



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Ingeniería Eléctrica

Caracterización del tracking interfacial en aisladores compuestos con defectos internos para líneas HVDC

Iván Alejandro Guajardo Sanhueza

Memoria para optar al título de:

Ingeniero Civil Electricista

Profesor guía:

Roger Schurch Brandt



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

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

Título del trabajo: Caracterización del tracking interfacial en aisladores compuestos con defectos internos para líneas HVDC

Nombre del candidato(a): Iván Alejandro Guajardo Sanhueza

Carrera / Grado: Ingeniería civil eléctrica

Campus: Casa Central, Valparaíso

Departamento: Electricidad

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Roger Schurch 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)

☒ 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: 17/09/2026

Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 17/09/2026

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.

Agradecimientos

Entrar a esta universidad fue uno de los sueños más grandes que tuve cuando pequeño, no le voy a endulzar la historia a nadie, fue difícil, más de una vez pensé que no lo iba a lograr, horas de estudio interminables que a veces ni siquiera tenían recompensa, meses incluso años en los cuales no podía ver a mi familia y amigos, aun así, siento que ha sido la mejor decisión que he tomado en toda mi vida, entrar aquí me ha enseñado cual es mi límite y que no hay desafíos imposibles. Quiero también dejar en claro que mi vida a lo largo de estos años fue muy buena solamente que difícil en el ámbito académico y además que si llegue hasta aquí fue porque tuve el apoyo de muchas personas a las cuales en las siguientes líneas me gustaría agradecer.

En primer lugar, a mis dos abuelos Judith y Eduardo que si bien los llamo abuelos los considero mis padres, me han acompañado a lo largo de toda mi vida y nunca han dejado de enseñarme cosas. A mi madre Paulina, a mis tíos Claudia, Elías y Eduardo.

Como ya mencioné esta travesía fue dura sin embargo hubo personas las cuales la hicieron mas amena. Quiero agradecer a mis amigos Simón, Lucas, Sebastián y Camilo con los cuales compartí momentos tristes y felices a lo largo de toda la carrera. A mi grupo de amigos de Osorno, que si bien no los pude ver mucho siempre fue ameno hablar con ellos, aunque fuera por el computador. A mi guía en este ultimo trabajo, el profesor Roger que siempre tuvo disposición y buena voluntad para atender todas las dudas que me surgían, si lee esto profe perdón por romper el frasquito de la maquina de aceites, a Diego mi compañero de trabajo en el laboratorio que me brindo toda la ayuda para realizar los experimentos, si lees esto diego perdón por casi quemar las probetas en el horno. Al equipo de pañol por ayudarme con los equipos y arreglarme el internet jajaja.

Quiero agradecer a centro de alumnos de los años 2024 y 2025 de los cuales yo fui parte y compartí con mucha gente, si bien fueron varios me gustaría mencionar a Cristobal, Igor, Ivonne y Juan Pablo.

Finalmente quisiera mencionar a dos profesores que tuve en el San Mateo (Osorno), Gilberto Martínez y Orlando Torres este ultimo siendo mi profesor de matemáticas y también el que me menciona a la USM por primera vez.

Piensa en grande

piensa en ti.

Glosario

DP: Descarga parcial.

HVAC: Corriente alterna en alto voltaje.

HVDC: Corriente continua en alto voltaje.

PSA: Análisis de Secuencia de Pulsos.

PRPD: Descargas Parciales Resueltas en Fase.

VLf: Fuente de voltaje de baja frecuencia.

Resumen

En los últimos años, Chile ha debido ampliar su capacidad de transmisión eléctrica para integrar nueva generación. En este contexto, la futura línea HVDC Kimal–Lo Aguirre ofrece ventajas para largas distancias, pero también plantea desafíos asociados al desempeño de los aisladores, elementos clave para la confiabilidad del sistema.

Este trabajo estudia las zonas eléctricamente críticas de los aisladores compuestos, con especial énfasis en sus interfaces internas. Debido a la unión entre materiales con distintas propiedades dieléctricas, estas regiones pueden concentrar campo eléctrico y favorecer la aparición de descargas parciales, degradación interfacial y, eventualmente, ruptura dieléctrica.

Para representar esta condición, se fabricaron probetas compuestas por silicona y resina epóxica, destinadas a emular la interfaz interna de un aislador compuesto. Inicialmente, las probetas fueron sometidas a ensayos bajo tensión alterna para validar su comportamiento mediante indicadores de descargas parciales e imágenes ópticas. Los diagramas PRPD, la tasa de repetición, la carga acumulada y otros métodos de análisis permitieron comprobar que la probeta presentó comportamientos compatibles con los fenómenos esperados bajo excitación AC.

Posteriormente, se realizaron ensayos bajo tensión continua sin contaminación para establecer una condición base de la evolución del tracking interfacial. El análisis combinó diagramas PSA, mapas tiempo-frecuencia, indicadores de actividad de descargas parciales e imágenes ópticas de la interfaz, lo que permitió relacionar la evolución eléctrica con los procesos visibles de degradación. Estos resultados fueron utilizados como referencia para comparar el comportamiento de los ensayos contaminados.

Finalmente, se desarrolló un método controlado de aplicación de contaminante en la interfaz. Los ensayos bajo tensión continua mostraron que las probetas contaminadas presentaron, en general, mayores tasas de repetición, mayor carga acumulada y una mayor propensión a la ruptura dieléctrica que el caso base. Además, la contaminación facilitó la observación óptica de la degradación, evidenciada mediante carbonización, desplazamiento del contaminante y aparición de burbujas en la interfaz.

En conclusión, el trabajo permitió establecer criterios preliminares para estudiar el tracking interfacial bajo tensión continua mediante el uso conjunto de indicadores eléctricos y observaciones ópticas. Sin embargo, la variabilidad entre ensayos demuestra que aún no es posible definir un criterio único y definitivo para predecir la ruptura, por lo que se requiere aumentar el número de repeticiones y mejorar el control de la geometría del contaminante.

Abstract

In recent years, Chile has had to expand its electrical transmission capacity to integrate new generation sources. In this context, the future Kimal–Lo Aguirre HVDC transmission line offers significant advantages for long-distance power transfer, but it also introduces challenges related to insulator performance, which is a key factor in ensuring system reliability.

This work investigates electrically critical regions within composite insulators, with particular emphasis on their internal interfaces. Due to the junction between materials with different dielectric properties, these regions may concentrate electric field stress and promote the occurrence of partial discharges, interfacial degradation, and eventually dielectric breakdown.

To represent these conditions, test specimens composed of silicone rubber and epoxy resin were manufactured to emulate the internal interface of a composite insulator. Initially, the specimens were subjected to alternating current (AC) voltage tests to validate their behavior through partial discharge indicators and optical imaging. PRPD diagrams, repetition rate, accumulated charge, and other analysis methods confirmed that the specimens exhibited behaviors consistent with the expected phenomena under AC excitation.

Subsequently, direct current (DC) tests were conducted without contamination to establish a baseline condition for the evolution of interfacial tracking. The analysis combined PSA diagrams, time–frequency maps, partial discharge activity indicators, and optical images of the interface, allowing the electrical evolution to be correlated with visible degradation processes. These results were used as a reference for comparison with the contaminated tests.

Finally, a controlled method for applying contamination at the interface was developed. The DC tests showed that contaminated specimens generally exhibited higher repetition rates, greater accumulated charge, and a higher tendency toward dielectric breakdown than the baseline case. In addition, contamination facilitated the optical observation of degradation, evidenced by carbonization, contaminant displacement, and the formation of bubbles at the interface.

In conclusion, this work established preliminary criteria for studying interfacial tracking under DC voltage through the combined use of electrical indicators and optical observations. However, the variability observed among the tests demonstrates that it is not yet possible to define a single and definitive criterion for predicting breakdown. Therefore, a larger number of repetitions and improved control of contaminant geometry are required.

Índice

1.	Introducción	7
2.	Marco teórico.....	9
2.1	Características de los aisladores	9
2.2	Contaminación.....	14
2.3	Descargas parciales.....	19
2.4	Métodos para analizar descargas parciales.....	22
3.	Procedimiento experimental.....	28
3.1	Circuito experimental.....	29
3.2	Probeta para el ensayo	32
3.3	Defecto en la interfaz	34
3.4	Instrumentos utilizados	35
3.5	Procedimiento de ensayos	41
4.	Resultados.....	43
4.1	Caso AC	44
4.2	Caso DC base	52
4.3	Caso DC con contaminación	59
4.4	Comparación Caso AC base con Caso DC base	68
4.5	Comparación Caso DC base con DC contaminado.....	70
5.	Conclusiones y Trabajo futuro.....	72
	Referencias.....	77

1. Introducción

En los últimos años, ha aumentado el interés por implementar nuevos métodos para la transmisión de energía. Actualmente, en Chile se está construyendo la primera línea de transmisión en corriente continua de alta tensión (HVDC) entre las subestaciones Kimal y Lo Aguirre. Esta obra se está realizando con este tipo de transmisión debido a las ventajas técnicas y económicas que presenta en comparación con las líneas de alta tensión en corriente alterna (HVAC), especialmente para largas distancias [1]. La incorporación de esta línea al Sistema Eléctrico Nacional chileno permitirá la integración de grandes fuentes de energía renovable, fortaleciendo la red eléctrica [2] y contribuyendo así al proceso de descarbonización del país.

Los aisladores son un elemento fundamental en la transmisión eléctrica, ya que cumplen tanto funciones mecánicas como eléctricas al sostener los cables de transmisión suspendidos desde las torres de alta tensión. Cuando estos fallan, las consecuencias pueden llegar hasta la pérdida del suministro eléctrico, lo que implica problemas de seguridad, económicos e incluso sociales. En los sistemas de corriente continua de alta tensión (HVDC), los aisladores están sometidos a mayores esfuerzos en comparación con los sistemas de corriente alterna (HVAC) [3], debido a que los esfuerzos en corriente continua generan una mayor acumulación de contaminación sobre sus superficies.

Los aisladores compuestos de silicona (SiR) se consideran una de las mejores opciones para líneas HVDC debido a su excelente desempeño en ambientes contaminados, gracias a su alta hidrofobicidad [4]. En los sistemas de transmisión, es fundamental contar con aisladores que mantengan altos niveles de hidrofobicidad, ya que la presencia simultánea de humedad y contaminación provoca un envejecimiento acelerado de estos componentes [5].

En términos de ruptura eléctrica, las interfaces constituyen la zona crítica en los aisladores. Esto se debe a que los cambios de material generan discontinuidades en propiedades dieléctricas, como la permitividad y la conductividad. Además, las microvacidades resultantes de uniones imperfectas entre materiales convierten estos puntos de contacto en zonas de concentración del campo eléctrico.

El *tracking* eléctrico bajo excitación alterna ha sido ampliamente estudiado, a diferencia de la sollicitación en corriente continua. Por ello, es relevante investigar este fenómeno en DC para caracterizarlo y mejorar el diagnóstico de aisladores en sistemas HVDC. Se propone analizar el comportamiento del *tracking* en corriente continua mediante probetas que emulen la interfaz sólido-sólido de aisladores compuestos, incorporando defectos como humedad y/o contaminación para reproducir condiciones reales de operación.

Objetivos

Objetivo general

- Caracterizar cómo la contaminación y humedad afectan el tracking eléctrico, bajo tensión continua (DC), en la interfaz sólido-sólido en probetas de silicona y resina epóxica que emulan aisladores compuestos con defectos internos.

Objetivos específicos

- Diseñar probetas que presenten contaminación o humedad en la interfaz solido-solido para el estudio del tracking interfacial eléctrico cuando existe aplicación de DC.
- Caracterizar el tracking interfacial en probetas de silicona y resina epóxica sin defectos bajo sollicitación AC y DC mediante imágenes ópticas y medición de descargas parciales, para obtener la situación experimental de base.
- Caracterizar el tracking interfacial en probetas con defectos bajo sollicitación AC mediante imágenes ópticas y medición de descargas parciales, para establecer una referencia de comportamiento.
- Caracterizar el tracking interfacial en probetas con defectos bajo sollicitación DC mediante imágenes ópticas y medición de descargas parciales, para recomendar criterios de diagnóstico y monitoreo en aisladores compuestos sometidos a sollicitación DC.

2. Marco teórico

2.1 Características de los aisladores

Los aisladores eléctricos son elementos fundamentales en los sistemas de transmisión de energía, ya que cumplen la doble función de soportar mecánicamente los conductores y garantizar el aislamiento eléctrico respecto de las estructuras de soporte, evitando que la corriente circule hacia la torre o el poste. Existen diversos tipos de aisladores, los cuales se diferencian principalmente por su diseño geométrico y por los materiales empleados en su fabricación, estos también se diferencian según la función que cumplen y su ubicación física entre los cuales se encuentran los aisladores de anclaje, de tipo poste, de tipo pin y los de suspensión.

Desde el punto de vista del material constitutivo, los aisladores pueden clasificarse en dos grandes grupos: aisladores cerámicos y aisladores compuestos, cada uno de los cuales presenta ventajas y desventajas asociadas a su comportamiento en servicio.

Los aisladores cerámicos destacan por su extensa experiencia operativa y por su elevada resistencia mecánica, lo que les permite alcanzar una larga vida útil y un desempeño confiable en diversas condiciones de operación. No obstante, presentan ciertas limitaciones, entre las que se encuentra su mayor peso en comparación con otras tecnologías, lo que dificulta su transporte e instalación. Asimismo, debido a su naturaleza frágil, son más susceptibles a daños mecánicos ante impactos o esfuerzos no previstos.

Por su parte, los aisladores compuestos, también conocidos como poliméricos, han ganado relevancia en las últimas décadas debido a su menor peso, lo que facilita su transporte, manipulación e instalación en terreno. Además, presentan un buen desempeño frente a ambientes contaminados, gracias a las propiedades hidrofóbicas de su recubrimiento, lo que reduce la probabilidad de descargas superficiales. Sin embargo, su comportamiento a largo plazo puede verse afectado por fenómenos de envejecimiento del material, tales como degradación por radiación ultravioleta, tracking y erosión superficial, así como por posibles fallas en el núcleo estructural o en las interfaces con los herrajes, lo que exige un adecuado control de calidad y mantenimiento durante su vida útil.

Los aisladores compuestos, están constituidos por un núcleo resistente, generalmente de fibra de vidrio reforzada con resina (FRP), recubierto por una envolvente polimérica, típicamente de silicona, y provistos de herrajes metálicos en sus extremos. Este diseño les permite cumplir simultáneamente funciones eléctricas y mecánicas, proporcionando un adecuado nivel de aislamiento junto con una alta resistencia a esfuerzos de tracción. Una de sus principales características es su bajo peso en comparación con los aisladores tradicionales, lo que facilita su instalación y reduce las cargas sobre las estructuras. Además, su superficie hidrofóbica contribuye a un mejor desempeño en ambientes contaminados, disminuyendo la formación de películas conductoras y, por ende, el riesgo de descargas superficiales. No obstante, su desempeño a largo plazo depende en gran medida de la calidad de los materiales y del proceso de fabricación, ya que pueden verse afectados por fenómenos de envejecimiento, degradación ambiental y fallas en sus interfaces estructurales.

Los aisladores compuestos presentan dos zonas críticas: la interfaz interna y la interfaz externa. La interfaz interna corresponde a la unión entre el núcleo de fibra de vidrio y el recubrimiento polimérico, siendo clave para la integridad mecánica y el sellado del aislador. En tanto, la interfaz externa se ubica en la superficie del recubrimiento en contacto con el ambiente, donde se desarrollan los principales fenómenos eléctricos. Ambas zonas son susceptibles a defectos como descargas parciales, tracking y erosión, lo que puede afectar el desempeño y la vida útil del aislador [6].



Figura 1: Aislador Compuesto de la marca Silpak.

Interfaz externa

La interfaz externa, del aislador compuesto, corresponde a la unión entre la superficie del recubrimiento polimérico del aislador y el aire circundante. Esta zona es determinante para el comportamiento eléctrico en servicio, ya que en ella se concentran los efectos de la contaminación, la humedad y las condiciones ambientales, que influyen directamente en el desempeño dieléctrico. En esta interfaz pueden generarse distorsiones del campo eléctrico, especialmente en presencia de irregularidades superficiales, partículas contaminantes o en zonas cercanas a herrajes, lo que favorece la iniciación de descargas.

La capacidad del material para mantener propiedades hidrofóbicas resulta fundamental, ya que limita la formación de películas conductoras continuas sobre la superficie, reduciendo así la probabilidad de corrientes de fuga y el desarrollo de flashover superficial. Sin embargo, esta interfaz sigue siendo altamente vulnerable a fenómenos como tracking, erosión, acumulación de carga superficial y descargas parciales, los cuales pueden alterar la distribución del campo eléctrico y degradar progresivamente el material. Como consecuencia, el deterioro de esta zona puede comprometer el aislamiento y reducir la confiabilidad del aislador en condiciones de operación exigentes [7].

Interfaz interna

La interfaz interna, del aislador compuesto como se muestra en la Figura 2, corresponde a la unión entre el núcleo de fibra de vidrio del aislador y el recubrimiento polimérico, así como a la conexión con los herrajes metálicos en sus extremos. Esta zona es fundamental para asegurar la integridad mecánica y el correcto sellado del sistema, evitando el ingreso de humedad y agentes externos hacia el interior del aislador.

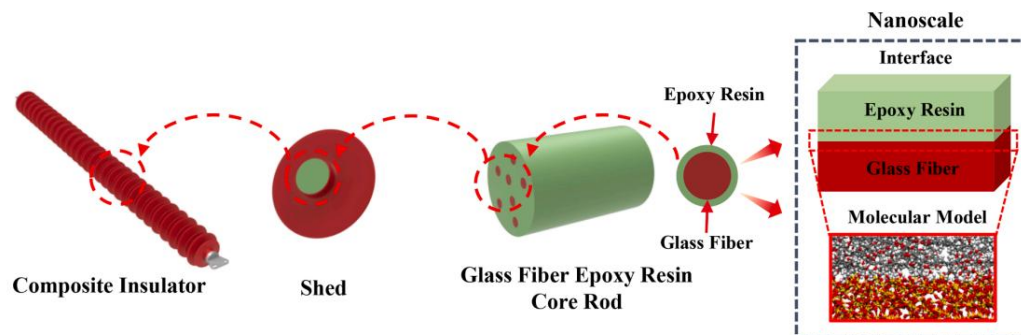


Figura 2: composición de la interfaz interna [8]

Desde el punto de vista eléctrico, esta interfaz constituye una región crítica de aislamiento sólido-sólido [7], donde pueden generarse no uniformidades del campo eléctrico producto de diferencias en propiedades como la permitividad y la conductividad de los materiales. Estas discontinuidades pueden favorecer la acumulación de carga espacial en la interfaz, especialmente bajo condiciones de operación en corriente continua o esfuerzos prolongados, lo que contribuye a la distorsión del campo eléctrico. Asimismo, debido a la naturaleza real de los materiales y procesos de fabricación, pueden existir microdefectos o microcavidades en la zona de contacto, los cuales actúan como puntos de inicio para descargas parciales internas.

La interfaz interna del aislador compuesto se puede clasificar en dos tipos: interfaz macroscópica e interfaz microscópica. La primera corresponde a una zona más extensa en la cual se unen dos tipos de materiales, mientras que la segunda consiste en numerosas pequeñas zonas dispersas entre ambos materiales, por ejemplo, las fibras de vidrio del núcleo en contacto con el recubrimiento de resina epóxica [6]. Las interfases bajo esfuerzos eléctricos pueden sufrir algunos fenómenos como: polarización interfacial en la zona límite entre los dos materiales con propiedades distintas, la rigidez dieléctrica de la interfaz será menor a la de las fases involucradas lo que lleva a una disminución de la tensión de ruptura.

La entrada de humedad a la interfaz provoca una aceleración en el proceso de degradación[9]. Esto se debe a que la humedad favorece la formación de caminos conductivos en la zona núcleo-recubrimiento, facilitando la aparición de descargas interfaciales. Estas descargas contribuyen a la descomposición progresiva de la resina epóxica del núcleo FRP y al debilitamiento de la interfaz interna del aislador. Asimismo, otros factores que aceleran la degradación son la temperatura, la acidez del contaminante o del ambiente, y la capa de aire que puede formarse entre las fases. Esta capa provoca una disminución de la tensión de ruptura, la cual será menor en comparación con la tensión necesaria para producir la ruptura en la interfaz interna si esta tuviese una capa de aire más pequeña o si no la tuviera [10].

La presión interfacial entre los materiales del aislador compuesto influye directamente en el proceso de degradación interna. Cuando existe una baja presión o pérdida de adherencia entre el núcleo y el recubrimiento, pueden formarse regiones de baja densidad o vacíos alargados en la interfaz. Si estas zonas se encuentran sometidas a un campo eléctrico elevado, se favorece la actividad de descargas parciales internas, las cuales producen daño permanente en la interfaz, formación de canales conductivos, depósitos de carbono y crecimiento de tracking interfacial. En este sentido, una interfaz débil o mal adherida facilita que las descargas internas formen canales huecos y anchos, generando zonas desadheridas y erosión interfacial. Además, el crecimiento de árboles eléctricos y la acumulación de carbono en la

resina epóxica pueden intensificar localmente el campo eléctrico, estimulando nuevas trayectorias de degradación a lo largo de la interfaz [11].

La degradación de la interfaz no depende únicamente del nivel de tensión aplicado, sino también de la forma de excitación eléctrica, ya que los campos AC, DC y AC–DC modifican de manera distinta la distribución del campo eléctrico y los mecanismos de descarga interfacial. En el caso AC, el campo tiende a concentrarse con mayor intensidad en las cavidades de la interfaz, favoreciendo descargas parciales, pérdidas por polarización y mayores corrientes de fuga, por lo que la ruptura se desencadena con mayor facilidad y la rigidez dieléctrica resulta menor. Bajo excitación DC, en cambio, el campo se concentra principalmente en las asperezas, las cuales soportan mayores intensidades de campo, reduciendo la actividad de descarga y aumentando la tensión de ruptura. El campo combinado AC–DC presenta un comportamiento intermedio, con pérdidas y descargas menores que en AC, pero mayores que en DC [12].

