

Universidad Técnica Federico Santa María
Departamento de Ingeniería Eléctrica

ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE AISLADORES EN CONDICIONES DE CONTAMINACIÓN BAJO EXCITACIÓN CONTINUA MEDIANTE MEDICIÓN DE DESCARGAS PARCIALES

Marco Ignacio Illanes Jorquera

Trabajo para optar al título de:
Ingeniero Civil Electricista

Profesores Guía:
Roger Schurch Brandt
Jorge Ardila Rey

Valparaíso, 8 de octubre de 2024
Casa Central

El mejor modelo de un gato, es otro gato. De preferencia el mismo gato.

Anónimo.

Agradecimientos

A mis padres, quienes, con esfuerzo y cariño, me han provisto de todo cuanto he necesitado.

Deseo utilizar este espacio para expresar mi gratitud a quienes, de una forma u otra, han sido parte de mi formación tanto personal como académica:

- Especialmente a mis padres, quienes, con notable abnegación, nos han educado a mí y a mis hermanas. A ellos les debo, en gran medida, lo que soy y lo que seré.
- A mis amigos y compañeros de largos años de carrera. Agradezco la fortuna de rodearme de excelentes amistades. Muchos de ustedes me han ofrecido un hombro en el cual apoyarme, me han hospedado en sus hogares y me han acompañado en incontables aventuras. A todos ustedes, testigos de noches de vigilia, compañeros de risas y penas, los admiro profundamente. Recordaré con afecto las largas sesiones de estudio, señalando figuras en los libros y manchando nuestras manos con el plumón de la pizarra.
- A mis maestros que, desde mi infancia hasta el presente, me han mostrado el más alto grado de saber humano. Estoy orgulloso de ser su alumno y espero, en un futuro cercano, seguir sus pasos.
- A la mujer que amo, quien sabe que la amo y ha sido una fuente de alegrías y apoyo inconmensurable.

Estimado lector, notarás que no he mencionado los nombres de quienes quiero y admiro; no lo considero necesario, pues sé que ustedes leerán estas palabras y se reconocerán en ellas. A todos ustedes, gracias.

Extiendo un especial agradecimiento al equipo de Pañol del DIE, en particular a Cristián Andrades, por facilitar todo el material y la disposición del LAT para el desarrollo de esta memoria. También agradezco a la empresa Silpak S.A., que, a través de Juan Pablo Montes, proporcionó los aisladores poliméricos necesarios para los ensayos.

Tabla de Contenidos

1 Introducción **6**
1.1 Efectos de la contaminación . . . 6
1.2 Descargas parciales . . . 7

2 Marco Teórico **8**
2.1 Detección de descargas parciales . . . 8
2.1.1 Métodos de medición . . . 8
2.1.2 Consideraciones bajo excitación continua . . . 10
2.2 Efectos de factores ambientales . . . 10
2.2.1 Humedad . . . 11
2.2.2 Temperatura . . . 11
2.3 Métodos de análisis de DP en DC . . . 12
2.3.1 Indicadores simples . . . 12
2.3.2 Análisis de secuencia de pulsos . . . 13
2.3.3 Mapas Tiempo - Frecuencia . . . 14
2.3.4 Parámetros de forma de onda . . . 15
2.4 Metodologías Normadas . . . 16
2.4.1 Norma IEC 60270 . . . 16
2.4.2 Norma IEC 60815 . . . 17
2.4.3 Norma IEC 61245 . . . 22
2.4.4 Norma IEC 62073 . . . 24

3 Propuesta experimental **26**
3.1 Objeto bajo estudio . . . 26
3.2 Contaminación artificial . . . 27
3.2.1 Caracterización de la Contaminación . . . 27
3.2.2 Generación de contaminación artificial . . . 28
3.3 Clase de hidrofobicidad . . . 29
3.4 Ensayos en alta tensión . . . 29
3.4.1 Medición de tensión de ruptura . . . 31
3.4.2 Medición de corriente de fuga . . . 32
3.4.3 Medición de descargas parciales . . . 34

4 Resultados experimentales **36**
4.1 Escenarios de contaminación . . . 36
4.2 Clase de hidrofobicidad . . . 37
4.3 Medición de tensión de ruptura . . . 40
4.4 Medido de corriente de fuga . . . 42
4.5 Mediciones de DP . . . 44
4.5.1 Indicadores simples . . . 44
4.5.2 Mapas PSA . . . 46
4.5.3 Mapas TF . . . 47
4.5.4 Parámetros $A_p - A_t - f - T_w - F_w$ . . . 49

5 Análisis de resultados y Conclusiones **51**
5.1 Propuesta para criterio de diagnóstico . . . 54

A Anexos: Registros de mediciones **55**
A.1 Contaminación . . . 55
A.2 Tensión de ruptura . . . 55
A.2.1 Mediciones en DC . . . 55
A.2.2 Mediciones en AC . . . 56
A.3 Corriente de fuga . . . 58

B Cuantificación de la dispersión mediante Varianza **60**
B.1 Cálculo del Centroide . . . 60
B.2 Cálculo de la Varianza . . . 60

Índice de Figuras

1 Distancia de aislamiento requerida: HVAC vs HVDC. . . . 6
2 Imágenes acústicas de equipo Flike. . . . 9
3 Relación entre tasa de repetición y humedad. . . . 11
4 Acoplamiento de factores físicos. . . . 11
5 Tasa de repetición de DP en función de la temperatura. . . . 12
6 Indicadores simples de DP bajo excitación en DC. . . . 13
7 Esquema de construcción de PSA . . . 13
8 Aplicación del mapeo TF a la medición de DP en HVDC. . . . 14
9 Circuitos de medición para la detección de DP . . . 16
10 Severidad de contaminación tipo A. Relación entre ESDD/NSDD y SPS . . . 20
11 Severidad de contaminación tipo B. Relación entre SES y SPS. . . . 20
12 Ejemplos de superficies con clase de hidrofobicidad (HC) de 1 a 6. . . . 25
13 Objeto bajo estudio . . . 26
14 Trazado del proyecto Kimal - Lo Aguirre . . . 27
15 Esquema y cabina de contaminación . . . 28
16 Exceso de agua en aisladores . . . 30
17 Esquema de método alternativo de humectación . . . 30
18 Disposición de equipos para medición de tensión de ruptura. . . . 31
19 Circuito para medición de tensión de ruptura . . . 32
20 Disposición de equipos para medición de corriente de fuga. . . . 33
21 Circuito para medición de corriente de fuga . . . 33
22 Equipos para la detección de DP . . . 34
23 Disposición de equipos para medición de descargas parciales. . . . 35
24 Esquema para medición de descargas parciales . . . 35
25 Diagrama de entornos de contaminación . . . 36
26 Fotografías de aisladores contaminados en condición seca . . . 37
27 Prueba de hidrofobicidad para aislador en caso base. . . . 37
28 Prueba de hidrofobicidad para aislador en entorno E2. . . . 38
29 Prueba de hidrofobicidad para aislador en entorno E4. . . . 38
30 Prueba de hidrofobicidad para aislador en entorno E5. . . . 38
31 Prueba de hidrofobicidad para aislador en entorno E7c. . . . 39
32 Prueba de hidrofobicidad para aislador en entorno E7s. . . . 39
33 Tensiones preliminares de ruptura ante escenarios de contaminación. . . . 40
34 Valores del ensayo de tensión de ruptura. . . . 41
35 Relación entre corriente de fuga y tensión de ensayo. . . . 42
36 Evolución de la corriente de fuga en el tiempo bajo humedad. . . . 43
37 Histogramas de Q para los distintos escenarios de contaminación. . . . 44

