correspondió a la evaluación de las probetas en estado limpio y seco, es decir, previo a la aplicación de la capa contaminante. Para esta fase inicial de ensayos, los aisladores fueron suspendidos verticalmente en el área de pruebas de alta tensión. Estas mediciones se realizaron bajo las condiciones ambientales normales del laboratorio, con el propósito de establecer los valores base de resistencia dieléctrica y observar el impacto aislado de las fallas físicas estructurales.

El segundo escenario abarcó los ensayos realizados sobre las probetas recubiertas con contaminación artificial tipo E5. Para simular el proceso de humectación climática que activa la conductividad de la capa salina, estas pruebas se ejecutaron en el interior de una cámara de niebla cerrada de 50 x 50 x 83 cm. Esta cabina de contención cuenta con un soporte estructural interno, diseñado específicamente para fijar y mantener la probeta aislada durante la aplicación de la tensión continua.

Con el fin de recrear los fenómenos de condensación típicos de un entorno costero o desértico, la cámara dispone de un orificio lateral a través del cual se acopla un conducto proveniente de un humidificador ultrasónico comercial. La inyección de vapor frío a través de este sistema permite controlar, incrementar y estabilizar el porcentaje de humedad relativa en el interior de la cabina.

El uso de esta técnica de humectación proporciona condiciones experimentales estrictamente representativas de la operación real. A diferencia de métodos rudimentarios, como el rociado directo de agua o la humectación manual, la inyección de vapor frío evita el lavado involuntario de la probeta. Dichas prácticas resultan contraproducentes, ya que el impacto y escurrimiento de gotas de gran tamaño termina barriendo una fracción significativa de las sales. Por el contrario, la niebla ultrasónica garantiza que solo se deposite una película microscópica de humedad sobre el aislador. Esta delgada capa es exactamente la necesaria para disolver el electrolito y activar las corrientes de fuga, preservando intacta la concentración de la mezcla sólida originalmente aplicada.

A modo de síntesis, la ejecución de los ensayos contempló la combinación sistemática de todas las variables analizadas previamente: entorno operativo, polaridad eléctrica y estado de las probetas. Con el propósito de ofrecer una visión estructurada del diseño experimental completo, en la Tabla 4 se presenta la matriz consolidada de casos de estudio que articulan esta investigación.

Tabla 4: Resumen de las variables y escenarios que componen la matriz experimental.

Variable Experimental	**Condiciones Evaluadas**
Entorno de Operación	1. Superficie limpia y ambiente seco. 2. Superficie con contaminación artificial severa (Clase E5).
Excitación Eléctrica	1. Tensión continua polaridad positiva. 2. Tensión continua polaridad negativa.
Estado de la Probeta	1. Caso Base (Aislador sano, sin alteraciones). 2. Falla por corte de faldón (Grados: Ligero, Intermedio, Severo). 3. Falla por exposición de núcleo (Grados: Ligero, Intermedio, Severo).

3.6.1. Tensión de ruptura

La evaluación de la tensión de ruptura dieléctrica constituye el primer parámetro de diagnóstico experimental. Esta etapa busca determinar el umbral crítico de contorneo sobre la totalidad del set de probetas, incluyendo el aislador sano y las unidades con fallas. Para ello, los ensayos se ejecutaron tanto en condiciones de limpieza como bajo contaminación E5, aplicando excitación en tensión continua con polaridad positiva y negativa en todos los escenarios.

En la ejecución de estas pruebas se siguieron los lineamientos detallados en la norma IEC 60060-1 [20] para ensayos de Clase 3. Bajo este estándar, todos los datos recolectados fueron corregidos considerando las condiciones ambientales de presión, temperatura y humedad registradas al momento exacto de la experimentación. Esta normalización es fundamental para garantizar la validez técnica y la comparabilidad de los resultados obtenidos en diferentes jornadas.

Respecto al equipamiento utilizado, la alimentación de alta tensión fue proporcionada por un equipo Multi Test Set (MTS) de la marca HAEFELY. Para asegurar la integridad del sistema y proteger la fuente ante eventos de descarga disruptiva súbita, el equipo se conectó en serie a una resistencia de agua con un valor nominal de 3 MΩ. Este montaje permite limitar la corriente de falla transitoria y estabilizar el suministro de energía durante el desarrollo de los arcos parciales sobre el polímero.

En la Figura 20 se presenta el esquema del montaje experimental utilizado para las mediciones de tensión de ruptura y el registro visual y acústico de los fenómenos asociados.

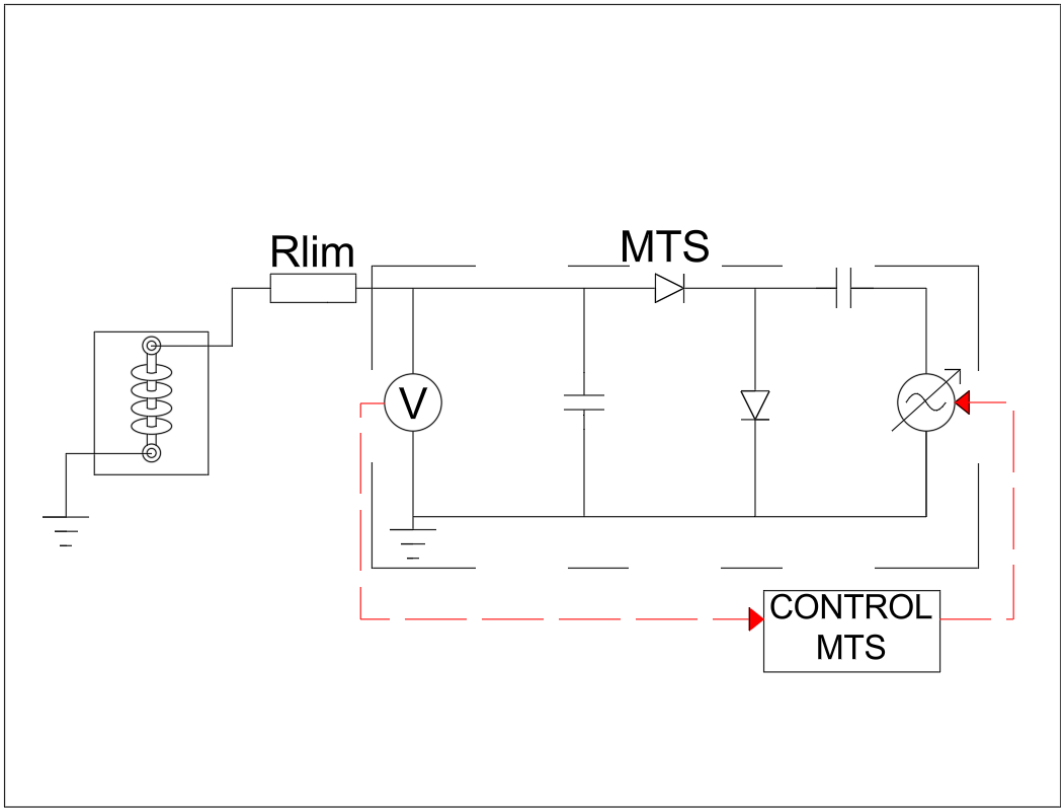


Figura 19: Diagrama del setup experimental para ensayos de tensión de ruptura en corriente continua.

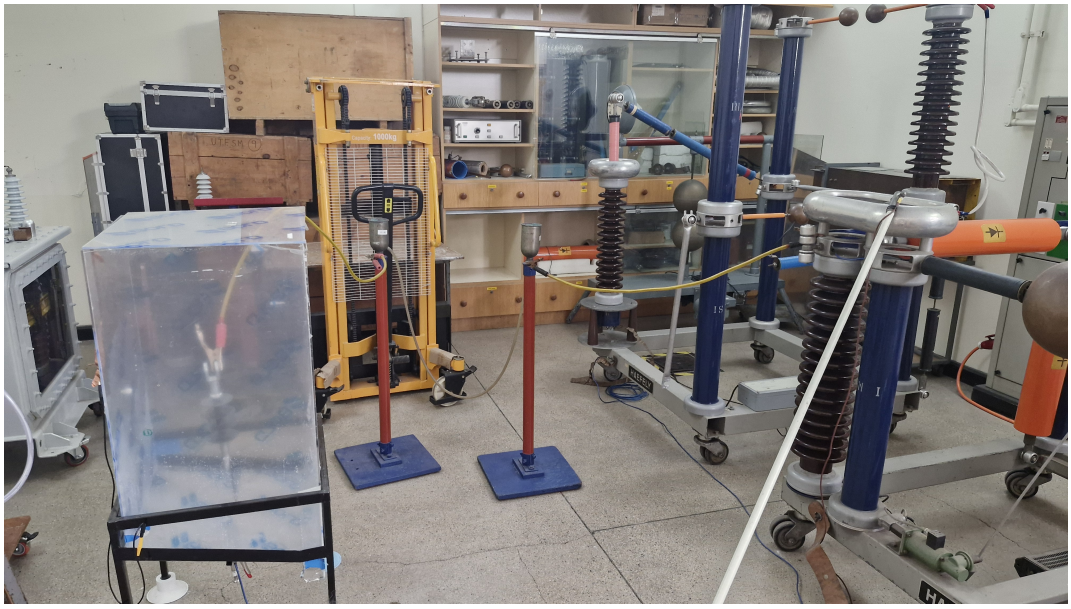


Figura 20: Setup ensayo en laboratorio.

Para la determinación empírica de la tensión de ruptura, se utilizó el siguiente procedimiento

operativo:

1. Disponer físicamente los diodos rectificadores en el circuito de alta tensión según la polaridad requerida. Para obtener polaridad negativa, seguir la orientación indicada en el diagrama del montaje; para polaridad positiva, invertir manualmente la posición de ambos diodos.

2. En los ensayos con probetas contaminadas, encender el humidificador ultrasónico hasta alcanzar y estabilizar el nivel de humedad relativa deseado dentro de la cámara.

3. Energizar la probeta e incrementar el potencial desde el equipo de control de manera constante y uniforme hasta provocar el contorneo. Registrar como tensión de ruptura el último valor estable marcado por el display numérico inmediatamente antes de:

   - Visualizar una caída de tensión abrupta en la fuente (operación de las protecciones del MTS).
   - Visualizar o escuchar claramente el desarrollo de un arco en la probeta.

4. Inmediatamente después de ocurrida la ruptura, reducir la tensión a cero y establecer un periodo de recuperación de entre 5 y 10 segundos.

5. Repetir el procedimiento hasta consolidar un total de 5 mediciones efectivas por cada configuración de falla y polaridad. Determinar la tensión de ruptura característica calculando el promedio aritmético de las muestras obtenidas.

3.6.2. Corriente de fuga

La medición de la corriente de fuga total constituye el segundo parámetro de diagnóstico experimental. Su propósito es cuantificar la pérdida de resistividad superficial del material y monitorear la dinámica de la conducción resistiva precursora al contorneo. Al igual que en las etapas precedentes, este análisis contempla la evaluación de las siete probetas (sana y defectuosas) en ambas condiciones superficiales y excitadas bajo ambas polaridades.

En la ejecución de las mediciones se mantuvieron los lineamientos de la norma IEC 60060-1 [20], en conjunto con las disposiciones de la norma IEC 61245 [7] específicas para el testeo de aisladores en corriente continua bajo polución. Nuevamente, la magnitud de las tensiones de ensayo fue corregida mediante los factores atmosféricos imperantes en el laboratorio.

En cuanto a la instrumentación, la alimentación de energía se mantuvo a cargo del equipo MTS de HAEFELY. Para la recolección de los datos de conducción superficial, se acopló directamente

a la línea de retorno a tierra un amperímetro de precisión, encargado de capturar y mostrar la magnitud de la corriente en escala de microamperios (μA).

El esquema de interconexión utilizado para el registro de las corrientes de fuga se detalla en la Figura 21.

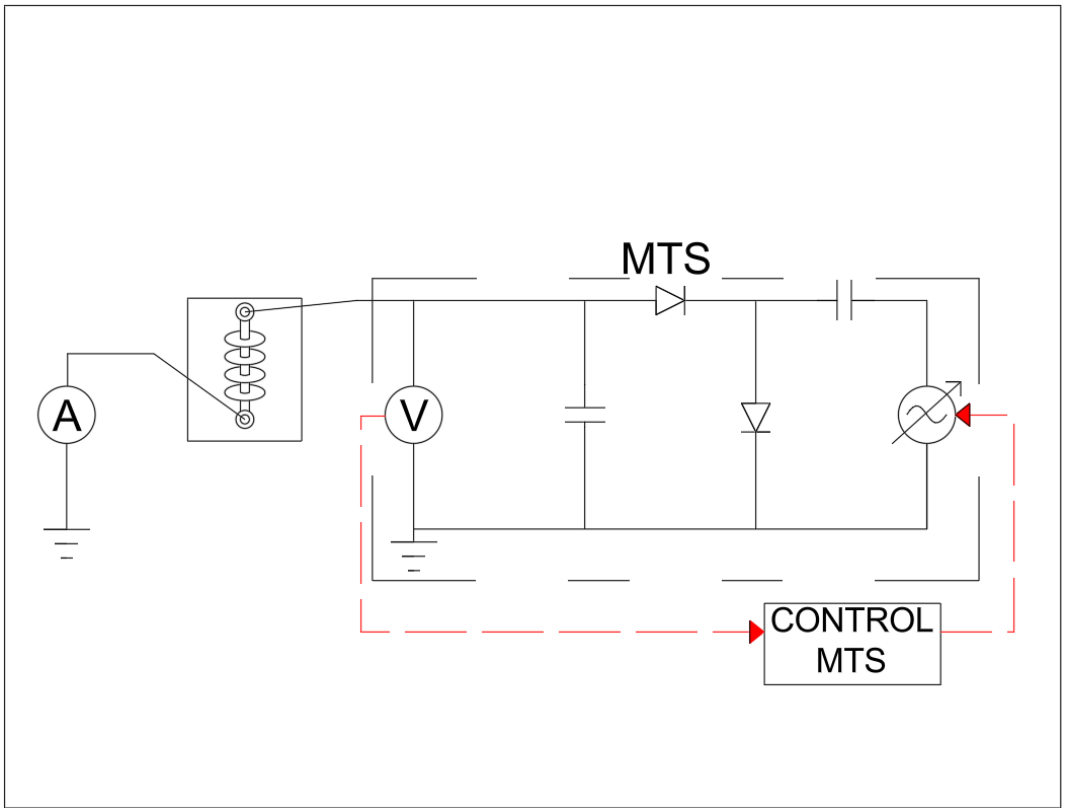


Figura 21: Diagrama del setup experimental para la medición de corriente de fuga total.

Para el registro de la corriente de fuga superficial, se procedió de la siguiente manera:

1. Configurar la polaridad de la tensión continua en el circuito rectificador mediante el posicionamiento de los diodos de alta tensión.
2. Para el escenario de evaluación bajo clase E5, saturar la cámara de prueba operando el humidificador de vapor frío hasta garantizar la disolución uniforme de las sales superficiales.
3. Definir una rampa de escalones de prueba en función del desempeño límite de cada unidad. Utilizando como parámetro la tensión de ruptura calculada en la etapa anterior, establecer 5 niveles de evaluación correspondientes al 30 %, 40 %, 50 %, 60 % y 70 % de la tensión disruptiva del aislador.

4. Energizar el circuito y elevar la tensión aplicada desde cero hasta alcanzar el primer escalón de medición establecido.

5. Estabilizar y mantener la tensión en ese nivel durante un periodo total de 180 segundos. Durante el último minuto de este intervalo, registrar de forma manual la magnitud de la corriente exhibida en el amperímetro mediante una tasa de muestreo de un dato cada 5 segundos.

6. Continuar el ascenso hacia el siguiente escalón de tensión y repetir el registro hasta completar la curva. Finalizada la medición del escalón superior, desenergizar la fuente para culminar la prueba.

3.6.3. Descargas Parciales

La medición indirecta de descargas parciales (DP) representa el tercer indicador diagnóstico de la metodología. Su objetivo es identificar de manera no destructiva la emisión de ráfagas eléctricas de alta frecuencia que se originan en los bordes de los cortes de los faldones, en la fibra expuesta del núcleo y en los arcos de banda seca.

Para garantizar la fiabilidad del registro de estos pulsos, el diseño del circuito de medición se ciñó a las especificaciones estipuladas en la norma técnica IEC 60270 [21].

A nivel de hardware, se operó la fuente MTS de HAEFELY para el suministro del campo DC. La captura de los transitorios electromagnéticos se logró implementando un sensor inductivo (Transformador de Corriente de Alta Frecuencia, HFCT) abrazado al conductor de tierra del montaje. Este sensor derivó la señal analógica captada simultáneamente hacia dos equipos: el analizador digital OMICRON MPD 600, encargado del procesamiento estadístico, y el osciloscopio KEYSIGHT Infiniium (DSOS104A), operado a una tasa de muestreo efectiva de 250 MSa/s, la cual resultó adecuada para la correcta reconstrucción temporal y espectral de las formas de onda.

El esquema topológico de este montaje múltiple se representa en la Figura 22.

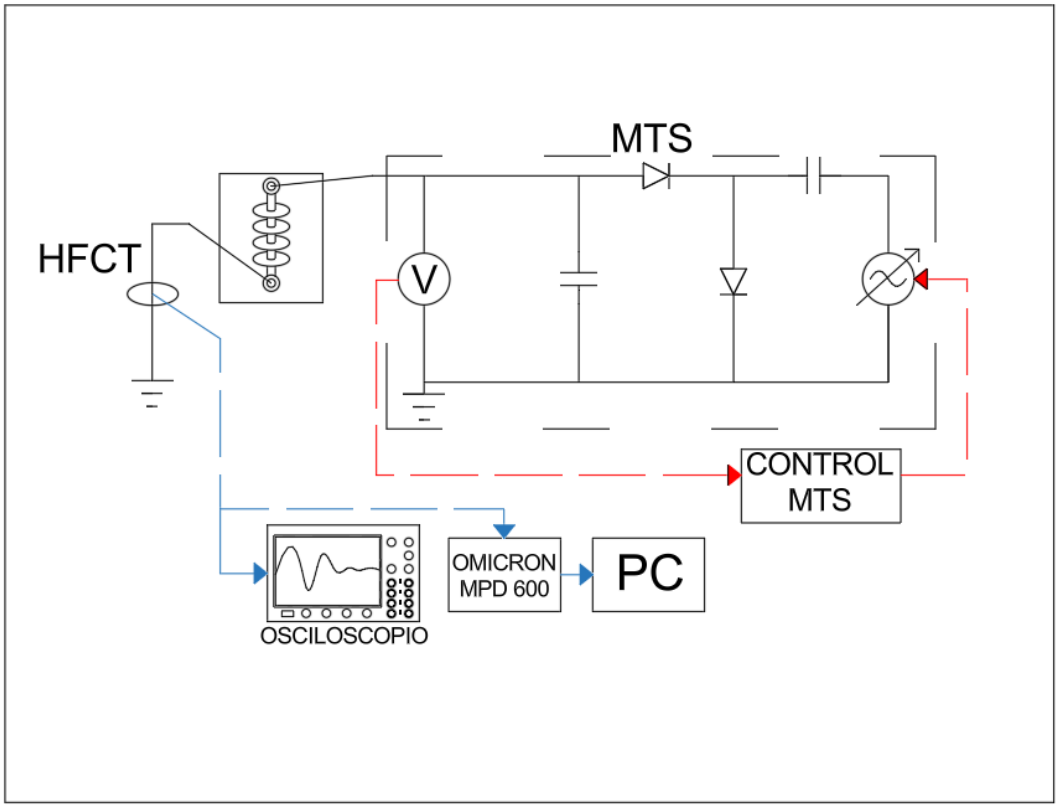


Figura 22: Diagrama del setup experimental para la caracterización espectral de descargas parciales.