La vida útil de los materiales y sistemas aislantes se encuentra fuertemente influenciada por el estrés eléctrico al cual son sometidos durante su operación. A medida que aumenta el campo eléctrico aplicado, los procesos de envejecimiento dieléctrico se aceleran, reduciendo el tiempo hasta la ruptura del aislamiento. Para estudiar este comportamiento, existen distintos métodos de ensayo, entre ellos los ensayos con escalones de tensión o tensión progresiva, en los cuales el voltaje aplicado aumenta gradualmente hasta producir la falla dieléctrica del espécimen. Estos ensayos permiten obtener información preliminar sobre la resistencia eléctrica del material y su comportamiento frente al envejecimiento. A partir de este tipo de pruebas y de ensayos a tensión constante, es posible construir la denominada curva de Voltage Endurance (VE) la cual se muestra en la Figura 3 y esta relaciona el esfuerzo eléctrico aplicado con el tiempo de vida del aislamiento, permitiendo evaluar su desempeño y estimar su durabilidad bajo distintas condiciones de operación [13].

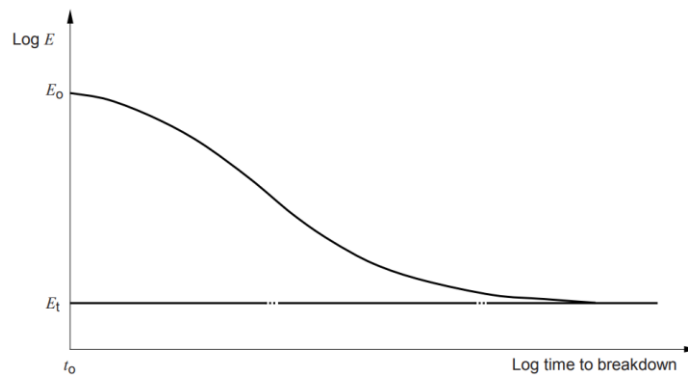


Figura 3: Curva de resistencia al voltaje [13]

2.2 Contaminación

Con el fin de mantener el sistema eléctrico operando de manera segura y confiable, resulta fundamental conservar los equipos eléctricos en buenas condiciones de funcionamiento, especialmente aquellos asociados a los sistemas de aislamiento. El aislamiento eléctrico cumple un rol esencial en equipos de potencia, ya que permite soportar los esfuerzos eléctricos presentes durante la operación normal y ante condiciones de falla, evitando descargas no deseadas y fallas dieléctricas. Sin embargo, la degradación del aislamiento es un fenómeno progresivo que puede producirse no solo bajo condiciones climáticas extremas, sino también debido a la exposición continua a distintos factores ambientales y operacionales [14]. Variables meteorológicas como la temperatura, la radiación solar, la humedad y las variaciones estacionales pueden acelerar los procesos de envejecimiento de los materiales aislantes. Además, la acción combinada de esfuerzos eléctricos, térmicos y mecánicos contribuye al deterioro gradual del aislamiento, reduciendo la vida útil de los aisladores comprometiendo el desempeño confiable del sistema eléctrico.

La contaminación en aisladores eléctricos corresponde a la acumulación de sustancias sobre su superficie o interfaz, lo que deteriora su comportamiento dieléctrico. Estas sustancias pueden ser solubles, como sales que al humedecerse forman películas conductoras, o no solubles, como polvo o arcillas, que favorecen la retención de humedad. En condiciones ambientales como niebla o lluvia, esta combinación incrementa las corrientes de fuga y provoca una distribución no uniforme del campo eléctrico, facilitando la aparición de descargas parciales y superficiales. Con el tiempo, estos fenómenos pueden derivar en flashover, reduciendo la capacidad de aislamiento y acelerando la degradación del material, lo que compromete la confiabilidad y vida útil del sistema.

La norma IEC 60815-1 [15] reconoce explícitamente que la contaminación se puede dividir en dos tipos:

- Tipo A: corresponde a contaminación sólida depositada sobre la superficie del aislador, la cual contiene componentes no solubles. Aunque inicialmente esta capa no sea altamente conductiva, al humedecerse (por lluvia, niebla o humedad ambiental) aumenta considerablemente su conductividad superficial.
- Tipo B: corresponde a contaminación producida principalmente por electrólitos líquidos depositados sobre el aislador, con muy poca o ninguna presencia de componentes sólidos no solubles. En este caso, la contaminación ya posee conductividad intrínseca debido a la naturaleza líquida del depósito. Este tipo de

contaminación se caracteriza principalmente por: mediciones de conductancia o corriente de fuga.

Dentro de este contexto la contaminación Tipo A esta compuesta por los siguientes dos elementos principales:

- ESDD: Cantidad de cloruro de sodio (NaCl) que, al disolverse en agua desmineralizada, produce la misma conductividad volumétrica que la del depósito natural removido de una superficie dada del aislador, dividida por el área de dicha superficie, generalmente expresada en mg/cm^2 .
- NSDD: Cantidad de residuo no soluble removido de una superficie dada del aislador, dividida por el área de dicha superficie, generalmente expresada en mg/cm^2 .

Para la normalización de la severidad de la contaminación, se definen cinco clases en función de la masa por unidad de superficie de contaminantes solubles y no solubles presentes en el entorno. Esta clasificación se establece para aisladores tipo disco y aisladores compuestos.

A continuación, se presentan los distintos niveles de severidad:

- E1: Very light (Muy ligero).
- E2: Light (Ligero).
- E3 y E4: Medium (Medio).
- E5 y E6: Heavy (Alta).
- E7: Very heavy (Muy alta).

A continuación, en la Figura 4 se muestra un gráfico que relaciona las concentraciones ESDD y NSDD para poder definir el grado de severidad.

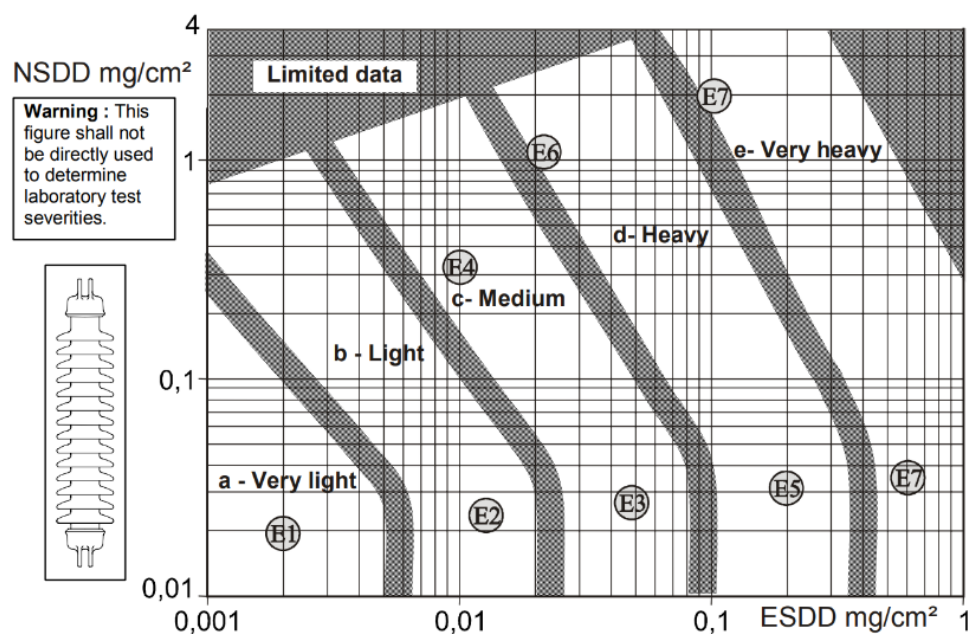


Figura 4: Gravedad de la contaminación en sitios de tipo A relación entre ESDD/NSDD [15]

La norma IEC 60815-1 [15] presenta descripciones aproximadas de distintos entornos típicos. A continuación, en la

Tabla 1 se muestran las descripciones correspondientes a cada uno de ellos.

Escenario	Descripción de entornos típicos
E1	>50 km^a de cualquier mar, desierto o zona seca abierta. >10 km de fuentes de contaminación artificial^b. A una distancia menor que la indicada anteriormente de las fuentes de contaminación, pero: • con viento predominante que no proviene directamente de estas fuentes de contaminación. • y/o con lavado regular por lluvias mensuales.
E2	10–50 km^a del mar, desierto o zona seca abierta. 5–10 km de fuentes de contaminación artificial^b. A una distancia menor que E1 de las fuentes de contaminación, pero: • con viento predominante que no proviene directamente de estas fuentes de contaminación. • y/o con lavado regular por lluvias mensuales.
E3	3–10 km^c del mar, desierto o zona seca abierta. 1–5 km de fuentes de contaminación artificial^b. A una distancia menor que la indicada anteriormente de las fuentes de contaminación, pero:

	• con viento predominante que no proviene directamente de estas fuentes de contaminación. • y/o con lavado regular por lluvias mensuales.
E4	A mayor distancia de las fuentes de contaminación que la indicada en E3, pero: • presencia frecuente de niebla densa (o llovizna) después de un largo período (varias semanas o meses) de acumulación de contaminación en condiciones secas. • y/o ocurrencia de lluvias intensas de alta conductividad. • y/o existencia de un nivel elevado de NSDD, entre 5 y 10 veces el ESDD.
E5	Dentro de 3 km del mar, desierto o zona seca abierta. Dentro de 1 km de fuentes de contaminación artificial^b.
E6	A mayor distancia de las fuentes de contaminación que la indicada en E5, pero: • presencia frecuente de niebla densa (o llovizna) después de un largo período (varias semanas o meses) de acumulación de contaminación en condiciones secas. • y/o existencia de un nivel elevado de NSDD, entre 5 y 10 veces el ESDD.
E7	Dentro de la misma distancia a las fuentes de contaminación que la especificada para zonas “severas” y: • directamente expuesto a salpicadura marina o niebla salina densa • o directamente expuesto a contaminantes de alta conductividad, o polvo tipo cemento de alta densidad, con humectación frecuente por niebla o llovizna. • zonas desérticas con rápida acumulación de arena y sal, y condensación frecuente.
^a Durante una tormenta, el nivel de ESDD a dicha distancia del mar puede alcanzar valores mucho más elevados. ^b La presencia de una gran ciudad tendrá influencia a mayores distancias, es decir, más allá de las distancias especificadas para el mar, desierto y zonas secas. ^c Dependiendo de la topografía de la zona costera y de la intensidad del viento.	

Tabla 1: Ejemplos de entornos típicos [15]

Para poder determinar el escenario en el cual está operando el aislador se deben calcular los valores de ESDD y NSDD los cuales se calculan con las fórmulas 1, 2 respectivamente.

$$ESDD = S_a \cdot \frac{V}{A} \quad (1)$$

$$NSDD = 1000 \cdot \frac{W_f - W_i}{A} \quad (2)$$

Donde

S_a : Salinidad del contaminante (kg/m³).

V : Volumen de agua destilada (cm³).

A : Área del aislador para recolectar contaminantes (cm²).

W_f : es el peso del papel filtro que contiene contaminantes en condiciones secas (g).

W_i : es el peso inicial del papel filtro en condiciones secas (g).

Para obtener la salinidad del contaminante, es necesario medir la conductividad volumétrica de la solución contaminante a 20 °C, σ_{20} . En la ecuación 3 se muestra la relación entre dicha conductividad y la salinidad.

$$S_a = (5.7 \cdot \sigma_{20})^{1.03} \quad (3)$$

Para obtener la conductividad referida a 20 °C, es necesario corregir la conductividad real de la solución. Para realizar dicha corrección, se utiliza la ecuación 4.

$$\sigma_{20} = \sigma_{\theta} [1 - b(\theta - 20)] \quad (4)$$

Donde

θ : Es la temperatura de la solución (°C).

σ_θ : Es la conductividad volumétrica de la solución a la temperatura θ (S/m).

b : Es un factor el cual depende de la temperatura θ y se puede obtener de la ecuación 5 o bien de la Figura 5.

$$b = -3.200 \cdot 10^{(-8)}\theta^3 + 1.032 \cdot 10^{(-5)}\theta^2 - 8.272 \cdot 10^{(-4)}\theta + 3.544 \cdot 10^{(-2)} \quad (5)$$

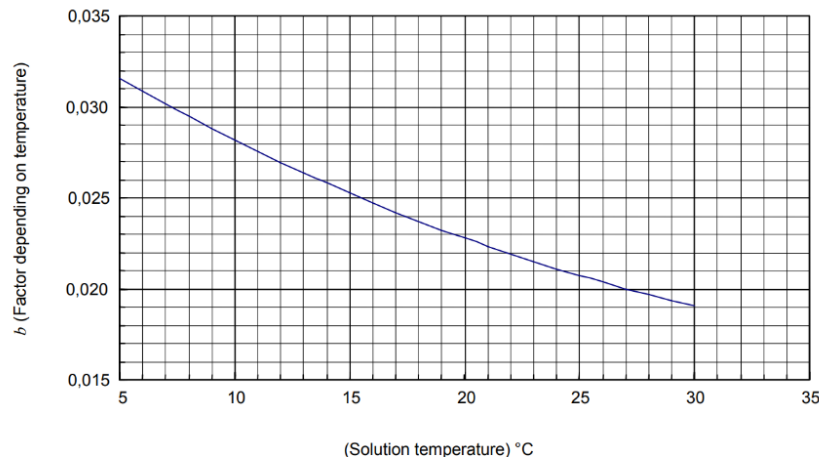


Figura 5: relación factor b en función de la temperatura de la solución[15].

2.3 Descargas parciales

La descarga parcial es una descarga eléctrica localizada que solo atraviesa parcialmente el aislamiento entre conductores y que puede ocurrir adyacente a un conductor [16]. Las descargas parciales son causadas, en general, por concentraciones locales del esfuerzo eléctrico dentro del aislamiento o sobre su superficie. Estas se manifiestan usualmente como pulsos de duración inferior a 1 μ s, aunque también pueden presentarse en formas más continuas, como las denominadas descargas sin pulsos en dieléctricos gaseosos. Estas descargas pueden ocurrir en distintos sistemas de aislamiento utilizados en equipos o sistemas eléctricos, y generalmente se restringen a una parte de los materiales dieléctricos empleados. El aislamiento puede estar constituido por materiales sólidos, líquidos, gaseosos o por combinaciones de estos [17]. Las descargas parciales son fenómenos de naturaleza estocástica y se pueden clasificar en los siguientes tipos:

- Descargas internas, que ocurren en vacíos o cavidades dentro de dieléctricos sólidos o líquidos.
- Descargas superficiales, que aparecen en la interfaz entre distintos materiales aislantes.
- Descargas corona, que ocurren en dieléctricos gaseosos bajo la presencia de campos eléctricos no homogéneos.
- Descargas asociadas al fenómeno de arborescencia eléctrica (*treeing*), caracterizadas por la acción continua de descargas en dieléctricos sólidos que generan canales de descarga.

Las descargas parciales provocan un deterioro significativo en los aisladores, afectando su vida útil. Este deterioro depende del tipo de tensión aplicada y del material involucrado. A lo largo de los años, se ha buscado establecer una relación cuantitativa entre la actividad de las descargas parciales y la vida útil de los materiales; sin embargo, dicha relación aún no ha podido definirse con precisión. La detección de descargas parciales puede realizarse mediante la observación de los siguientes fenómenos fisicoquímicos:

- Pulsos de corriente eléctrica.
- Pérdidas dieléctricas.
- Radiación electromagnética.
- Emisión acústica.
- Incremento de la presión del gas.
- Reacciones químicas.

Las descargas parciales presentan formas de onda características, las cuales varían según el tipo de descarga, el medio dieléctrico involucrado, la geometría del defecto y las condiciones de medición. Sin embargo, existen parámetros comunes que permiten describir y comparar estas señales, tales como la amplitud del pulso, el tiempo de subida y el ancho de pulso[18]. A continuación, en la Figura 6, se presenta una forma de onda típica de descarga parcial junto con algunos de sus principales parámetros característicos del análisis de descarga parcial resuelta en el tiempo.

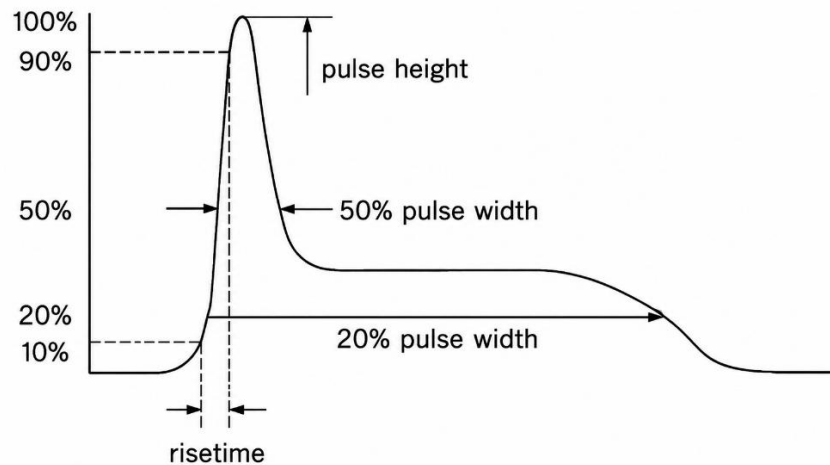


Figura 6: Forma de onda típica de una descarga parcial [18].

- Amplitud de pulso (Pulse height): Corresponde a la máxima amplitud alcanzada por el pulso.
- Tiempo de subida (risetime): Corresponde al tiempo que tarda el pulso en subir del 20% al 90% de su amplitud máxima.
- Ancho de pulso al 50% de la amplitud máxima (50% pulse width): corresponde al tiempo durante el cual la amplitud del pulso permanece por encima del 50% de su valor máximo.
- Ancho de pulso al 20% de la amplitud máxima (20% pulse width): corresponde al tiempo durante el cual la amplitud del pulso permanece por encima del 20% de su valor máximo.

Las características de la forma de onda reflejan un valor equivalente a la intensidad de una componente de frecuencia específica que caracteriza la descarga parcial en un punto de descarga. Por otro lado, las características de la forma de onda también deberían contener información sobre el estado de deterioro del aislamiento y no únicamente información sobre el comportamiento de la carga eléctrica en el espacio donde esta ocurre [19].

A diferencia de las descargas parciales bajo esfuerzos AC, las descargas parciales en sistemas DC aún no cuentan con un nivel de estudio, metodologías de análisis ni procedimientos normativos tan desarrollados. Esta situación dificulta la realización de diagnósticos confiables y el diseño adecuado de los elementos y sistemas sometidos a este

tipo de excitación eléctrica. Si se busca realizar una comparación entre las descargas producidas por esfuerzos AC y DC, se puede decir que las formas de onda generadas en ambos casos son similares. Sin embargo, las descargas en DC tienden a presentar menor amplitud, mayor duración y una menor tasa de repetición [20]

2.4 Métodos para analizar descargas parciales

Con el fin de diagnosticar el estado de los equipos eléctricos y evaluar la condición de sus sistemas de aislamiento, se han desarrollado diversos métodos de análisis de descargas parciales. Estas técnicas permiten detectar defectos incipientes, identificar posibles fuentes de degradación y evaluar la actividad de las descargas dentro o sobre el aislamiento. Dichas descargas suelen estar asociadas a cavidades internas, contaminación superficial, o deterioro progresivo del material aislante, por lo que su análisis entrega información relevante sobre la integridad dieléctrica del equipo. A partir de sus parámetros característicos, es posible estimar la severidad del defecto, su evolución y el riesgo que representa para la operación, convirtiendo este análisis en una herramienta clave para el mantenimiento basado en condición y la prevención de fallas mayores en equipos eléctricos de alta tensión.

Algoritmo de visualización de patrones de descargas parciales resueltas en fase (PRPD)

El análisis PRPD es uno de los algoritmos de visualización estándar para la representación de señales de descargas parciales a nivel mundial, y es utilizado prácticamente por todos los fabricantes de instrumentos de medición de descargas parciales. El patrón PRPD como el mostrado en la Figura 7 corresponde a una representación bidimensional de un arreglo tridimensional, donde cada punto del patrón representa la amplitud de un pulso de descarga parcial graficada respecto al ángulo de fase de la tensión aplicada en el instante en que ocurrió dicho pulso. Cuando se produce más de un pulso en la misma posición, el número de ocurrencias aumenta, lo que se refleja como una variación de color dentro del esquema [16].

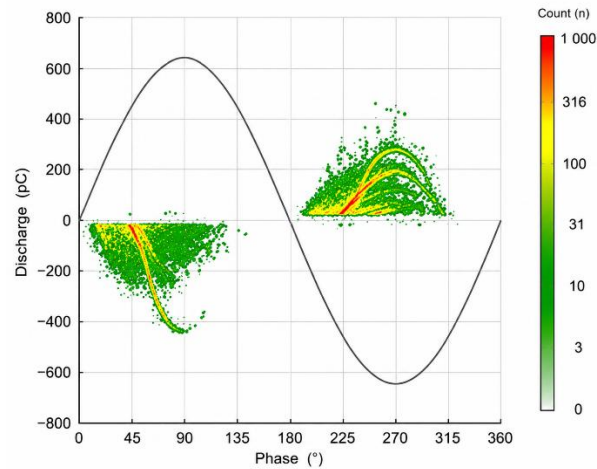


Figura 7: Esquema PRPD [16]

La medición y clasificación de patrones de descargas parciales permite asociar las señales registradas con posibles fuentes o tipos de defectos en el sistema de aislamiento. Además, el análisis de estos patrones puede entregar información útil para apoyar la identificación de la fuente de descarga, su configuración y eventualmente, su ubicación probable, aunque esta última no se determina únicamente a partir del patrón PRPD [21]

En sistemas HVDC, debido a la ausencia de una referencia de fase, los métodos PRPD no pueden aplicarse de forma directa. Por esta razón, se han propuesto técnicas basadas en patrones TRPD, las cuales analizan la evolución temporal de los pulsos de descarga parcial [22]

Indicadores de la Norma IEC 60270

La norma IEC 60270 [16] no establece procedimientos específicos para la evaluación de descargas parciales bajo excitación en corriente continua (DC) sin embargo, recomienda utilizar los siguientes indicadores para el análisis de la actividad de descargas parciales:

Valor máximo de carga aparente (Q_{pk}): Corresponde al mayor valor de carga aparente registrado por un sistema de medición de descargas parciales, generalmente implementado mediante un detector de pico o una emulación digital equivalente. Con el fin de reducir la influencia del ruido o de valores erráticos que puedan aparecer durante la medición, si bien este indicador será el utilizado para este trabajo es importante mencionar que este valor se puede reemplazar por Q_{95} , el cual corresponde al valor de carga aparente por debajo del

cual se encuentra el 95% de los pulsos registrados. Para este estudio se utilizará el valor máximo de carga.