38 Histogramas de Q para los distintos escenarios de contaminación escalados para E7. 45
39 Mapa PSA para entornos bajo estudio. 46
40 Mapa TF registrado mediante HFCT. 47
41 Mapa TF registrado mediante Antena UHF. 47
42 Mapa TF filtrado registrado mediante HFCT. 48
43 Mapa TF filtrado registrado mediante antena. 48
44 Mapa $A_t - A_p - f$ registrado mediante HFCT. 49
45 Mapa $A_t - A_p - f$ registrado mediante Antena UHF. 49
46 Mapa TwFw registrado mediante HFCT. 50
47 Mapa TwFw registrado mediante HFCT. 50
48 Tensiones de ruptura y entornos de contaminación. 51
49 Tasa de repetición y entornos de contaminación. 52
50 Parámetro de dispersión del mapa PSA y entornos de contaminación. 53
51 Parámetro de dispersión de mapa TF y entornos de contaminación. 53
52 Disposición de equipos para medición de tensión de ruptura en AC. 57
53 Circuito para medición de tensión de ruptura en AC. 57

Índice de Tablas

1 Manifestaciones físicas de una DP y métodos de medición 8
2 Clasificación de las señales EM radiadas. 9
3 Descripción de ambientes típicos de contaminación 19
4 Criterios para la determinación de la clase de hidrofobicidad 24
5 Casos y Entornos de Contaminación 27
6 Tabla de concentración de sal y caolín, junto con ESDD y NSDD. 36
7 Resumen de resultados de clase de hidrofobicidad. 39
8 Resultados de tensión de ruptura en ambientes secos y húmedos. 41
9 Datos de Carga Q y Tasa de repetición 44
10 Datos de dispersión de datos según método PSA 46
11 Resumen de parámetros propuestos e indicadores de contaminación. 54

Nomenclatura

Sigla	Concepto	Sigla del Inglés
AC:	Corriente Alterna	*Alternating Current*
DC:	Corriente Continua	*Direct Current*
DP:	Descarga Parcial	
ESDD:	Densidad de Depósitos de Sal	*Equivalent Salt Deposit Density*
GIS:	Subestación Aislada por Gas	*Gas Insulated Substation*
HC:	Clase de Hidrofobicidad	*Hydrophobic Class*
HF:	Alta Frecuencia	*High Frequency*
HFTC:	Transformador de Alta Frecuencia	*High Frequency Current Transformer*
HVAC:	Alta Tensión en Corriente Alterna	*High Voltage Alternating Current*
HVDC:	Alta Tensión en Corriente Continua	*High Voltage Direct Current*
LF:	Baja Frecuencia	*Low Frequency*
MF:	Media Frecuencia	*Medium Frequency*
NSDD:	Densidad de Depósitos no Solubles	*Non-Soluble Deposit Density*
PDIV:	Tensión de Iniciación de Descargas Parciales	*Partial Discharge Inception Voltage*
PDEV:	Tensión de Extinción de Descargas Parciales	*Partial Discharge Extinction Voltage*
PRPD:	Diagrama de Descarga Parcial en Fase Resuelta	*Phase Resolved Partial Discharge*
PSA:	Análisis de Secuencia de Pulsos	*Pulse Sequence Analysis*
SPS:	Gravedad de Contaminación del Sitio	*Site Pollution Severity*
TF:	Mapa Tiempo Frecuencia	*Time Frequency*
UHF:	Ultra Alta Frecuencia	*Ultra High Frequency*
UV:	Ultra Violeta	*Ultraviolet*
VHF:	Muy Alta Frecuencia	*Very High Frequency*

Objetivos

Objetivo general

Analizar el desempeño de aisladores compuestos bajo condiciones de contaminación característicos del Norte y Centro de Chile, ante excitación en DC en laboratorio mediante el análisis de respuesta en descargas parciales.

Objetivos específicos

- Realizar una revisión bibliográfica acerca de las técnicas empleadas para la medición y el análisis de datos de descargas parciales en aisladores de líneas HVDC, así como también de la sensibilidad con respecto al nivel de contaminación de dichos aisladores.
- Desarrollar mediciones de corriente de fuga y respuesta en DP bajo excitación en DC para evaluar el desempeño de los aisladores bajo distintos escenarios de contaminación.
- Relacionar los niveles de contaminación con las mediciones dieléctricas mediante técnicas cualitativas y/o cuantitativas.
- Proponer criterios de diagnóstico del nivel de contaminación y probabilidad de contorneo en los aisladores en estudio para la toma de decisiones de mantenimiento.

Motivación

El proyecto Kimal - Lo Aguirre propone la puesta en marcha, en el año 2029, de la primera línea de transmisión en corriente continua del país [1]. Este proyecto, con una capacidad nominal de 3000 MW a tensiones de $\pm$500 kV, contempla la construcción de una línea de transmisión en HVDC de 1352 km de longitud y dos subestaciones convertidoras AC/DC ubicadas en las proximidades de las subestaciones existentes: Kimal, en la región de Antofagasta, y Seccionadora Lo Aguirre, en la región Metropolitana. Este hito constituye un factor clave para lograr las metas de carbononeutralidad en 2050 [2] y, además, contribuirá a la descongestión de la línea en AC de 500 kV Kimal – Cardones – Polpaico.

La implementación de este proyecto plantea una serie de desafíos técnicos inherentes al uso de tecnología HVDC, los cuales se extienden de forma transversal a diversas aristas de la ingeniería eléctrica. Dentro de estos, se destaca el desempeño de los aisladores, pues se enfrentan a solicitaciones particulares dadas las condiciones extremas de contaminación propias del emplazamiento de la línea. La cual, al atravesar el desierto de Atacama, experimenta contaminación salina, un clima seco y uno de los mayores índices de radiación UV del planeta [3].