Para la caracterización integral de las descargas parciales, se ejecutó el siguiente protocolo:

1. Establecer la polaridad de excitación deseada en el circuito rectificador.
2. En el caso del set de probetas contaminadas, humidificar la cabina de ensayo mediante el inyector ultrasónico hasta estabilizar el índice de humedad relativa y activar la capa salina.
3. Energizar la probeta y elevar el potencial de manera progresiva hasta alcanzar un estrés eléctrico que garantice la existencia de actividad pero evite la saturación por ruido de fondo. Este nivel se fijó en un 40 % de la tensión de ruptura para el entorno limpio, y en un 60 % de la tensión de ruptura para el ambiente E5.
4. Acatar un periodo de estabilización o cuarentena de aproximadamente 5 minutos tras alcanzar el nivel objetivo. Este paso es mandatorio para permitir la disipación del estrés dieléctrico transitorio propio de la elevación de voltaje y asegurar que la actividad medida corresponda a un régimen permanente de la falla.

5. Mantener el voltaje constante durante un periodo de monitoreo de 10 minutos. En el transcurso de este intervalo, grabar el flujo de eventos utilizando el software de control del OMICRON MPD 600, y de manera simultanea, capturar las formas de onda en el osciloscopio.

6. Transcurrido el periodo de evaluación, apagar el suministro desde el panel de control y descargar el circuito.

3.7. Ensayo exploratorio de envejecimiento acelerado

Con el objetivo de evaluar el impacto de condiciones climáticas extremas y el estrés termo-mecánico sobre la integridad estructural y dieléctrica de los aisladores, se diseñó un ensayo exploratorio de envejecimiento acelerado. Este estudio de caso busca simular y acelerar los mecanismos de degradación interfacial a largo plazo, tales como la intrusión profunda de humedad, el deslaminado y la fatiga por expansión diferencial de los materiales.

Para aislar el efecto de esta degradación termo-mecánica y representar los límites extremos del estudio, se seleccionaron únicamente dos unidades para este ciclo: la probeta sana como caso base referencial y la probeta defectuosa con falla de exposición de núcleo severo.

3.7.1. Procedimiento del ciclado térmico-ambiental

Ambas probetas, en su condición contaminada, fueron sometidas a un ciclo continuo de estrés ambiental dividido en tres etapas consecutivas de 24 horas cada una. Estas fases fueron diseñadas metodológicamente para vulnerar mecánicamente las interfaces entre la matriz y la cubierta:

a. **Inmersión en agua:** Las muestras fueron sumergidas completamente en recipientes con agua destilada a temperatura ambiente. Esta primera etapa propicia la difusión de la humedad hacia el interior del material, forzando un mecanismo de absorción capilar que resulta particularmente agresivo y destructivo en la matriz intrínsecamente hidrofílica de la probeta que posee el núcleo de FRP expuesto.

b. **Congelación térmica:** Inmediatamente tras la inmersión, los aisladores fueron introducidos y mantenidos en una cámara de congelación a temperaturas bajo cero. Esta fase induce un violento estrés mecánico a nivel interno. El agua absorbida que se encuentra alojada en microvacíos, fisuras o entrelazada en las fibras de vidrio experimenta una expansión volumétrica al congelarse. Esta presión hidráulica ensancha las grietas microscópicas y fuerza la separación interfacial o *de-bonding*.

c. **Calentamiento y secado en horno:** Finalmente, las probetas congeladas se trasladaron directamente a un horno industrial. Este choque térmico induce una dilatación diferencial agresiva entre la goma de silicona, el núcleo estructural y los herrajes metálicos. Adicionalmente, vaporiza la humedad remanente en el interior de la varilla; dado que el vapor requiere un mayor volumen que el hielo o el agua líquida, esta presión de escape termina por expandir irreversiblemente las cavidades internas formadas en las fases anteriores.

Al concluir este ciclo de 72 horas de estrés ambiental acelerado, a ambas probetas se les aplicó la misma batería completa de ensayos de alta tensión (ruptura, fuga y DP) previamente descrita. La ejecución de estas pruebas permite cuantificar la caída del desempeño dieléctrico inducida por la fatiga termo-mecánica, contrastando experimentalmente la robustez y capacidad de sellado de un equipo en óptimas condiciones frente a la vulnerabilidad crítica de una unidad con el núcleo severamente expuesto y dañado.

4. Resultados y análisis experimentales

En esta sección se presentan y analizan los resultados obtenidos en los ensayos experimentales de alta tensión, evaluando el desempeño dieléctrico a través de tres parámetros fundamentales: tensión de ruptura, corriente de fuga y descargas parciales. Cada uno de estos indicadores se analiza de manera comparativa, contrastando el comportamiento de la probeta base frente a las seis unidades que presentan fallas físicas en distintos niveles de severidad. Asimismo, los datos abarcan transversalmente los escenarios de operación en condición limpia y bajo contaminación artificial severa, considerando en todos los casos la influencia de la polaridad de excitación.

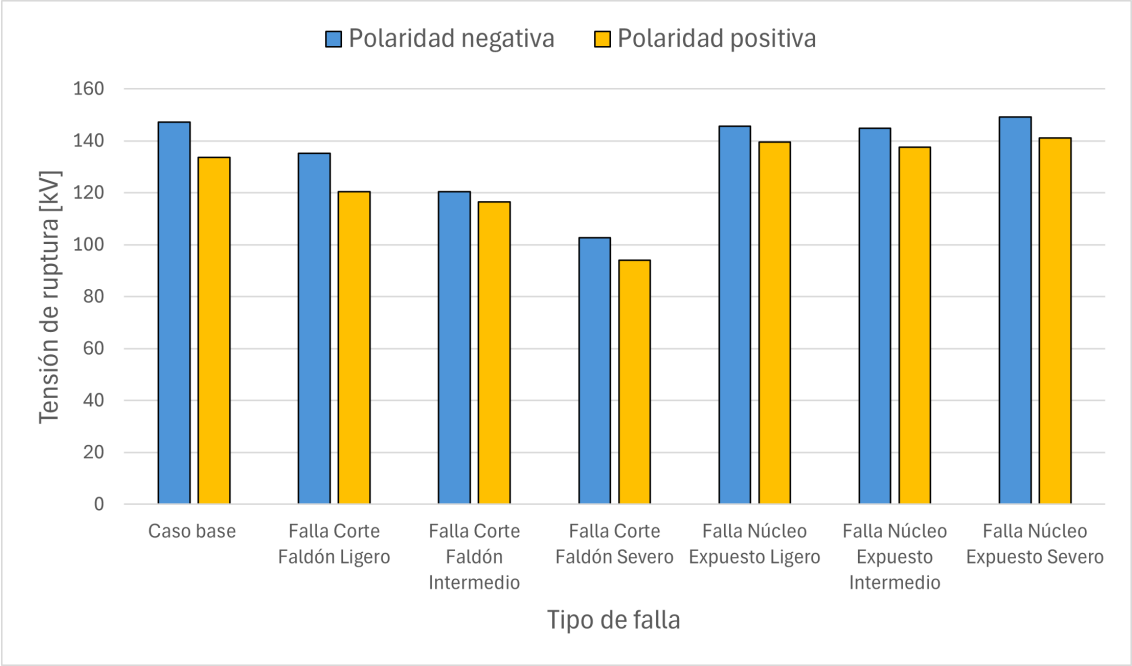
4.1. Resultados del ensayo de tensión de ruptura

A continuación se presentan los resultados correspondientes a la tensión de ruptura dieléctrica, obtenidos a partir del procedimiento experimental detallado previamente en la sección 3.6.1. Los datos consolidados abarcan los ensayos ejecutados sobre la totalidad de las probetas, evaluando tanto la condición de superficie limpia como el escenario con contaminación artificial severa.

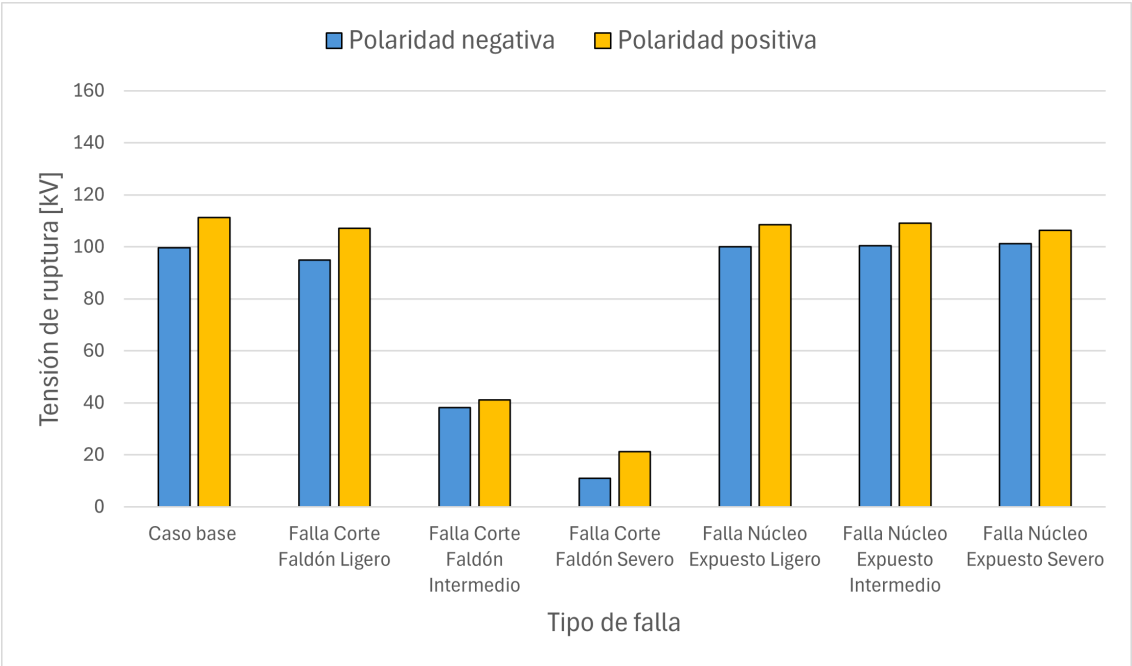
Cabe destacar que los valores para la condición sin contaminación fueron normalizados mediante los factores de corrección atmosférica de la norma IEC 60060-1 [20].

En la Figura 23 se detalla el comportamiento de la tensión de ruptura para el caso base y las diferentes progresiones de falla. Cada gráfico presenta las cinco mediciones individuales obtenidas durante los ensayos, junto con la curva superpuesta que conecta los valores promedio resultantes para cada configuración. Los resultados se han segmentado para facilitar la comparación cruzada entre los escenarios limpios y aquellos sometidos a contaminación E5, bajo ambas polaridades de excitación.

Para cuantificar de manera precisa el impacto de las alteraciones geométricas, la Tabla 5 detalla el porcentaje de reducción de la tensión de ruptura promedio para cada probeta fallada. Estos valores fueron calculados tomando como referencia el caso base evaluado bajo su misma condición superficial y polaridad.



(a) Tensión de ruptura sin contaminación



(b) Tensión de ruptura con contaminación E5

Figura 23: Comparación de las tensiones de ruptura promedio según el tipo de falla física y polaridad.

Tabla 5: Reducción porcentual de la tensión de ruptura promedio respecto al caso base.

Condición de la Probeta	**Sin Contaminación**		**Contaminación E5**	
	Positiva	**Negativa**	**Positiva**	**Negativa**
Caso Base (Sano)	-	-	-	-
Corte Faldón Ligero	-10 %	-8 %	-4 %	-4. %
Corte Faldón Intermedio	-13 %	-18 %	-63 %	-61 %
Corte Faldón Severo	-30 %	-30 %	-81 %	-89 %
Núcleo Expuesto Ligero	4 %	-1 %	-3 %	1 %
Núcleo Expuesto Intermedio	3 %	-2 %	-2 %	1 %
Núcleo Expuesto Severo	6 %	1 %	-4 %	2 %

Los valores individuales correspondientes a cada uno de los ensayos realizados para todas las configuraciones y polaridades se encuentran disponibles para su consulta en el Anexo A.

En primer lugar, la presencia de contaminación E5 induce una reducción significativa transversal en la tensión de ruptura. Para evidenciar el peso específico que tiene el entorno ambiental sobre cada configuración, la Tabla 6 contrasta los valores promedio de ruptura entre la condición limpia y la condición contaminada, aislando así el efecto del daño físico.

Tabla 6: Reducción de la tensión de ruptura provocada exclusivamente por la contaminación E5.

Condición de la Probeta	**Sin Contaminación [kV]**	**Contaminación E5 [kV]**	**Reducción**
Caso Base	140	105	-25 %
Corte Faldón Ligero	128	101	-21 %
Corte Faldón Intermedio	119	40	-67 %
Corte Faldón Severo	98	16	-84 %
Núcleo Expuesto Ligero	143	104	-27 %
Núcleo Expuesto Intermedio	141	105	-26 %
Núcleo Expuesto Severo	145	104	-29 %

Como se extrae de los datos, para el caso base y las probetas con núcleo expuesto, la caída se sitúa en torno al 27 % respecto a su propia condición limpia (descendiendo, por ejemplo, de 140 kV a 105 kV en el caso base, según los datos específicos de la matriz), estableciendo de forma transversal un umbral de contorneo considerablemente menor.

En cuanto a las fallas por corte en los faldones, en condiciones de limpieza provocan una degradación de la tensión de hasta el 30 % respecto al caso base, descendiendo a promedios de 94,0 kV y 102,8 kV (polaridad positiva y negativa, respectivamente) en su grado más severo. En contraste, al someter estas mismas probetas al entorno contaminado, la reducción se agudiza drásticamente, superando el 88 % en el escenario de mayor severidad, donde la tensión de ruptura colapsa a un nivel crítico de apenas 11,0 kV. Por el contrario, las probetas con núcleo expuesto prácticamente no ven afectada su tensión de ruptura frente al caso base bajo ninguna condición de ensayo, logrando sostener promedios estables en torno a los 145 kV en ambiente limpio y 100 kV bajo contaminación.

Asimismo, los datos revelan que la degradación resultante de combinar fallas físicas y contaminación no equivale a la suma aritmética de ambos factores. En el corte de faldón severo en condición limpia, la reducción respecto al caso base bordea el 30 %, mientras que la contaminación por sí sola representa una caída en torno al 25 %. Sin embargo, al interactuar ambas condiciones, el efecto es sinérgico y altamente destructivo, provocando que la reducción llegue al 88,9 % (desplomándose desde los 147,2 kV originales hasta los 11,0 kV).

Para evidenciar la dependencia directa entre la geometría del aislador y su capacidad de soporte, en la Figura 24 se ilustra la relación empírica entre la tensión de ruptura promedio y la distancia de fuga respectiva para cada nivel de corte de faldón evaluado.

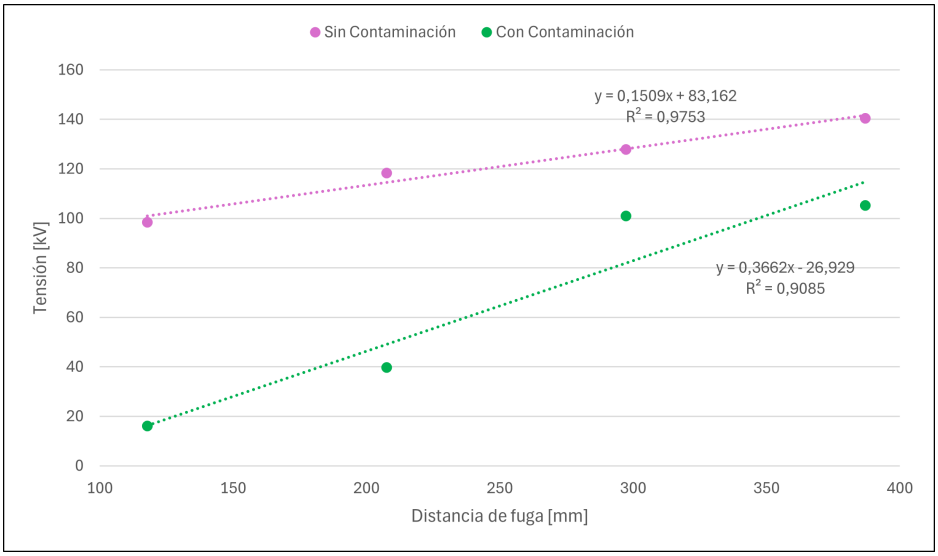


Figura 24: Relación entre la tensión de ruptura promedio y la distancia de fuga geométrica efectiva.

Como se observa en la Figura 24, las líneas de tendencia permiten cuantificar matemáticamente la severidad de esta degradación a través del gradiente dieléctrico superficial. En la condición sin contaminación, existe una fuerte correlación lineal con una pendiente de 0,15 kV/mm. Este valor indica que, en ausencia de contaminación, el polímero conserva una alta capacidad de soporte de tensión por cada milímetro de distancia de fuga remanente, logrando resistir tensiones considerables, de hasta 100 kV, incluso en el escenario de corte de faldón severo.

Por el contrario, la curva correspondiente a la probeta bajo contaminación exhibe una pendiente drásticamente mayor, alcanzando los 0,36 kV/mm. Esta diferencia en las tasas de caída demuestra de forma contundente que el daño estructural y el entorno salino no actúan de forma aislada. La película electrolítica magnifica el impacto de la pérdida de distancia de fuga, haciendo que el aislador sea mucho más sensible a la pérdida de material y provocando un colapso dieléctrico prematuro que invalida por completo la efectividad del perfil restante.

Respecto al efecto de la polaridad, la variación promedio ronda el 8 %. Sin embargo, se identifica que el peor escenario operativo se invierte dependiendo de la condición superficial: en escenarios limpios, la menor tensión de ruptura se presenta bajo polaridad positiva, mientras que, bajo contaminación E5, la condición más desfavorable se registra sistemáticamente en polaridad negativa.