Valor de carga aparente acumulada: Corresponde a la suma de las magnitudes de carga aparente de todas las descargas parciales registradas durante un intervalo de tiempo determinado, constituyendo un indicador de la actividad total de descargas parciales presente en el sistema de aislamiento matemáticamente se puede expresar como en la ecuación 6 y gráficamente en la Figura 8.

$$Q_{acumulada} = \sum_{i=1}^N q_i \quad (6)$$

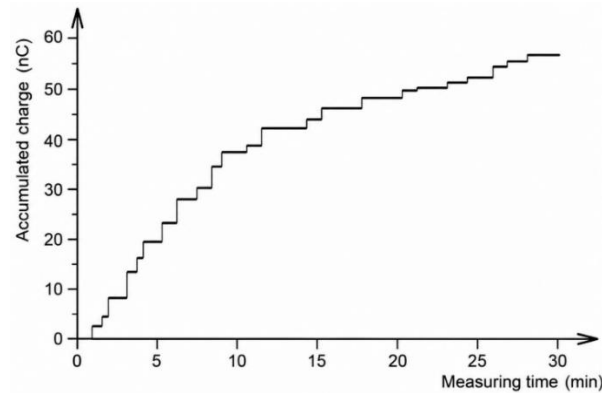


Figura 8: Grafico de carga acumulada [16]

Conteo de pulsos acumulado: representa cuántos pulsos de descarga parcial superan un determinado valor de carga aparente un esquema de estos se presenta en la Figura 9.

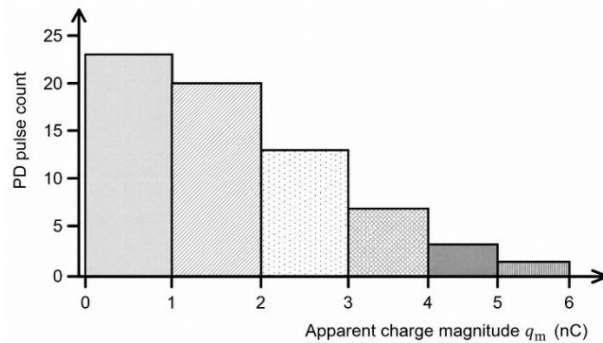


Figura 9: Grafico conteo de pulsos acumulado [16]

Conteo de pulsos por intervalos: representa cuántos pulsos se encuentran dentro de un rango específico de magnitud de carga un esquema así se presenta en la Figura 10.

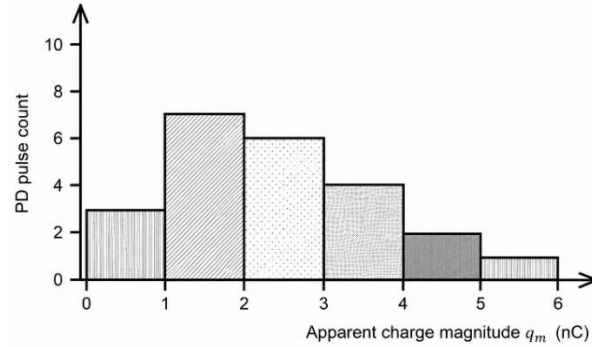


Figura 10: Grafico de conteo de pulsos por intervalo [16]

Tasa de repetición: Corresponde a la cantidad de pulsos de descarga parcial registrados por unidad de tiempo durante el ensayo, constituyendo un indicador de la frecuencia de ocurrencia de la actividad de descargas parciales en el sistema de aislamiento. Matemáticamente, se expresa como el cociente entre la cantidad de pulsos registrados y la duración del ensayo.

Análisis de pulsos de secuencia (PSA)

El análisis PSA plantea que la evaluación de las descargas parciales no debe limitarse únicamente al estudio estadístico global de los pulsos registrados, sino que también es importante analizar la correlación entre descargas parciales consecutivas. Esto se debe a que cada descarga modifica localmente la distribución de cargas espaciales y, por consiguiente, influye en la ocurrencia de las descargas posteriores. De esta manera, el análisis de secuencias de pulsos permite observar con mayor detalle la evolución y degradación progresiva del aislamiento, entregando información adicional sobre las características y el comportamiento del defecto presente en el sistema [23].

Para realizar el análisis de secuencia de pulsos bajo excitación DC, se consideran principalmente la magnitud de carga de las descargas parciales y el instante temporal en que ocurre cada pulso. A partir de estas variables se determinan la diferencia de carga entre pulsos consecutivos, ΔQ_i , y el intervalo temporal entre ellos, Δt_i . Los diagramas PSA pueden construirse relacionando ΔQ_{i+1} con ΔQ_i , con el propósito de analizar la

evolución de la magnitud de las descargas, o bien relacionando Δt_{i+1} con Δt_i , para estudiar la evolución temporal y la tasa de repetición de los pulsos. De esta manera, el análisis PSA permite caracterizar tanto las variaciones de magnitud como el comportamiento temporal de las descargas parciales bajo tensión continua [24]. Los parámetros calculan mediante las ecuaciones (7), (8), (9) y (10).

$$\Delta t_i = t_i - t_{i-1} \quad (7)$$

$$\Delta t_{i+1} = t_{i+1} - t_i \quad (8)$$

$$\Delta Q_i = Q_i - Q_{i-1} \quad (9)$$

$$\Delta Q_{i+1} = Q_{i+1} - Q_i \quad (10)$$

Utilizando herramientas computacionales, para guardas parámetros estos se pueden graficar como se muestra en la Figuras 11 y 12.

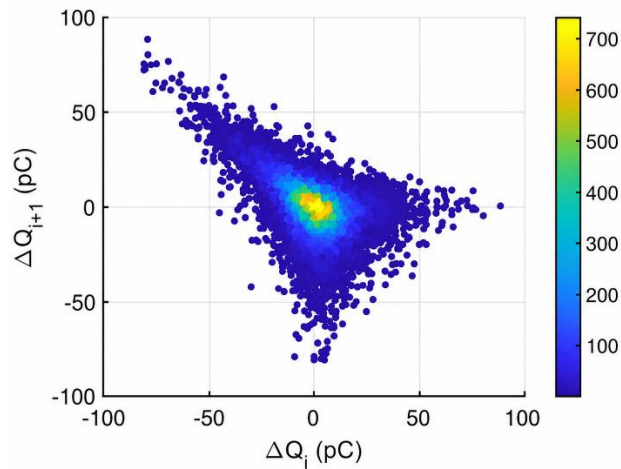


Figura 11: Grafico PSA de carga [24]

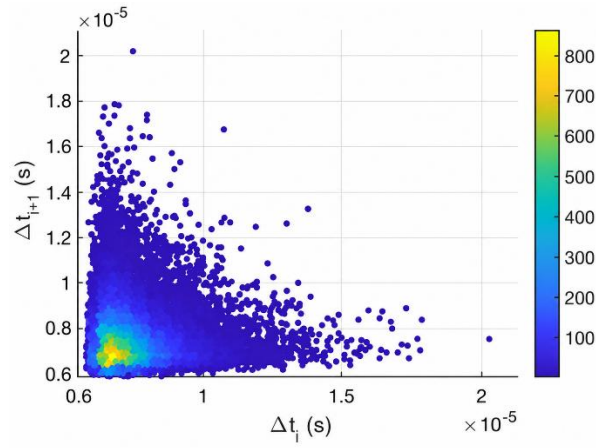


Figura 12: Grafico PSA de tiempo [24]

Mapas tiempo – frecuencia (Mapas TF)

Los análisis de descargas parciales no deben basarse únicamente en la observación global de todos los patrones medidos. Es necesario filtrar las señales registradas e identificar tanto las distintas fuentes de descargas parciales como las posibles fuentes de ruido. Para ello, el uso de mapas TF permite representar las características temporales y frecuenciales de cada pulso, agrupando señales con formas similares y separando aquellas provenientes de distintas fuentes. De esta manera, los mapas TF permiten analizar de forma independiente las señales asociadas a cada fenómeno de descarga parcial, mejorando la confiabilidad del diagnóstico en sistemas de aislamiento sólido cuando existen múltiples fenómenos superpuestos o interferencias externas [25].

Para realizar este análisis se plantea la forma del pulso $s(t)$, la cual se debe normalizar utilizando la ecuación 11.

$$\tilde{s}(t) = \frac{s(t)}{\sqrt{\int_0^T s(t)^2 dt}} \quad (11)$$

Luego se calcula la desviación estándar de la señal normalizada en los dominios temporal y frecuencial de la siguiente manera utilizando las ecuaciones 12 y 13.

$$\sigma_T = \sqrt{\int_0^T (t - t_0)^2 \tilde{s}(t)^2 dt} \quad (12)$$

$$\sigma_F = \sqrt{\int_0^\infty f^2 |\tilde{S}(f)|^2 df} \quad (13)$$

Donde $\tilde{S}(f)$ es la transformada de Fourier de la señal $\tilde{s}(t)$ y t_0 es el centro de gravedad de la señal normalizada, el cual se puede calcular según la ecuación 14.

$$t_0 = \int_0^T t \tilde{s}(t)^2 dt \quad (14)$$

3. Procedimiento experimental

En esta sección se presenta el procedimiento experimental utilizado para estudiar la degradación en la interfaz interna sólido-sólido de un aislador compuesto, mediante el uso de una probeta representativa de dicha interfaz. Como base metodológica se consideró la investigación de [26], de la cual se adoptaron el diseño inicial de la probeta, el circuito experimental y la metodología general de ensayo. A partir de esta referencia, se incorporaron modificaciones orientadas a introducir defectos controlados mediante distintos métodos de contaminación. Posteriormente, se seleccionó el método más adecuado, considerando su replicabilidad y la posibilidad de obtener variables medibles durante el ensayo. Finalmente, la metodología experimental fue ajustada para adaptarse a las modificaciones realizadas en la probeta.

Es importante mencionar que, si bien el enfoque principal de esta investigación corresponde al estudio de la degradación bajo esfuerzos DC, también se realizaron ensayos bajo esfuerzos AC con el fin de contrastar resultados y corroborar la validez de los procedimientos implementados.

3.1 Circuito experimental

Los ensayos realizados para medir descargas parciales fueron realizados en el circuito que está representado en la Figura 13.

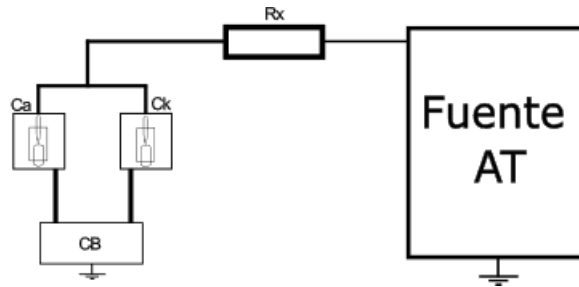


Figura 13: Circuito experimental para medición de descargas parciales.

Donde:

- Fuente AT: Generador de tensión AC o DC.
- Rx: Es una resistencia limitadora de $2\text{ M}\Omega$.
- Ca: Es la probeta la cual se ensayará.
- Ck: Es una probeta libre de descargas parciales.
- CB: Es un circuito balanceado para mitigar ruido.

A continuación, en las figuras Figura 14 y 15 se presenta un esquema físico del circuito experimental, estos esquemas cuentan con todos los equipos utilizados para la obtención y registro de los datos.

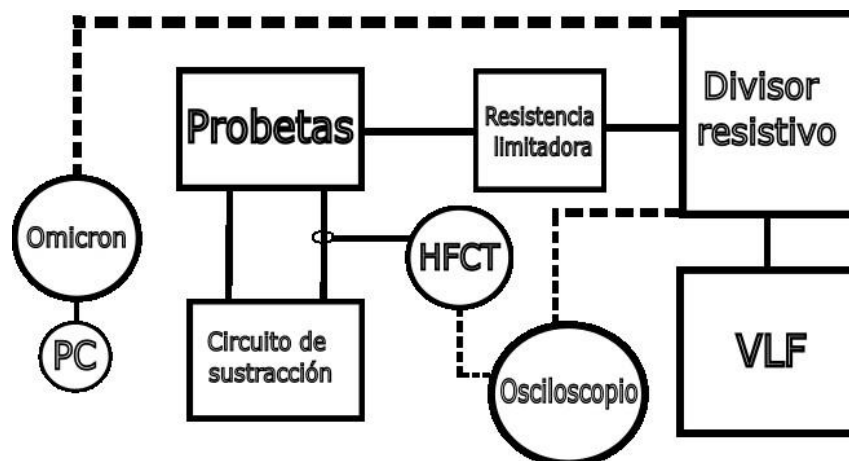


Figura 14: Set up para medición de descargas parciales bajo esfuerzos DC.

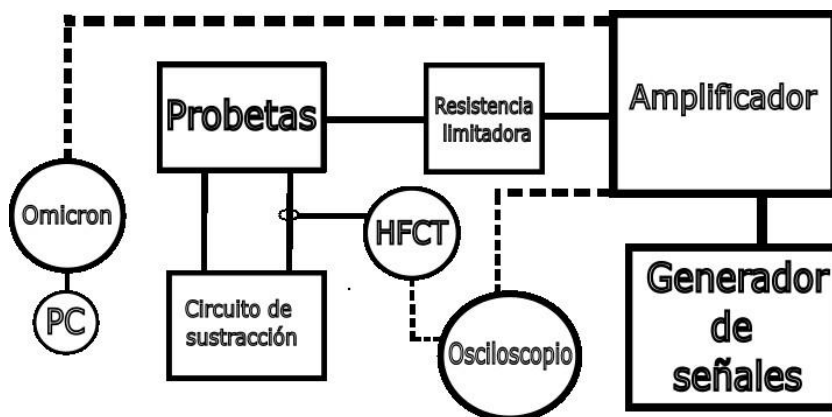


Figura 15: Set up para medición de descargas parciales bajo esfuerzos AC.

De acuerdo con la norma IEC 60270, los circuitos balanceados constituyen una alternativa para la medición de descargas parciales cuando se requiere reducir la influencia de perturbaciones externas en la señal medida. Este tipo de configuración se basa en comparar las señales obtenidas desde dos ramas de acoplamiento, permitiendo atenuar componentes comunes asociadas al ruido o a interferencias del circuito de ensayo, mientras se conserva la contribución de las descargas parciales originadas en el objeto bajo prueba. Para este análisis se utilizó el circuito balanceado implementado en [27] el cual se muestra en la figura 16.

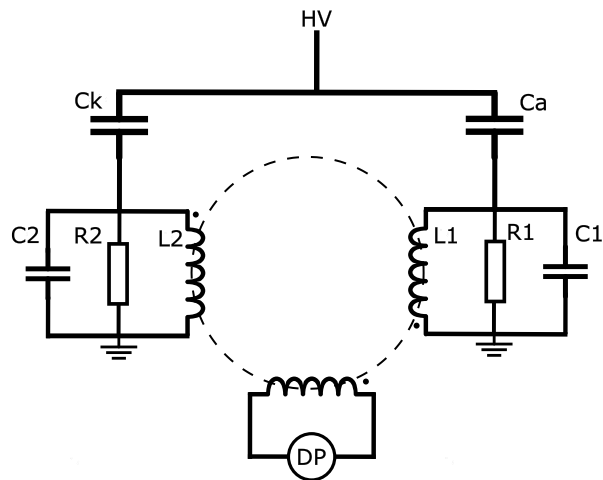


Figura 16: Circuito balanceado [27].

A continuación, se presenta los valores usados para el circuito balanceado:

- Condensador C1 y C2: 10 pF
- Resistencia R1 y R2: 180 Ω
- Inductancia L1 y L2: 625 μF

En la figura 17 se presenta el circuito implementado. El punto **a** corresponde a la salida de la probeta libre de descargas, mientras que el punto **b** corresponde a la salida de la probeta de ensayo. Por su parte, el punto **c** representa la conexión a tierra y el punto **d** corresponde a la salida de medición hacia el equipo OMICRON.

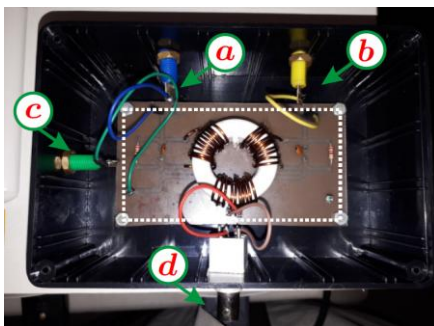


Figura 17: Circuito balanceado utilizado en [27]

3.2 Probeta para el ensayo

La probeta utilizada para el análisis de la interfaz sólido-sólido está compuesta por dos fases: resina epóxica y silicona RTV. Entre ambas fases se disponen dos electrodos con configuración punta-plano, los cuales son construidos con cinta de cobre de la marca Eterart como se muestra en la Figura 18. Durante los ensayos, el electrodo de punta será energizado, mientras que el electrodo plano se conectará a tierra. Esta configuración permitirá observar la evolución de la degradación en la interfaz hasta alcanzar la ruptura dieléctrica.

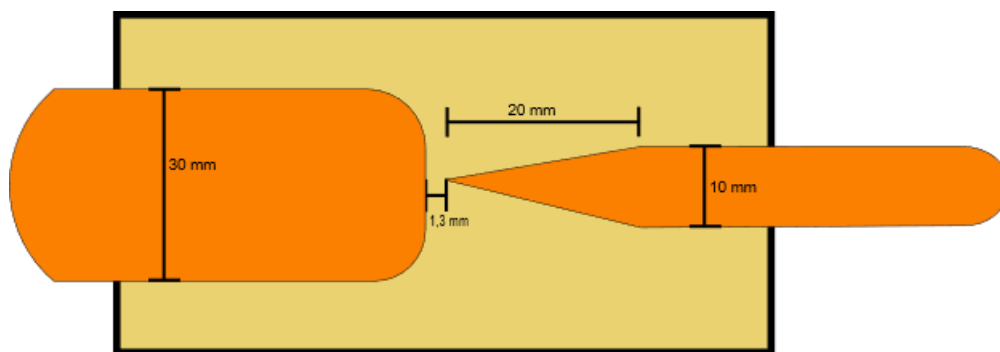


Figura 18: Esquema de probeta.



Figura 19: Cinta de cobre de la marca Eterart.

Para fabricar la fase de silicona se utilizará silicona RTV XL 8820T como la que se muestra en la Figura 20 (b), mezclada con su catalizador en una proporción 100:2.5 en peso. Ambos componentes serán mezclados y desgasificados en un horno de vacío, durante 2

minutos. Posteriormente, la mezcla será vertida en moldes como los presentados en la Figura 20 (a) y sometida a un segundo proceso de desgasificación durante 15 minutos, con el objetivo de eliminar burbujas de aire y reducir la humedad presente en la mezcla. Esto permite mejorar la uniformidad del material y de la interfaz formada finalmente se realizará un proceso de curado a 23°C durante 24 horas.



Figura 20: (a) Molde para la fase de silicona. (b) Silicona caucho TRV XL 8820T con catalizador.

Para fabricar la fase de resina se utilizará resina epóxica MEPOX 1124U, mezclada con su catalizador en una proporción 2:1. Posteriormente, la mezcla será sometida a un proceso de desgasificación durante 15 minutos. Luego, será vertida en moldes como los mostrados en la Figura 21 y sometida a un segundo proceso de desgasificación durante 15 minutos. Finalmente, se realizará un proceso de curado a 23 °C durante 24 horas, seguido de un postcurado a 50 °C durante 15 horas.

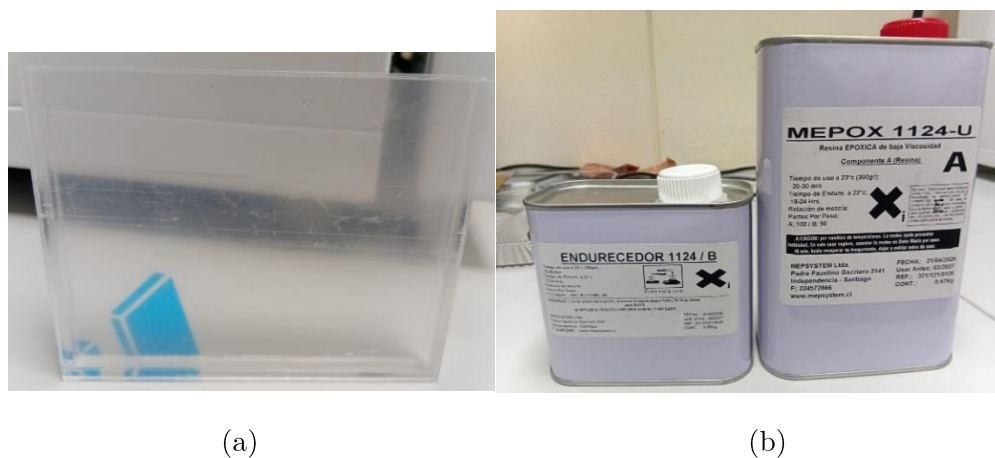


Figura 21: (a) Moldes para la fase de resina epóxica. (b) Resina epóxica Mepox 1124-U con endurecedor.

3.3 Defecto en la interfaz

En este apartado se describe el procedimiento utilizado para introducir defectos controlados en las probetas de ensayo, con el objetivo de analizar los efectos producidos por el contaminante sobre la interfaz de estudio. Asimismo, se presenta una comparación entre las probetas contaminadas y aquellas que no poseen defectos, permitiendo evaluar la influencia del contaminante en el comportamiento observado durante los ensayos.

La norma IEC 60815-1 [15] describe distintos escenarios de contaminación a los que pueden estar expuestos los aisladores. Con el fin de seguir un procedimiento estandarizado, se buscó replicar condiciones normadas de contaminación. Para ello, se utilizó como guía el trabajo de [28], en el cual se estudia cómo la contaminación en aisladores influye en la aparición de descargas parciales bajo esfuerzos DC. En dicha investigación se emplea un aislador compuesto de cuatro aletas de la marca Silpak, y se propone caracterizar los escenarios de contaminación mediante los parámetros ESDD y NSDD. Estos parámetros permiten determinar las concentraciones de sal y caolín en agua necesarias para representar distintos escenarios de contaminación. A continuación, en la Tabla 2 se presentan las concentraciones para simular los escenarios E2 y E5.

Escenario	concentración de sal g/l	concentración de caolín g/l
E2	1	1
E5	20	2

Tabla 2: Concentraciones de partículas ESDD y NSDD.

Una vez definidas las concentraciones, los escenarios de contaminación pueden replicarse de forma sencilla. Para ello, se preparó la mezcla correspondiente y, mediante una jeringa de cromatografía, se aplicaron $2\ \mu\text{L}$ de solución entre los electrodos. Durante este proceso se tuvo especial cuidado en asegurar que la contaminación estableciera una conexión entre ambos electrodos y que, al posicionar la fase de silicona sobre la fase de resina epóxica, dicha conexión se mantuviera.