La mayor acumulación de contaminantes en los aisladores de sistemas HVDC, en comparación con los sistemas HVAC, exige diseños de aislamiento más rigurosos y mantenimientos más frecuentes, especialmente en zonas con alta contaminación salina. Este contexto, sumado a la falta de experiencia previa en el país con tecnología HVDC, resalta la necesidad de desarrollar estrategias de mantenimiento robustas que garanticen la fiabilidad de los sistemas de transmisión. En este sentido, dados los avances en los estudios de DP bajo excitación continua [4], surge la interrogante de si la medición de DP podría contribuir al análisis del desempeño de los aisladores compuestos en esta nueva infraestructura.

1. Introducción

La transmisión en HVDC se ha convertido en una solución factible para la transmisión en largas distancias, dada su capacidad para transportar grandes cantidades de energía con menores pérdidas en comparación con los sistemas en AC. No obstante, el uso de sistemas en DC implica enfrentar una serie de desafíos técnicos inherentes a la naturaleza del tipo de excitación. Dentro de ellos, se destaca el fenómeno de acumulación de contaminación en los aisladores, el cual, puede afectar la fiabilidad del sistema y requerir estrategias de mantenimiento más rigurosas.

Pese a todo, los beneficios a largo plazo de sistemas en HVDC, en términos de eficiencia y sostenibilidad energética, justifican su creciente adopción. La industria muestra un interés considerable en enfrentar los desafíos técnicos presentes, impulsada por la promesa de una transmisión de energía más eficiente y sostenible.

1.1. Efectos de la contaminación

La literatura indica que los efectos de la contaminación sobre los aisladores generados por las solicitaciones en DC son diferentes de los generados en sistemas en AC. En [5] se sugiere que las características de aglomeración de la contaminación están significativamente influenciadas por el campo eléctrico producido en DC. De hecho, la acumulación de contaminación es hasta 1.4 veces mayor en DC que en AC para un mismo ambiente [6] y [7]. Además, en [8] se afirma que las pruebas de erosión en DC resultarán ser más severas que en AC. Adicionalmente, los efectos de la radiación UV reducen la capacidad para repeler tanto el agua como los contaminantes en los aisladores poliméricos, usados mayoritariamente en líneas HVDC en China, países de la Unión Europea, América del Norte y Brasil [9]. Con lo anterior, como se concluye en [10], los valores de tensión de descarga disruptiva en condiciones de contaminación húmeda son notablemente afectados por los contaminantes acumulados, lo que demanda una mayor distancia de fuga en sistemas DC en comparación con sistemas AC [10], [11].

La Figura 1 compara las distancias de aislamiento requeridas para que los sistemas HVAC y HVDC soporten descargas atmosféricas y sobretensiones de maniobra, y los efectos de la contaminación en aisladores.

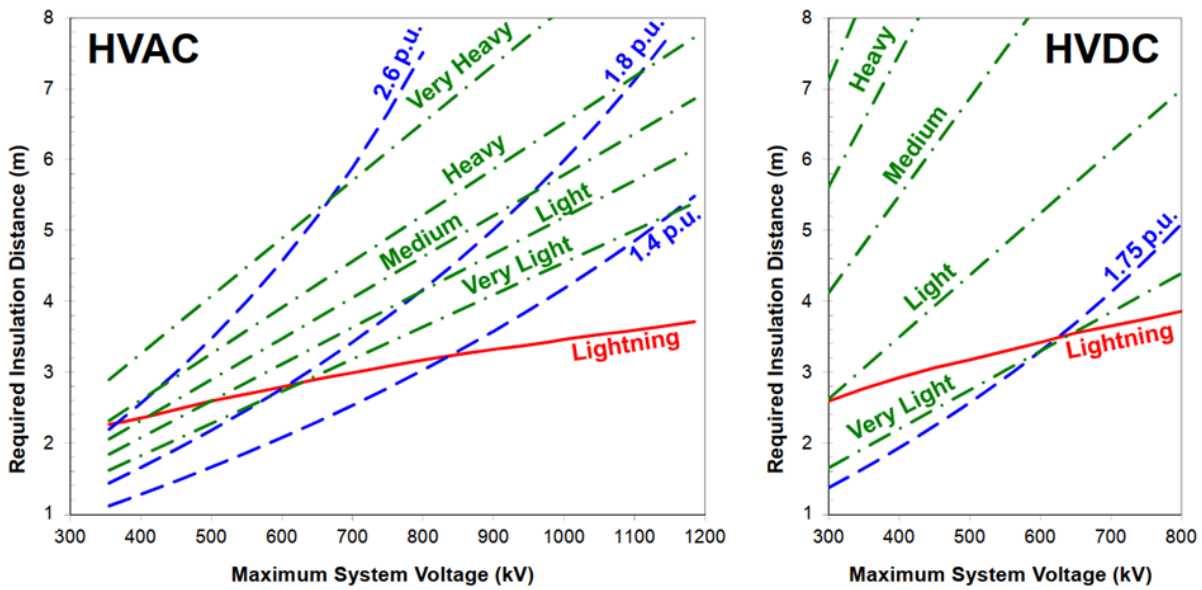


Figura 1: Distancia de aislamiento requerida: HVAC vs HVDC.
Fuente: CIGRE WG C4.303 [11].

En dicha Figura, se evidencia que el comportamiento de los sistemas HVDC difiere considerablemente de los sistemas HVAC. En primer lugar, la distancia de aislamiento requerida para un mismo nivel de contaminación es mayor en sistemas DC que en AC. En segundo lugar, la magnitud de las sobretensiones de conmutación que un sistema puede soportar es menor en sistemas DC.

En síntesis, la mayor acumulación de contaminantes en sistemas HVDC y la necesidad de mayores distancias de fuga, comparadas con HVAC, requieren diseños de aislamiento más exigentes y mantenimientos más rigurosos.

1.2. Descargas parciales

En [12], se señala que la aparición de DP depende en gran medida de la tensión aplicada, la naturaleza del material dieléctrico y las condiciones ambientales, enfatizando la influencia de la contaminación superficial e irregularidades en el aislamiento sólido. El interés en este fenómeno radica en que su detección y diagnóstico, actualmente basados en señales de UHF, constituyen uno de los métodos más adoptados para evaluar el estado del aislamiento interno de los equipos de alta tensión [13]. En [14], se sostiene que, en comparación con otras técnicas de monitoreo, la medición de DP se considera un método clave para evaluar el estado de salud del aislamiento. Aunque la teoría detrás del fenómeno de DP ha sido ampliamente estudiada durante décadas, disponiéndose de abundante información en condiciones de excitación en AC [15], el estudio de DP bajo excitación en DC aún se encuentra en desarrollo [16].

A la fecha, no existe un método consolidado de medición de DP para identificar defectos de aislamiento bajo solicitaciones en DC [17]. Esto es así a pesar del fuerte deseo de la industria eléctrica por replicar los métodos empleados en sistemas en AC en los sistemas en DC [18]. Lo anterior se debe principalmente a la naturaleza misma del fenómeno. Un ejemplo de ello se observa con la técnica de análisis del PRPD, la cual es útil para identificar el tipo de defecto en AC, pero no es aplicable bajo tensión de DC.