4.2. Resultados del ensayo de corriente de fuga

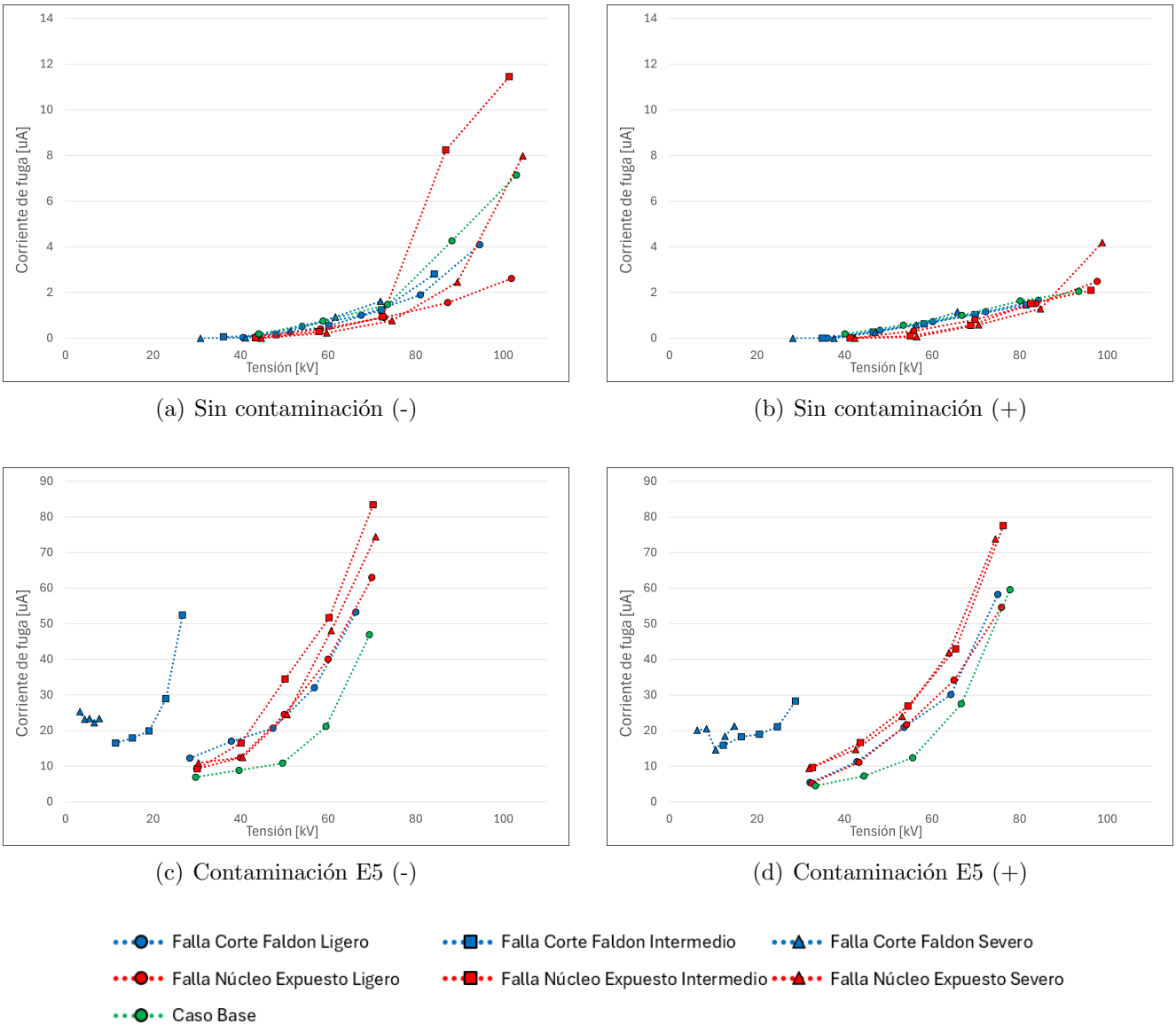
A continuación se presentan los resultados correspondientes a las mediciones de corriente de fuga, obtenidos a partir del procedimiento experimental detallado en la Sección 3.6.2. Dada la cantidad de variables e información recopilada, el análisis se ha estructurado en dos etapas: en primer lugar, se evalúa la evolución de la magnitud de la corriente frente al incremento de voltaje; posteriormente, se profundiza en la dinámica temporal de las descargas en los instantes previos a la ruptura dieléctrica.

4.2.1. Magnitud de corriente en función de la tensión aplicada

En la Figura 25 se presenta la evolución de la corriente de fuga promedio en función de la tensión de ensayo. Los resultados abarcan la totalidad de las probetas evaluadas, agrupadas en una matriz comparativa que segmenta la información según la condición superficial del polímero (limpia y con contaminación E5) y la polaridad de la fuente.

A partir de la observación conjunta de estas curvas, la diferencia más radical se encuentra en el efecto del entorno salino. En los escenarios sin contaminación (Figuras 25(a) y 25(b)), el polímero mantiene una elevada capacidad aislante. Independiente de la probeta analizada, todas presentan un comportamiento inicial similar donde las corrientes de fuga se vuelven perceptibles a partir de los 30 kV. Tras superar este umbral, las magnitudes se mantienen muy reducidas, en el orden de los 1 μA, presentando un crecimiento de carácter no lineal hacia los tramos finales de la medición. Es imperativo destacar que este aumento acelerado de la corriente no obedece a la proximidad de una ruptura inminente, dado que se limitó la tensión máxima aplicada al 70 % del umbral de ruptura de cada probeta. En este contexto, se nota el impacto de la polaridad en el ensayo: bajo tensión negativa, el crecimiento acelerado de la corriente ocurre de forma anticipada, manifestándose alrededor de los 80 kV; por su parte, en polaridad positiva el aumento es mucho más controlado, volviéndose notable recién en las proximidades de los 100 kV. Por el contrario, la introducción de la contaminación E5 (Figuras 25(c) y 25(d)) transforma drásticamente la conducción superficial, generando un aumento de varios órdenes de magnitud en las corrientes de fuga desde las etapas iniciales de energización.

Dentro de este escenario bajo contaminación, se mantiene la dependencia observada respecto a la polaridad de la fuente, aunque la diferencia en su desarrollo es más acotada. Si bien ambas polaridades logran experimentar un crecimiento acelerado en sus magnitudes de corriente, se advierte un ligero desfase: bajo polaridad positiva este fenómeno requiere umbrales de voltaje marginalmente superiores, manifestándose con un retraso aproximado de 5 kV en comparación con la tensión negativa, donde el incremento drástico de la conducción superficial se induce de manera anticipada.



(a) Sin contaminación (-)

(b) Sin contaminación (+)

(c) Contaminación E5 (-)

(d) Contaminación E5 (+)

Figura 25: Evolución de la magnitud de corriente de fuga según el nivel de tensión, condición superficial y polaridad.

En cuanto a la influencia de las alteraciones geométricas, las curvas evidencian comportamientos distintos según la naturaleza del daño. Por un lado, las probetas con falla por núcleo expuesto logran mantener sus niveles de tensión de ruptura en valores elevados; sin embargo, esto ocurre a costa de registrar las mayores magnitudes de conducción superficial del experimento, llegando a sobrepasar los $80\,\mu$A en sus grados intermedio y severo. Por otro lado, la falla por corte de faldón presenta una pérdida de aislación progresiva. En su grado intermedio, la probeta conserva la tendencia de crecimiento característica, pero sufre una reducción importante en su tensión de contorneo, lo que se traduce visualmente en un claro desplazamiento de su curva hacia la izquierda. Finalmente, el escenario de corte de faldón severo es el único que exhibe una degradación total: el contorneo se produce de forma tan prematura que el rango operativo de tensiones es mínimo, imposibilitando el desarrollo de una trayectoria clara de corriente de fuga previa al colapso.

4.2.2. Evolución temporal de la corriente de fuga

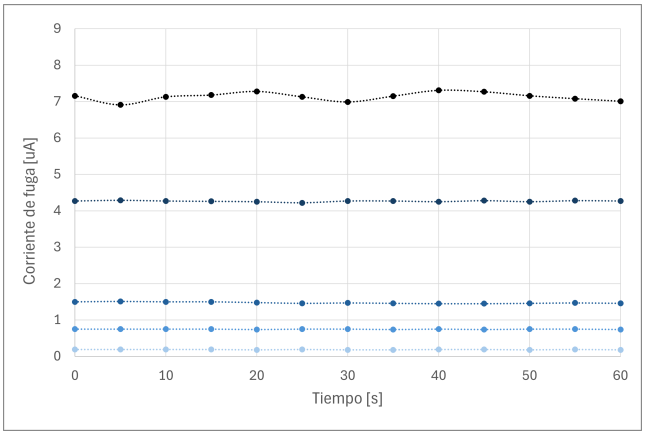
Habiendo establecido el comportamiento macroscópico de la magnitud de corriente en función del nivel de tensión, resulta fundamental analizar la evolución de la conducción superficial bajo condiciones de elevado estrés eléctrico. Para ello, se examinó el registro correspondiente a los últimos 60 segundos de cada ensayo, periodo que representa la etapa de máxima exigencia a la que fueron sometidas las probetas antes de la finalización de la medida.

Dado el amplio volumen de datos generados al evaluar la totalidad de las combinaciones posibles, el presente análisis se focaliza en un conjunto de escenarios representativos que ilustran los extremos de desempeño del material. Considerando que los ensayos previos demostraron que la polaridad negativa representa la condición de mayor exigencia, induciendo un crecimiento anticipado de las corrientes superficiales, se ha seleccionado esta tensión de excitación como base de comparación. Bajo este marco, se contrasta directamente el aislador en estado sano frente a la condición de falla más crítica (núcleo expuesto severo), evaluando ambos extremos tanto en un entorno limpio como bajo contaminación E5.

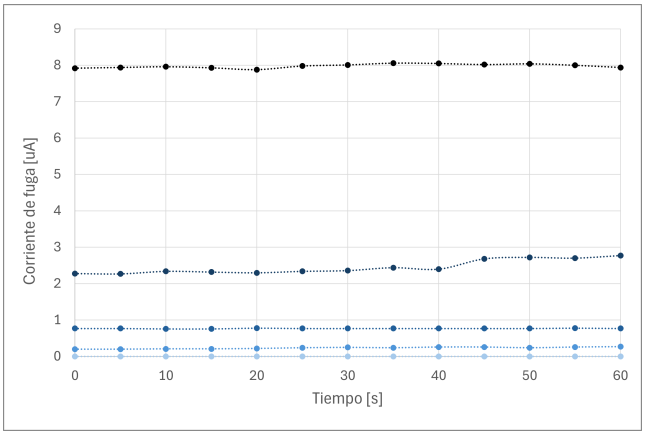
El registro temporal detallado para la totalidad de las probetas y escenarios no incluidos en este apartado se encuentra disponible para su consulta en el Anexo A.

En la Figura 26 se presenta la evolución de la corriente durante el último minuto de zensayo para los cuatro escenarios seleccionados.

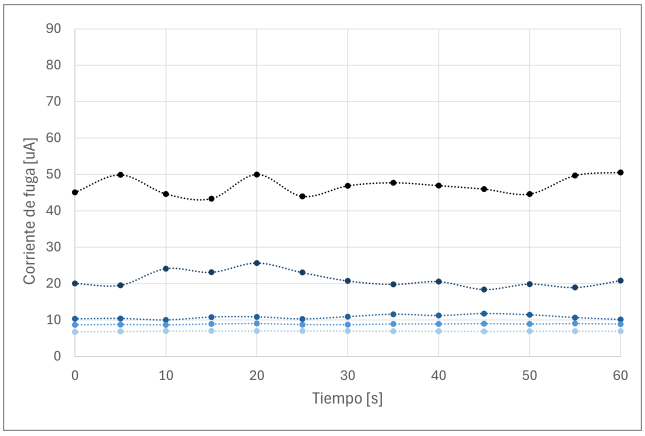
A partir del análisis de los registros temporales, se evidencian diferencias en la dinámica de conducción entre ambos entornos. Al evaluar las probetas en condición limpia (Figuras 26(a) y 26(b)), se observa un comportamiento de alta estabilidad. Durante los 60 segundos de registro bajo estrés eléctrico, tanto el caso base como la falla por núcleo expuesto severo exhiben magnitudes de co-



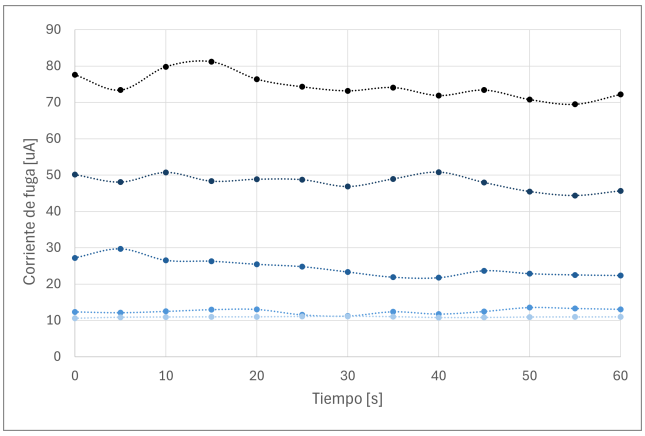
(a) Caso Base - Sin contaminación



(b) Núcleo Expuesto Severo - Sin contaminación



(c) Caso Base - Contaminación E5



(d) Núcleo Expuesto Severo - Contaminación E5



Figura 26: Evolución temporal de la corriente de fuga.
Porcentajes respecto a la tensión de ruptura experimental

rriente constantes y prácticamente equiparables, sin registrarse saltos o variabilidad significativa en sus trayectorias.

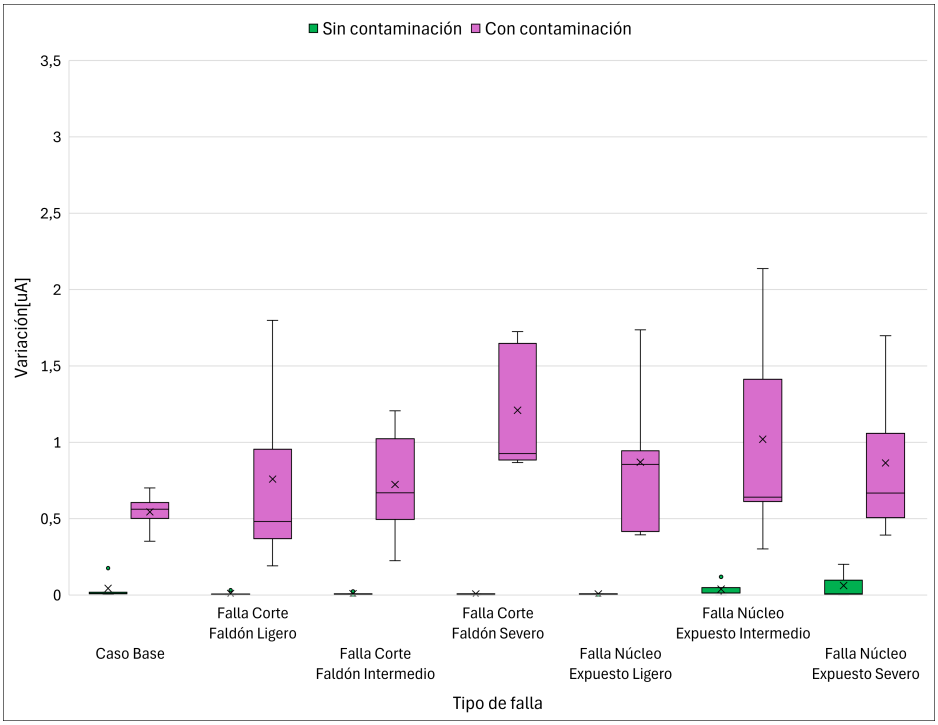
Por el contrario, la introducción de la contaminación artificial E5 (Figuras 26(c) y 26(d)) modifica la respuesta temporal del sistema. En este escenario, la condición con falla estructural evidencia un aumento en la magnitud de sus corrientes de fuga respecto al caso base, brecha que se acentúa en los rangos superiores de voltaje. Asimismo, a diferencia de la linealidad observada en el entorno limpio, los registros bajo contaminación presentan una marcada variabilidad, registrando oscilaciones permanentes a lo largo del minuto de ensayo con fluctuaciones transitorias que varían entre los 5 y 10 μA.

Para complementar el estudio de la evolución temporal de la conducción, se evaluó estadísticamente la estabilidad del sistema calculando el coeficiente de variación de la corriente durante los últimos 60 segundos de cada escalón de medición. En la Figura 27 se presenta la dispersión estadística de esta variabilidad para los cinco niveles de tensión evaluados por probeta.

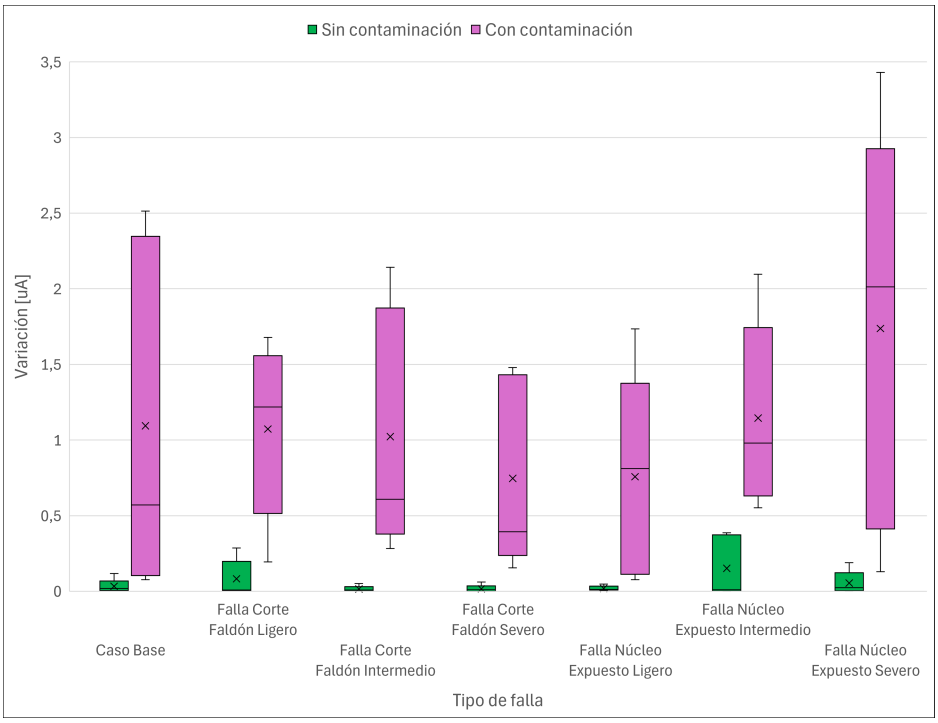
A partir de la distribución de los datos, se constata que la contaminación no solo eleva la magnitud de la corriente, sino que desestabiliza severamente su dinámica. Como se observa en los diagramas, los escenarios contaminados presentan, por norma general, un rango más amplio que sus contrapartes sin contaminación. Esta mayor variabilidad refleja las continuas fluctuaciones en la conducción, provocadas por los rápidos ciclos de formación y extinción térmica de bandas secas (*dry bands*) sobre la película electrolítica.

Al analizar la influencia de los defectos físicos dentro de este entorno inestable, la falla por exposición del núcleo destaca como la condición más crítica. Este fenómeno se agudiza drásticamente bajo excitación negativa (Figura 27(b)), donde la interacción geométrica del defecto con la emisión facilitada de electrones genera picos de variabilidad extrema, alcanzando fluctuaciones que superan los 12 μA.

Si bien este comportamiento inestable posee una componente inherentemente estocástica que admite ciertas excepciones puntuales en los datos, la tendencia global del experimento confirma empíricamente que el comportamiento del polímero es predecible y estable a niveles bajos de excitación, pero transita hacia un régimen considerablemente más errático y fluctuante a medida que se escalan las tensiones hacia los umbrales previos al colapso estructural.



(a) Variabilidad bajo polaridad positiva



(b) Variabilidad bajo polaridad negativa

Figura 27: Variabilidad temporal de la corriente de fuga.

4.3. Resultados del ensayo de descargas parciales

A continuación se presentan los resultados correspondientes a las mediciones de descargas parciales, obtenidos a partir del procedimiento experimental detallado en la Sección 3.6.3. Dada la naturaleza del fenómeno y la cantidad de información recopilada, la exposición de los resultados se ha estructurado en dos etapas: en primer lugar, se analiza el comportamiento dieléctrico de las probetas en estado limpio y seco, aislando el impacto exclusivo de las fallas físicas; posteriormente, se evalúa el desempeño bajo la condición de contaminación artificial E5, escenario donde los defectos estructurales interactúan dinámicamente con la capa salina.