Es importante destacar la utilidad de la jeringa de cromatografía en el procedimiento de contaminación, ya que inicialmente se evaluaron otros métodos de aplicación de la solución contaminante. Entre ellos, se consideró el uso de un atomizador manual con gatillo para rociar la solución sobre la muestra, así como la exposición de la probeta de resina epóxica, con los electrodos instalados, dentro de una cámara de humedad equipada con un sistema

de humidificación, con el objetivo de favorecer la impregnación del contaminante sobre la superficie.

Sin embargo, estos métodos fueron descartados debido a que no permitían controlar adecuadamente la cantidad ni la ubicación del contaminante en la zona de interés del ensayo. En contraste, el uso de la jeringa de cromatografía permitió una aplicación más localizada y controlada de la solución, asegurando una mayor reproducibilidad del procedimiento experimental.

Con el fin de comprobar que tanto afecta la característica de humedad en la aparición de descargas parciales se proponen los siguientes contaminantes:

- Agua destilada.
- Escenario E2 húmedo.
- Escenario E5 húmedo.
- Escenario E2 seco.
- Escenario E5 seco.

Para los escenarios secos, el procedimiento consistió en aplicar la solución contaminante entre los electrodos y dejarla secar durante 24 horas, con el objetivo de eliminar la presencia de humedad antes del ensayo. En cambio, los escenarios húmedos fueron ensayados poco tiempo después de aplicar la solución, con el fin de conservar la condición húmeda del contaminante y evitar posibles desplazamientos, filtraciones o alteraciones en su distribución entre los electrodos.

3.4 Instrumentos utilizados

En este apartado se describen los instrumentos utilizados durante el desarrollo experimental, indicando sus principales características técnicas, su función dentro del ensayo y la finalidad específica para la cual fueron empleados en esta investigación.

Horno de secado y bomba de vacío

El horno de secado de la marca Faithful que se muestra en la Figura 22 permite mantener en su interior presiones menores a 133 Pa mediante el uso de una bomba de vacío, además de operar a distintas temperaturas controladas. Este equipo fue utilizado durante la fabricación de las dos fases de las probetas: una de silicona y otra de resina epóxica. La aplicación de vacío permitió extraer la humedad y el aire remanente que pudiera quedar atrapado en el interior del material, mientras que el control de temperatura permitió realizar los procesos de curado requeridos para cada fase.



Figura 22: Horno de secado y bomba de vacío.

Moldes de aluminio con geometría punta placa

Los moldes de aluminio mostrados en la Figura 23 fueron utilizados para definir la geometría de las probetas sobre cinta de cobre, permitiendo posteriormente su recorte y utilización en la fabricación de las probetas. A continuación, se presentan las dimensiones de los moldes utilizados.

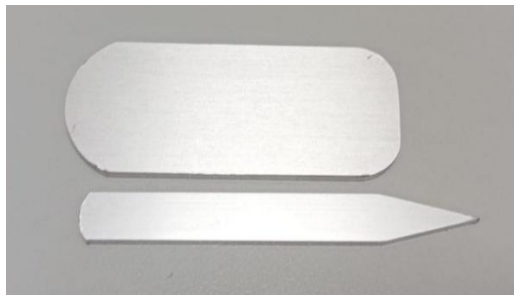


Figura 23: Moldes de aluminio con geometría punta placa.

Lupa estereoscópica binocular.

La lupa estereoscópica mostrada en la Figura 24 fue utilizada para verificar que los electrodos, al momento de ser adheridos a la fase de resina epóxica, presentaran una geometría adecuada y estuvieran libres de defectos visibles. Además, permitió corroborar que el contaminante estableciera una conexión entre los electrodos en aquellos ensayos que requerían esta condición.



(a)



(b)

Figura 24: (a) Lupa estereoscópica binocular. (b) Degradación de la probeta luego de la ruptura vista desde la lupa estereoscópica binocular.

Jeringa de cromatografía

La jeringa de cromatografía mostrada en la Figura 25 fue utilizada para aplicar, de manera precisa, una solución compuesta por agua desalinizada, sal y caolín sobre las probetas que requerían contaminación controlada. Esta jeringa posee una capacidad máxima de $1\mu L$, permitiendo dosificar pequeñas cantidades de solución con alta precisión y repetibilidad.



Figura 25: Jeringa de cromatografía.

Electrodos

Para montar la probeta en el circuito de ensayo se utilizaron los electrodos mostrados en la Figura 26 los cuales fueron diseñados con bordes redondeados para minimizar la aparición de descargas parciales.



(a)



(b)

Figura 26: (a) Electro de HV para la probeta. (b) Electrodo a tierra para la probeta.

Equipo VLF

En la Figura 27 el equipo utilizado para la aplicación de tensión DC fue el *Very Low Frequency* (VLF) modelo Frida TD de la marca Baur. Este equipo permite realizar ensayos bajo esfuerzos de tensión continua en ambas polaridades, con un rango de tensión entre 0 y 34 kV en magnitud. Además, el equipo cuenta con modos de control automático y manual de tensión, permitiendo realizar ajustes precisos durante los ensayos.



Figura 27: Generador VLF.

Amplificador de alta tensión y generador de señales

En la Figura 28 se muestra el equipo utilizado para aplicar tensión AC estuvo compuesto por un generador de señales Rigol DG-1022 y un amplificador de alta tensión Trek modelo 20/20C-HS. El generador Rigol DG-1022 fue utilizado para producir una señal sinusoidal de 50 Hz, con un valor RMS máximo de 5 V. Posteriormente, esta señal fue amplificada mediante el equipo Trek 20/20C-HS, el cual posee una razón de amplificación de 1:2000, permitiendo obtener la tensión requerida para la realización de los ensayos.



(a)

(b)

Figura 28: (a) Amplificador de señales. (b) Generador de señales.

Divisor resistivo

En la Figura 29 se muestra el divisor resistivo fue utilizado para medir indirectamente la tensión aplicada durante los ensayos DC, reduciendo la tensión de entrada a un nivel seguro para los instrumentos de medición. El divisor posee una razón de 1:20100, lo que permite monitorear tensiones elevadas de forma proporcional, precisa y segura.



Figura 29: Divisor resistivo.

Transformador de corriente de alta frecuencia (HFCT)

En la Figura 30 se muestra el HFCT utilizado fue de la marca Techimp y posee un ancho de banda de 1 a 80 MHz. Este sensor fue empleado para medir los pulsos de corriente de alta frecuencia asociados a las descargas parciales que circulaban hacia tierra desde la probeta. La señal capturada por el HFCT era posteriormente enviada al osciloscopio. Con el fin de evitar la saturación de la señal medida, se utilizó una sonda de atenuación $\times 10$.

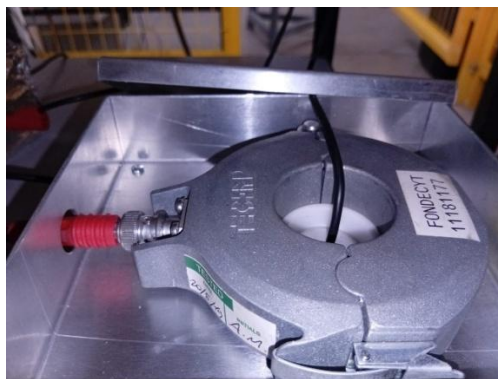


Figura 30: Transformador de corriente de alta frecuencia (HFCT).

Equipo de medición de descargas parciales Omicron

En la Figura 31 se muestra el equipo Omicron fue utilizado para medir las descargas parciales generadas por el circuito sustractor y transmitir esta información al computador. Mediante el software MPD, se registraron los datos correspondientes a cada ensayo, incluyendo la cantidad de descargas parciales, su intensidad y los niveles de tensión aplicados. En el caso de los ensayos bajo esfuerzos AC, también se registró la fase en la que ocurre cada descarga parcial. El equipo posee una tasa de muestreo de $48\mu s$.



Figura 31: (a) Omicron modulo MPD 600. (b) Omicron modulo MCU 502.

Osciloscopio

Para este trabajo se utilizó un osciloscopio Keysight Infiniium S-Series, modelo DSOS104A, mostrado en la Figura 32, el cual posee un ancho de banda de 2.5 GHz. Este equipo fue empleado para registrar la forma de onda de los pulsos provenientes del HFCT, permitiendo posteriormente su procesamiento y análisis. Además, el osciloscopio cuenta con sistema operativo Windows 11, lo que facilita la adquisición, almacenamiento y gestión de los datos obtenidos durante los ensayos.

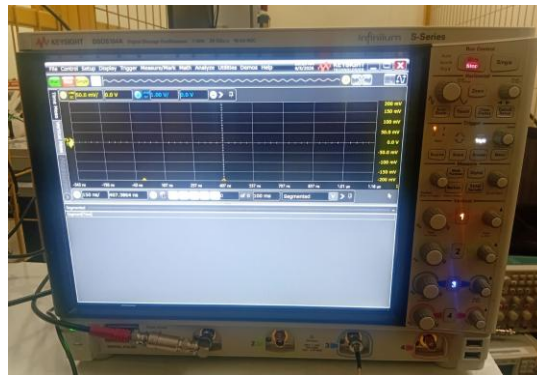


Figura 32: Osciloscopio Keysight.

3.5 Procedimiento de ensayos

Para realizar los ensayos se construyen las probetas y se montan en el circuito de experimental, se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Los electrodos deben cumplir con la distancia de separación establecida y encontrarse libres de residuos. En caso de presentar suciedad, deben ser limpiados utilizando alcohol isopropílico antes de realizar el ensayo.
- Al momento de montar la probeta, el peso utilizado para aplicar presión debe colocarse de manera adecuada, con el fin de minimizar la cantidad de aire presente en la interfaz.
- Para los ensayos con contaminante húmedo, se debe verificar antes y después del montaje de la probeta que el contaminante mantenga la unión entre ambos electrodos. Para ello, inicialmente se utiliza el microscopio para corroborar esta condición. Durante el montaje de la probeta se debe tener especial cuidado, ya que al aplicar presión el contaminante puede desplazarse; por esta razón, la colocación del peso debe realizarse de manera lenta y precisa.
- Para los ensayos con contaminante seco, se debe verificar inicialmente que el contaminante, en estado húmedo, establezca una unión entre ambos electrodos. Luego, transcurridas 12 horas de secado, se debe corroborar que el contaminante seco

continúe uniendo los electrodos y que no presente contaminación externa o residuos no deseados.

- Antes de aplicar la tensión se debe calibrar la ómicron.
- Una vez calibrado el equipo Omicron, se debe verificar que no exista ruido eléctrico significativo tanto en las mediciones registradas por el propio equipo como en las señales medidas mediante el HFCT y visualizadas en el osciloscopio.
- Se recomienda no realizar mediciones de descargas parciales en paralelo con otros ensayos que puedan generar pulsos eléctricos hacia tierra, ya que estas perturbaciones afectan las mediciones obtenidas tanto en el osciloscopio como en el sistema de adquisición de descargas parciales.

El esquema de energización utilizado se presenta en la Figura 33 y corresponde a un esquema análogo para las tres variantes generales de ensayos realizados. En los ensayos bajo esfuerzos AC, la tensión se incrementó desde 1 kV hasta 10 kV mediante escalones de 1 kV. Para los ensayos bajo esfuerzos DC sin contaminación, correspondientes al caso base, se aplicó inicialmente una tensión de 14 kV durante 30 minutos. Posteriormente, la tensión se incrementó mediante escalones de 2 kV, con duraciones de 30 minutos o 2 minutos, hasta alcanzar tensiones finales de 18 kV, 26 kV o 34 kV, las cuales se mantuvieron durante algunas horas. En el caso de los ensayos bajo esfuerzos DC con contaminación, el procedimiento comenzó con una tensión de 1 kV durante 10 minutos, seguida de incrementos de 1 kV cada 2 minutos. Es importante destacar que todos los ensayos DC fueron realizados en ambas polaridades, positiva y negativa.

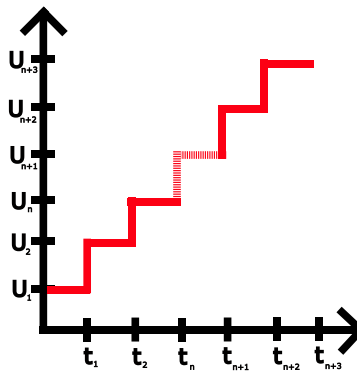


Figura 33: Esquema de energización para los ensayos.

En conjunto, este esquema de energización permite estudiar la evolución del proceso de degradación de la interfaz sólido-sólido bajo una aplicación progresiva de tensión,

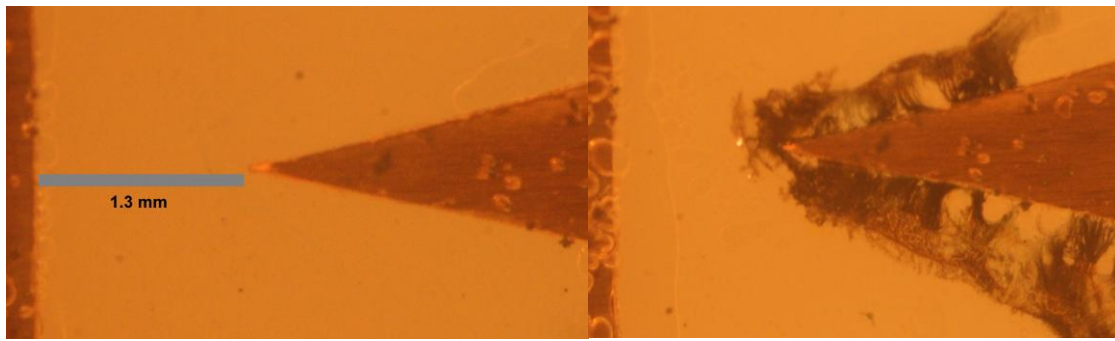
distinguiendo entre los efectos asociados al aumento gradual de la tensión y aquellos relacionados con el envejecimiento bajo condiciones estacionarias. Además, al considerar ensayos con y sin contaminación, se proporciona una base experimental para evaluar la influencia de agentes externos sobre la aparición, intensidad y frecuencia de las descargas parciales, así como sobre los mecanismos de degradación de la interfaz.

4. Resultados

En esta sección se presentará el análisis de los experimentos realizados. Para ello, se utilizarán diversos métodos de análisis asociados a la degradación y a la aparición de descargas parciales, tales como mapas PRPD para el caso AC, mapas TF y PSA para ensayos DC y AC, entre otros métodos. El análisis se estructurará de forma individual según los incrementos de tensión, tal como se explicó en la sección anterior, con el fin de identificar una posible evolución en la degradación del material aislante. Es importante mencionar que no todos los ensayos realizados en este trabajo presentaron una degradación notable a simple vista; es decir, en algunos casos no se observó carbonización entre los electrodos. Por esta razón, con el objetivo de analizar una evolución en la que la degradación fuese visible de manera sencilla, los ensayos bajo esfuerzos DC fueron diseñados para inducir la ruptura dieléctrica de la probeta.

Es importante definir qué se entiende por ruptura dieléctrica. Las descargas parciales no son equivalentes a una ruptura dieléctrica, ya que corresponden a fenómenos localizados dentro del aislamiento. Sin embargo, su actividad repetitiva puede constituir un mecanismo de degradación capaz de generar y propagar canales conductores en el material.

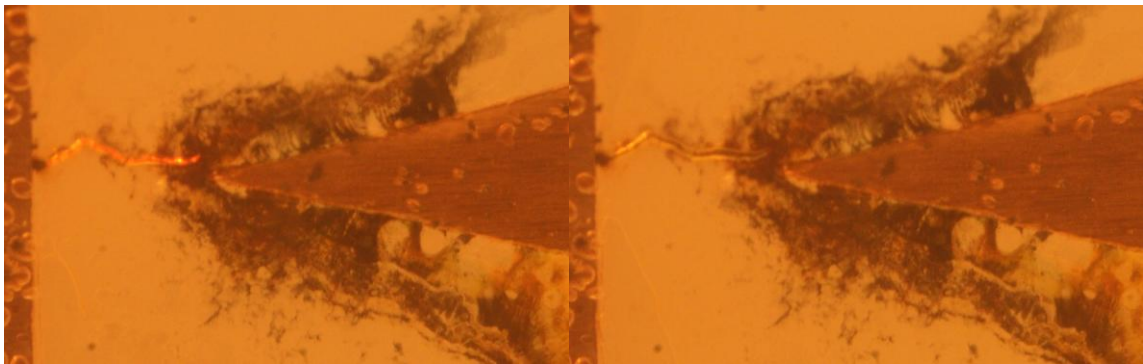
Para las probetas de aislamiento sólido analizadas en este estudio, se definirá la ruptura dieléctrica como la formación de un camino conductor continuo que une eléctricamente ambos electrodos a través del material aislante. Este camino no corresponde únicamente a segmentos aislados de carbonización, sino a una conexión completa entre los electrodos, capaz de permitir el establecimiento de una corriente de conducción de magnitud significativa, a continuación, en las Figuras 34 y 35 se muestra un contraste entre lo que se define como con ruptura dieléctrica para este análisis. En la Figura 34 se presenta una escala de 1.3mm la cual tiene una equivalencia de 1236 pixeles.



(a)

(b)

Figura 34: (a) Probeta contaminada sin degradación. (b) Probeta contaminada con carbonización.



(a)

(b)

Figura 35: (a) Probeta con camino conductor. (b) Probeta con marca del camino conductor.

4.1 Caso AC

El procedimiento experimental utilizado en los ensayos bajo esfuerzo AC consistió en aplicar escalones de tensión de 1 kV cada 2 minutos, iniciando en 1 kV y finalizando en 10 kV, siempre que no se produjera ruptura dieléctrica. En caso de presentarse ruptura, el ensayo se detuvo al momento de observarse la formación de un camino conductor entre los electrodos.

A continuación, en la Tabla 3, se presenta la nomenclatura utilizada para identificar los distintos escenarios estudiados bajo este tipo de excitación, considerando probetas con y sin contaminación.

Prefijo	Caso	Estado del contaminante
AC	Base (B)	-
	Agua destilada (d)	-
	Escenario 2 (E2)	Seco (S)
		Húmedo (H)
	Escenario 5 (E5)	Seco (S)
		Húmedo (H)

Tabla 3: Nomenclatura para los casos AC.

Es importante señalar que cada tipo de ensayo fue repetido tres veces. Por esta razón, además de la nomenclatura definida anteriormente, se incorporó al final el número correspondiente a la repetición del ensayo. Por ejemplo, el tercer ensayo realizado bajo excitación AC, correspondiente al escenario de contaminación E2 en condición húmeda, se identifica como AC_E2H_3.

Los ensayos bajo esfuerzo AC fueron realizados con el objetivo de validar la probeta utilizada a partir de una condición de referencia conocida. Debido a que este tipo de excitación ha sido ampliamente estudiado, estos ensayos permiten establecer una base comparativa mediante la identificación de patrones de degradación previamente reportados.

4.1.1 Análisis PRPD para caso AC

A continuación, en la Figura 36, se presenta la evolución del mapa PRPD correspondiente al ensayo base sometido a esfuerzos de tensión alterna. Se observa un patrón claramente dependiente de la fase, caracterizado por regiones de concentración de descargas parciales asociadas a ambos semiciclos de la tensión aplicada. A medida que aumenta el nivel de tensión, dichas regiones presentan un incremento tanto en la densidad de pulsos como en su dispersión en magnitud y fase, lo que indica una mayor actividad de descargas parciales. De manera cualitativa, los mapas PRPD obtenidos para la condición E2 seco presentan una distribución similar a la observada en el caso base, manteniendo regiones de actividad dependientes de la fase y una evolución comparable al incrementar la tensión.

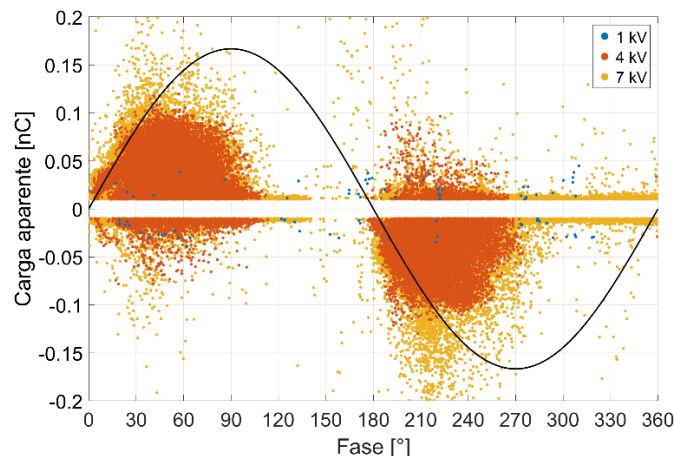


Figura 36: Diagrama PRPD del ensayo AC_B_3

Los distintos tipos de contaminación utilizados pueden modificar de manera significativa el comportamiento eléctrico de la interfaz entre los materiales aislantes y los electrodos. La sal disuelta en agua incrementa la conductividad superficial, favoreciendo la circulación de corrientes de fuga y la redistribución de cargas sobre la superficie. Por su parte, el caolín, al formar un depósito heterogéneo, poroso y de mayor rugosidad, puede retener humedad y partículas salinas, además de generar zonas de intensificación local del campo eléctrico.

En contraste, el agua destilada presenta una conductividad considerablemente menor que una solución salina, debido a su baja concentración de iones. Sin embargo, no constituye un aislante perfecto, ya que puede adquirir conductividad por contaminación, contacto con los electrodos o disolución de impurezas presentes en la superficie. Bajo condiciones de campo eléctrico elevado, especialmente cerca de bordes o puntas de los electrodos, puede producirse una ruptura dieléctrica repentina aun cuando previamente se observe una baja actividad de descargas parciales. En la Figura 37 se presentan los diagramas PRPD correspondientes a los distintos escenarios de contaminación. Se observa que la presencia de contaminantes modifica la distribución fase-resuelta de las descargas parciales, concentrando su aparición en intervalos de fase más acotados respecto de los ensayos sin contaminación. Además, se aprecia un aumento en la magnitud de los pulsos registrados, lo que sugiere una mayor severidad de la actividad de descarga.