Ante la necesidad de desarrollar técnicas de medición y análisis de DP bajo excitación continua, se han empleado métodos de análisis de DP en AC que no dependen de la frecuencia de la señal, obteniendo resultados relevantes en la identificación de fuentes de DP en la aislación de cables [19] [20] [4].

En este sentido, técnicas como el análisis de mapas TF [21], [22] y [23], el método PSA [24] o el análisis de los parámetros propuestos en [25], se presentan como algunas de las alternativas interesantes para evaluar el estado de contaminación en aisladores, proporcionando información que podrá ser útil para el diagnóstico y mantenimiento de sistemas de alta tensión.

2. Marco Teórico

2.1. Detección de descargas parciales

La norma IEC 60270 define a la descarga parcial como una descarga eléctrica localizada que solo atraviesa parcialmente el aislamiento entre conductores y que puede o no ocurrir adyacente a un conductor [26]. Adicionalmente, estas pueden ser entendidas como fenómenos transitorios que se originan por el exceso de campo eléctrico localizado [27].

Las DP se clasifican en tres tipos basados en su ubicación de ocurrencia: Internas, Superficiales y Corona:[1]

- Las DP internas ocurren en aislamientos sólidos o líquidos debido a huecos o irregularidades con baja rigidez dieléctrica, como fallas constructivas o burbujas.
- Las DP superficiales se producen en interfaces entre dos dieléctricos, como aislante y aire, debido a campos eléctricos tangenciales intensos, agravados por la contaminación y humedad.
- Las DP corona ocurren en zonas afiladas dentro de gases o líquidos bajo un campo eléctrico intenso, como bordes afilados o pernos, y se incrementan en condiciones de contaminación o lluvia.

Las DP generan pulsos de corriente con duraciones del orden de nanosegundos, acompañadas de otras manifestaciones físicas medibles. Estas manifestaciones permiten la aplicación de diferentes métodos de detección, los cuales se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1: Manifestaciones físicas de una DP y métodos de medición

Manifestación Física	Método de medición	Norma asociada
Pulsos de corriente	Detección eléctrica	IEC 60270
Radiación electromagnética	Detección electromagnética	IEC 62478[2]
Señales audibles y ultrasónicas	Detección acústica	IEC 62478
Luz ultravioleta y visible	Detección óptica	-
Generación de especies químicas	Detección química	IEC 60599

2.1.1. Métodos de medición

En esta sección se presentan y describen, brevemente, los métodos de medición de DP empleados en la actualidad. Estos métodos se explican de manera detallada en el libro: *Practical Partial Discharge Measurement on Electrical Equipment* [28], publicado en 2023.

Detección eléctrica: Este método de medición, también denominado *basado en carga*, permite la detección del impulso de corriente generado por la DP en el rango de 1 `MHz` desde los terminales del objeto de ensayo, utilizando un sensor adecuado; una impedancia de medida (cuadripolo), generalmente en serie con un condensador de acoplamiento. La norma IEC 60270 cubre de forma exhaustiva este tipo de detección, siendo el más común y necesario para las pruebas de aceptación de DP en fábrica [28].

Detección electromagnética: Los pulsos de corriente de las DP excitan ondas electromagnéticas que desde el rango HF hasta el UHF (desde 3 `MHz` hasta 3 `GHz`, ver Tabla 2). Cuando estas señales se miden a frecuencias superiores a 3 `MHz`, se utiliza el término *detección electromagnética de DP*, también conocida como *detección no convencional de DP*.

[1] Dependiendo del autor, se puede identificar una cuarta clasificación denominada *electrodo flotante*. Este tipo de electrodo se distingue por su capacidad de operar sin estar conectado de manera fija a una referencia eléctrica específica, permitiendo medir la respuesta de los sistemas en condiciones de aislamiento relativo o flotante.

[2] La norma IEC 60270 comenta brevete este tipo de detección

Tabla 2: Clasificación de las señales EM radiadas.
Fuente: Practical Partial Discharge Measurement on Electrical Equipment [28].

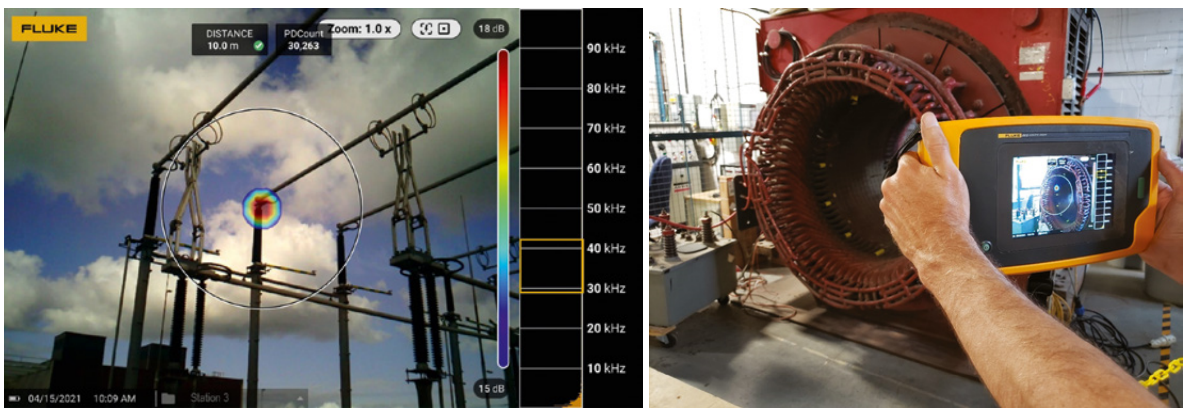
Clasificación	LF	MF	HF	VHF	UHF
Rango de Frecuencia (MHz)	0.03–0.3	0.3–3	3–30	30–300	300–3000
Longitud de onda (m)	10000–1000	1000–100	100–10	10–1	1–0.1

Para la detección de estas señales, existe una amplia variedad de sensores, tales como antenas o transformadores de corriente de alta frecuencia (HFCT), los cuales operan bajo distintos principios de acoplamiento (campo eléctrico, campo magnético u ondas electromagnéticas planas). La norma IEC 62478 abarca este método de medición. Independiente del tipo de sensor, es posible el procesamiento de la señal en el dominio del tiempo o de la frecuencia para el análisis cuantitativo de las DP.

Detección acústica: Las ondas de presión causadas por las DP pueden ser reconocidas como sonido. Es posible describirlas como chasquidos discretos que, a medida que aumenta la magnitud de los impulsos de DP, se convierten en chisporroteo, crepitación o siseo.