Cabe destacar que los registros fueron obtenidos manteniendo un nivel de estrés constante, adaptado a la condición superficial de la probeta: 40 % de la tensión de ruptura para el escenario limpio y 60 % para el entorno contaminado. La selección de estos niveles diferenciados de tensión responde a la necesidad de aproximar las mediciones de forma homogénea a un valor cercano a los 70 kV para todas las probetas, garantizando una base de comparación equitativa. Asimismo, se procuró no superar dicho umbral para minimizar que el ruido de fondo distorsione la respuesta real del material.

4.3.1. Evaluación en condición de superficie limpia

Para evaluar el comportamiento de las fallas físicas en una condición de operación seca sin inducir un contorneo prematuro, se analizaron de manera conjunta la magnitud (Q_{95}) y la tasa de repetición de los eventos mediante el equipo OMICRON. Asimismo, se utilizó el osciloscopio para caracterizar la huella espectral de las descargas a través de mapas de tiempo-frecuencia (TF), permitiendo identificar los mecanismos de falla predominantes en ausencia de la capa contaminante.

En la Figura 28 se presenta la evolución de la magnitud de las descargas (Q_{95}), mientras que la Tabla **??** detalla la tasa de repetición de los eventos validados por el equipo OMICRON.

Tabla 7: Tasa de repetición de pulsos, sin contaminación

Condición de la Probeta	**Tasa de pulsos [pulsos/min]**	
	Polaridad Negativa	**Polaridad Positiva**
Caso Base	8	2,8
Falla Corte de Faldón Ligero	1,9	0,2
Falla Corte de Faldón Intermedio	1,6	0
Falla Corte de Faldón Severo	0	0
Núcleo Expuesto Ligero	14,6	0,5
Núcleo Expuesto Intermedio	3,8	2,3
Núcleo Expuesto Severo	0,4	1,4

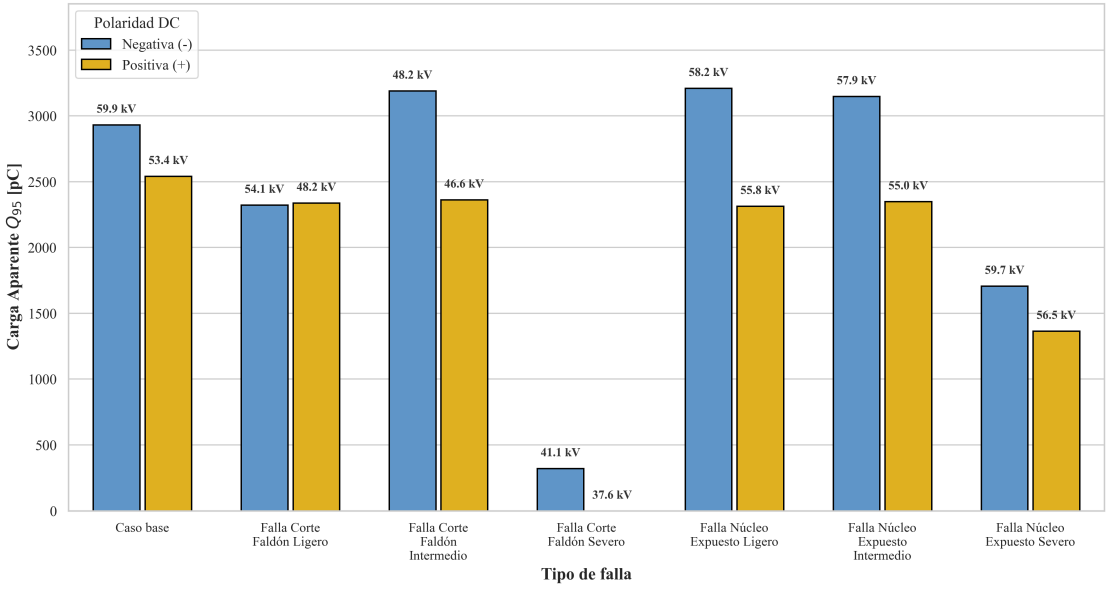


Figura 28: Magnitud de las descargas (Q_{95}) en condición de superficie limpia.

A partir de los datos estadísticos, se evidencia que en ausencia de un medio electrolítico superficial, la dinámica de la actividad se rige por una menor frecuencia de eventos. Tal como lo refleja la Tabla **??**, el polímero en estado seco y limpio presenta una tasa de repetición de pulsos mínima, registrando una actividad prácticamente nula, con valores consistentemente inferiores a un pulso

por segundo en la totalidad de las probetas.

Cabe destacar que el menor número de pulsos registrado en los escenarios de fallas con mayor severidad (como el corte de faldón severo, donde incluso no se registraron descargas parciales) no representa un aislamiento en buen estado, sino a un efecto de la reducción en la tensión aplicada durante el ensayo. Dado que estas probetas presentaban un umbral significativamente menor antes de alcanzar la ruptura dieléctrica, la tensión debió limitarse de forma proporcional a su capacidad, disminuyendo la probabilidad de encendido de las descargas en comparación con las unidades más sanas.

Esta baja tasa de pulsos se complementa con registros de carga aparente (Q_{95}) que alcanzan valores del orden de los 3.000 pC en la probeta base y fallas de núcleo expuesto, según se observa en la Figura 28. A partir de estas magnitudes, se identifica de manera transversal que la polaridad negativa presenta descargas de mayor magnitud en comparación con la excitación positiva bajo estas condiciones de superficie limpia.

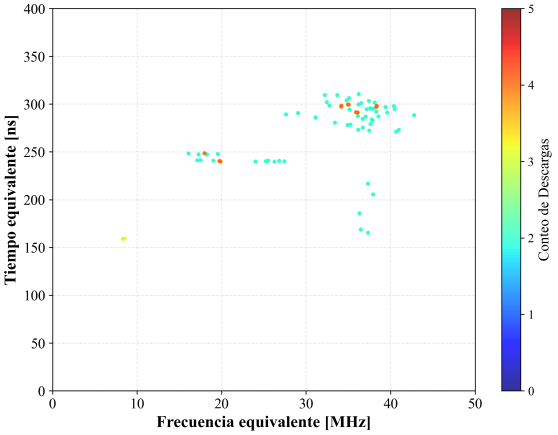
En la Figura 29 se presenta la comparativa representativa entre el caso base y las condiciones de falla severa.

Al observar el comportamiento espectral en la Figura 29, la huella de las descargas refleja visualmente lo descrito por los datos estadísticos. Los mapas TF en condición limpia destacan por una evidente escasez de eventos y una naturaleza altamente aislada.

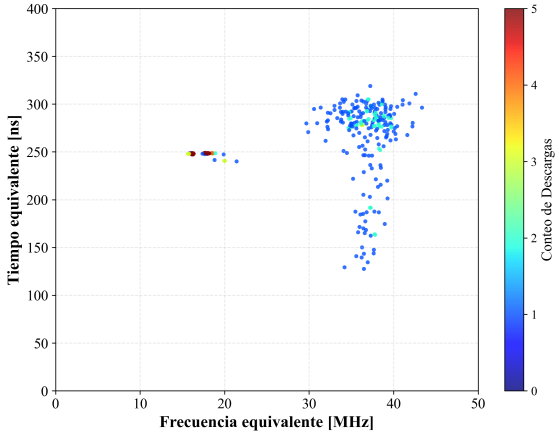
Se observa que se presenta una mayor densidad de eventos bajo excitación de polaridad negativa (Figuras 29(a) y 29(c)) en comparación con la polaridad positiva. Este comportamiento gráfico concuerda con el análisis estadístico previo. Cabe señalar que esta diferencia esta directamente relacionada con las magnitudes de tensión involucradas, dado que en condición limpia los umbrales de ruptura son mayores bajo polaridad negativa, sometiendo al polímero a un estrés eléctrico más elevado, proporcionando una mayor actividad de descargas. Por su parte, bajo excitación positiva (Figuras 29(b) y 29(d)), donde la tensión de ensayo fue menor, los mapas exhiben una actividad real atenuada, predominando el registro del transitorio del sistema.

Sin embargo, a pesar de lograr capturar estos clústeres aislados, la tasa de repetición general del fenómeno es tan ínfima que la huella espectral de la probeta con el núcleo severamente expuesto resulta en la práctica indistinguible de la del aislador en estado sano.

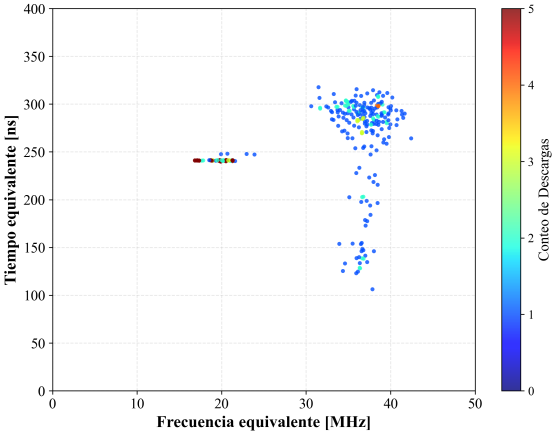
Por su parte, no fue posible generar mapas TF para las probetas con fallas por corte de faldón, dada la ausencia total de eventos registrados por el sistema de adquisición. Al ensayar estas probetas al 40 % de una tensión de ruptura ya mermada estructuralmente, el gradiente eléctrico superficial es



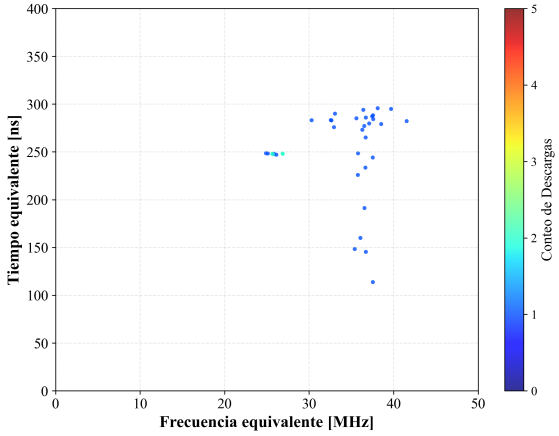
(a) Caso Base (-)



(b) Caso Base (+)



(c) Núcleo Expuesto Severo (-)



(d) Núcleo Expuesto Severo (+)

Figura 29: Comparativa mapas TF en condición de superficie limpia.

estrictamente insuficiente para encender y sostener descargas parciales previas al contorneo.

4.3.2. Evaluación en condición contaminada

Empleando la metodología detallada en la Sección 3.6.3, se caracterizó la magnitud (Q_{95}), tasa de repetición y mapas TF bajo contaminación E5. Esto permite cuantificar la interacción entre los defectos físicos y el entorno conductor para identificar los mecanismos de falla resultantes.

Al procesar los datos registrados por el analizador OMICRON, se observa que la presencia de la película electrolítica (E5) redefine drásticamente los umbrales de actividad eléctrica. Para ilustrar este comportamiento, la Figura 30 presenta la evolución de la magnitud de las descargas (Q_{95}), mientras que la Tabla 8 detalla la tasa de repetición de los eventos.

Tabla 8: Tasa de repetición de pulsos bajo contaminación E5

Condición de la Probeta	**Tasa de pulsos [pulsos/min]**	
	Polaridad Negativa	**Polaridad Positiva**
Caso Base	666,5	48661,5
Falla Corte de Faldón Ligero	13133,2	16139,3
Falla Corte de Faldón Intermedio	9,8	20,9
Falla Corte de Faldón Severo	0	1,5
Núcleo Expuesto Ligero	9018,7	150723,8
Núcleo Expuesto Intermedio	60109,1	32531
Núcleo Expuesto Severo	35722,7	81878

A partir del análisis conjunto de ambos indicadores, se aprecia un cambio radical en la dinámica de las descargas al comparar este entorno con el escenario limpio. A diferencia del estado seco, donde predominaban eventos discretos de gran magnitud impulsados principalmente por la polaridad negativa, la presencia de la capa conductora transforma el comportamiento hacia un régimen de conducción continuo y errático. En este contexto, las unidades con falla por exposición de núcleo exhiben la actividad de descargas parciales más agresiva del set experimental. Tal como se aprecia en la Tabla 8, estas probetas registran tasas de repetición extremas, llegando a superar los 2.500

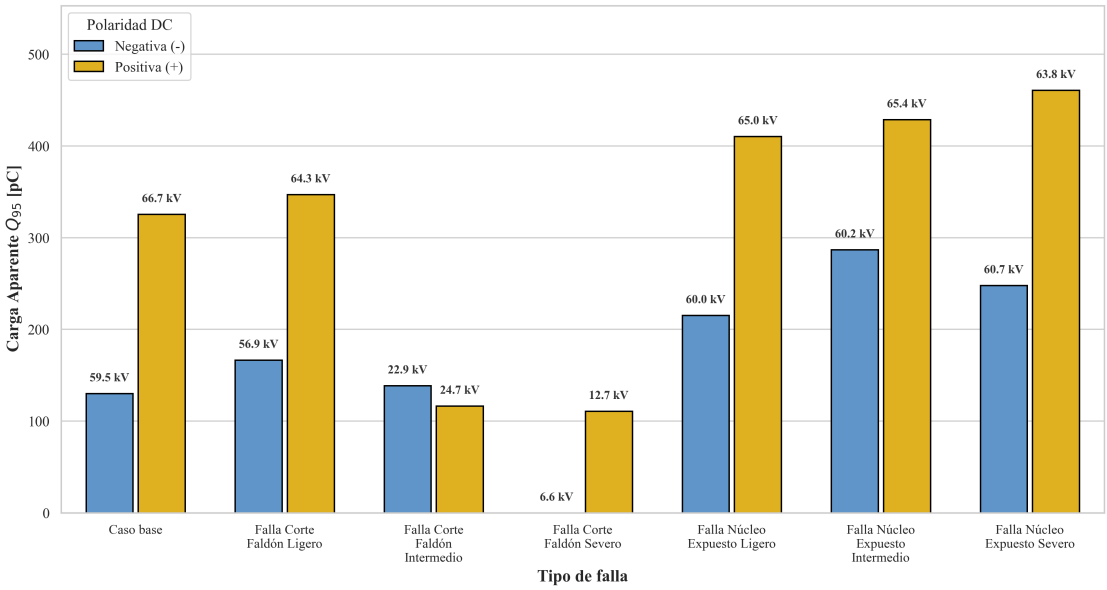
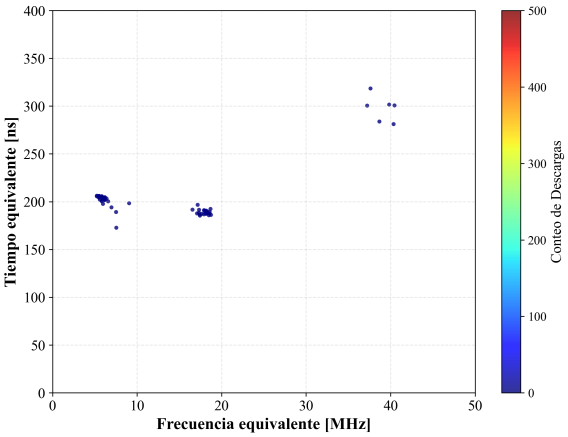


Figura 30: Magnitud de las descargas (Q_{95}) bajo contaminación artificial E5.

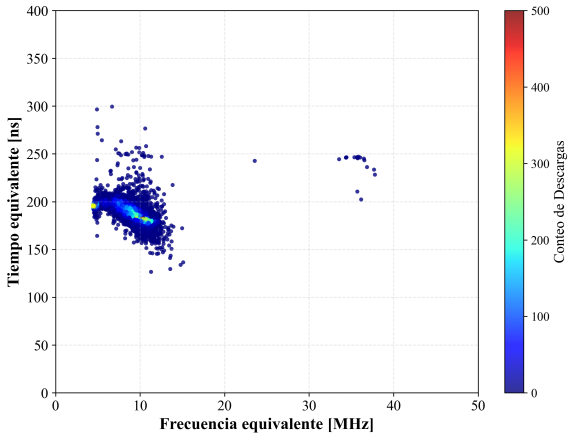
pulsos/s bajo polaridad positiva, lo cual representa un contraste abismal frente a las tasas casi nulas (menor a 1 pulso/s) observadas sin contaminación. Simultáneamente, la Figura 30 demuestra que estas mismas probetas presentan las cargas aparentes de mayor magnitud para este escenario húmedo, cercanas a los 460 pC. Si bien esta magnitud es significativamente menor a los eventos masivos superiores a 3.000 pC del escenario limpio, su mayor frecuencia de ocurrencia evidencia un proceso continuo de degradación térmica provocado por arcos de banda seca en la interfaz del material.

Por el contrario, la evolución de la falla por corte de faldón presenta un comportamiento estadístico que, a simple vista, resulta contradictorio, ya que a medida que el daño geométrico se agrava, tanto la tasa de repetición como la magnitud del Q_{95} decaen drásticamente, llegando a registrar actividad prácticamente nula en el nivel de corte severo. Al igual que lo observado en la condición de superficie limpia, esta ausencia de descargas parciales no es un indicador de sanidad dieléctrica, sino la confirmación de una severa pérdida de integridad física. La diferencia radica en que la combinación del corte estructural con la contaminación salina agudiza esta caída hasta un punto crítico. Al observar las etiquetas en la Figura 30, se evidencia que el umbral de ruptura de estas probetas se desplomó a valores insostenibles (entre 6,6 kV y 12,7 kV). Al realizar el ensayo al 60 % de dicho límite, el potencial eléctrico es estrictamente insuficiente para encender y sostener un régimen de descargas parciales.

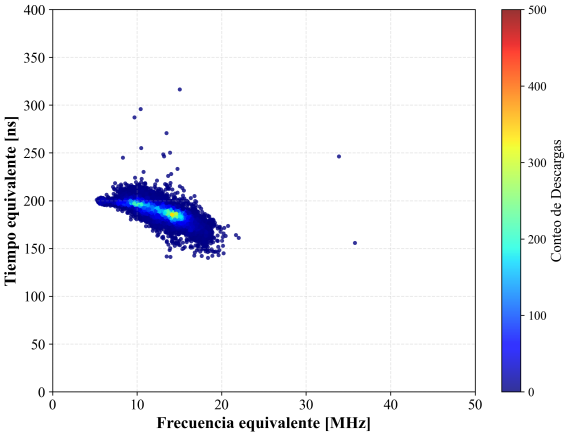
En la Figura 31 se presenta la comparativa entre el caso base y las condiciones de falla más críticas bajo el entorno salino.



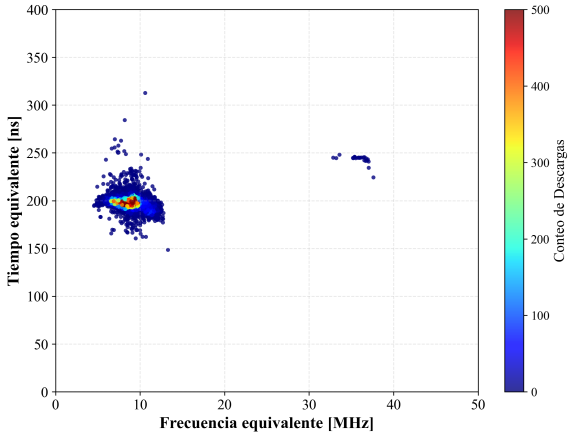
(a) Caso Base (-)



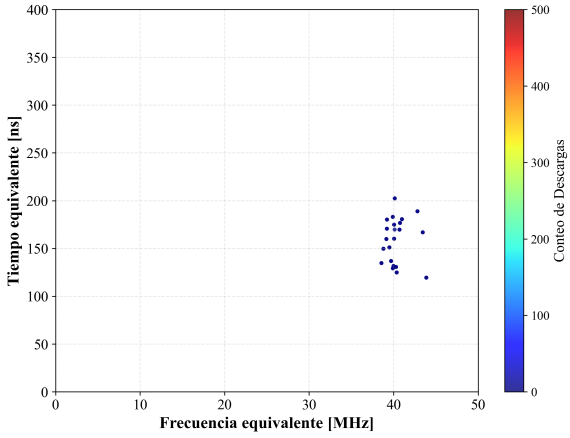
(b) Caso Base (+)



(c) Núcleo Expuesto Severo (-)



(d) Núcleo Expuesto Severo (+)



(e) Corte de Faldón Severo (+)

Figura 31: Comparativa mapas TF bajo contaminación E5.