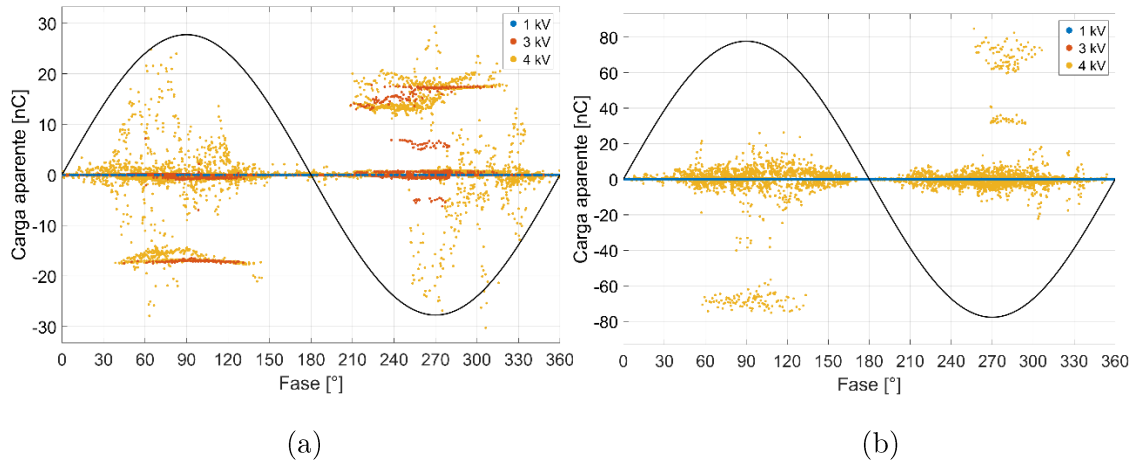


Figura 37: (a) Diagrama PRPD del ensayo AC_E5S_3 (b) Diagrama PRPD del ensayo AC_E2H_2

4.1.2 Pulsos en el tiempo y acumulación de carga

En la Figura 38 se presentan los pulsos y la carga acumulada en función del tiempo para el ensayo base. Las descargas parciales comienzan a observarse de manera sostenida a partir de 3 kV, lo que se refleja en incrementos de la carga acumulada. Debido a la escala temporal utilizada, esta variable puede aparentar un crecimiento lineal; sin embargo, su evolución corresponde a saltos discretos asociados a la ocurrencia de pulsos individuales, cuyos intervalos temporales son mucho menores que los dos minutos de duración de cada escalón de tensión. Finalmente, en el último nivel de tensión se registran descargas del orden de 10 nC, considerablemente mayores que las observadas en los escalones previos, evidenciando una intensificación de la actividad de descarga antes y en la ruptura.

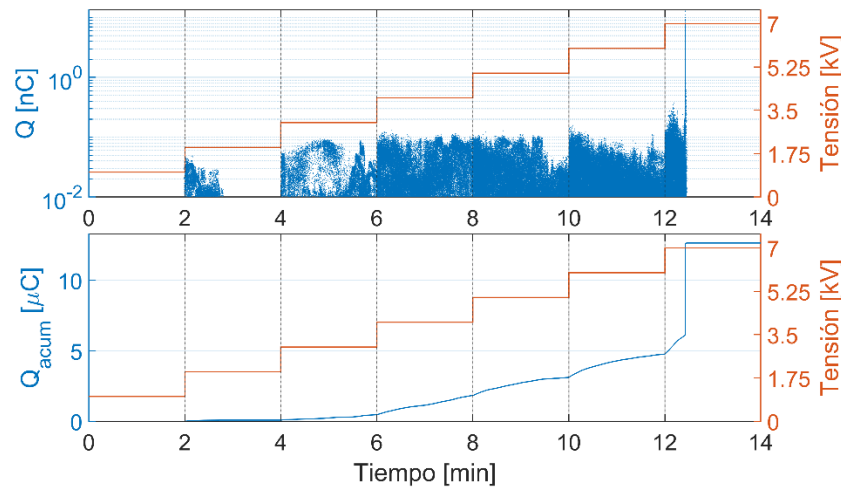


Figura 38: Gráfico pulsos vs tiempo, carga acumulada vs tiempo para el ensayo AC_B_3.

En los ensayos con contaminación, excepto en el caso con agua destilada, se observan comportamientos similares en la evolución de la aparición de descargas parciales y de la carga acumulada. La principal diferencia corresponde a la magnitud de las descargas registradas en los escalones finales, siendo los escenarios húmedos los que presentan mayores niveles de carga aparente al aproximarse a la ruptura dieléctrica. Por otro lado, el ensayo con agua destilada se caracteriza por no presentar actividad de descargas parciales durante los primeros escalones; una vez que estas comienzan a manifestarse, se produce la ruptura dieléctrica de forma prácticamente inmediata.

En la tabla 4 se presenta el valor de carga acumulada de todos los ensayos bajo esfuerzos continuos.

Nombre	Carga acumulada [nC]	Tensión final [kV]	Nombre	Carga acumulada [nC]	Tensión final [kV]
AC_B_1	82909	9	AC_E2S_1	23943	8
AC_B_2	54690	9	AC_E2S_2	34680	8
AC_B_3	12653	7	AC_E2S_3	19002	10
AC_D_1	10532	5	AC_E5H_1	78649	9
AC_D_2	50080	5	AC_E5H_2	1610871	10
AC_D_3	4547	6	AC_E5H_3	3140251	4
AC_E2H_1	363051	6	AC_E5S_1	667369	4
AC_E2H_2	252819	4	AC_E5S_2	403562	5
AC_E2H_3	407978	5	AC_E5S_3	31275	4

Tabla 4: Valores de carga acumulada para el caso AC.

4.1.3 Tasa de repetitividad

En la Figura 39 se presenta la tasa de repetición de las descargas parciales, para un ensayo representativo de cada caso, en función del nivel de tensión aplicado. A partir de este gráfico, se observa que los escenarios húmedos presentan tasas de repetición superiores durante todo el ensayo. Además, hacia los últimos escalones de tensión, estos casos exhiben una leve disminución de la tasa de repetición. En contraste, en los demás escenarios la tasa de repetición tiende a aumentar progresivamente a medida que se incrementa la tensión aplicada.

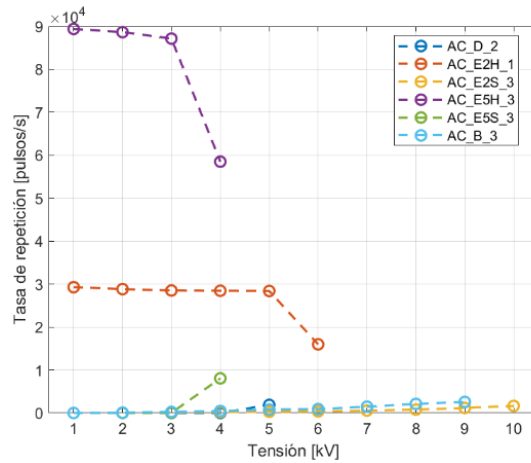


Figura 39: Tasa de repetitividad en función del nivel de tensión

4.1.4 Análisis PSA

En la Figura 40 se presenta la evolución del diagrama PSA para un ensayo sin contaminación. En los primeros niveles de tensión, las descargas se concentran cerca del origen y presentan variaciones reducidas. Al aumentar la tensión, particularmente a 8 kV, se observa una distribución triangular que indica un patrón en la evolución de las magnitudes de descarga, asociado a secuencias de pulsos de mayor y menor amplitud.

La ruptura dieléctrica ocurre a 9 kV, nivel en el que aumenta considerablemente la dispersión y la magnitud de las variaciones entre pulsos consecutivos. Posteriormente, aparecen agrupamientos y trayectorias horizontales, verticales y diagonales decrecientes, las cuales reflejan secuencias repetitivas de descargas con cambios bruscos de amplitud. Estas configuraciones también se observan en otros ensayos, tanto limpios como contaminados, por lo que pueden utilizarse como indicadores cualitativos de cambios en el régimen de descargas parciales.

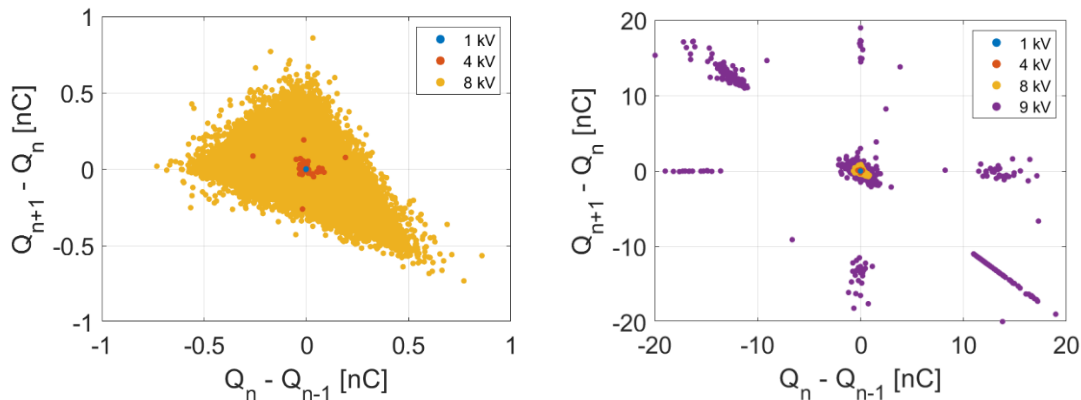


Figura 40: Evolución del diagrama PSA para el ensayo AC_B_1.

En la Figura 41 se presenta el diagrama PSA correspondiente al escalón de 4 kV del ensayo contaminado E5 seco. Aunque la ruptura dieléctrica ocurrió a 5 kV, en este nivel fue posible registrar visualmente la aparición de un arco eléctrico, como se muestra en la Figura 42. Este evento también se refleja en el diagrama PSA mediante trayectorias horizontales, verticales y diagonales decrecientes, asociadas a cambios bruscos y repetitivos en la magnitud de los pulsos antes de la ruptura.

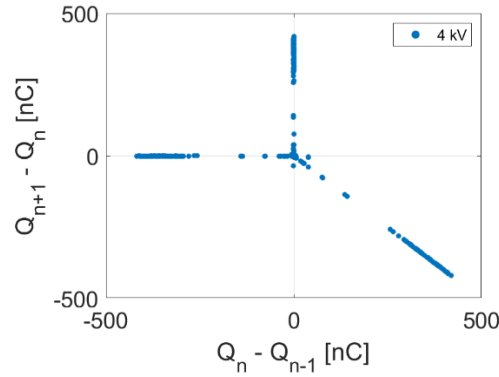


Figura 41: Diagrama PSA del ensayo AC_E5S_2 en 4kV.

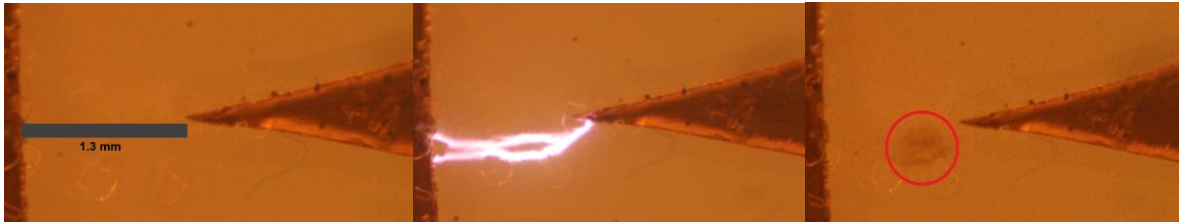


Figura 42: Evolución óptica de probeta

4.1.5 Mapas tiempo – frecuencia

En las Figuras 43, 44, 45 y 46 se muestra la evolución del mapa TF correspondiente a los ensayos realizados bajo alimentación AC. Para representar esta evolución, se presenta la concentración de puntos asociada a los escalones de tensión inicial y final, además de un escalón intermedio. En este caso, se observa que las características de las DP se encuentran dentro del rango de 0–80 MHz en el eje de frecuencia y entre 0–250 ns en el eje temporal.

En la Figura 44 se presenta el mapa TF asociado al caso base, donde se aprecia una expansión de la nube de puntos principalmente en el eje de frecuencia. Por otra parte, en los casos contaminados mostrados en las Figuras 43, 45 y 46, se observa una menor cantidad de puntos

durante los primeros niveles de tensión en comparación con los niveles finales. Asimismo, tanto para los casos contaminados como para el caso base, se aprecia una disminución de la característica temporal de las DP a medida que aumenta el nivel de tensión.

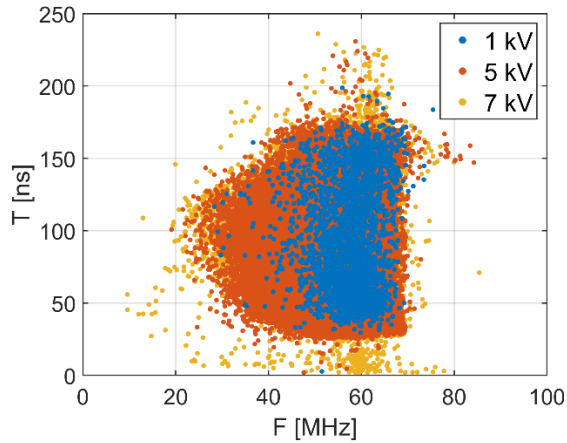


Figura 43: Evolución del mapa TF para el ensayo AC_D_1.

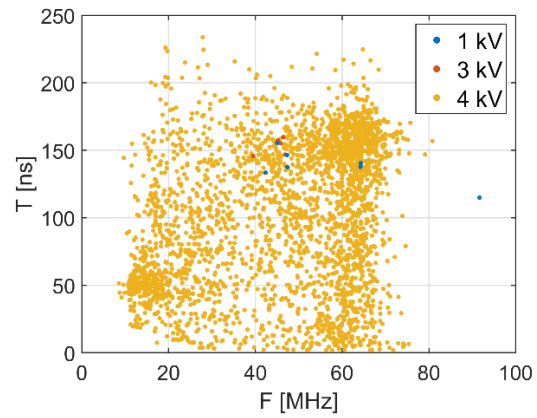


Figura 44: Evolución del mapa TF para el ensayo AC_B_3.

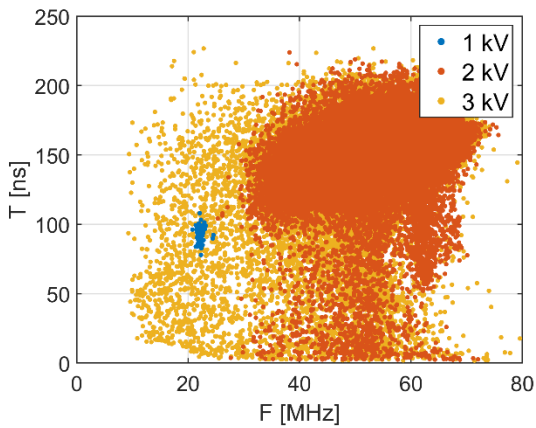


Figura 45: Evolución del mapa TF para el ensayo AC_E2H_2

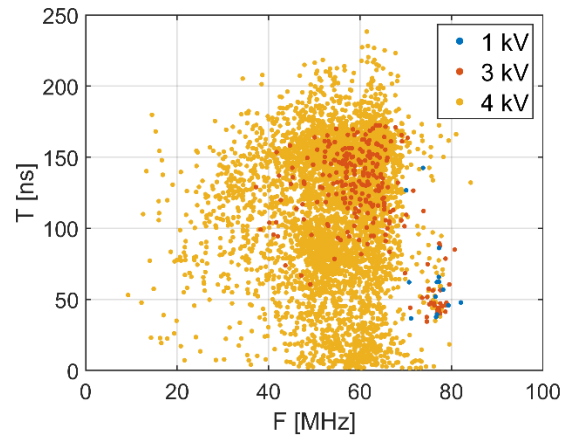


Figura 46: Evolución del mapa TF para el ensayo AC_E5S_2

4.2 Caso DC base

El procedimiento experimental empleado para los ensayos bajo esfuerzos de tensión continua, sin contaminación, consistió en aplicar inicialmente una tensión de 14 kV durante 30 minutos, con el propósito de estabilizar la distribución de carga interna en la probeta. Posteriormente, se aplicaron incrementos escalonados de tensión durante distintos intervalos de tiempo, hasta alcanzar tres niveles finales de tensión, los cuales se mantuvieron durante varias horas. Este análisis incluyó ensayos realizados con polaridad positiva y negativa. A continuación, en la tabla 5 se presenta la nomenclatura utilizada para los ensayos del caso DC base.

Prefijo	Tiempo de escalón	Tensión final	Polaridad
DC	2 min	18kV	Positiva
		26kV	
	30 min	34kV	Negativa

Tabla 5: Nomenclatura para los ensayos DC sin contaminación

Al igual que en los ensayos bajo tensión alterna, cada condición experimental fue repetida tres veces. Por este motivo, al final de la nomenclatura se incorporará el número correspondiente a la repetición realizada. Por ejemplo, el primer ensayo con escalones de 2 minutos, una tensión máxima de 18 kV y polaridad negativa se denominará DC_2_18_N_1.

4.2.1 Pulsos en el tiempo y acumulación de carga

En las Figuras 47 y 48 se presentan los gráficos de cantidad de pulsos y carga acumulada correspondientes a los ensayos DC_2_18_P_1 y DC_2_34_N_2, respectivamente. A partir de estos resultados se observa una marcada variabilidad en la aparición de las descargas parciales entre ensayos. En la Figura 47, las descargas comienzan a registrarse al alcanzar los 18 kV, coincidiendo con la etapa en que se produce la ruptura. En contraste, en la Figura 48 se detectan pulsos desde el inicio del ensayo.

En ambos casos, los incrementos de tensión constituyen las etapas más críticas para la aparición y el aumento de actividad de descargas parciales. Sin embargo, también se registran pulsos de magnitud elevada durante intervalos en los que la tensión se mantiene constante, lo que evidencia que la actividad de descarga no depende únicamente de los saltos de tensión, sino también de la evolución local de las condiciones dieléctricas de la probeta.

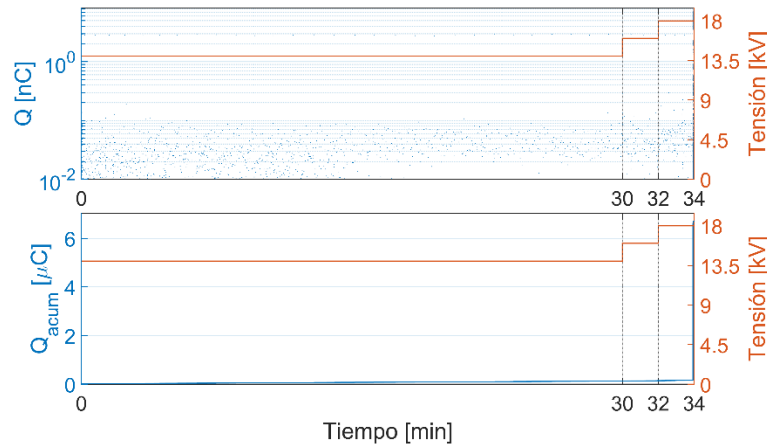


Figura 47: Grafico de pulsos vs tiempo y Carga acumulada vs tiempo para el ensayo DC_2_18_P_1.

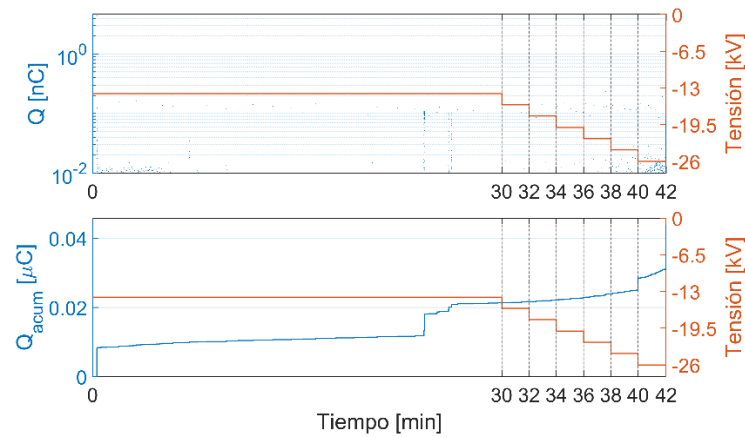


Figura 48: Grafico de pulsos vs tiempo y Carga acumulada vs tiempo para el ensayo DC_2_34_N_2.

Las Figuras 49 y 50 permiten contrastar el efecto del tiempo de permanencia en cada escalón de tensión sobre el comportamiento de la probeta. En la Figura 49 se aplicaron escalones de 2 minutos, condición bajo la cual se produjo la ruptura a aproximadamente -28 kV, sin alcanzar la tensión final programada de -34 kV. En cambio, en la Figura 50 se utilizaron escalones de 30 minutos, lo que permitió completar el ensayo hasta la tensión final. Cabe señalar que la carga acumulada debería presentar variaciones escalonadas, debido a que la cantidad de pulsos corresponde a una variable discreta. No obstante, en el ensayo DC_30_34_P_1 la extensa escala temporal dificulta apreciar dichas separaciones; además, el mayor tiempo de permanencia favorece la aparición de descargas de magnitudes más similares, contribuyendo a una representación visual aparentemente más lineal.

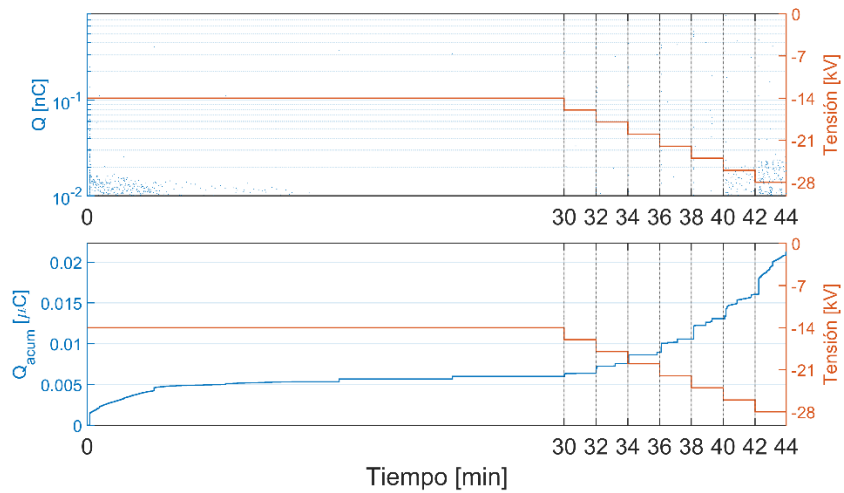


Figura 49: Grafico de pulsos vs tiempo y Carga acumulada vs tiempo para el ensayo DC_2_34_N_3.