La detección acústica de DP, sujeta la norma IEC 62478 [29], se utiliza principalmente para identificar el origen espacial de las DP mediante triangulación de sensores acústicos que registran el tiempo y la intensidad de las señales. Los tipos principales de detección acústica son dos:

1. En el aire: En 2020, las cámaras de imágenes acústicas Fluke y FLIR revolucionaron esta técnica, usando micrófonos y software para generar imágenes acústicas, detectando DP en el rango de 30-50 kHz [28].



(a) Corona detectada en aislador (b) Uso de cámara de imágenes acústicas

Figura 2: Imágenes acústicas de equipo Flike.
Fuente: Practical Partial Discharge Measurement on Electrical Equipment [28].

2. En la superficie de equipos: Sensores piezoeléctricos o de fibra óptica detectan DP en transformadores, condensadores y sistemas GIS mediante principios como rejillas de Bragg y resonancia vibratoria.

Detección óptica: Las DP emiten luz visible y ultravioleta debido a las colisiones entre electrones y moléculas de gas, y a la recombinación electrón-ión. En ambientes oscuros, es posible identificar las DP a simple vista [28]. Las cámaras UV modernas pueden operar a la luz del día y se utilizan en inspecciones de líneas de transmisión y aisladores, montadas en helicópteros o drones.

Actualmente, el uso de sensores ópticos hipersensibles ha permitido el desarrollo de una innovadora estrategia de diagnóstico multiespectral [30]. Esta estrategia posee un potencial significativo en la evaluación de la gravedad

de las descargas y en la clasificación de fallas mediante la descomposición en bandas de frecuencia del espectro medido. Esto permite prescindir de la medición de la señal de tensión, ofreciendo una alternativa para el diagnóstico de fallas de descarga en equipos bajo excitación DC.

Detección química: Las DP alteran la composición química del medio circundante, permitiendo su detección mediante el análisis de los subproductos de descomposición. Estos subproductos varían en función del medio: Aire, aceite o SF6.

- En aire las DP, especialmente en coronas de líneas de transmisión, generan ozono (O_3).
- El análisis de gases disueltos del aceite de transformadores permite identificar DP, arcos o degradación térmica, mediante la detección de hidrógeno e hidrocarburos.
- En sistemas GIS, las DP descomponen SF6 en diversos gases, algunos de estos son: CF_4, F_2, HF, CO_2, SOF_2, SO_2F_2, SO_2, H_2S.

2.1.2. Consideraciones bajo excitación continua

Las manifestaciones físicas de las DP, anteriormente mencionadas, se presentan de forma independiente del tipo de excitación, ya sea AC o en DC. Sin embargo, como se concluye en [16] *el estudio de la DP de DC todavía está en sus primeras etapas y no hay suficientes documentos que puedan proporcionar el conocimiento suficiente para tener una comprensión completa del mecanismo que pueda explicar con precisión los fenómenos de DP en diferentes escenarios.*

Por otro lado, los métodos de detección eléctricos y electromagnéticos se ven directamente influenciados por el tipo de excitación del objeto de ensayo. En su capítulo 11, la norma IEC 60270, aunque de forma breve, indica los procedimientos para la medición de DP bajo excitación continua. Esta señala que, *en general, los circuitos de prueba e instrumentos utilizados para detectar DP con tensión alterna también pueden usarse bajo tensión continua* [26].

Los objetos de prueba con aislamiento sólido o impregnado en líquido muestran características de DP muy diferentes cuando se prueban con tensión continua en comparación con tensión alterna. Estas diferencias pueden ser menores en objetos con aislamiento gaseoso [28]. Algunas diferencias clave incluyen:

- La tasa de repetición de pulsos de DP puede ser muy baja bajo excitación continua.
- Se pueden producir numerosas descargas cuando se cambia el valor de tensión aplicada, especialmente durante la inversión de polaridad.
- En aislamiento líquido, generalmente, aumenta la frecuencia de descargas.
- Las características de DP pueden verse afectadas por el rizado de la tensión de prueba.
- La sincronización de fase en AC no estará disponible; por tanto, será imposible generar un patrón PRPD.
- En general, la sensibilidad de detección de DP será menor en DC, ya que distinguir la DP real de la interferencia de fondo es difícil cuando no hay un patrón PRPD que ayude a la separación.

2.2. Efectos de factores ambientales

Las DP se ven afectadas por las diferencias en la distribución del campo eléctrico generado frente a excitaciones DC y AC. En sistemas de DC, el campo eléctrico está influenciado por la conductividad del material (σ), la cual puede variar significativamente con la temperatura y la humedad, introduciendo una mayor variabilidad y dificultando la predictibilidad del comportamiento del campo. En contraste, en sistemas de AC, la distribución del campo eléctrico está determinada principalmente por la permitividad del material (ε), un parámetro que permanece relativamente constante ante cambios en la temperatura y las condiciones ambientales. A lo anterior se suma el

fenómeno de la acumulación de carga en DC, aumentando los niveles de contaminación hasta en 1.4 veces con respecto a un sistema en AC [6], [7].

En [19] se presentan los efectos de la temperatura y humedad sobre las DP, estos se comentan brevemente en las siguientes secciones.

2.2.1. Humedad

Para descargas superficiales, la tasa de repetición puede aumentar en un orden de magnitud al pasar de condiciones secas (30 % de humedad relativa) a condiciones húmedas (80 % de humedad relativa), como se muestra en la Figura 3. Otra característica que parece asociarse a la humedad elevada es la forma en que se inician las DP. A baja humedad, la tasa de repetición tiende a ser constante en el tiempo. Por el contrario, a alta humedad, las descargas superficiales tienden a aparecer en ráfagas, probablemente asociadas a los ciclos de secado y humedecimiento de la superficie inducidos por el flujo de altas corrientes de fuga [19].

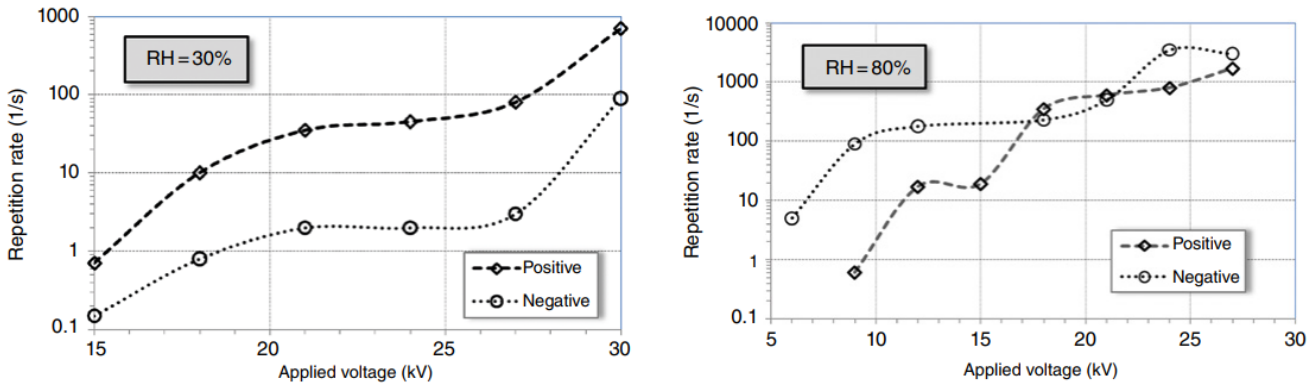


Figura 3: Relación entre tasa de repetición y humedad.
Fuente: Practical Partial Discharge Measurement on Electrical Equipment [28].