Al comparar los mapas espectrales, se ve que a diferencia de la condición limpia, el entorno humedecido fomenta la formación de una nube densa y masiva de pulsos desplazada hacia frecuencias equivalentes más bajas (entre 5 y 25 MHz) y de tiempos equivalentes menores (150 a 250 ns).

Para el caso base, la polaridad negativa (Figura 31(a)) logra mantener cierta estabilidad superficial, exhibiendo una nube de baja densidad que conserva rastros del clúster dieléctrico original a 40 MHz. Sin embargo, al invertir a polaridad positiva (Figura 31(b)), el aislador sano cede ante la contaminación, generando una saturación masiva y concentrada de actividad en torno a los 10 MHz.

Por el contrario, las probetas con núcleo expuesto severo (Figuras 31(c) y 31(d)) muestran un desarrollo marcado en ambas polaridades. A diferencia de la concentración puntual observada en el caso sano, los eventos en el núcleo dañado tienden a estabilizarse temporalmente cerca de los 200 ns, pero se extienden horizontalmente abarcando un espectro frecuencial inusualmente amplio, desde los 5 MHz hasta los 20 MHz.

Por último, las fallas tipo corte de faldón severo (Figura 31(e)) presentan un comportamiento radicalmente opuesto, mostrando una ausencia practicamente total de actividad. Como se explicó previamente en el análisis estadístico, esta falta de actividad no es un indicador de sanidad, sino la consecuencia directa de la degradación estructural crítica de la probeta. En la polaridad positiva, al ser el umbral de ruptura ligeramente superior, el sistema alcanza a registrar apenas una actividad marginal, débil y desorganizada. Sin embargo, para la polaridad negativa, donde la tensión de ensayo ronda apenas los 7 kV, el potencial eléctrico es estrictamente insuficiente para encender y sostener cualquier régimen de actividad precursora antes de desencadenar el contorneo directo.

4.3.3. Análisis global del comportamiento de descargas parciales

A partir del análisis comparativo entre los escenarios de superficie limpia y bajo contaminación artificial E5, se determina que la medición de descargas parciales (DP) actúa como un indicador diagnóstico de viabilidad estrictamente condicional para la detección de fallas físicas en aisladores poliméricos bajo tensión continua. Su efectividad para revelar defectos estructurales depende de manera crítica de la presencia de un medio conductor superficial.

Para visualizar este fenómeno de manera integral, la Figura 32 presenta un diagrama de dispersión que consolida la totalidad de los ensayos, contrastando la tasa de repetición de pulsos frente a la magnitud de las descargas (Q_{95}). En este gráfico se identifican claramente dos macrocomportamientos o clústeres principales que definen los regímenes de operación del polímero.

Al observar la distribución de los datos en la Figura 32, se identifican claramente dos clústeres

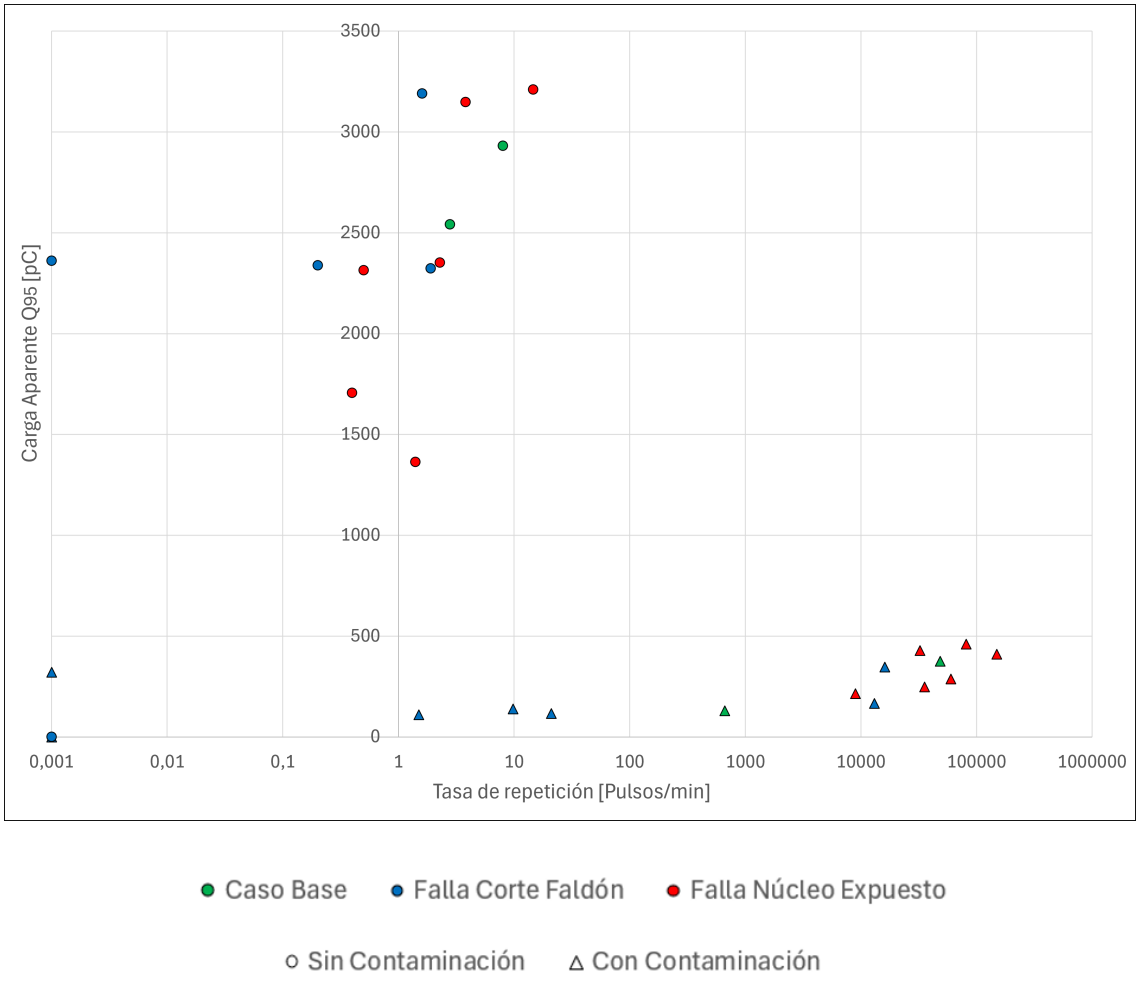


Figura 32: Relación entre la carga aparente y la tasa de repetición de descargas parciales.

principales que definen los regímenes de descargas parciales.

En el cuadrante superior izquierdo, distribuidos de forma mucho más descentralizada, se ubican los casos sin contaminación. Estos registros evidencian eventos sumamente energéticos, superando los 3.000 pC de magnitud debido a la gran acumulación de campo eléctrico previa a la ruptura, pero caracterizados por una tasa de repetición ínfima. Esta escasez de eventos complica significativamente el análisis, ya que el comportamiento estadístico de las probetas con fallas resulta prácticamente indistinguible del caso base. Al no lograr consolidar un patrón claro, se evidencia que, en ambientes limpios y secos, el monitoreo de descargas parciales carece de la sensibilidad necesaria para operar como una herramienta predictiva confiable y diferenciar una unidad dañada de una sana.

Por el contrario, el grupo situado en el cuadrante inferior derecho agrupa a los casos bajo contaminación salina E5. En este escenario, la dinámica se transforma radicalmente, ya que la magnitud individual de los pulsos disminuye, pero la tasa de repetición se incrementa de forma masiva. Es precisamente en este régimen donde se pueden notar claras diferencias visuales entre las probetas.

En esta zona, los casos con exposición de núcleo tienden a posicionarse con una mayor tasa de repetición de pulsos y una magnitud de carga superior a las unidades sanas. Por otra parte, se puede notar cómo las fallas por corte de faldón exhiben un comportamiento particular, se reparten por la zona inferior del gráfico (registrando las cargas más bajas) sin importar su condición ambiental, y se desplazan progresivamente hacia menores tasas de repetición a medida que aumenta la severidad del daño, hasta llegar a los casos más críticos en el extremo inferior izquierdo, donde la degradación geométrica es tal que se dejan de emitir descargas parciales por completo antes del contorneo directo.

4.4. Efecto del envejecimiento acelerado

Para complementar el análisis del desempeño dieléctrico, se evaluó el impacto de un ciclo de envejecimiento termo-mecánico acelerado sobre el caso base y la falla de núcleo expuesto severo. A continuación, se contrastan los resultados obtenidos para ambas unidades tras ser sometidas a las etapas de inmersión, congelación y calentamiento descritas en la metodología.

4.4.1. Resultados del ensayo de tensión de ruptura

A continuación se presentan los resultados correspondientes a la tensión de ruptura dieléctrica obtenidos tras someter a las probetas al ciclo exploratorio de inmersión, congelación y horneado, detallado previamente en la metodología. Para este análisis de escenario límite, se evaluó el desempeño del caso base y de la probeta con falla de núcleo expuesto severo.

En la Figura 33 se detalla el comportamiento de la tensión de ruptura para las unidades envejecidas bajo ambas polaridades de excitación. El gráfico incluye intencionalmente al caso base en su estado original (sin envejecer) como punto de referencia absoluto, lo que permite visualizar de forma directa la degradación intrínseca inducida por el ensayo ambiental frente a la capacidad de aislación inicial del equipo.

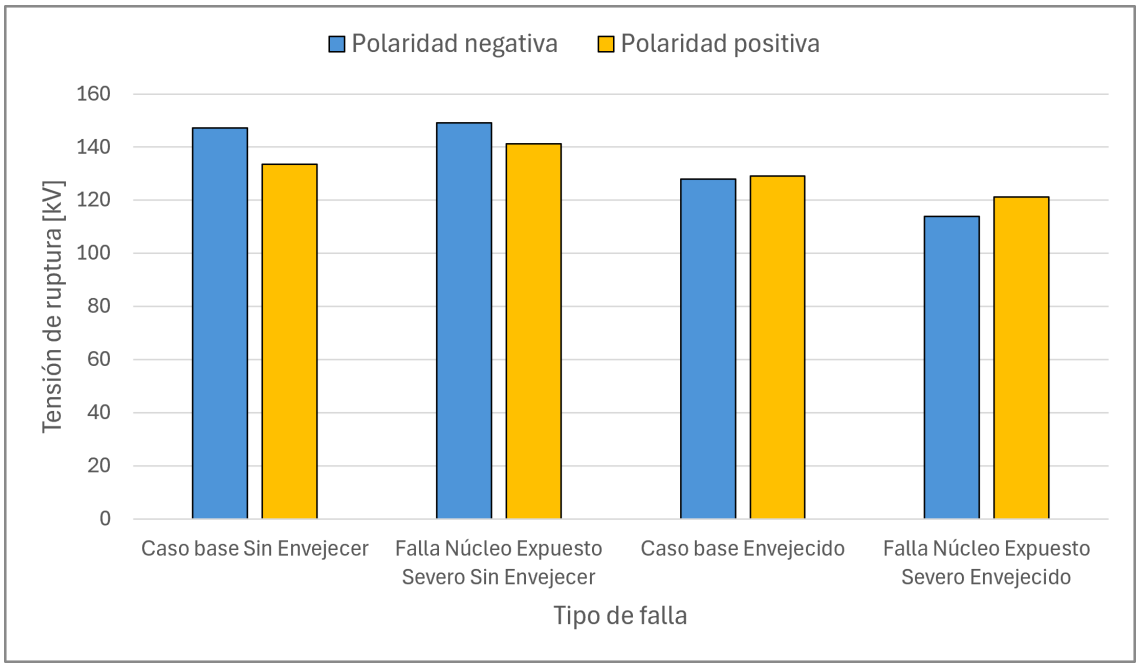


Figura 33: Tensión de ruptura tras el ciclo de envejecimiento acelerado.

Para cuantificar de manera precisa el impacto de la intrusión de humedad, la Tabla 9 detalla el porcentaje de reducción de la tensión de ruptura promedio para cada probeta tras el ciclo. Estos

valores fueron calculados tomando como referencia exclusiva el caso base original evaluado bajo su respectiva polaridad.

Tabla 9: Reducción porcentual de la tensión de ruptura promedio tras envejecimiento.

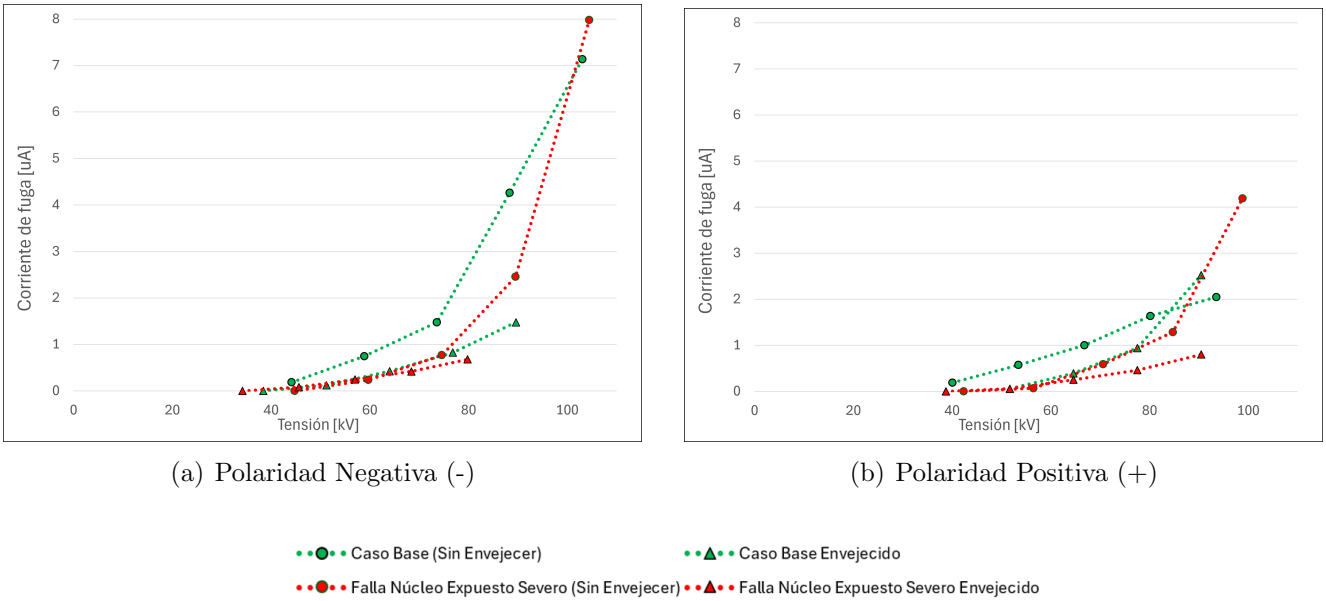
Condición de la Probeta	**Reducción post-envejecimiento**	
	Positiva	**Negativa**
Caso Base (Sin Envejecer)	-	-
Caso Base Envejecido	-3 %	-13 %
Núcleo Expuesto Severo (Sin Envejecer)	-	-
Núcleo Expuesto Severo Envejecido	-14 %	-24 %

En primer lugar, los datos experimentales revelan que el ciclo de estrés térmico-ambiental afecta negativamente el desempeño dieléctrico, incluso en unidades en buen estado. El caso base envejecido experimentó una reducción en su umbral de ruptura, cayendo a promedios de 129,2 kV y 128,0 kV bajo polaridad positiva y negativa. Este comportamiento sugiere que los gradientes térmicos logran vulnerar temporalmente la matriz superficial de la silicona; no obstante, al carecer de daños estructurales previos, el equipo logra mantener un margen de aislamiento robusto.

Por el contrario, el impacto es más agresivo en el núcleo expuesto. Tras ser sometido al mismo ciclo ambiental, su tensión de ruptura se desplomó hasta los 121,2 kV y 114,0 kV (positiva y negativa, respectivamente). Un hallazgo destacable durante la ejecución de este ensayo fue que la ruptura dieléctrica no se manifestó a través de un arco superficial visible, como ocurría en los otros escenarios evaluados, sino que únicamente pudo ser detectada de forma sonora. Este comportamiento sugiere fuertemente la formación de un camino conductivo interno para la descarga, demostrando que la penetración del agua hacia la fibra de vidrio y las posteriores fases de expansión por hielo y dilatación térmica agravaron mecánicamente la separación interfacial, mermando drásticamente la capacidad del núcleo para soportar el gradiente eléctrico antes del contorneo.

4.4.2. Comportamiento de la corriente de fuga

Para complementar el análisis de la degradación, se evaluó la evolución de la corriente de fuga total frente al incremento de tensión. En la Figura 34 se presenta el comportamiento de las unidades sometidas al ciclo térmico-ambiental, incluyendo el trazado del caso base en su estado original como referencia.



(a) Polaridad Negativa (-)

(b) Polaridad Positiva (+)

Figura 34: Evolución de la magnitud de la corriente de fuga total tras el ciclo de envejecimiento acelerado.

A partir del análisis de las curvas, se observa un cambio fundamental en la dinámica de conducción de las unidades envejecidas. A diferencia del caso base original, el cual desarrolla un crecimiento de corriente marcadamente exponencial en las etapas previas al contorneo, tanto el caso base envejecido como la probeta con núcleo expuesto exhiben trayectorias truncadas, con un crecimiento mucho más lineal y de menor magnitud.

Al no registrarse el aumento drástico de corriente típico que precede a un arco visible en el aire, los datos sugieren que el envejecimiento de los aisladores creó un camino de menor resistencia al interior de estos. En consecuencia, la corriente se canalizó a través de este defecto, generando el contorneo internamente y provocando el colapso abrupto sin dar lugar a un desarrollo significativo en la magnitud de la corriente de fuga.

Dinámica de las descargas parciales post-envejecimiento acelerado

Para culminar la caracterización dieléctrica de los escenarios límite sometidos al ciclo de envejecimiento térmico-ambiental, se evaluó la actividad de descargas parciales. Siguiendo la misma metodología empleada para los casos anteriores, el análisis integra la magnitud (Q_{95}) y la tasa de repetición de los eventos capturados por el analizador OMICRON, junto con la caracterización de la huella espectral mediante los mapas de tiempo-frecuencia (TF) obtenidos con el osciloscopio.

En la Figura 35 se presenta la magnitud de la carga aparente (Q_{95}) para las probetas envejecidas, mientras que la Tabla 10 resume las tasas de repetición de los eventos validados por el equipo

OMICRON.

Tabla 10: Tasa de repetición de pulsos post-ciclado de envejecimiento acelerado.