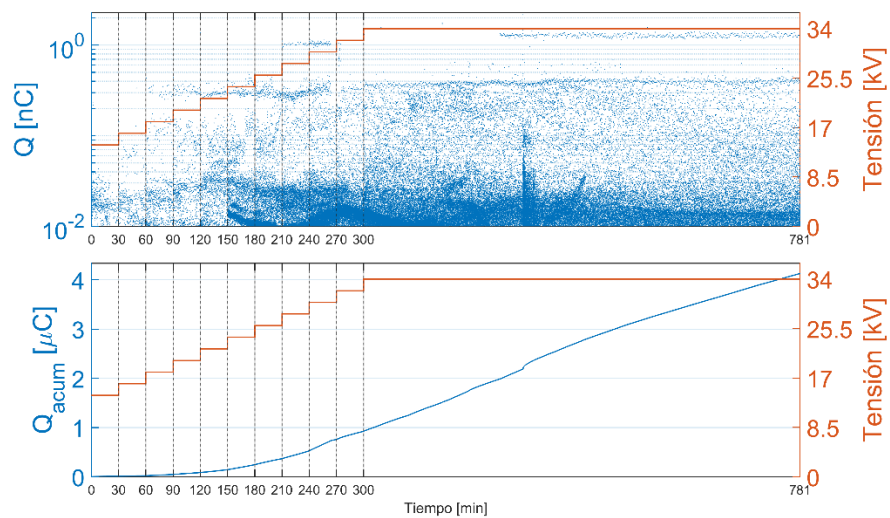


Figura 50: Grafico de pulsos vs tiempo y Carga acumulada vs tiempo para el ensayo DC_30_34_P_1.

En la tabla 6 se muestran todos los valores de carga acumulada para los ensayos realizados bajo esfuerzos DC sin contaminación.

Nombre ensayo	Carga acumulada [nC]	Tensión final [kV]	Nombre ensayo	Carga acumulada [nC]	Tensión final [kV]
DC_2_18_N_1	6278	-18	DC_30_18_N1	1796	-18
DC_2_18_N_2	5479	-18	DC_30_18_N_2	697	-18
DC_2_18_N_3	2065	-18	DC_30_18_N_3	3	-18
DC_2_18_P_1	6700	18	DC_30_18_P_1	2072	18
DC_2_18_P_2	5730	18	DC_30_18_P_2	1794	18
DC_2_18_P_3	3395	18	DC_30_18_P_3	274	18
DC_2_26_N_1	57	-26	DC_30_26_N_1	6796	-26
DC_2_26_N_2	15329	-22	DC_30_26_N_2	1583	-26
DC_2_26_N_3	60	-26	DC_30_26_N_3	4496	-26
DC_2_26_P_1	23586	20	DC_30_26_P_1	858	26
DC_2_26_P_2	54646	22	DC_30_26_P_2	262	24
DC_2_26_P_3	292	18	DC_30_26_P_3	48	26
DC_2_34_N_1	45	-26	DC_30_34_N_1	8228	-30
DC_2_34_N_2	51	-26	DC_30_34_N_2	5508	-34
DC_2_34_N_3	21	-28	DC_30_34_N_3	442	-34
DC_2_34_P_1	56	26	DC_30_34_P_1	4130	34
DC_2_34_P_2	9016	22	DC_30_34_P_2	5239	22
DC_2_34_P_3	26	24	DC_30_34_P_3	1118	34

Tabla 6: Valores de carga acumulada para los ensayos DC base.

4.2.2 Tasa de repetitividad

En términos generales, la tasa de repetición se mantiene en valores bajos durante gran parte de los escalones de tensión analizados. Sin embargo, se observan incrementos puntuales de elevada magnitud en ensayos específicos, los cuales se concentran principalmente en escalones intermedios o finales y no siguen una tendencia con el aumento de la tensión. Por ejemplo, algunos ensayos con escalones de 2 minutos presentan aumentos abruptos al aproximarse a la tensión máxima aplicada, mientras que en ciertos ensayos de 30 minutos también se registran máximos aislados, seguidos incluso por una disminución de la tasa en escalones posteriores. Este comportamiento evidencia una alta variabilidad entre repeticiones y sugiere que la actividad de descargas parciales depende no solo de la tensión aplicada, sino también de la condición particular de cada probeta y de la evolución local del deterioro dieléctrico. A continuación, desde la Figura 51 a 56 se muestran las tasas de repetitividad de los ensayos para el caso DC base.

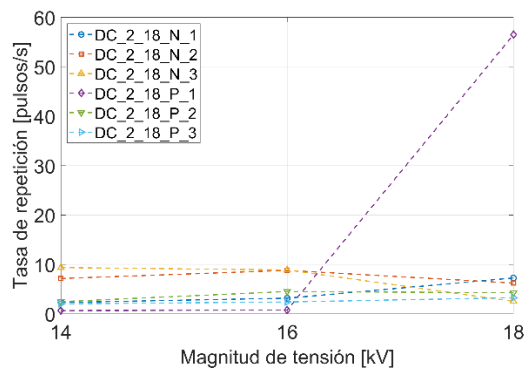


Figura 51: Tasa de repetición vs tensión para saltos de 2 minutos hasta 18kV.

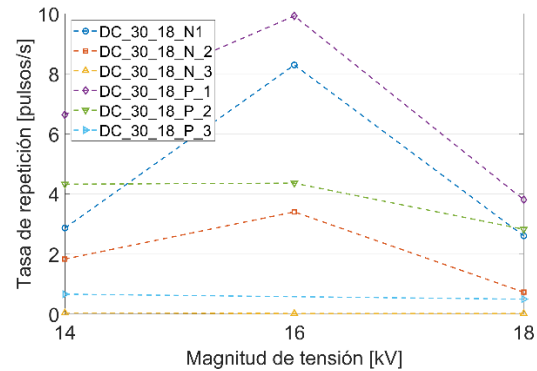


Figura 52: Tasa de repetición vs tensión para saltos de 30 minutos hasta 18kV.

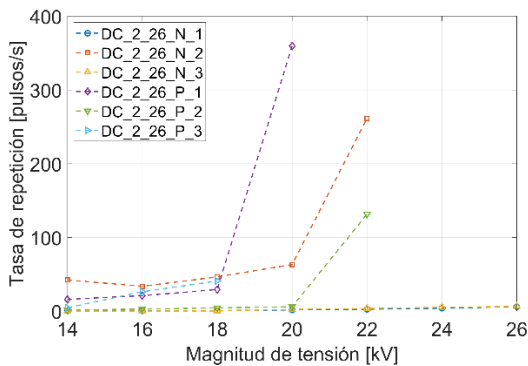


Figura 53: Tasa de repetición vs tensión para saltos de 2 minutos hasta 26kV.

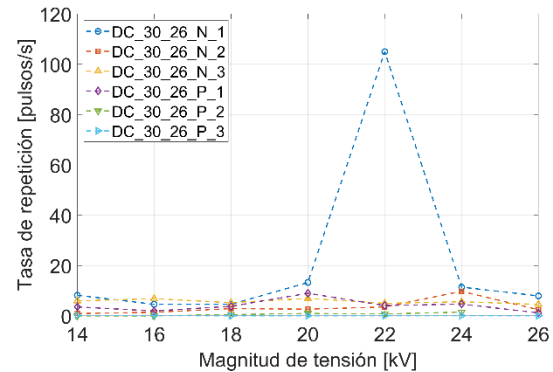


Figura 54: Tasa de repetición vs tensión para saltos de 30 minutos hasta 26kV.

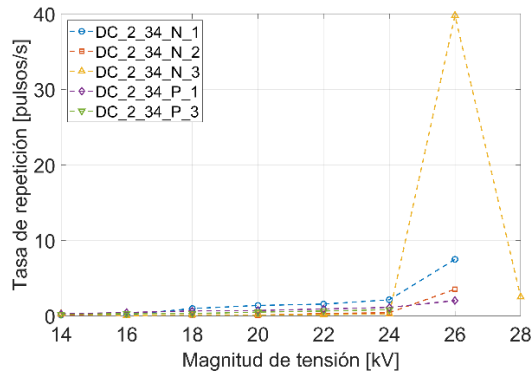


Figura 55: Tasa de repetición vs tensión para saltos de 2 minutos hasta 34kV.

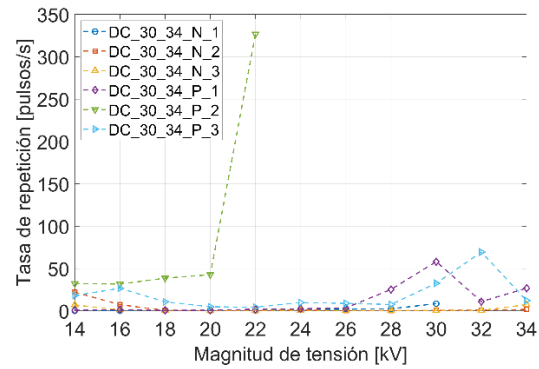


Figura 56: Tasa de repetición vs tensión para saltos de 30 minutos hasta 34kV.

4.2.3 Análisis PSA

En las Figuras 57 y 58 se observa un patrón de evolución del diagrama PSA recurrente en los ensayos sin contaminación sometidos a esfuerzos continuos. En la zona central se forma una distribución aproximadamente triangular, lo que evidencia la presencia de diferentes relaciones entre las magnitudes de pulsos consecutivos y una variabilidad progresiva en la actividad de descarga. Además, se distinguen agrupaciones con tendencias horizontales, verticales y diagonales decrecientes, las cuales comienzan a hacerse más evidentes a medida que avanza el ensayo o durante las etapas previas a la ruptura. Estos patrones sugieren cambios en la dinámica de las descargas parciales, asociados tanto a la evolución temporal del ensayo como al aumento del deterioro dieléctrico de la probeta.

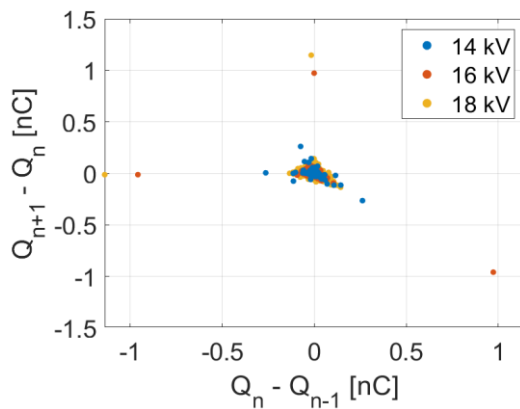


Figura 57: Diagrama PSA del ensayo DC_30_18_P_1.

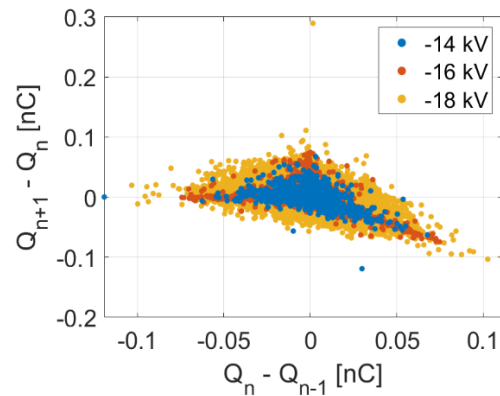


Figura 58: PSA del ensayo DC_30_18_N_2.

En la Figura 59 se presenta la evolución del diagrama PSA correspondiente a un ensayo que culmina con ruptura dieléctrica. Si bien se observan indicios de las tendencias horizontales, verticales y diagonales previamente descritas, durante la etapa asociada a la ruptura aparece una mayor dispersión de los puntos, formando agrupaciones menos definidas y distribuidas en distintas regiones del plano. Este comportamiento refleja una mayor variabilidad entre pulsos consecutivos, consistente con una actividad de descargas parciales más inestable durante el deterioro final de la probeta.

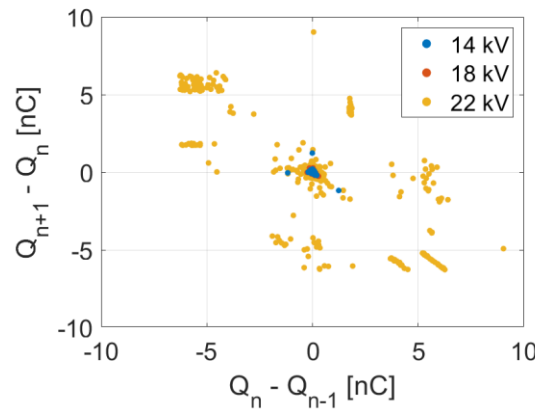


Figura 59: Diagrama PSA del ensayo DC_2_34_P_2.

4.2.4 Mapas tiempo – frecuencia

En las Figuras 60 y 61 se observa que los ensayos con escalones de tensión de 2 minutos presentan, hacia los niveles finales de tensión, un ensanchamiento más pronunciado de las poblaciones en el plano TF, acompañado de una mayor dispersión y de la aparición de agrupaciones periféricas. En contraste, las Figuras 62 y 63, correspondientes a ensayos con escalones de 30 minutos, muestran distribuciones comparativamente más compactas, con un ensanchamiento menos marcado y núcleos de puntos más definidos. Este comportamiento sugiere que el menor tiempo de permanencia entre incrementos de tensión favorece una respuesta más transitoria y heterogénea de las descargas parciales, mientras que los escalones de mayor duración permiten una evolución más estable de las poblaciones de pulsos.

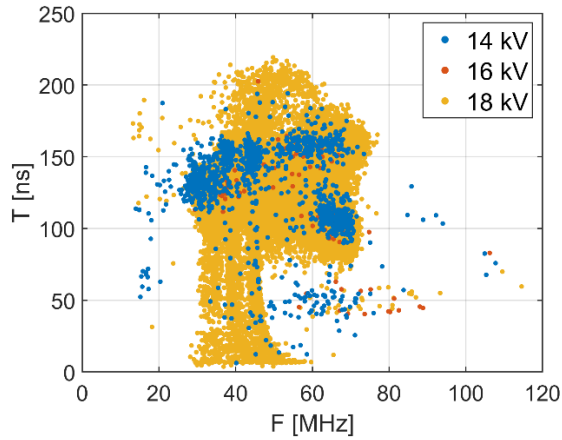


Figura 60: Evolución del mapa TF para el ensayo DC_2_18_P_3.

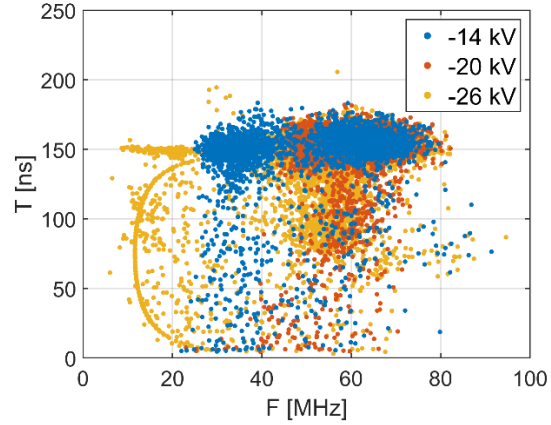


Figura 61: Evolución del mapa TF para el ensayo DC_2_26_N_3.

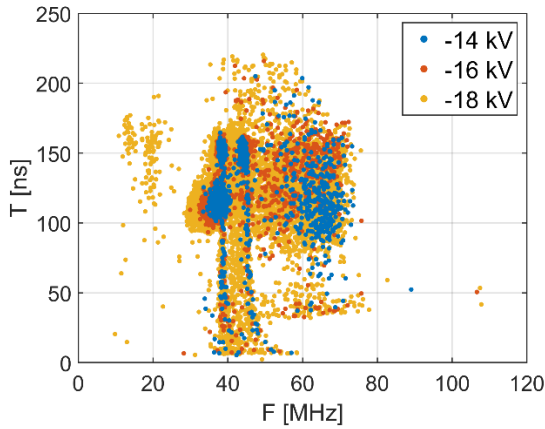


Figura 62: Evolución del mapa TF para el ensayo DC_30_18_N_2.

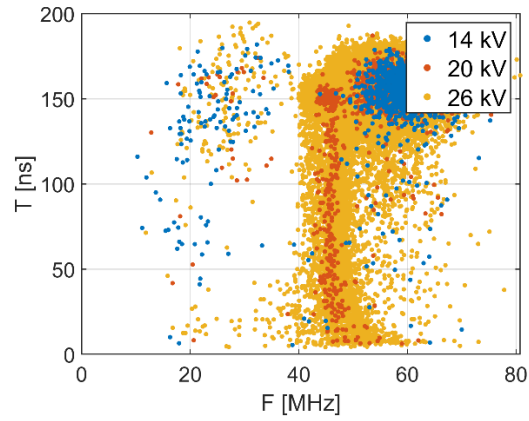


Figura 63: Evolución del mapa TF para el ensayo DC_30_26_P_3.

4.3 Caso DC con contaminación

El procedimiento experimental empleado para los ensayos bajo esfuerzos de tensión continua con contaminación consistió en aplicar inicialmente una tensión de 1 kV durante 10 minutos, con el propósito de estabilizar la distribución interna de carga en la probeta. Posteriormente, se aplicaron escalones de tensión de 1 kV con una duración de dos minutos cada uno. La nomenclatura utilizada para identificar los ensayos es análoga a la empleada en los ensayos bajo tensión alterna, incorporando adicionalmente la polaridad aplicada; por ejemplo, el segundo ensayo realizado con contaminación de agua destilada y polaridad negativa se denomina DC_D_N_2.

4.3.1 Pulsos en el tiempo y acumulación de carga

En las Figuras 64 y 65 se presenta la evolución de la aparición de pulsos y de la carga acumulada durante los ensayos. A partir de estos resultados, se observó que las probetas contaminadas con agua destilada tendieron a presentar descargas parciales previas a la ruptura al ser energizadas con polaridad negativa. En contraste, este comportamiento no se evidenció en los ensayos realizados con polaridad positiva.

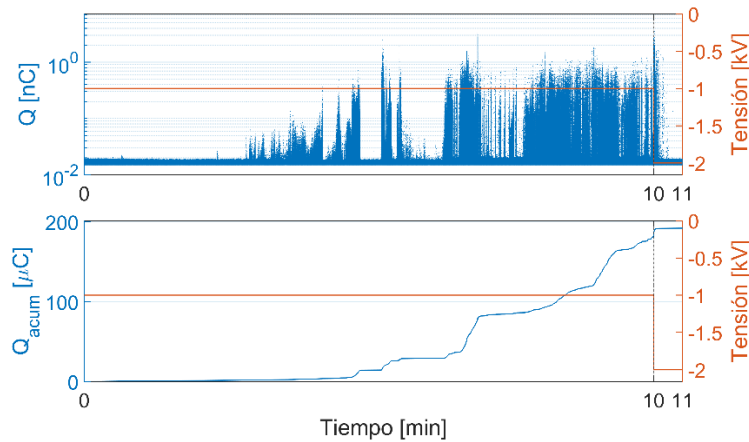


Figura 64: Grafico de pulsos vs tiempo y Carga acumulada vs tiempo para el ensayo DC_D_N_3.

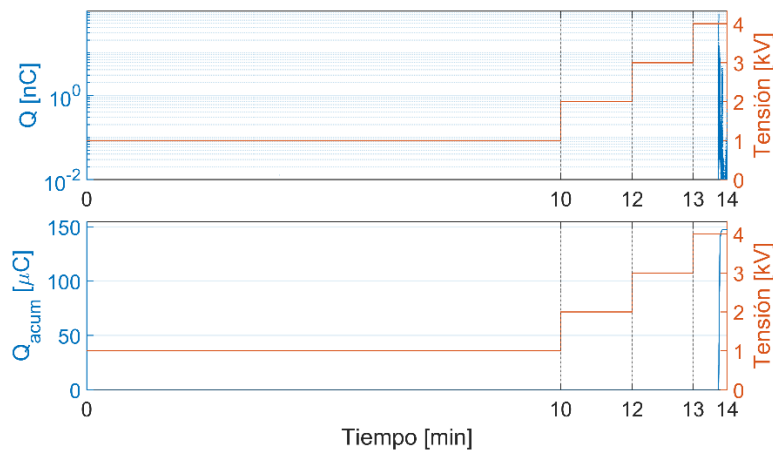


Figura 65: Grafico de pulsos vs tiempo y Carga acumulada vs tiempo para el ensayo DC_D_P_3.

La aparición de descargas parciales puede reflejarse visualmente mediante la carbonización localizada de la superficie de la probeta o, como se observa en la Figura 66, mediante el desplazamiento del contaminante presente en la interfaz entre los electrodos.

Durante la aplicación de tensión se evidenció inicialmente una zona de quemadura en dicha interfaz, acompañada por un movimiento de la mezcla contaminante. Este comportamiento puede asociarse a la conducción superficial favorecida por la presencia de sales disueltas, la cual genera migración de cargas, calentamiento localizado y posibles fuerzas capaces de desplazar la solución y las partículas de caolín. Posteriormente, la degradación se concentró en una trayectoria más definida, observándose una carbonización directa sobre la superficie de la probeta, lo que sugiere la formación progresiva de un camino conductor entre los electrodos.

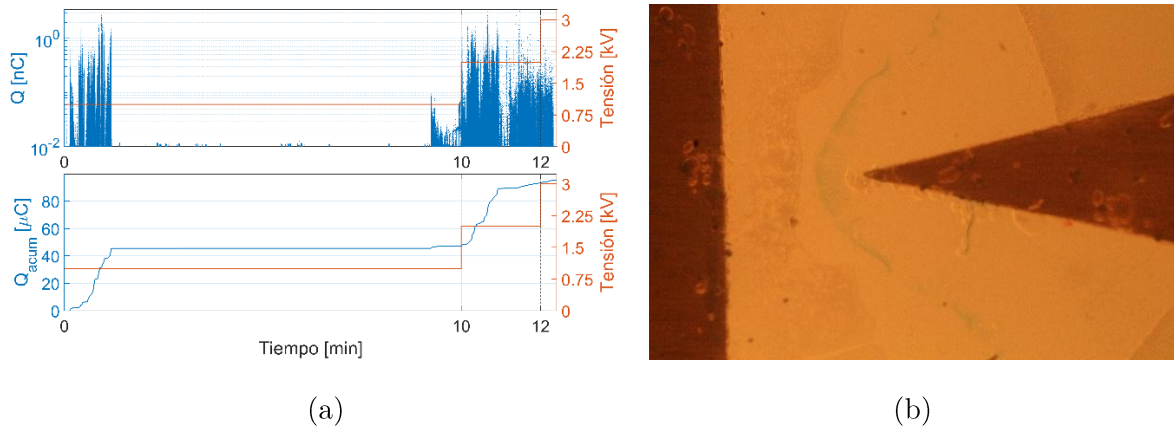


Figura 66: (a) Grafico pulsos vs tiempo y carga acumulada vs tiempo (b) Probeta contaminada del ensayo DC_E2H_P_3 a un minuto del ensayo.