Discusión: Los efectos de la humedad no resultan consistentes con las conclusiones de investigaciones anteriores, que indican que el PDIV observado disminuye con el aumento de la humedad relativa a baja temperatura [31].

En [16] se analizan estas discrepancias y se plantea la necesidad de mayor investigación del mecanismo de activación de la DP bajo excitación continua, ante diferentes factores ambientales. En ella, se destaca la complejidad del acoplamiento de múltiples fenómenos físicos y factores materiales y ambientales (Ver Figura 4).

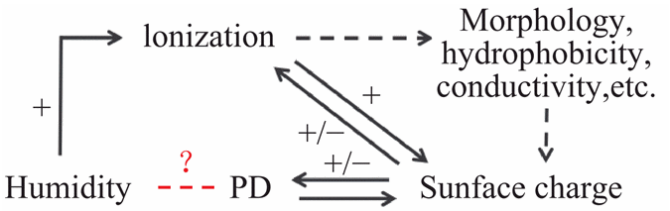


Figura 4: Acoplamiento de factores físicos.
Fuente: Understanding dc partial discharge: Recent progress, challenges, and outlooks. [16]

2.2.2. Temperatura

Existe una estrecha relación entre la temperatura, la tasa de repetición de DP y la PDIV.

La Figura 5 muestra cómo la tasa de repetición de DP depende tanto de la temperatura como de la tensión aplicada al aislamiento en una cavidad artificial. Los primeros resultados destacan que el PDIV varía en función de la temperatura, y se observa que las tasas de repetición de DP aumentan exponencialmente con el voltaje aplicado, presentando una pendiente ligeramente menor a temperaturas más bajas [19].

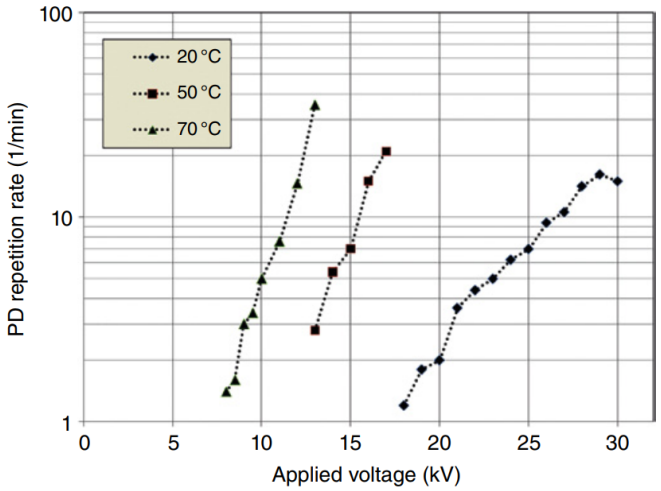


Figura 5: Tasa de repetición y la temperatura.
Fuente: Diagnostic of HVDC systems using partial discharges [19]

2.3. Métodos de análisis de DP en DC

La detección eléctrica de DP bajo excitación en DC proporciona una cantidad de información cuantitativa similar a la del caso bajo excitación en AC. En general, se comparten las magnitudes relacionadas con los impulsos de DP, con la clara excepción del ángulo de fase (ϕ_i). Las magnitudes medibles son:

- Carga aparente (q) (Expresada en unidades de `pC` o `mV`)
- Tasa de repetición de pulsos (n)
- Frecuencia de repetición de pulsos (N)
- Corriente de descarga promedio (I)
- Potencia de descarga (P)
- Tasa cuadrática (D)

Se suma a lo anterior, mediante un equipo con la tasa de muestreo apropiada, la posibilidad de registrar la forma de onda del pulso de DP.

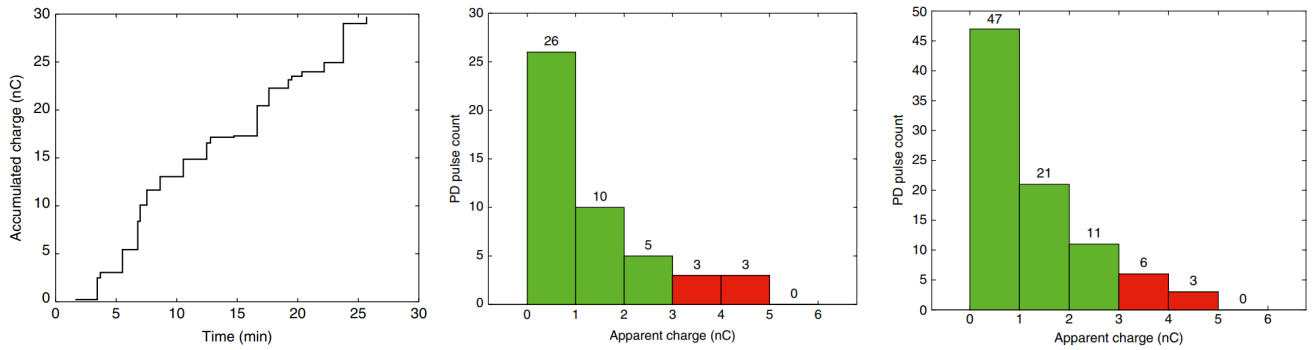
Además, la norma IEC 60270 destaca que los procedimientos descritos para determinar la PDIV y PDEV de DP bajo tensión alterna, generalmente, no son aplicables a las pruebas con tensión continua. Las DP pueden ocurrir durante la aplicación o variaciones de la tensión, volviéndose intermitentes cuando la distribución de tensión se estabiliza. A continuación se presentan algunas de las alternativas para el análisis de DP bajo excitación en DC:

2.3.1. Indicadores simples

Con base en lo anterior, en la norma IEC 60270, se sugiere utilizar indicadores muy sencillos de la actividad de las DP bajo excitación continua, como:

1. La mayor DP registrada durante las pruebas.
2. La carga aparente acumulada (Ver Figura 6(a)).

3. El histograma (o recuento) de cargas de DP (Ver Figura 6(b)).
4. El recuento acumulado de impulsos de DP (Ver Figura 6(c)).