Condición de la Probeta	**Tasa de pulsos [pulsos/min]**	
	Polaridad Negativa	**Polaridad Positiva**
Caso Base Envejecido	2	4492,7
Núcleo Expuesto Severo Envejecido	1,1	2574,7

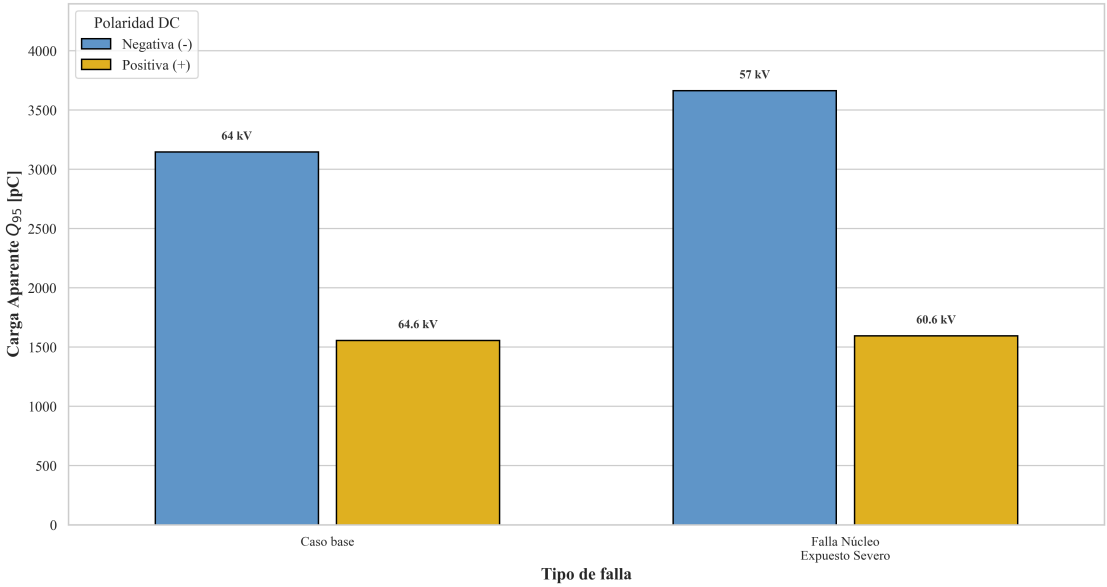


Figura 35: Magnitud de las descargas (Q_{95}) tras el ciclo de envejecimiento acelerado.

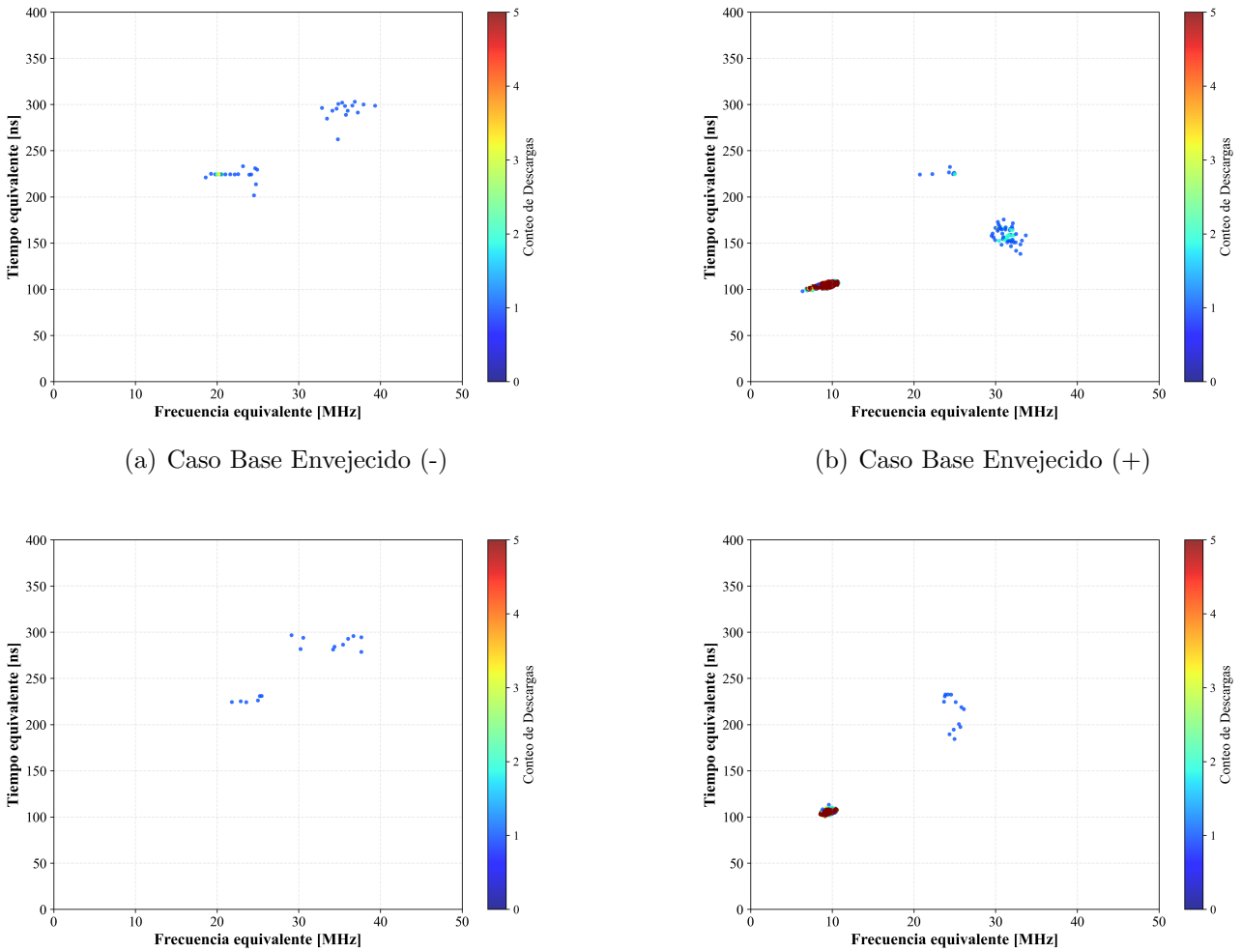
A partir de los datos registrados, se evidencia que el estrés térmico-ambiental modifica la dinámica de las descargas parciales, generando un comportamiento híbrido dependiendo de la polaridad de excitación.

En cuanto a la magnitud de los eventos, la Figura 35 revela que ambas probetas alcanzan niveles de carga aparente (Q_{95}) que superan los 1.000 pC, asemejándose a las magnitudes observadas previamente en la condición limpia sin envejecer. Dentro de este parámetro, destaca una marcada dominancia de la polaridad negativa, la cual registra magnitudes que prácticamente duplican las observadas bajo excitación positiva, llegando a superar los 3.600 pC en el caso de la probeta con núcleo expuesto severo.

Por otro lado, el análisis de la tasa de repetición (Tabla 10) expone un contraste frente a lo observado en las primeras pruebas. Mientras que en polaridad negativa la ocurrencia de pulsos

es mínima, la polaridad positiva desencadena una actividad sostenida. El caso base envejecido y la falla de núcleo expuesto registran tasas de 4492 y 2574 pulsos/min, respectivamente, valores que representan un incremento de hasta mil veces en comparación con la baja actividad que estas mismas unidades presentaban en su estado limpio original.

En la Figura 36 se presenta la comparación entre la unidad base y la falla severa tras el envejecimiento acelerado.



(a) Caso Base Envejecido (-)

(b) Caso Base Envejecido (+)

(c) Núcleo Expuesto Severo Envejecido (-)

(d) Núcleo Expuesto Severo Envejecido (+)

Figura 36: Comparativa mapas TF tras envejecimiento acelerado.

Al observar las capturas, resulta evidente que el estrés termo-ambiental transforma la huella de las descargas. Bajo polaridad positiva (Figuras 36(b) y 36(d)), ambas unidades exhiben una gran actividad. Tanto el caso base envejecido como la falla de núcleo expuesto generan un clúster denso y focalizado, el cual se posiciona en frecuencias bajas (en torno a los 10 MHz) y tiempos equivalentes mucho más cortos (cercanos a los 100 ns).

Este patrón espectral, caracterizado por bajas frecuencias y tiempos cortos, sigue una tendencia similar a la observada en los ensayos bajo contaminación. No obstante, en las unidades envejecidas la actividad se presenta de forma mucho más concentrada y con una tasa de repetición significativamente menor, acercándose al comportamiento estadístico del escenario limpio.

En contraste, bajo polaridad negativa, la actividad queda severamente suprimida. Tanto el caso base (Figura 36(a)) como la probeta con núcleo expuesto (Figura 36(c)) apenas registran puntos aislados, segregados en dos zonas tenues (alrededor de los 22 MHz y 35 MHz). Si bien esta bajísima densidad visual podría estar parcialmente influenciada por el hecho de que la tensión absoluta de ensayo aplicada fue menor en comparación a la polaridad positiva, a diferencia de los entornos anteriores, la brecha de voltaje entre ambas polaridades tras el envejecimiento no es tan marcada.

5. Conclusiones y trabajos futuros

En esta sección se presentan las conclusiones principales derivadas del análisis de los resultados experimentales, consolidando la relación entre el comportamiento eléctrico observado en el laboratorio y los mecanismos físicos de degradación del caucho de silicona. Se exponen los hallazgos definitivos sobre cómo interactúan los tres parámetros medidos (tensión de ruptura, corriente de fuga y descargas parciales) frente a los cambios de polaridad, la presencia de contaminación severa y los diferentes daños físicos de las probetas. Finalmente, sobre la base de esta caracterización diagnóstica, se proponen directrices para futuros trabajos de investigación.

A partir de la evaluación transversal de los ensayos, se concluyen los siguientes lineamientos generales respecto a la degradación dieléctrica de los aisladores:

- Se comprobó empíricamente que la degradación resultante de combinar alteraciones geométricas con contaminación (clase E5) no equivale a la suma aritmética de ambos factores. La película electrolítica magnifica drásticamente el impacto de la pérdida de distancia de fuga, provocando un colapso dieléctrico prematuro que reduce la tensión de ruptura hasta en un 89 % respecto a un aislador sano.
- La polaridad más crítica para el contorneo varía según la condición superficial, resultando la polaridad positiva más perjudicial en ambientes limpios y la negativa en condiciones de contaminación. Esta inversión podría explicarse por un cambio en el mecanismo de ruptura al introducirse la presencia de contaminantes, al desarrollarse mediante la formación progresiva de caminos conductivos sobre la superficie del aislador hasta que se alcanza la ruptura.
- Se determinó que el registro de DP carece de la sensibilidad necesaria para detectar daños físicos estructurales en entornos secos, dada su ínfima tasa de repetición. Su efectividad como herramienta de diagnóstico predictivo depende estrictamente de la presencia de un medio conductor superficial (humedad y contaminación) que estimule una actividad de descargas parciales continua y masiva.
- El ensayo exploratorio de envejecimiento acelerado reveló que la penetración de humedad y los gradientes térmicos generan daños estructurales en la interfaz del polímero con el núcleo. Esto induce la formación de trayectorias de baja impedancia que canalizan la descarga internamente, provocando rupturas abruptas y silenciosas que eluden el desarrollo de las señales eléctricas superficiales precursoras.

5.1. Caracterización de las fallas físicas

A partir de la ejecución secuencial de los ensayos de tensión de ruptura, medición de corrientes de fuga y análisis de descargas parciales, ha sido posible establecer un diagnóstico integral del impacto que cada defecto físico ejerce sobre la integridad del aislador polimérico. El cruce de estas tres variables experimentales demuestra que el deterioro dieléctrico no es uniforme, sino que cada alteración geométrica presenta un mecanismo de falla con características eléctricas y espectrales sumamente particulares. A continuación, se resumen los perfiles distintivos de las fallas estudiadas.

5.1.1. Falla por corte de faldón

La remoción de material en las aletas del perfil polimérico constituye una falla de naturaleza puramente geométrica que compromete de forma directa la distancia de fuga del equipo. El cruce de los distintos ensayos realizados permite caracterizar su impacto en el desempeño dieléctrico y evaluar la viabilidad de su detección mediante diversas técnicas, destacando el siguiente comportamiento:

- **Tensión de Ruptura:** Este parámetro captura de manera directa y proporcional la drástica reducción de las capacidades dieléctricas del equipo. A medida que el daño geométrico en los faldones se agudiza, el umbral de ruptura experimenta un descenso crítico, llevando al aislador a niveles de operación insostenibles, una vulnerabilidad que se acentúa aún más bajo la influencia de entornos contaminados.
- **Corrientes de Fuga:** Su efectividad como indicador diagnóstico resulta ser condicional. Ante daños ligeros o incipientes interactuando con un ambiente contaminado, la medición sí logra registrar un aumento claro en la magnitud de las corrientes de fuga respecto al aislador sano. Sin embargo, a medida que el nivel de severidad del corte aumenta, la evaluación se vuelve inviable; la drástica reducción geométrica precipita un contorneo prematuro que interrumpe abruptamente el desarrollo de las corrientes de fuga antes de que estas alcancen valores estables o de alarma.
- **Descargas Parciales:** El monitoreo de DP presenta un comportamiento análogo al de las corrientes de fuga, manifestando una mayor actividad únicamente bajo el estímulo de la contaminación salina. No obstante, frente a cortes severos, esta técnica pierde por completo su capacidad predictiva. Al estar el camino resistivo severamente acortado, el gradiente eléctrico es incapaz de acumular el estrés necesario para encender y sostener descargas parciales, resultando en un colapso estructural directo sin emitir actividad precursora que pueda ser detectada por los sistemas de monitoreo convencionales.

Para sintetizar el perfil diagnóstico de esta falla, la Tabla 11 presenta los rangos de valores experimentales típicos observados a lo largo de la caracterización.

Tabla 11: Perfil diagnóstico y rangos típicos de medición para la falla por corte de faldón.

Parámetro	**Limpio**	**Contaminación E5**
Tensión de Ruptura	∼94 kV a ∼135 kV	∼11 kV a ∼107 kV
Corriente de Fuga	∼0 μA a ∼4 μA	∼5 μA a ∼60 μA
Descargas Parciales	Tasa: ∼0 a ∼2 pulsos/min Magnitud: ∼0 a ∼3.200 pC	Tasa: ∼0 a ∼16000 pulsos/min Magnitud: ∼0 a ∼350 pC

5.1.2. Falla por exposición de núcleo

A diferencia del corte de faldón, la exposición del núcleo de fibra de vidrio (FRP) representa una falla de naturaleza interfacial y material. Su característica más destacable es su extrema susceptibilidad a las condiciones ambientales, producto de la naturaleza intrínsecamente hidrofílica de la matriz de fibra. El cruce de las distintas variables experimentales revela un perfil diagnóstico muy particular, detallado a continuación:

- **Tensión de Ruptura:** La evaluación del umbral disruptivo no resulta ser un indicador confiable para la detección de este defecto. Los resultados experimentales demuestran que, independientemente de la polaridad, la condición ambiental y el nivel de severidad de la exposición, la probeta soporta niveles de tensión prácticamente idénticos a los de un aislador sano. Este comportamiento se explica porque la falla por exposición de núcleo no altera la distancia de fuga geométrica efectiva del aislador; al mantenerse constante la trayectoria de contorneo sobre la superficie, la capacidad aislante del equipo frente a sobretensiones permanece inalterada a pesar de la pérdida localizada de revestimiento.
- **Corrientes de Fuga:** El desempeño de esta medición como indicador diagnóstico es estrictamente dependiente del entorno. En escenarios con la superficie limpia y seca, los valores de corriente registrados no presentan diferencias apreciables respecto a una unidad sana, haciendo que la falla pase completamente inadvertida. Sin embargo, al interactuar con un entorno

contaminado, la capacidad de absorción de la fibra expuesta se activa, provocando que estas probetas presenten sistemáticamente mayores magnitudes de corriente de fuga en comparación con el caso base. Adicionalmente, se observa que este deterioro resistivo superficial crece en proporción directa a la severidad del daño.

- **Descargas Parciales:** De manera análoga a las corrientes de fuga, en un estado limpio y seco las emisiones de DP se mantienen en niveles tan bajos y esporádicos que su comportamiento estadístico y espectral resulta indistinguible del de un aislador en perfectas condiciones. No obstante, el monitoreo despliega su máxima capacidad diagnóstica al introducir el ambiente contaminado. Al humedecerse, la inestabilidad de la interfaz expuesta genera el escenario más agresivo de todo el set experimental: estas fallas presentan las mayores magnitudes de carga aparente y las tasas de repetición más altas del ensayo, llegando a triplicar el número de pulsos por segundo registrados en una unidad sana bajo la misma contaminación. Asimismo, esta respuesta se traduce en una firma diagnóstica única en los mapas TF, donde los eventos tienden a estabilizarse temporalmente cerca de los 200 ns pero exhiben un ensanchamiento horizontal inusualmente amplio que abarca desde los 5 MHz hasta los 20 MHz. Esta incesante y dispersa actividad de descargas parciales evidencia un régimen continuo que, aunque no disminuye la tensión de ruptura inmediata, acelera dramáticamente la degradación a largo plazo del aislador.

Para sintetizar el perfil diagnóstico de esta falla, la Tabla 12 presenta los rangos de valores experimentales típicos observados a lo largo de la caracterización.

Tabla 12: Perfil diagnóstico y rangos típicos de medición para la falla por exposición de núcleo.

Parámetro	**Limpio**	**Contaminación E5**
Tensión de Ruptura	$\sim$138 kV a $\sim$149 kV	$\sim$100 kV a $\sim$109 kV
Corriente de Fuga	$\sim$0 μA a $\sim$11 μA	$\sim$5 μA a $\sim$83 μA
Descargas Parciales	Tasa: $\sim$0 a $\sim$15 pulsos/min Magnitud: $\sim$1.350 a $\sim$3.200 pC	Tasa: $\sim$9000 a $\sim$150000 pulsos/min Magnitud: $\sim$250 a $\sim$460 pC

5.2. Trabajos futuros

A partir de los hallazgos y las limitaciones identificadas durante el desarrollo de esta investigación, se proponen las siguientes líneas de trabajo para futuras investigaciones, con el objetivo de profundizar en el diagnóstico y la caracterización de aisladores poliméricos:

- El ensayo exploratorio demostró que el estrés climático altera el mecanismo de falla. Se recomienda diseñar estudios a mayor escala que sometan a los aisladores poliméricos a ciclos de envejecimiento estandarizados (ej. radiación UV, cámara de niebla salina prolongada, estrés termo-mecánico). De este modo, se podría avanzar hacia la caracterización de nuevos tipos de falla que vayan más allá de los daños físicos directos abordados en este estudio, reproduciendo de manera controlada los diversos mecanismos de degradación progresiva que sufren los equipos al operar en distintos entornos ambientales, tales como zonas costeras de alta salinidad, áreas de contaminación industrial o regiones sometidas a oscilaciones térmicas extremas.
- Se sugiere la integración de diversas tecnologías de monitoreo complementario para identificar con mayor precisión el instante y la ubicación de la ruptura en unidades con alto grado de deterioro. Dado que el colapso en estos casos puede manifestarse de forma interna, el uso de herramientas como cámaras termográficas (IR), sensores de emisión acústica o sistemas de detección de radiofrecuencia permitiría capturar precursores térmicos, mecánicos o electromagnéticos asociados a la falla. Estas mediciones facilitarían la localización de puntos calientes o trayectorias de conducción internas antes de la ruptura definitiva, permitiendo caracterizar el fenómeno con una trazabilidad que los métodos visuales convencionales no pueden proporcionar.

Referencias

[1] CIGRE Working Group B2.03, "Outdoor insulation in polluted conditions: Guidelines for selection and dimensioning - part 2: The dc case," Tech. Rep. 518, CIGRE, 2012.

[2] E. Kuffel, W. S. Zaengl, and J. Kuffel, *High Voltage Engineering: Fundamentals*. Newnes, 2nd ed., 2000.