En los ensayos realizados con contaminación previamente secada, no se identificó una tendencia uniforme en la aparición de descargas parciales. En algunos casos, los pulsos se presentaron durante las primeras etapas del ensayo y posteriormente disminuyeron o desaparecieron, mientras que en otros se observaron únicamente hacia los niveles finales de tensión. Este comportamiento puede relacionarse con la distribución no homogénea del residuo contaminante luego del proceso de secado. La evaporación de la solución puede concentrar sales y partículas de caolín en zonas específicas de la interfaz, generando trayectorias superficiales con distinta conductividad, geometría y nivel de humedad residual.

En la tabla 7 se preseta el valor de carga acumulada para todos los ensayos bajo esfuerzos continuos que presentan algún tipo de contaminación.

Nombre ensayo	Carga acumulada [nC]	Tensión final [kV]	Nombre ensayo	Carga acumulada [nC]	Tensión final [kV]
DC_D_N_1	19968	-11	DC_E2S_P_1	14364	20
DC_D_N_2	28490	-6	DC_E2S_P_2	12824	20
DC_D_N_3	194696	-2	DC_E2S_P_3	5470	20
DC_D_P_1	30662433	9	DC_E5H_N_1	639781	-6
DC_D_P_2	124330	5	DC_E5H_N_2	577981	-4
DC_D_P_3	147566	4	DC_E5H_N_3	1001539	-7
DC_E2H_N_1	12778	-5	DC_E5H_P_1	43060	6
DC_E2H_N_2	21910	-2	DC_E5H_P_2	8709	12
DC_E2H_N_3	8903	-7	DC_E5H_P_3	271448	3
DC_E2H_P_1	63180	8	DC_E5S_N_1	12138	-7
DC_E2H_P_2	71160	5	DC_E5S_N_2	99570	-6
DC_E2H_P_3	107845	3	DC_E5S_N_3	71439	-7
DC_E2S_N_1	2722	-5	DC_E5S_P_1	886	6
DC_E2S_N_2	2976	-15	DC_E5S_P_2	2020	6
DC_E2S_N_3	276103	-11	DC_E5S_P_3	2774	7

Tabla 7 : Valores de carga acumulada para el caso DC contaminado

4.3.2 Tasa de repetitividad

Como se puede apreciar en las figuras, no se observa un comportamiento típico de aumento progresivo de la actividad de descargas parciales con el incremento de la tensión aplicada. En cambio, se evidencian variaciones caracterizadas por aumentos localizados y abruptos en determinados niveles de tensión, los cuales, en algunos casos, cesan o disminuyen en los escalones posteriores. Asimismo, se observa una dispersión importante entre ensayos realizados bajo una misma condición de contaminación.

Este comportamiento sugiere que la actividad de descargas parciales no depende solo de la tensión aplicada, sino también de las condiciones particulares de la interfaz. Factores como la distribución del contaminante, la humedad, la acumulación de carga espacial y la formación de trayectorias conductivas pueden modificar el campo eléctrico y favorecer o inhibir la aparición de DP.

Al comparar las tasas de repetición máximas registradas para ambas polaridades en las distintas condiciones de contaminación, se observa que en cuatro de los cinco casos analizados la mayor actividad de descargas parciales se presentó bajo polaridad negativa. Esta tendencia se aprecia con mayor claridad en los ensayos correspondientes a las condiciones E2S, E5H y E5S, donde las tasas máximas registradas en polaridad negativa superan de manera importante a las obtenidas bajo polaridad positiva. Si bien este comportamiento no se repite de forma absoluta en todos los ensayos, los resultados sugieren una tendencia predominante hacia una mayor actividad de descargas parciales bajo polaridad negativa para las condiciones de contaminación evaluadas. De la Figuras 67 a 71 se muestran las tasas de repetición de los ensayos DC con contaminación.

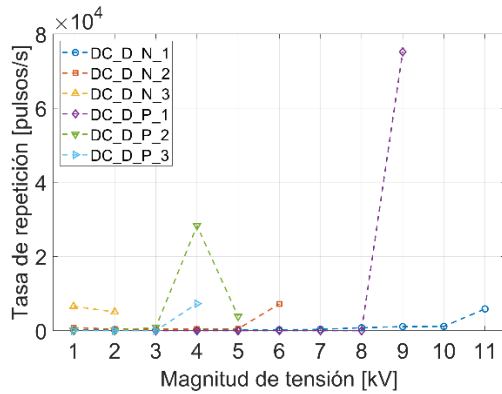


Figura 67: Tasa de repetición vs tensión
para el caso de agua destilada.

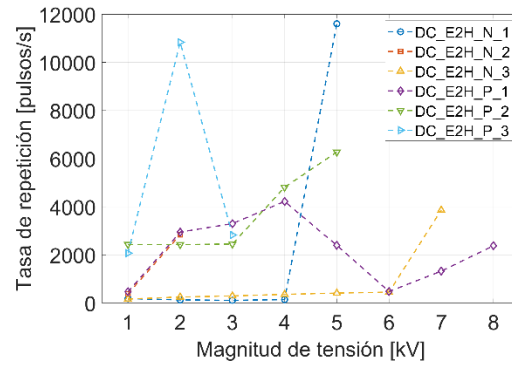


Figura 68: Tasa de repetición vs tensión
para el caso de E2 húmedo.

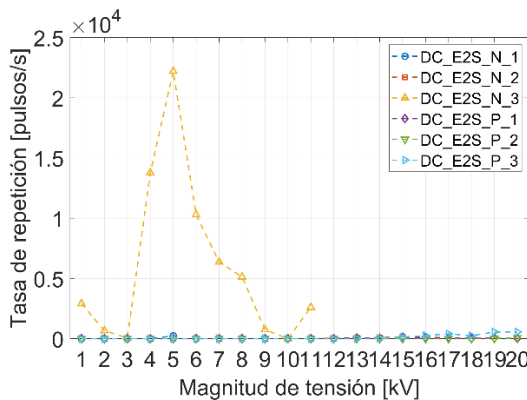


Figura 69: Tasa de repetición vs tensión
para el caso de E2 seco.

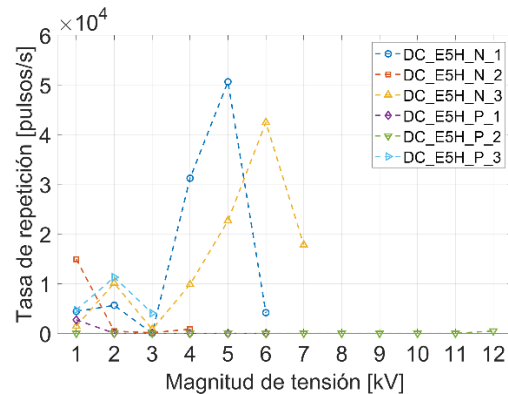


Figura 70: Tasa de repetición vs tensión
para el caso de E5 húmedo.

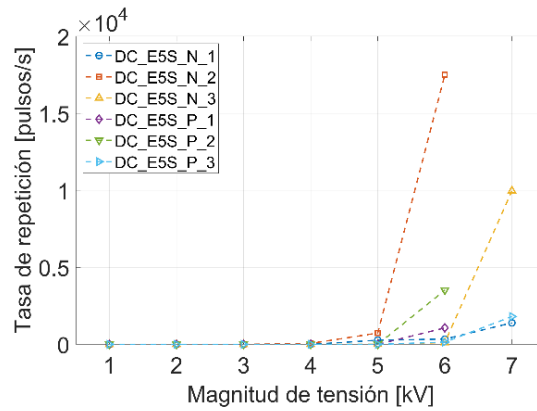


Figura 71: Tasa de repetición vs tensión para el caso de E5 seco.

4.3.3 Análisis PSA

Cuando existe contaminación en la interfaz de la probeta, los diagramas PSA pueden presentar una evolución variable con el incremento de la tensión aplicada. En la Figura 72 (a), correspondiente a los últimos escalones del ensayo DC_E2S_P_1, se observa una concentración principal de puntos alrededor del origen, junto con agrupaciones lineales horizontales, verticales y diagonales. En la Figura 72 (b), correspondiente al último escalón de tensión, estas agrupaciones aumentan considerablemente su extensión y también se aprecia una mayor dispersión de la nube central, lo que indica una mayor variabilidad entre las magnitudes de pulsos consecutivos.

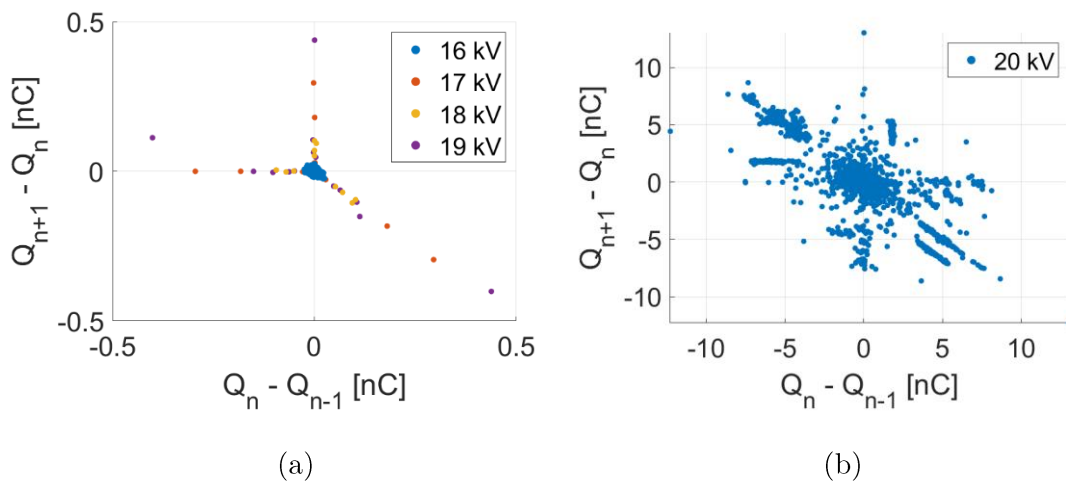


Figura 72: (a) Diagrama PSA de algunos escalones del ensayo DC_E2S_P_1. (b) Diagrama PSA del último escalón.

En la Figura 73 se presenta la evolución del diagrama PSA correspondiente al ensayo DC_E2H_P_1. A diferencia del comportamiento observado en la figura anterior, en este caso los escalones previos a la ruptura dieléctrica no presentan agrupaciones lineales tan marcadas. Si bien se aprecia un aumento gradual en la dispersión de los puntos al incrementar la tensión, la nube principal permanece concentrada en torno al origen hasta los últimos niveles de tensión. Recién en el escalón final se observa una expansión significativa del diagrama, con la aparición de puntos alejados de la región central y una mayor variabilidad entre pulsos consecutivos. Esto sugiere que, para esta condición de ensayo, la transición hacia una actividad más irregular ocurre de forma más abrupta y no mediante la formación progresiva de patrones lineales claramente definidos.

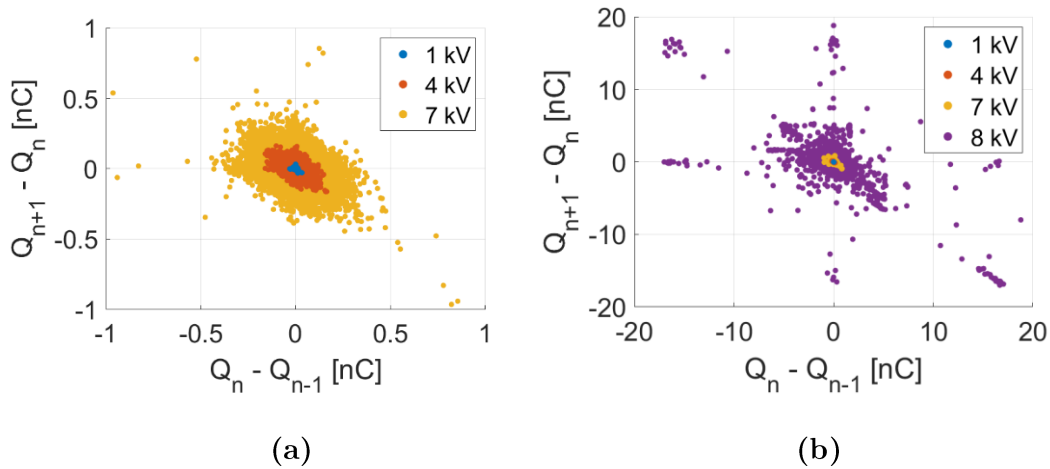


Figura 73: (a) Crecimiento del diagrama PSA para el ensayo DC_E2H_P_1. (b) Crecimiento del diagrama PSA más el último escalón de tensión.

4.3.4 Mapas tiempo – frecuencia

En las Figuras 74 y 75 se presenta la evolución de los mapas TF para los ensayos DC_E5H_P_2 y DC_E2H_P_1, respectivamente. En ambos casos se observa una concentración relevante de pulsos en una región central-superior del plano tiempo–frecuencia, localizada aproximadamente entre valores intermedios de frecuencia y valores altos de la característica temporal (T). La persistencia de esta nube en ambos escenarios sugiere la existencia de pulsos con características temporales y frecuenciales similares bajo contaminación homogénea y polaridad positiva cuando están cerca de ruptura.

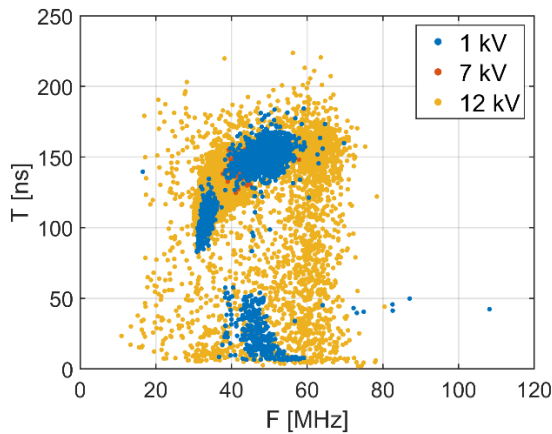


Figura 74: Evolución del mapa TF para el ensayo DC_E5H_P_2.

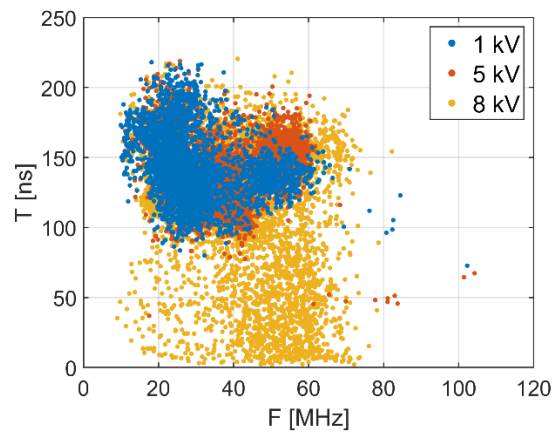


Figura 75: Evolución del mapa TF para el ensayo DC_E2H_P_1.

En las Figuras 76 a 79 se observa un corrimiento de las poblaciones de pulsos hacia mayores valores del parámetro de frecuencia a medida que aumenta la tensión aplicada. En los primeros escalones, los pulsos se concentran principalmente en valores cercanos a 30 MHz; sin embargo, al aumentar la tensión, las distribuciones se desplazan progresivamente o se extienden hacia frecuencias mayores, alcanzando valores cercanos a 70 MHz. Este comportamiento se aprecia tanto en los ensayos bajo polaridad negativa como positiva, aunque con distintos niveles de dispersión y solapamiento entre escalones. El aumento de frecuencia sugiere una modificación gradual en las características temporales de los pulsos, con una mayor presencia de señales asociadas a variaciones más rápidas en los niveles de tensión superiores. No obstante, este corrimiento frecuencial no implica necesariamente un aumento de la magnitud o severidad de las descargas.

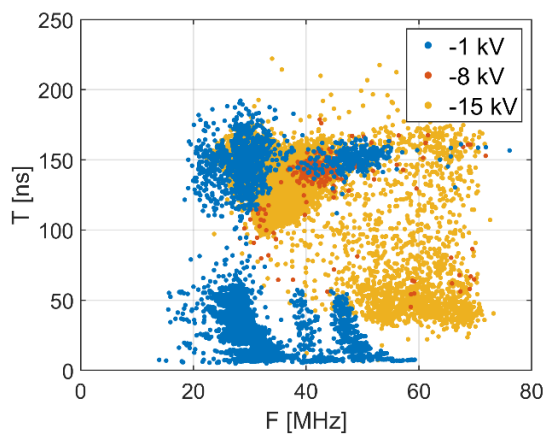


Figura 76: Evolución del mapa TF para el ensayo DC_E2S_N_2.

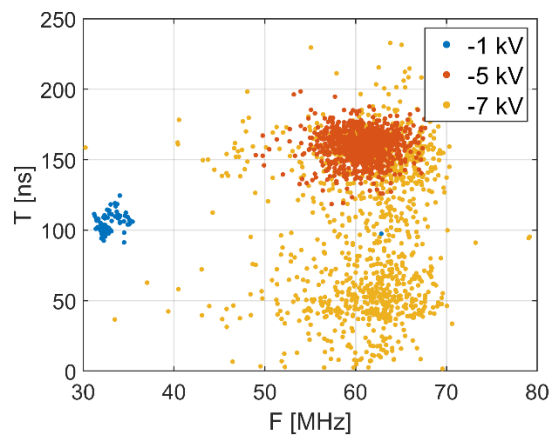


Figura 77: Evolución del mapa TF para el ensayo DC_E5S_N_3.

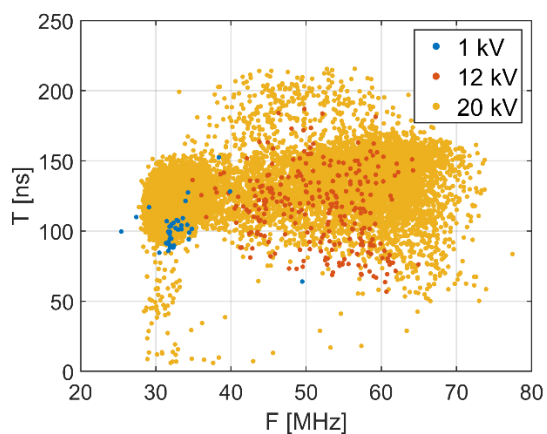


Figura 78: Evolución del mapa TF para el ensayo DC_E2S_P_3.

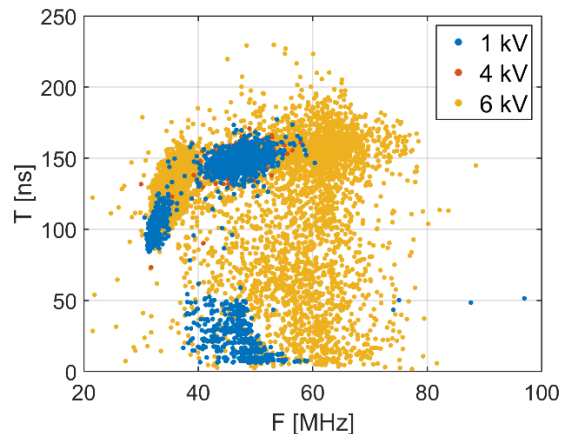


Figura 79: Evolución del mapa TF para el ensayo DC_E5S_P_1.

4.4 Comparación Caso AC base con Caso DC base

Es importante destacar que los ensayos realizados bajo alimentación AC presentan niveles de tensión considerablemente inferiores a los correspondientes a los ensayos bajo alimentación DC. En estos últimos, la tensión aplicada puede alcanzar valores comprendidos entre 14 kV, como mínimo, y 34 kV, como máximo, mientras que en los ensayos AC la tensión final alcanza hasta 10 kV.

Asimismo, existe una diferencia significativa en la duración de los ensayos. En el caso de la alimentación AC, la duración máxima es de aproximadamente 20 minutos, considerando 2 minutos por escalón de tensión. En contraste, algunos ensayos bajo alimentación DC pueden extenderse hasta aproximadamente 18 horas. Incluso el intervalo de menor duración considerado en estos ensayos corresponde a 30 minutos, asociado al escalón de 14 kV, utilizado para favorecer la agrupación y redistribución de la carga sobre la interfaz de la probeta.

En la tabla 8 se presenta el contraste entre la carga acumulada registrada para los ensayos base bajo alimentación AC y DC. Se observa que los ensayos AC alcanzan mayores valores de carga acumulada, aun cuando presentan una duración considerablemente menor que los ensayos realizados bajo alimentación DC. Al comparar los valores máximos, el caso AC alcanza una carga acumulada de 82 909 nC, mientras que para el caso DC el máximo corresponde a 54 646 nC. Esto implica que el valor máximo registrado bajo alimentación AC es aproximadamente un 51,7 % mayor que el obtenido bajo alimentación DC.

Una diferencia aún más pronunciada se observa en los valores mínimos, donde el caso AC presenta 12 653 nC frente a solo 3 nC para el caso DC. En términos porcentuales, el valor mínimo del caso AC es aproximadamente un 421 667 % mayor, equivalente a cerca de 4218 veces el valor registrado en DC. Sin embargo, esta diferencia porcentual debe interpretarse con precaución, debido al valor extremadamente bajo utilizado como referencia en el caso DC.

	AC base	DC base
Valor máximo de Q_{acum} [nC]	82909	54646
Valor mínimo de Q_{acum} [nC]	12653	3

Tabla 8: Valor máximo y mínimo de carga acumulada para los casos AC y DC base.

Para los mapas TF y PSA no se observaron diferencias significativas entre ambos tipos de alimentación. En el caso de los mapas TF, las características asociadas al tiempo y a la frecuencia de los pulsos presentan un comportamiento similar, observándose en ambos casos una ampliación del rango de frecuencias a medida que avanza el ensayo. Por su parte, los mapas PSA muestran una evolución comparable, caracterizada por un crecimiento de forma triangular a lo largo del ensayo. En consecuencia, tanto la distribución TF como la evolución del PSA presentan tendencias análogas bajo alimentación AC y DC.

En los ensayos bajo alimentación AC se evidencia visualmente un desarrollo progresivo de la arborescencia eléctrica, como se observa en las Figuras 80 y 81. En contraste, este tipo de crecimiento no resulta apreciable en los ensayos base realizados bajo alimentación DC.