(a) Carga aparente acumulada. (b) Histograma de DP y carga aparente. (c) Histograma de recuentos acumulados.

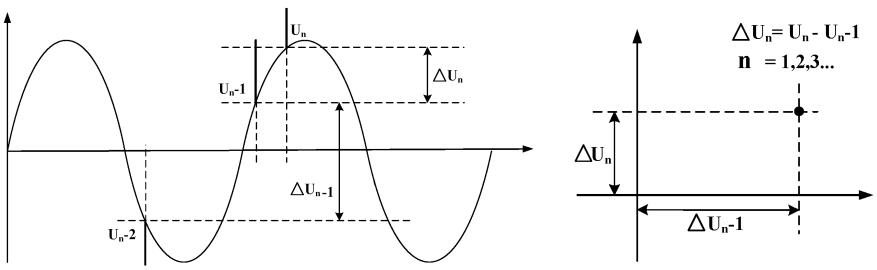
Figura 6: Indicadores simples de DP bajo excitación en DC.
Fuente: Practical Partial Discharge Measurement on Electrical Equipment [28]

Pero estos indicadores solo resultan útiles en pruebas de aceptación o para el monitoreo histórico de equipos. Por sí solos son incapaces de identificar fuentes o tipos de DP [28]. No obstante, en [32], se muestran resultados significativos en el análisis de contaminación para el caso de excitación en AC de aisladores de vidrio.

2.3.2. Análisis de secuencia de pulsos

El Análisis de Secuencia de Pulsos, o PSA, es un método basado en la premisa de que, al producirse una DP, el espacio físico donde ocurre queda alterado por la carga espacial residual, lo que afecta la ocurrencia del siguiente pulso. En consecuencia, las descargas no pueden considerarse eventos independientes entre sí [24].

Bajo excitación alterna, estos eventos suelen representarse gráficamente utilizando la diferencia de tensión entre la ocurrencia de pulsos consecutivos. En la Figura 7 se ejemplifica esta idea, donde el eje y representa la diferencia de tensión del pulso posterior, mientras que el eje x muestra la diferencia de tensión del pulso anterior.



(a) Tensión de ocurrencia de DP (b) Gráfico de secuencia de pulso

Figura 7: Esquema de construcción de PSA
Adaptación de: Voltage-difference analysis, a tool for partial discharge source identification [33].

Sin embargo, este método no es directamente aplicable en sistemas en DC. En [24], se consideraron ecuaciones basadas en la magnitud de la carga aparente como alternativa para la investigación (2.2), obteniendo mapas de PSA donde se logra identificar la actividad corona bajo extinción en DC.

$$\Delta Q_n = |Q_{n+1}| - |Q_n| \quad \text{(Para el eje Y)} \tag{2.1}$$

$$\Delta Q_{n-1} = |Q_n| - |Q_{n-1}| \quad \text{(Para el eje X)} \tag{2.2}$$

2.3.3. Mapas Tiempo - Frecuencia

Los mapas TF son un método de postprocesamiento que propone resaltar las diferencias en las formas de onda de los pulsos de DP, representando cada punto en un plano Tiempo-Frecuencia. Esto es independiente de la tensión de alimentación y, por tanto, adecuado tanto para excitación en AC como en DC. [28].

La técnica requiere un convertidor de análogo digital con una frecuencia de muestreo de 40 `MHz` o superior [28]. Esta se basa en la transformación de series temporales de señales de DP en sub-series temporales correspondientes a los pulsos de formas de onda similares [21], [22]. Para ello, los pulsos de las señales se normalizan en el dominio del tiempo como:

$$\tilde{s}(t) = \frac{s(t)}{\sqrt{\int_0^T s(t)^2\, dt}} \tag{2.3}$$

Donde $s(t)$ es la serie temporal de la señal de DP. Posteriormente, se calcula la desviación estándar de la señal normalizada tanto para el dominio del tiempo (2.4), como para el de la frecuencia (2.5). De este modo, surgen los conceptos de longitud de tiempo equivalente (σ_T) y ancho de banda equivalente (σ_F), los cuales se representan como un punto en un plano tiempo-frecuencia para cada pulso [34].

$$\sigma_T = \sqrt{\int_0^T (t - t_0)^2 \tilde{s}(t)^2\, dt} \tag{2.4}$$

$$\sigma_F = \sqrt{\int_0^\infty f^2 |\tilde{S}(f)|^2\, df} \tag{2.5}$$

Donde f es la frecuencia, $\tilde{S}(f)$ la transformada de Fourier de $\tilde{s}(t)$, y t_0 el "centro de gravedad" de la señal normalizada, es decir:

$$t_0 = \int_0^T t \tilde{s}(t)^2\, dt \tag{2.6}$$

En [19], se utilizó el mapa TF para separar las DP causadas por diferentes fenómenos bajo excitación HVDC, facilitando la tarea de identificación. Logrando la separación, como se expone en la Figura 8, entre: DP tipo corona, ruido de fondo y perturbaciones de circuitos HVAC vecinos.

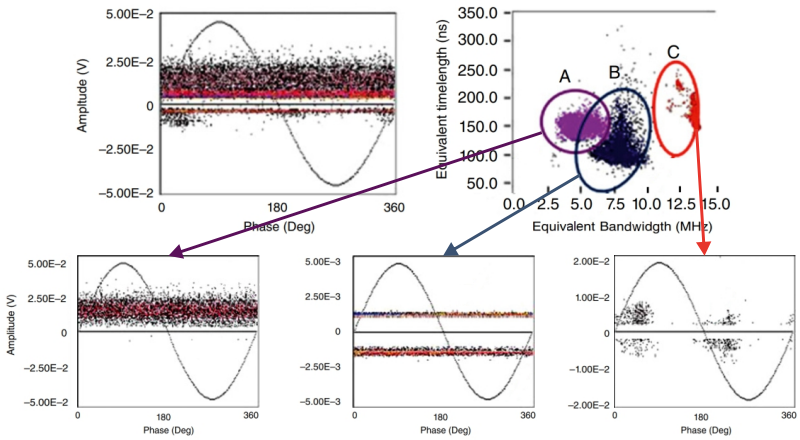


Figura 8: Aplicación del mapeo TF a la medición de DP en HVDC. En la esquina superior izquierda el gráfico PRPD tal como fue registrado, a la derecha el Mapeo TF mostrando tres grupos. Las flechas apuntan a los gráficos PRPD de cada grupo: (A) DP tipo corona, (B) ruido de fondo y (C) Perturbaciones de circuitos HVAC vecinos.
Adaptación de: Diagnostic of HVDC systems using partial discharges [19]

2.3.4. Parámetros de forma de onda

Tal como se analiza en [35], se propone utilizar tres parámetros planteados por Álvarez et al. [36] y dos parámetros por Zhu et al. [37] como técnicas de identificación de DP.