[3] S. Gubanski, A. Dernfalk, J. Andersson, and H. Hillborg, "Diagnostic methods for outdoor polymeric insulators," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 14, pp. 1065–1080, Oct 2007.

[4] L. Ming, L. Yangyang, and H. Jianlin, "Influence of sheds damage on the ac pollution flashover performance of different voltage class composite insulators," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 84713–84719, 2020.

[5] G. Georgiev, M. Ivanova, R. Dimitrova, and Y. Rangelov, "Polymeric composite insulators for overhead power lines. a review of in-service damages and diagnostic approaches," in *2021 17th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*, IEEE, 2021.

[6] International Electrotechnical Commission, "Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions part 4 ceramic and glass insulators for d.c. systems," Technical Specification IEC/TS 60815-4, International Electrotechnical Commission, october 2018.

[7] International Electrotechnical Commission, "Artificial pollution tests on high-voltage ceramic and glass insulators to be used on d.c. systems," Technical Specification IEC/TS 61245, International Electrotechnical Commission, 2015.

[8] I. Kimoto, T. Fujimura, and K. Naito, "Performance of insulators for direct current transmisson line under polluted condition," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-92, pp. 943–949, May 1973.

[9] A. C. Baker, L. E. Zaffanella, L. D. Anzivino, H. M. Schneider, and J. H. Moran, "A comparison of HVAC and HVDC contamination performance of station post insulators," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, pp. 1486–1491, April 1989.

[10] A. Pigini *et al.*, "Performance of insulators for EHVDC systems under polluted conditions," in *Cigré Paris Session*, 1988. Paper 33.22.

[11] International Electrotechnical Commission, "Iec/ts 60815-1: Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions - part 1: Definitions, information and general principles," technical specification, International Electrotechnical Commission, 2008.

[12] N. C. Mavrikakis, P. N. Mikropoulos, K. Siderakis, I. Pellas, and E. Thalassinakis, "Evaluation of the damage caused by bird pecking activity along composite high voltage insulators," in *2018 IEEE*, IEEE, 2018.

[13] L. Ming, L. Yangyang, and H. Jianlin, "Influence of sheds damage on the ac pollution flashover performance of different voltage class composite insulators," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 84713–84719, 2020.

[14] P. Rajamani, K. A. Aravind, and P. M. Nirgude, "Impact of common defects in silicone composite long rod insulators on radio frequency interference spectra," in *2022 1st International Conference on Electrical, Electronics, Information and Communication Technologies (ICEEICT)*, IEEE, 2022.

[15] G. Göcsei, B. Németh, and I. Berta, "Brittle fracture of high voltage composite insulators-a new method in inspection and detection," in *2014 Electrical Insulation Conference (EIC)*, pp. 213–217, IEEE, 2014.

[16] International Electrotechnical Commission, "IEC TS 62073: Guidance on the measurement of wettability of insulator surfaces," norma técnica, IEC, Ginebra, Suiza, 2016.

[17] SILPAK S.A. Manufacturas de Silicona, *Aisladores Poliméricos de Silicona Suspensión - Retención*. Ficha técnica, División Eléctrica.

[18] Esri / ArcGIS, "Mapa base topográfico y de relieve, visor interactivo del trazado kimal - lo aguirre." [En línea]. Disponible en plataforma ArcGIS Online, 2026. Accedido: 2 de julio de 2026.

[19] M. I. I. Jorquera, "Análisis del desempeño de aisladores en condiciones de contaminación bajo excitación continua mediante medición de descargas parciales," octubre 2024.

[20] International Electrotechnical Commission, "High-voltage test techniques part 1: General definitions and test requirements," International Standard IEC 60060-1, International Electrotechnical Commission, 2010.

[21] International Electrotechnical Commission, "High-voltage test techniques - partial discharge measurements," International Standard IEC 60270, International Electrotechnical Commission, 2000.

Anexo A. Tablas de resultados experimentales

A.1. Tensión de ruptura

Tabla 13: Tensiones de ruptura para polaridad negativa y positiva en condiciones sin contaminación.

Ruptura Polaridad Negativa	**Ensayos [kV]**					**Promedio**
Sin contaminación	1	2	3	4	5	**[kV]**
Caso base	144	148	150	150	144	147,2
Falla Corte Faldón Ligero	128	136	134	138	140	135,2
Falla Corte Faldón Intermedio	118	118	120	124	122	120,4
Falla Corte Faldón Severo	98	100	106	106	104	102,8
Falla Núcleo Expuesto Ligero	146	148	146	144	144	145,6
Falla Núcleo Expuesto Intermedio	144	146	146	142	146	144,8
Falla Núcleo Expuesto Severo	152	152	148	148	146	149,2
Ruptura Polaridad Positiva	1	2	3	4	5	**Promedio**
Caso base	132	134	132	134	136	133,6
Falla Corte Faldón Ligero	122	120	118	120	122	120,4
Falla Corte Faldón Intermedio	116	116	116	118	116	116,4
Falla Corte Faldón Severo	98	96	92	92	92	94,0
Falla Núcleo Expuesto Ligero	142	138	134	144	140	139,6
Falla Núcleo Expuesto Intermedio	136	136	140	136	140	137,6
Falla Núcleo Expuesto Severo	140	142	144	136	144	141,2

Tabla 14: Tensiones de ruptura para polaridad negativa y positiva en condiciones con contaminación.

Ruptura Polaridad Negativa	**Ensayos [kV]**					**Promedio**
Con contaminación	1	2	3	4	5	**[kV]**
Caso base	100	98	104	98	96	99,2
Falla Corte Faldón Ligero	96	94	94	96	94	94,8
Falla Corte Faldón Intermedio	42	36	37	41	35	38,2
Falla Corte Faldón Severo	11	12	14	10	8	11,0
Falla Núcleo Expuesto Ligero	100	100	102	98	100	100,0
Falla Núcleo Expuesto Intermedio	100	98	102	104	98	100,4
Falla Núcleo Expuesto Severo	98	102	102	106	98	101,2
Ruptura Polaridad Positiva	1	2	3	4	5	**Promedio**
Caso base	112	112	110	112	110	111,2
Falla Corte Faldón Ligero	104	108	104	110	110	107,2
Falla Corte Faldón Intermedio	42	41	41	40	42	41,2
Falla Corte Faldón Severo	24	22	20	20	20	21,2
Falla Núcleo Expuesto Ligero	110	108	108	108	108	108,4
Falla Núcleo Expuesto Intermedio	109	110	109	109	108	109,0
Falla Núcleo Expuesto Severo	104	110	106	108	104	106,4

Tabla 15: Tensiones de ruptura para polaridad negativa y positiva tras envejecimiento acelerado.

Ruptura Polaridad Negativa	**Ensayos [kV]**					**Promedio**
Envejecimiento acelerado	1	2	3	4	5	**[kV]**
Caso base	126	128	128	126	132	128
Falla Núcleo Expuesto Severo	112	114	112	116	116	114
Ruptura Polaridad Positiva	1	2	3	4	5	**Promedio**
Caso base	128	126	128	132	132	129,2
Falla Núcleo Expuesto Severo	118	120	124	120	124	121,2

A.2. Corriente de fuga - Sin contaminación

Tabla 16: Corriente de fuga [μA] sin contaminación - Polaridad Negativa - 70 % de Tensión.

t [s]	Caso Base	C. Ligero	C. Interm.	C. Severo	N. Ligero	N. Interm.	N. Severo
0	7,16	4,57	2,88	1,71	2,68	11,50	7,92
5	6,91	4,51	2,88	1,69	2,69	11,27	7,94
10	7,13	4,37	2,88	1,66	2,67	11,62	7,96
15	7,18	4,28	2,82	1,66	2,62	11,54	7,93
20	7,28	4,36	2,80	1,65	2,62	11,74	7,88
25	7,13	4,05	2,76	1,64	2,62	11,60	7,98
30	6,99	3,85	2,80	1,64	2,63	11,29	8,01
35	7,15	3,89	2,76	1,63	2,61	11,08	8,06
40	7,31	3,88	2,79	1,58	2,62	11,78	8,05
45	7,27	3,89	2,79	1,56	2,60	11,19	8,02
50	7,16	3,79	2,83	1,57	2,56	11,88	8,04
55	7,08	3,87	2,79	1,54	2,55	11,84	8,00
60	7,01	3,84	2,71	1,51	2,53	10,48	7,94
Prom.	**7,1353**	**4,0884**	**2,8069**	**1,6184**	**2,6153**	**11,4469**	**7,9792**

Tabla 17: Corriente de fuga [μA] sin contaminación - Polaridad Negativa - 60 % de Tensión.

t [s]	Caso Base	C. Ligero	C. Interm.	C. Severo	N. Ligero	N. Interm.	N. Severo
0	4,27	2,20	1,23	0,95	1,58	8,37	2,28
5	4,29	2,02	1,25	0,96	1,57	8,39	2,27
10	4,27	1,81	1,24	0,93	1,56	8,83	2,34
15	4,26	1,87	1,25	0,93	1,56	8,58	2,32
20	4,25	1,87	1,24	0,94	1,55	8,50	2,30
25	4,22	1,87	1,22	0,92	1,55	8,48	2,34
30	4,27	1,86	1,25	0,92	1,55	8,38	2,36
35	4,27	1,86	1,24	0,93	1,55	8,29	2,44
40	4,25	1,85	1,23	0,93	1,56	7,86	2,44
45	4,28	1,87	1,26	0,94	1,55	8,14	2,68
50	4,25	1,81	1,23	0,93	1,54	7,85	2,72
55	4,28	1,81	1,23	0,93	1,55	7,89	2,70
60	4,27	1,97	1,23	0,93	1,56	7,56	2,77
Prom.	**4,2638**	**1,8976**	**1,2384**	**0,9338**	**1,5561**	**8,24**	**2,4553**

Tabla 18: Corriente de fuga [μA] sin contaminación - Polaridad Negativa - 50 % de Tensión.

t [s]	Caso Base	C. Ligero	C. Interm.	C. Severo	N. Ligero	N. Interm.	N. Severo
0	1,50	1,02	0,54	0,30	0,93	0,93	0,77
5	1,51	1,01	0,55	0,31	0,94	0,94	0,77
10	1,50	1,01	0,56	0,31	0,93	0,94	0,76
15	1,50	1,01	0,54	0,31	0,92	0,94	0,76
20	1,48	1,00	0,55	0,32	0,91	0,94	0,78
25	1,46	1,00	0,55	0,33	0,89	0,93	0,77
30	1,47	0,99	0,55	0,33	0,89	0,93	0,77
35	1,46	1,00	0,55	0,33	0,89	0,93	0,77
40	1,45	1,00	0,55	0,32	0,89	0,92	0,77
45	1,45	0,99	0,54	0,32	0,89	0,91	0,77
50	1,46	0,99	0,54	0,33	0,89	0,92	0,77
55	1,47	1,00	0,53	0,33	0,89	0,92	0,78
60	1,46	1,00	0,53	0,32	0,92	0,92	0,77
Prom.	**1,4746**	**1,0015**	**0,5446**	**0,32**	**0,9061**	**0,9284**	**0,77**

Tabla 19: Corriente de fuga [μA] sin contaminación - Polaridad Negativa - 40 % de Tensión.

t [s]	Caso Base	C. Ligero	C. Interm.	C. Severo	N. Ligero	N. Interm.	N. Severo
0	0,75	0,52	0,15	0,02	0,40	0,29	0,20
5	0,75	0,53	0,15	0,02	0,41	0,29	0,20
10	0,75	0,52	0,15	0,02	0,40	0,29	0,21
15	0,75	0,53	0,15	0,02	0,40	0,29	0,21
20	0,74	0,52	0,16	0,02	0,40	0,29	0,22
25	0,75	0,52	0,16	0,02	0,39	0,29	0,24
30	0,75	0,52	0,15	0,02	0,39	0,29	0,25
35	0,74	0,52	0,15	0,02	0,40	0,29	0,24
40	0,75	0,52	0,15	0,02	0,40	0,29	0,26
45	0,74	0,52	0,15	0,02	0,40	0,29	0,26
50	0,75	0,51	0,15	0,02	0,40	0,29	0,24
55	0,75	0,51	0,16	0,02	0,39	0,29	0,26
60	0,74	0,51	0,15	0,02	0,39	0,29	0,27
Prom.	**0,7469**	**0,5192**	**0,1523**	**0,02**	**0,3976**	**0,29**	**0,2353**

Tabla 20: Corriente de fuga [μA] sin contaminación - Polaridad Negativa - 30 % de Tensión.

t [s]	Caso Base	C. Ligero	C. Interm.	C. Severo	N. Ligero	N. Interm.	N. Severo
0	0,19	0,02	0,06	0,00	0,11	0,02	0,00
5	0,19	0,02	0,06	0,00	0,09	0,02	0,00
10	0,19	0,03	0,06	0,00	0,09	0,01	0,00
15	0,19	0,03	0,06	0,00	0,11	0,02	0,00
20	0,18	0,03	0,06	0,00	0,08	0,01	0,00
25	0,19	0,03	0,06	0,00	0,08	0,02	0,00
30	0,18	0,04	0,06	0,00	0,08	0,01	0,00
35	0,18	0,03	0,06	0,00	0,08	0,01	0,00
40	0,19	0,03	0,06	0,00	0,08	0,01	0,00
45	0,19	0,03	0,06	0,00	0,08	0,01	0,00
50	0,18	0,03	0,06	0,00	0,08	0,01	0,00
55	0,19	0,02	0,06	0,00	0,08	0,01	0,00
60	0,18	0,03	0,06	0,00	0,08	0,02	0,00
Prom.	**0,1861**	**0,0284**	**0,06**	**0,00**	**0,0861**	**0,0138**	**0,00**

Tabla 21: Corriente de fuga [μA] sin contaminación - Polaridad Positiva - 70 % de Tensión.

t [s]	Caso Base	C. Ligero	C. Interm.	C. Severo	N. Ligero	N. Interm.	N. Severo
0	2,17	1,69	1,49	1,16	2,51	2,18	4,18
5	2,08	1,70	1,48	1,15	2,51	2,17	4,15
10	2,17	1,70	1,47	1,14	2,50	2,14	4,16
15	2,17	1,68	1,49	1,14	2,50	2,14	4,20
20	2,17	1,66	1,46	1,14	2,46	2,13	4,05
25	1,99	1,67	1,45	1,14	2,50	2,10	4,10
30	2,13	1,66	1,45	1,14	2,48	2,07	4,13
35	2,08	1,66	1,45	1,13	2,47	2,06	4,15
40	1,51	1,64	1,44	1,17	2,45	2,07	4,40
45	1,98	1,62	1,43	1,18	2,47	2,05	4,35
50	2,09	1,62	1,43	1,17	2,47	2,06	4,26
55	2,07	1,62	1,43	1,20	2,50	2,05	4,18
60	2,02	1,61	1,42	1,19	2,49	2,05	4,17
Prom.	**2,0484**	**1,6561**	**1,4530**	**1,1576**	**2,4853**	**2,0976**	**4,1907**

Tabla 22: Corriente de fuga [μA] sin contaminación - Polaridad Positiva - 60 % de Tensión.

t [s]	Caso Base	C. Ligero	C. Interm.	C. Severo	N. Ligero	N. Interm.	N. Severo
0	1,66	1,18	1,04	0,59	1,52	1,61	1,16
5	1,65	1,17	1,04	0,59	1,52	1,61	1,18
10	1,65	1,17	1,04	0,59	1,53	1,60	1,19
15	1,65	1,17	1,04	0,58	1,51	1,59	1,19
20	1,65	1,17	1,03	0,59	1,51	1,60	1,61
25	1,64	1,16	1,03	0,59	1,52	1,58	1,64
30	1,64	1,16	1,04	0,58	1,53	1,52	1,66
35	1,64	1,17	1,04	0,60	1,51	1,57	1,16
40	1,63	1,16	1,04	0,60	1,51	1,59	1,18
45	1,62	1,16	1,04	0,59	1,52	1,36	1,19
50	1,61	1,16	1,04	0,60	1,52	1,40	1,18
55	1,61	1,16	1,03	0,60	1,51	1,33	1,18
60	1,61	1,61	1,03	0,60	1,52	1,30	1,19
Prom.	**1,6353**	**1,1653**	**1,0369**	**0,5923**	**1,5176**	**1,5123**	**1,2853**

Tabla 23: Corriente de fuga [μA] sin contaminación - Polaridad Positiva - 50 % de Tensión.

t [s]	Caso Base	C. Ligero	C. Interm.	C. Severo	N. Ligero	N. Interm.	N. Severo
0	1,02	0,73	0,63	0,25	0,81	0,58	0,59
5	1,01	0,74	0,61	0,26	0,81	0,56	0,59
10	1,01	0,73	0,63	0,25	0,81	0,55	0,59
15	0,99	0,73	0,61	0,26	0,81	0,54	0,59
20	1,01	0,73	0,63	0,26	0,82	0,57	0,59
25	0,99	0,73	0,62	0,26	0,81	0,57	0,59
30	1,01	0,73	0,62	0,25	0,81	0,56	0,59
35	1,00	0,72	0,63	0,25	0,81	0,57	0,59
40	0,99	0,73	0,63	0,26	0,81	0,56	0,60
45	1,00	0,72	0,63	0,26	0,82	0,54	0,60
50	1,00	0,72	0,62	0,25	0,82	0,56	0,60
55	0,99	0,73	0,63	0,25	0,82	0,58	0,59
60	1,00	0,73	0,63	0,26	0,82	0,56	0,59
Prom.	**1,0015**	**0,7284**	**0,6246**	**0,2553**	**0,8138**	**0,5615**	**0,5923**

Tabla 24: Corriente de fuga [μA] sin contaminación - Polaridad Positiva - 40 % de Tensión.

t [s]	Caso Base	C. Ligero	C. Interm.	C. Severo	N. Ligero	N. Interm.	N. Severo
0	0,57	0,35	0,28	0,00	0,32	0,08	0,06
5	0,58	0,35	0,28	0,00	0,32	0,09	0,06
10	0,58	0,35	0,28	0,00	0,32	0,08	0,07
15	0,57	0,35	0,27	0,00	0,32	0,12	0,07
20	0,57	0,35	0,26	0,00	0,32	0,10	0,06
25	0,56	0,35	0,27	0,00	0,31	0,09	0,06
30	0,57	0,34	0,27	0,00	0,32	0,10	0,07
35	0,58	0,35	0,28	0,00	0,32	0,10	0,06
40	0,57	0,35	0,27	0,00	0,31	0,11	0,07
45	0,59	0,35	0,27	0,00	0,31	0,11	0,08
50	0,58	0,35	0,28	0,00	0,32	0,10	0,08
55	0,57	0,35	0,28	0,00	0,32	0,08	0,07
60	0,57	0,34	0,28	0,00	0,32	0,09	0,07
Prom.	**0,5738**	**0,3484**	**0,2746**	**0,00**	**0,3176**	**0,0961**	**0,0676**

Tabla 25: Corriente de fuga [μA] sin contaminación - Polaridad Positiva - 30 % de Tensión.

t [s]	Caso Base	C. Ligero	C. Interm.	C. Severo	N. Ligero	N. Interm.	N. Severo
0	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
5	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
10	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
15	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
20	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
25	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
30	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
35	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
40	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
45	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
50	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
55	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
60	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
Prom.	**0,1915**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,01**	**0,00**

A.3. Corriente de fuga - Con contaminación

Tabla 26: Corriente de fuga [μA] con contaminación - Polaridad Negativa - 70 % de Tensión.