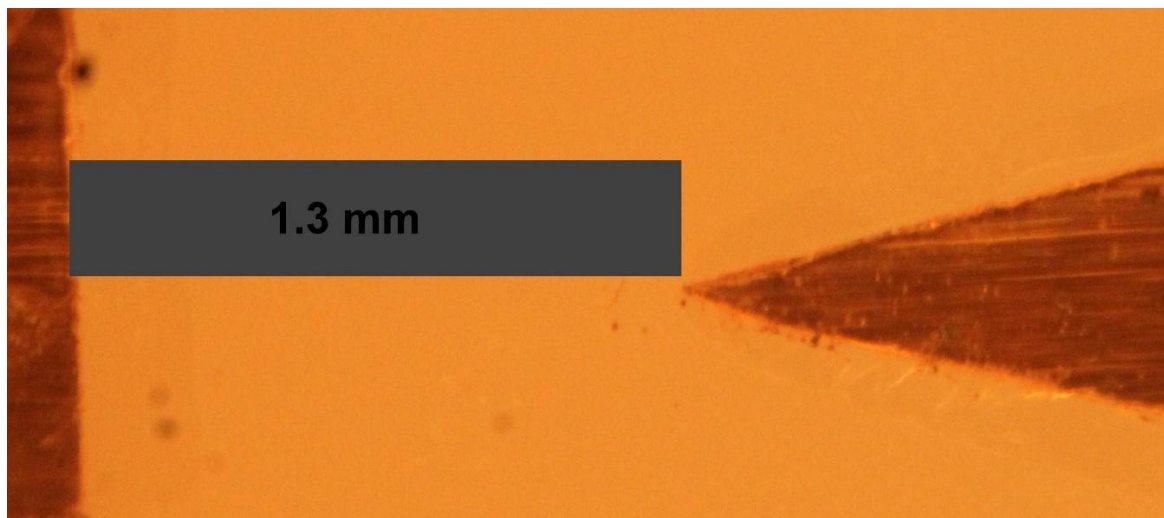


Figura 80: Interfaz de la probeta AC_B_3.



Figura 81: Interfaz de la probeta AC_B_3 con arborización eléctrica.

4.5 Comparación Caso DC base con DC contaminado

Los ensayos del caso base comienzan con una tensión de magnitud 14 kV y, en algunos casos, alcanzan tensiones finales de hasta 34 kV. En contraste, los ensayos con contaminación no superan los 20 kV de tensión final. Por lo tanto, una primera comparación relevante indica que la presencia de contaminante en la interfaz de la probeta reduce considerablemente el nivel de tensión que esta puede soportar antes de presentar una ruptura dieléctrica o una condición que impide continuar el ensayo. Este resultado era esperable, ya que el contaminante favorece la concentración del campo eléctrico en la interfaz. Se observa que los valores de carga acumulada de las DP son considerablemente menores en el caso base que en los ensayos con contaminación. Una tendencia coherente se aprecia también en la tasa de repetición de descargas parciales, la cual tiende a ser mayor en las probetas contaminadas. Además, estos ensayos presentan fluctuaciones más pronunciadas entre escalones de tensión, en comparación con el comportamiento relativamente más estable del caso base. Esta variabilidad podría asociarse a cambios progresivos en la interfaz de la probeta, ya que el contaminante puede desplazarse, redistribuirse o evaporarse bajo la acción del campo eléctrico y del calentamiento local producido por las descargas, modificando las condiciones superficiales en las que se desarrolla la actividad de descarga parcial.

A continuación, en las Tablas 9 y 10 se presentan los valores máximos de la tasa de repetición obtenidos para cada escenario de ensayo, tanto en los casos base como en los casos

contaminados. A partir de estos resultados, se observa que el valor máximo registrado para los casos base corresponde a 373,28 pulsos/s, mientras que para los casos contaminados se alcanza un máximo de 75 224,20 pulsos/s. Por lo tanto, la tasa de repetición máxima observada en los casos contaminados es aproximadamente 202 veces la registrada en el caso base, lo que evidencia un aumento considerable de la actividad de descargas parciales en presencia de contaminación.

Nombre del ensayo	Tasa de repetición [pulsos/s]	Nivel de tensión [kV]
DC_2_18_P_1	57,27	18
DC_30_18_P_1	9,92	16
DC_2_26_P_1	373,28	20
DC_30_26_N_1	106,47	22
DC_2_34_N_3	40,32	26
DC_30_34_P_2	318,92	22

Tabla 9: Tasa de repetición máxima para cada escenario base.

Nombre del ensayo	Tasa de repetición [pulsos/s]	Nivel de tensión [kV]
DC_D_P_1	75224,20	9
DC_E2H_N_1	11741,27	5
DC_E2S_N_3	22204,74	5
DC_E5H_N_1	50630,62	5
DC_E5S_N_2	15789,00	6

Tabla 10: Tasa de repetición máxima para cada escenario contaminado.

El diagrama PSA presenta un comportamiento general similar para los casos bajo excitación continua con y sin defecto. Sin embargo, en los ensayos con contaminación se observa una aparición más temprana y recurrente de tendencias horizontales, verticales y diagonales decrecientes. Estas estructuras podrían estar asociadas a cambios progresivos en la interfaz de la probeta, tales como la carbonización superficial o la formación de trayectorias preferenciales para el desarrollo de las descargas parciales. En contraste, patrones similares también se identifican en el caso base, aunque tienden a aparecer luego de un mayor tiempo de ensayo o cuando la probeta ha estado expuesta durante más tiempo al esfuerzo eléctrico. Esto sugiere que la contaminación podría acelerar procesos de degradación que, en ausencia de contaminante, se desarrollan de forma más gradual.

Los mapas TF correspondientes tanto a los casos base como a los casos con contaminación presentan una evolución caracterizada por un aumento en la dispersión de las nubes de puntos, tanto en el eje temporal como en el eje de frecuencia, a medida que avanza el ensayo. Es importante señalar que este comportamiento se encuentra asociado principalmente al incremento de la tensión aplicada sobre la probeta. En efecto, las probetas que presentaron ruptura dieléctrica no evidencian una evolución del mapa TF claramente diferenciada respecto de aquellas que no alcanzaron dicha condición.

Los ensayos con presencia de contaminación presentan una mayor propensión a la ruptura dieléctrica y un comportamiento menos predecible que los casos base. En algunos escenarios con agua destilada y contaminación húmeda o seca, la probeta permaneció sin actividad apreciable de descargas parciales hasta que, tras un incremento de tensión, se registraron únicamente algunos pulsos antes de producirse la ruptura dieléctrica en un intervalo de tiempo reducido. En contraste, en los casos base las DP estuvieron presentes desde etapas tempranas del ensayo. Estos resultados indican que, si bien la presencia de DP evidencia actividad asociada al deterioro del aislamiento, la ruptura dieléctrica puede ocurrir sin que exista previamente un período prolongado de actividad de descargas parciales.

5. Conclusiones y Trabajo futuro

- El trabajo permitió caracterizar experimentalmente el tracking interfacial en probetas de silicona y resina epóxica bajo solicitaciones AC y DC, tanto en condición base como en presencia de humedad y contaminación. En total se realizaron 84 ensayos, correspondientes a 18 ensayos AC, 36 ensayos DC sin contaminación y 30 ensayos DC con contaminación. El análisis conjunto de las descargas parciales y de la evolución óptica de la interfaz permitió determinar que la condición de la interfaz modifica significativamente tanto la actividad eléctrica registrada como el proceso de degradación observado hasta la ruptura.
- Se implementó un procedimiento que permitió incorporar de forma localizada contaminación y humedad en la interfaz sólido-sólido, diferenciando condiciones con agua destilada y contaminantes E2 y E5, en estado húmedo y seco. La aplicación mediante jeringa de cromatografía entregó un mayor control y permitió realizar las repeticiones requeridas; sin embargo, en condiciones húmedas se observó una mayor variabilidad debido al desplazamiento de la solución al comprimir ambas fases de la

probeta. Por ello, la distribución del contaminante debe considerarse al interpretar la dispersión entre ensayos.

- Los ensayos realizados sin defectos permitieron establecer una referencia para las solicitaciones AC y DC. Bajo AC se observaron patrones PRPD dependientes de la fase, una evolución progresiva de las descargas parciales y desarrollo visible de arborescencia eléctrica. Bajo DC, en cambio, la actividad presentó mayor variabilidad y no se observó de igual forma este crecimiento. La carga acumulada máxima fue de 82 909 nC en AC y 54 646 nC en DC, es decir, un 51,7 % mayor en AC, pese a que los ensayos AC se realizaron entre 1 y 10 kV, mientras que los DC alcanzaron entre 14 y 34 kV. En conjunto, estos resultados indican que, bajo las condiciones estudiadas, la solicitud AC produjo una degradación más severa de la interfaz que la solicitud DC.
- En las probetas con defectos sometidas a AC, la presencia y el estado del contaminante modificaron el comportamiento de las descargas parciales respecto del caso base. Las probetas base finalizaron entre 7 y 9 kV, mientras que escenarios como agua destilada alcanzaron entre 5 y 6 kV, E2 húmedo entre 4 y 6 kV y E5 seco entre 4 y 5 kV. Sin embargo, esta reducción no fue uniforme para todas las condiciones, ya que E2 seco alcanzó entre 8 y 10 kV y E5 húmedo presentó una dispersión entre 4 y 10 kV. Asimismo, los escenarios húmedos presentaron, en general, mayores tasas de repetición durante el ensayo. Estos resultados muestran que la presencia de un defecto no determina por sí sola la severidad del comportamiento bajo AC también resultan relevantes su composición, estado de humedad y distribución en la interfaz.
- Bajo solicitud DC, la contaminación produjo el efecto más relevante observado en el trabajo: una disminución de la capacidad de la interfaz para mantener el esfuerzo eléctrico junto con un aumento significativo de la actividad de descargas parciales. Los ensayos base comenzaron en 14 kV y algunas probetas alcanzaron 34 kV. En contraste, los ensayos contaminados alcanzaron como máximo 20 kV, y 26 de los 30 ensayos contaminados, equivalentes al 86,7 %, finalizaron antes de alcanzar 14 kV, es decir, antes del nivel utilizado como punto inicial en los ensayos base. Debido a que ambos grupos fueron sometidos a procedimientos de energización diferentes, estos resultados no permiten determinar directamente un porcentaje de reducción de la tensión de ruptura; sin embargo, evidencian que la contaminación interfacial reduce

sustancialmente el nivel de tensión que la probeta puede alcanzar antes de la ruptura o de una condición que impida continuar el ensayo.

- La contaminación presentó además un efecto cuantificable sobre la actividad de descargas parciales. La máxima tasa de repetición obtenida para los casos DC base fue de 373,28 pulsos/s, mientras que en los casos contaminados se alcanzaron 75 224,20 pulsos/s, aproximadamente 202 veces el máximo del caso base. De esta forma, la tasa de repetición resultó ser uno de los indicadores más sensibles a la modificación de la interfaz producida por la contaminación. Sin embargo, tanto en los casos base como contaminados se observaron incrementos y disminuciones abruptas entre escalones consecutivos, por lo que una tasa elevada evidencia una interfaz eléctricamente activa, pero su disminución posterior no necesariamente representa una recuperación de la condición dieléctrica.
- Uno de los principales resultados para el diagnóstico fue comprobar que la ruptura dieléctrica puede producirse sin estar precedida por un período prolongado de actividad de descargas parciales. En varios ensayos contaminados se registró una actividad reducida o casi inexistente hasta que, tras un incremento de tensión, aparecieron solo algunos pulsos antes de la ruptura. Por ello, la ausencia de DP sostenidas no garantiza un buen estado de la interfaz, ni un aumento progresivo de su tasa de repetición constituye una condición necesaria para que ocurra la ruptura.
- El análisis PSA y los mapas tiempo–frecuencia permitieron observar cambios en las descargas parciales durante la degradación, como patrones triangulares y agrupaciones lineales en PSA, y desplazamientos de las poblaciones hacia mayores frecuencias en los mapas TF. No obstante, estos comportamientos se presentaron tanto en ensayos con ruptura como sin ella, por lo que ninguno de los dos métodos permitió identificar por sí solo un patrón único capaz de anticipar la ruptura dieléctrica.
- Las observaciones ópticas complementaron la información entregada por las mediciones eléctricas y permitieron identificar directamente la evolución física del tracking. Durante los ensayos contaminados se registraron carbonización localizada, desplazamiento del contaminante, formación de burbujas y desarrollo de trayectorias conductoras entre los electrodos. Estos fenómenos muestran que la interfaz no permanece invariable durante la energización, sino que su geometría y condición eléctrica evolucionan como consecuencia del esfuerzo aplicado.

- En relación con los criterios de diagnóstico y monitoreo bajo DC, los resultados muestran que no resulta recomendable utilizar un único indicador ni establecer un umbral absoluto de descargas parciales para anticipar la ruptura. La tasa de repetición mostró una alta sensibilidad a la presencia de contaminación, la carga aparente y la carga acumulada permitieron cuantificar la actividad eléctrica, los diagramas PSA permitieron reconocer modificaciones en la secuencia de pulsos y los mapas TF permitieron identificar cambios en sus características temporales y frecuenciales. Sin embargo, ninguno presentó individualmente una evolución común previa a todas las rupturas registradas.

Trabajos futuros

Para trabajos posteriores, se recomienda realizar modificaciones en el diseño de las probetas, en el método de energización, en la cantidad de tipos de contaminantes utilizados y en el número de ensayos realizados para cada escenario. Con el objetivo de evaluar de manera más adecuada la influencia de la contaminación sobre la degradación de la probeta, resulta conveniente establecer un método de energización común tanto para los casos base, es decir, sin contaminación, como para aquellos que presentan contaminantes.

El presente estudio se inició a partir de ensayos previamente definidos, los cuales no pudieron ser replicados bajo condiciones de contaminación debido a que la presencia del contaminante provocaba la ruptura dieléctrica de la probeta a niveles de tensión considerablemente inferiores a los utilizados en los ensayos base. En estos últimos, el nivel inicial de tensión correspondía a 14 kV. Por esta razón, se considera necesario modificar el diseño de la probeta con el fin de permitir la aplicación de un mismo procedimiento de energización tanto en los casos base como en los casos contaminados.

La realización de ensayos con contaminante húmedo presenta dificultades experimentales durante el armado de la probeta. En este procedimiento, el contaminante se dispone entre las dos fases sólidas que conforman la interfaz, correspondientes a silicona y resina. Al unir y comprimir ambas superficies, el contaminante húmedo tiende a desplazarse y expandirse de manera poco controlada, dificultando mantener una distribución reproducible entre ensayos. Por este motivo, se recomienda priorizar el uso de contaminantes en estado seco. Esta decisión permitiría reducir el número de escenarios experimentales, lo que podría compensarse mediante un aumento en la cantidad de ensayos realizados para cada condición. De esta forma, también sería posible otorgar mayor énfasis al análisis de la componente estocástica asociada a las DP.

Asimismo, el rediseño de la probeta y la modificación del método de energización deberían orientarse a permitir la realización de ensayos de mayor duración, de manera que las condiciones experimentales puedan aproximarse en mayor medida a aquellas utilizadas en ensayos normalizados de degradación.

En particular, se propone modificar la probeta de manera que tanto los casos base como los contaminados puedan ser evaluados bajo criterios de energización equivalentes. Para ello, una alternativa consiste en aumentar la distancia entre los electrodos, actualmente igual a 1,3 mm. Este incremento implicaría, a su vez, una mayor cantidad de contaminante requerida para cubrir la zona de interés, reforzando la conveniencia de utilizar contaminantes en estado seco.

Entre las condiciones analizadas en este estudio, la contaminación E2 en estado seco fue la que permitió alcanzar el mayor nivel de tensión, llegando hasta 20 kV. Por lo tanto, este tipo de contaminación podría utilizarse inicialmente para verificar si el método de energización empleado en el caso base puede ser replicado bajo condiciones contaminadas. En caso de que esto no resulte posible, también sería necesario rediseñar el procedimiento de energización utilizado para los casos base, disminuyendo tanto el nivel de tensión inicial como el nivel de tensión final, con el objetivo de establecer condiciones comparables entre ambos tipos de ensayo.

Referencias

- [1] A. Alassi, S. Bañales, O. Ellabban, G. Adam, and C. MacIver, “HVDC Transmission: Technology Review, Market Trends and Future Outlook,” Sep. 01, 2019, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.rser.2019.04.062.
- [2] Jaime Peralta, “HVDC PROJECT KIMAL - LO AGUIRRE Enabler for a Sustainable Decarbonization Process,” Santiago, Nov. 2020.
- [3] Roger Schurch Brandt, “Improving HVDC Lines Reliability through Enhancing Understanding of Dielectric Interfaces in Composite Insulators,” Valparaíso, 2024.
- [4] X. Liang, S. Li, Y. Gao, Z. Su, and J. Zhou, “Improving the outdoor insulation performance of Chinese EHV and UHV AC and DC overhead transmission lines,” *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 36, no. 4, pp. 7–25, 2020, doi: 10.1109/MEI.2020.9111096.
- [5] K. Zhou, T. Li, Z. Chen, D. Yang, and W. Tao, “The relationship between microstructure and hydrophobicity of service-aged silicone rubber insulators,” in *2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*, 2016, pp. 952–955. doi: 10.1109/CMD.2016.7757982.
- [6] H. C. Karner and M. Ieda, “Technical aspects of interfacial phenomena in solid insulating systems,” in *[1991] Proceedings of the 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, 1991, pp. 592–597 vol.1. doi: 10.1109/ICPADM.1991.172128.
- [7] T. Wong, I. Timoshkin, S. MacGregor, M. Wilson, and M. Given, “Dielectric Interfaces in High-Voltage Technology: Overview and Theoretical Approaches to the Modeling of Functional and Breakdown Behavior,” *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 39, no. 4, pp. 34–49, 2023, doi: 10.1109/MEI.2023.10151812.
- [8] J. Xie *et al.*, “Influence of water penetration on glass fiber-epoxy resin interface under electric field: A DFT and molecular dynamics study,” *J. Mol. Liq.*, vol. 385, p. 122346, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.122346>.
- [9] Y.-N. Peng *et al.*, “Reproduction and Analysis of Decay-Like Aging Development Induced by Interfacial Discharge in Composite Insulators,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 30, no. 4, pp. 1858–1867, 2023, doi: 10.1109/TDEI.2023.3266185.
- [10] T. Takahashi, T. Okamoto, Y. Ohki, and K. Shibata, “Breakdown strength at the interface between epoxy resin and silicone rubber—a basic study for the development of all solid insulation,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 12, no. 4, pp. 719–724, 2005, doi: 10.1109/TDEI.2005.1511097.
- [11] P. D. Bastidas and S. M. Rowland, “Interfacial aging in composite insulators as a result of partial discharge activity,” in *2017 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, 2017, pp. 13–16. doi: 10.1109/EIC.2017.8004690.
- [12] X. Li, H. Hu, K. Song, Z. Wang, and Z. Jia, “Voltage Endurance Characteristics of Cross-Linked Polyethylene–Silicone Rubber Interface Subjected to DC and AC Voltages,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 32, no. 2, pp. 690–698, 2025, doi: 10.1109/TDEI.2024.3456773.

- [13] British Standards Institution, “Electrical insulating materials – A.C. voltage endurance evaluation – Introduction,” DD IEC/TS 61251:2008, 2008.
- [14] S. Li, K. Du, M. Lin, Z. Li, N. Li, and C. Xiong, “Analysis of Meteorological Causes and Preventive Strategies of Power Insulation Degradation Failures,” in *2024 6th International Conference on Power and Energy Technology (ICPET)*, 2024, pp. 108–113. doi: 10.1109/ICPET62369.2024.10940389.
- [15] International Electrotechnical Commission, “Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions – Part 1: Definitions, information and general principles,” IEC/TS 60815-1:2008, Oct. 2008.
- [16] International Electrotechnical Commission, “High-voltage Test Techniques – Partial Discharge Measurements,” IEC 60270:2000, Dec. 2000.
- [17] E. Kuffel, W. S. Zaengl, and J. Kuffel, *High Voltage Engineering: Fundamentals*, 2nd ed. Oxford: Newnes, 2000.
- [18] P. H. F. Morshuis, “Time-resolved discharge measurements,” in *1993 International Conference on Partial Discharge*, 1993, pp. 43–46.
- [19] T. Kawashima, Y. Murakami, and N. Hozumi, “Fundamental Study on Partial Discharge Measurement in High-Voltage Cable Terminal Joint Model and Waveform Reconstruction by Deconvolution Processing,” in *2024 10th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*, 2024, pp. 669–672. doi: 10.23919/CMD62064.2024.10766143.
- [20] M. Rostaghi-Chalaki, K. Yousefpour, J. Klüss, M. Kurum, J. P. Donohoe, and C. Park, “Classification and comparison of AC and DC partial discharges by pulse waveform analysis,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 125, p. 106518, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106518>.
- [21] N. C. Sahoo, M. M. A. Salama, and R. Bartnikas, “Trends in partial discharge pattern classification: a survey,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 12, no. 2, pp. 248–264, 2005, doi: 10.1109/TDEI.2005.1430395.
- [22] R. Piccin, A. R. Mor, P. Morshuis, A. Girodet, and J. Smit, “Partial discharge analysis of gas insulated systems at high voltage AC and DC,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 22, no. 1, pp. 218–228, 2015, doi: 10.1109/TDEI.2014.004711.
- [23] R. Patsch and M. Hoof, “Pulse-sequence-analysis, a way to get a better insight into the physics of discharges,” in *1993 International Conference on Partial Discharge*, 1993, pp. 49–51.
- [24] S. Abdul Madhar, P. Mraz, A. Rodrigo Mor, and R. Ross, “Empirical analysis of partial discharge data and innovative visualization tools for defect identification under DC stress,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 123, p. 106270, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106270>.
- [25] A. Cavallini, G. C. Montanari, A. Contin, and F. Pulletti, “A new approach to the diagnosis of solid insulation systems based on PD signal inference,” *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 19, no. 2, pp. 23–30, 2003, doi: 10.1109/MEI.2003.1192033.

- [26] R. Schurch, D. Herrera, D. Figueroa, and J. Ardila-Rey, “Characterization of Degradation and Breakdown of Silicone-Epoxy Resin Interface Under DC,” in *2025 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, 2025, pp. 93–96. doi: 10.1109/CEIDP61707.2025.11218572.
- [27] M. Maureira, “Implementación de un banco de pruebas de laboratorio para el monitoreo del crecimiento de árboles eléctricos y sus descargas parciales asociadas a excitación de frecuencia industrial y VLF,” Trabajo de titulación, Universidad Técnica Federico Santa María, 2017.
- [28] M. I. Illanes Jorquera, “Análisis del desempeño de aisladores en condiciones de contaminación bajo excitación continua mediante medición de descargas parciales,” Trabajo de titulación, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile, 2024.