t [s]	Caso Base	C. Ligero	C. Interm.	C. Severo	N. Ligero	N. Interm.	N. Severo
0	45,09	54,98	54,50	22,53	65,00	81,00	77,60
5	49,88	50,30	54,99	22,51	62,60	81,60	73,40
10	44,66	53,74	54,15	22,52	65,10	84,10	79,80
15	43,35	54,94	53,70	22,39	62,90	82,90	81,20
20	49,99	53,45	53,78	22,87	63,60	85,00	76,40
25	43,99	51,43	53,42	23,12	60,30	83,90	74,30
30	46,88	50,67	51,69	22,86	61,10	83,00	73,20
35	47,72	53,79	51,39	22,59	63,70	85,70	74,10
40	46,93	52,08	51,14	22,53	63,40	88,30	71,90
45	45,98	55,07	50,71	26,99	62,60	83,90	73,40
50	44,63	53,19	51,30	25,33	60,50	82,60	70,80
55	49,69	55,25	51,26	24,39	62,10	81,50	69,50
60	50,58	53,11	50,46	23,46	65,90	80,90	72,20
Prom.	**46,8746**	**53,2307**	**52,4992**	**23,3915**	**62,9846**	**83,4153**	**74,4461**

Tabla 27: Corriente de fuga [μA] con contaminación - Polaridad Negativa - 60 % de Tensión.

t [s]	Caso Base	C. Ligero	C. Interm.	C. Severo	N. Ligero	N. Interm.	N. Severo
0	20,08	31,20	28,28	22,15	41,39	52,85	50,13
5	19,58	31,77	26,23	22,08	40,57	50,17	48,07
10	24,14	32,41	25,95	22,45	40,39	53,09	50,74
15	23,13	33,04	26,93	22,04	39,99	52,19	48,33
20	25,68	31,27	27,60	26,57	39,84	50,98	48,86
25	23,06	32,48	28,37	23,42	40,10	53,78	48,73
30	20,76	29,46	28,26	22,46	41,18	51,03	46,85
35	19,81	31,76	28,46	22,18	40,68	49,72	48,96
40	20,56	34,65	28,75	21,75	39,12	50,12	50,82
45	18,40	32,96	31,74	21,37	40,28	50,46	47,96
50	19,89	32,02	31,22	21,02	40,36	53,63	45,47
55	18,95	31,99	32,03	20,76	38,42	52,29	44,37
60	20,85	31,19	31,92	21,12	37,86	51,71	45,66
Prom.	**21,1453**	**32,0153**	**28,9030**	**22,2592**	**40,0138**	**51,6938**	**48,0730**

Tabla 28: Corriente de fuga [μA] con contaminación - Polaridad Negativa - 50 % de Tensión.

t [s]	Caso Base	C. Ligero	C. Interm.	C. Severo	N. Ligero	N. Interm.	N. Severo
0	10,33	18,63	20,30	24,09	25,03	33,58	27,22
5	10,15	19,45	19,90	23,80	24,10	34,20	26,80
10	10,01	21,49	19,78	23,55	23,62	35,47	26,54
15	10,40	22,30	19,70	23,40	23,90	34,90	26,00
20	10,88	23,17	19,67	23,25	24,53	34,35	25,44
25	10,90	21,50	19,70	23,45	25,00	35,10	24,40
30	10,93	20,12	19,74	23,60	25,54	35,88	23,33
35	11,10	20,80	19,65	23,62	25,00	35,00	22,50
40	11,23	21,42	19,61	23,65	24,48	34,24	21,76
45	11,35	20,20	19,70	23,35	24,40	34,30	22,30
50	11,44	18,97	19,79	23,08	24,38	34,38	22,87
55	11,00	19,80	20,00	23,00	23,60	34,30	22,60
60	10,14	20,60	20,38	22,86	22,94	34,29	22,36
Prom.	**10,8184**	**20,6561**	**19,8884**	**23,3738**	**24,4861**	**34,5053**	**24,4907**

Tabla 29: Corriente de fuga [μA] con contaminación - Polaridad Negativa - 40 % de Tensión.

t [s]	Caso Base	C. Ligero	C. Interm.	C. Severo	N. Ligero	N. Interm.	N. Severo
0	8,70	18,21	18,73	23,36	12,73	16,96	12,37
5	8,72	17,90	18,50	23,32	12,60	16,80	12,10
10	8,80	17,50	18,20	23,30	12,50	16,70	11,90
15	8,75	17,30	18,00	23,28	12,45	16,50	11,70
20	8,74	17,10	17,80	23,26	12,35	16,30	11,50
25	8,73	17,00	17,60	23,25	12,30	16,10	11,30
30	8,73	16,92	17,52	23,24	12,25	16,03	11,22
35	8,78	17,00	17,45	23,24	12,25	16,15	11,50
40	8,85	17,15	17,35	23,24	12,26	16,25	11,90
45	8,90	17,30	17,25	23,24	12,26	16,40	12,30
50	8,92	17,45	17,15	23,24	12,27	16,50	12,70
55	8,95	17,60	17,10	23,25	12,27	16,60	12,90
60	8,91	17,60	17,05	23,24	12,28	16,61	13,07
Prom.	**8,8761**	**17,0076**	**17,8846**	**23,2046**	**12,4184**	**16,5638**	**12,4876**

Tabla 30: Corriente de fuga [μA] con contaminación - Polaridad Negativa - 30 % de Tensión.

t [s]	Caso Base	C. Ligero	C. Interm.	C. Severo	N. Ligero	N. Interm.	N. Severo
0	6,76	12,05	18,09	25,34	9,28	9,40	10,63
5	6,80	12,10	17,80	25,30	9,30	9,35	10,75
10	6,85	12,15	17,50	25,25	9,32	9,30	10,85
15	6,90	12,20	17,20	25,20	9,34	9,25	10,95
20	6,95	12,25	16,90	25,15	9,35	9,24	11,05
25	7,00	12,30	16,60	25,10	9,36	9,23	11,10
30	7,01	12,37	16,32	25,06	9,36	9,23	11,14
35	7,00	12,35	16,25	25,15	9,32	9,00	11,10
40	6,98	12,35	16,20	25,25	9,25	8,80	11,05
45	6,96	12,36	16,15	25,35	9,20	8,60	11,00
50	6,95	12,37	16,10	25,45	9,15	8,40	11,00
55	6,95	12,38	16,05	25,50	9,12	8,30	11,00
60	6,94	12,39	16,01	25,55	9,10	8,20	10,98
Prom.	**6,9476**	**12,2430**	**16,5246**	**25,2838**	**9,25**	**9,2438**	**10,9423**

Tabla 31: Corriente de fuga [μA] con contaminación - Polaridad Positiva - 70 % de Tensión.

t [s]	Caso Base	C. Ligero	C. Interm.	C. Severo	N. Ligero	N. Interm.	N. Severo
0	59,50	57,00	28,22	20,56	57,71	80,50	75,60
5	59,50	56,40	28,43	23,36	56,70	77,60	74,70
10	58,50	56,90	26,30	22,82	54,87	78,10	75,50
15	59,70	57,80	26,49	23,56	53,97	78,40	75,40
20	59,50	56,40	28,60	21,93	52,99	76,90	74,40
25	59,50	58,30	29,00	23,04	54,69	78,70	73,10
30	59,20	59,10	28,39	21,60	52,61	82,10	73,50
35	58,90	60,30	29,86	19,18	52,53	78,00	72,80
40	59,90	62,40	28,17	19,12	52,93	75,90	75,20
45	58,90	59,10	28,01	18,61	53,34	75,30	72,50
50	61,00	56,30	26,78	22,61	56,04	74,40	70,30
55	59,60	59,40	29,38	20,14	55,10	75,60	71,30
60	60,80	57,60	30,19	20,62	56,62	76,60	74,80
Prom.	**59,5769**	**58,2307**	**28,2938**	**21,3192**	**54,6230**	**77,5461**	**73,7769**

Tabla 32: Corriente de fuga [μA] con contaminación - Polaridad Positiva - 60 % de Tensión.

t [s]	Caso Base	C. Ligero	C. Interm.	C. Severo	N. Ligero	N. Interm.	N. Severo
0	27,79	30,75	21,46	17,41	32,92	43,59	42,14
5	28,77	29,31	23,31	17,80	33,04	43,84	41,82
10	27,80	30,07	21,46	17,03	36,19	43,59	43,09
15	27,62	31,18	21,30	18,09	35,59	42,99	41,60
20	27,38	29,50	20,39	20,34	34,91	43,86	43,00
25	27,77	31,19	20,13	19,29	34,33	42,97	42,19
30	27,09	31,40	20,25	18,49	33,97	43,04	42,36
35	26,20	30,89	20,95	19,23	34,53	43,02	43,42
40	27,12	30,62	21,14	18,86	33,78	42,76	40,86
45	27,01	29,64	20,95	19,28	33,98	42,20	40,57
50	28,00	28,60	22,30	18,43	33,43	42,16	41,84
55	27,49	28,91	21,32	17,65	33,93	42,37	41,98
60	27,61	29,27	19,18	17,96	33,69	42,00	39,62
Prom.	**27,5115**	**30,1023**	**21,0876**	**18,4507**	**34,1761**	**42,9530**	**41,8838**

Tabla 33: Corriente de fuga [μA] con contaminación - Polaridad Positiva - 50 % de Tensión.

t [s]	Caso Base	C. Ligero	C. Interm.	C. Severo	N. Ligero	N. Interm.	N. Severo
0	12,61	20,64	18,86	14,28	22,82	25,97	24,14
5	12,73	21,07	18,66	17,08	22,18	25,80	24,19
10	13,12	21,70	18,56	15,92	21,99	27,50	24,62
15	12,73	20,90	18,79	15,93	22,53	28,58	23,84
20	12,79	21,08	18,95	16,36	23,04	28,65	24,78
25	12,85	21,07	19,10	15,84	21,30	28,96	24,77
30	12,70	20,06	19,47	14,24	20,39	27,98	24,38
35	11,80	21,35	19,57	13,33	20,79	27,61	23,39
40	11,97	20,32	19,53	12,82	20,63	26,99	22,32
45	11,86	20,74	19,48	12,71	20,90	25,10	23,45
50	12,35	21,18	19,36	15,84	21,47	25,18	23,88
55	11,80	21,27	18,05	12,82	21,81	25,41	23,96
60	11,63	20,20	18,31	12,37	21,19	25,77	23,82
Prom.	**12,3800**	**20,8907**	**18,9761**	**14,5800**	**21,6184**	**26,8846**	**23,9646**

Tabla 34: Corriente de fuga [μA] con contaminación - Polaridad Positiva - 40 % de Tensión.

t [s]	Caso Base	C. Ligero	C. Interm.	C. Severo	N. Ligero	N. Interm.	N. Severo
0	6,44	10,80	18,18	21,53	11,53	16,77	15,08
5	7,04	10,84	18,96	20,91	11,25	16,29	14,68
10	7,36	10,92	18,98	20,45	11,58	16,77	15,14
15	7,39	11,00	18,83	19,58	11,57	16,86	14,82
20	7,10	11,42	18,30	19,33	11,43	16,82	13,52
25	6,56	11,52	18,33	18,98	11,34	17,06	14,40
30	6,38	11,51	18,17	21,32	11,28	17,14	14,86
35	7,03	12,01	17,83	21,92	10,89	16,66	14,40
40	7,23	11,35	17,40	20,59	10,59	16,53	15,03
45	7,72	11,68	16,74	20,11	10,37	16,16	15,36
50	7,85	11,43	18,89	21,12	10,75	16,56	14,94
55	7,98	10,89	17,97	20,36	10,70	16,36	14,86
60	8,05	11,25	18,80	20,52	10,77	16,33	13,99
Prom.	**7,2407**	**11,2784**	**18,2600**	**20,5169**	**11,0807**	**16,6392**	**14,6984**

Tabla 35: Corriente de fuga [μA] con contaminación - Polaridad Positiva - 30 % de Tensión.

t [s]	Caso Base	C. Ligero	C. Interm.	C. Severo	N. Ligero	N. Interm.	N. Severo
0	4,00	5,73	15,96	20,38	5,89	10,63	8,69
5	4,36	5,67	15,90	19,75	5,96	10,52	8,97
10	3,98	5,65	15,99	19,66	5,41	10,59	9,27
15	5,08	5,49	16,39	19,64	5,43	10,15	9,40
20	4,82	5,49	15,92	20,89	5,18	9,47	9,17
25	4,78	5,39	15,96	19,58	5,23	9,25	9,30
30	4,52	5,29	15,90	19,79	5,26	9,22	9,12
35	4,71	5,26	15,77	19,41	4,92	9,12	9,28
40	4,18	5,34	15,60	19,36	4,65	9,20	9,47
45	4,45	5,24	15,64	19,94	4,68	9,48	9,60
50	4,99	5,25	15,70	20,53	5,11	9,49	10,20
55	4,58	5,11	15,67	22,66	4,97	9,54	9,81
60	4,32	5,29	15,55	20,19	5,16	8,81	9,77
Prom.	**4,5207**	**5,4000**	**15,8438**	**20,1369**	**5,2192**	**9,6515**	**9,3884**

A.4. Corriente de fuga - Envejecimiento acelerado

Polaridad Negativa

70 % de Tensión			60 % de Tensión			50 % de Tensión			40 % de Tensión			30 % de Tensión		
t[s]	**Base**	**N.Sev**	**t[s]**	**Base**	**N.Sev**	**t[s]**	**Base**	**N.Sev**	**t[s]**	**Base**	**N.Sev**	**t[s]**	**Base**	**N.Sev**
0	1,47	0,69	0	0,81	0,41	0	0,42	0,25	0	0,12	0,08	0	0	0
5	1,45	0,69	5	0,82	0,42	5	0,43	0,25	5	0,12	0,08	5	0	0
10	1,48	0,69	10	0,82	0,42	10	0,43	0,25	10	0,12	0,08	10	0	0
15	1,46	0,68	15	0,82	0,42	15	0,42	0,24	15	0,12	0,08	15	0	0
20	1,46	0,68	20	0,82	0,42	20	0,43	0,25	20	0,12	0,08	20	0	0
25	1,48	0,68	25	0,82	0,42	25	0,43	0,25	25	0,13	0,09	25	0	0
30	1,50	0,68	30	0,82	0,42	30	0,42	0,25	30	0,12	0,08	30	0	0
35	1,47	0,68	35	0,83	0,42	35	0,42	0,25	35	0,13	0,08	35	0	0
40	1,46	0,67	40	0,82	0,42	40	0,43	0,25	40	0,12	0,08	40	0	0
45	1,47	0,68	45	0,83	0,41	45	0,42	0,25	45	0,13	0,09	45	0	0
50	1,45	0,67	50	0,84	0,42	50	0,43	0,24	50	0,12	0,08	50	0	0
55	1,46	0,67	55	0,83	0,42	55	0,42	0,24	55	0,12	0,08	55	0	0
60	1,57	0,67	60	0,83	0,42	60	0,42	0,24	60	0,13	0,09	60	0	0
Prom	**1,4754**	**0,6792**	**Prom**	**0,8238**	**0,8974**	**Prom**	**0,4246**	**0,2469**	**Prom**	**0,1231**	**0,0823**	**Prom**	**0**	**0**

Tabla 36: Corriente de fuga [μA] para probetas envejecidas bajo polaridad negativa.

Polaridad Positiva

70 % de Tensión			60 % de Tensión			50 % de Tensión			40 % de Tensión			30 % de Tensión		
t[s]	**Base**	**N.Sev**	**t[s]**	**Base**	**N.Sev**	**t[s]**	**Base**	**N.Sev**	**t[s]**	**Base**	**N.Sev**	**t[s]**	**Base**	**N.Sev**
0	2,62	0,80	0	0,93	0,44	0	0,40	0,25	0	0,06	0,07	0	0	0
5	2,58	0,80	5	0,93	0,58	5	0,40	0,27	5	0,06	0,06	5	0	0
10	2,35	0,80	10	0,92	0,48	10	0,39	0,25	10	0,06	0,06	10	0	0
15	2,38	0,79	15	0,92	0,42	15	0,39	0,26	15	0,06	0,06	15	0	0
20	2,43	0,80	20	0,93	0,44	20	0,39	0,27	20	0,06	0,06	20	0	0
25	2,44	0,81	25	0,94	0,47	25	0,39	0,26	25	0,06	0,06	25	0	0
30	2,48	0,79	30	0,95	0,44	30	0,39	0,24	30	0,06	0,05	30	0	0
35	2,54	0,80	35	0,95	0,44	35	0,39	0,28	35	0,06	0,06	35	0	0
40	2,57	0,81	40	0,95	0,56	40	0,39	0,24	40	0,06	0,06	40	0	0
45	2,63	0,81	45	0,96	0,43	45	0,40	0,24	45	0,06	0,06	45	0	0
50	2,59	0,81	50	0,95	0,45	50	0,39	0,25	50	0,06	0,06	50	0	0
55	2,62	0,80	55	0,96	0,44	55	0,39	0,24	55	0,06	0,06	55	0	0
60	2,61	0,80	60	0,96	0,41	60	0,39	0,25	60	0,06	0,05	60	0	0
Prom	**2,5262**	**0,8015**	**Prom**	**0,9423**	**0,4615**	**Prom**	**0,3923**	**0,2538**	**Prom**	**0,06**	**0,0592**	**Prom**	**0**	**0**

Tabla 37: Corriente de fuga [μA] para probetas envejecidas bajo polaridad positiva.

Anexo B. Registro fotográfico del montaje experimental

B.1. Sistema de contaminación artificial

La preparación de las probetas se llevó a cabo en una cabina de acrílico acondicionada. En la Figura 37 se muestra el entorno cerrado utilizado para la pulverización de la mezcla salina.



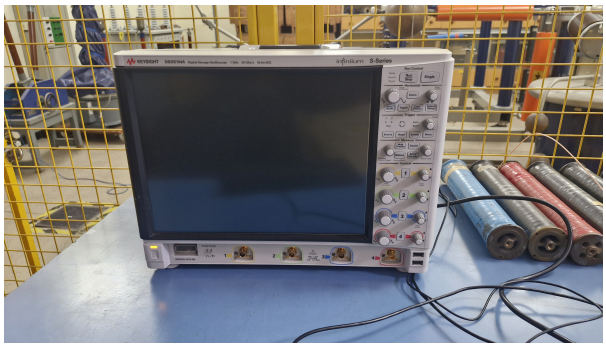
Figura 37: Cabina de acrílico empleada para la contaminación artificial de las probetas.

B.2. Instrumentación para la medición de descargas parciales

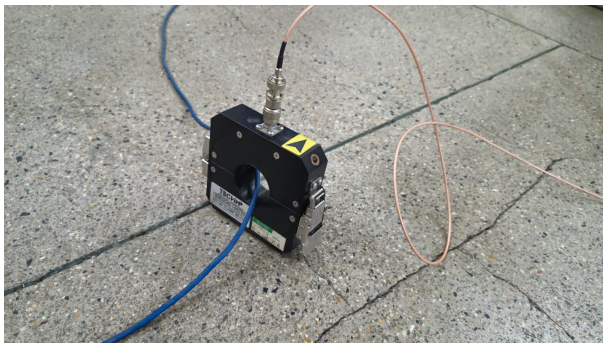
La captura y caracterización de las descargas parciales requirió un sistema de medición simultáneo. La Figura 38 presenta el equipamiento empleado..



(a) Analizador digital OMICRON MPD 600.



(b) Osciloscopio KEYSIGHT DSOS104A.



(c) Transformador de corriente de alta frecuencia (HFCT).

Figura 38: Equipamiento de adquisición de datos para la caracterización de descargas parciales.