En particular, los parámetros área de *peak* (A_p) y área de *tail* (A_t) describen la forma de onda de la envolvente asociada a cada pulso, y el parámetro F caracteriza su contenido en frecuencia. Estos tres parámetros, presentados en [36], se definen mediante las ecuaciones:

$$h^*_{pu}(t) = \frac{h(t)}{I_p}, \quad A_p = \int_0^{t_p} h^*_{pu}(t)\,dt, \quad A_t = \int_{t_p}^{t_f} h^*_{pu}(t)\,dt, \quad F = \frac{\int_{f_1}^{f_2} fF^*(f)\,df}{\int_{f_1}^{f_2} F(f)\,df} \tag{2.7}$$

Donde $h(t)$ es la función envolvente del pulso, la cual se calcula utilizando la transformada de Hilbert, I_p es el valor máximo de $h(t)$, $h_{pu}(t)$ es la función envolvente normalizada, $F(t)$ es la transformada de Fourier del pulso, y f_1 y f_2 definen el intervalo de frecuencias donde la amplitud del espectro es mayor al 70 % de su valor máximo.

Estos parámetros permiten describir la dinámica de los pulsos en función de su forma y contenido en frecuencia, proporcionando una herramienta útil para el análisis y agrupamiento de los pulsos, en particular durante el crecimiento de fallas como los árboles eléctricos.

Los otros dos parámetros utilizan la función de energía acumulativa en el dominio del tiempo (TCE) y en el dominio de la frecuencia (FCE), de las cuales se extraen dos características: T_w `ns` y F_w `MHz`, que describen la duración temporal y el ancho de banda de frecuencia de los pulsos. Estos parámetros se definen según [37] como:

$$TCE(t_k) = \frac{\sum_{i=1}^{k} v(t_i)^2}{\sum_{i=1}^{N} v(T_i)^2} \times 100, \quad k = 1, \ldots, N \tag{2.8}$$

$$FCE(f_k) = \frac{\sum_{i=1}^{k} F(f_i)^2}{\sum_{i=1}^{N} F(f_i)^2} \times 100, \quad k = 1, \ldots, N \tag{2.9}$$

$$\begin{aligned} T_w &= t \,|\, TCE = 80 - t \,|\, TCE = 20 \\ F_w &= f \,|\, FCE = 90 \end{aligned} \tag{2.10}$$

Donde $v(t_i)$ es la amplitud de la señal de DP en el instante t_i, $F(f_i)$ es la amplitud en la frecuencia f_i obtenida mediante la transformada rápida de Fourier (FFT), y N es el número total de puntos de muestreo del pulso.

En [37], mediante DBSCAN, un algoritmo de agrupamiento, y un sistema comercial de medición de DP, con una frecuencia de muestreo de 100 MS/s, bajo excitación en AC a 7.0 `kV`, logran la separación de fuentes de DP empleando los parámetros T_w y F_w.

En [36], en un sistema de distribución de 45 `kV` empleando sensores HFCT con un ancho de banda de 100 kHz a 20 MHz, los parámetros A_p, A_t y f demostraron la capacidad de identificar y clasificar diferentes tipos de PD, separando los pulsos en bandas de frecuencia específicas.

En [35], bajo el análisis del crecimiento de árboles eléctricos aplicando 12 `kV` en AC y frecuencias de 50 a 550 `Hz`, se muestra que los parámetros: A_t, f, T_w y F_w, relacionados con la caída del pulso de PD, presentan variaciones y son sensibles a la propagación de los árboles eléctricos. En particular, f permitió separar las DP en tres tipos claramente identificados como bandas de frecuencia.

2.4. Metodologías Normadas

2.4.1. Norma IEC 60270

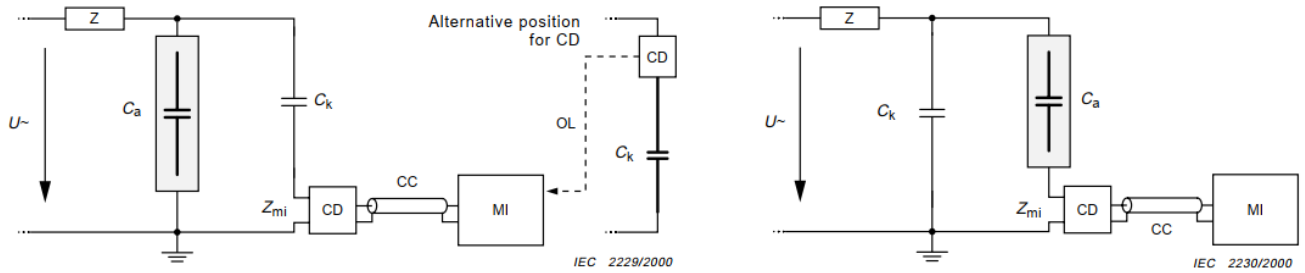
La norma IEC 60270: *High-voltage test techniques – Partial discharge measurements* [26] plantea los procedimientos y circuitos que se deben utilizar para la medición de DP. En ella, las DP se asocian a un fenómeno de degradación local, que genera impulsos de corrientes de magnitudes muy pequeñas y visibles en intervalos de micro y nanosegundos a través del sistema de aislamiento. Como resultado de los impulsos de corriente se tiene la descomposición del dieléctrico, reduciendo notablemente la vida útil del sistema de aislamiento.

Elección del procedimiento de prueba La norma indica que la definición de los procedimientos aplicables a pruebas específicas y objetos de prueba es responsabilidad del *comité técnico pertinente*. Este debe establecer los procesos de acondicionamiento previo, niveles y frecuencias de la tensión de prueba, tasas de incremento y disminución de la tensión, y tiempos de aplicación de la tensión.

Determinación de las tensiones de iniciación y extinción de descargas parciales Para pruebas en AC, se aplica una tensión inicial considerablemente inferior a la esperada, esta se aumenta gradualmente y se define la PDIV (U_i) cuando las DP alcanzan la magnitud mínima especificada. Luego, se incrementa la tensión a un nivel predeterminado y se reduce la tensión, definiendo PDEV (U_e) cuando las DP caigan por debajo de la misma magnitud especificada. En ninguna circunstancia, la tensión aplicada deberá exceder la tensión soportada del objeto bajo ensayo. Cabe destacar que el valor de U_i depende de la tasa de incremento de la tensión, mientras que U_e se ve afectado por la amplitud, duración y tasa de disminución de la tensión.

Este procedimiento, generalmente, no es aplicable bajo excitación continua. Es probable que las DP se produzcan durante la aplicación inicial de la tensión o durante los cambios de tensión, y luego se vuelvan más intermitentes a medida que la distribución de la tensión se torne resistiva.

Elección del circuito de prueba Se requiere un circuito específico para la medición de DP, el cual debe proporcionar un camino de baja impedancia para el pulso de corriente asociado a la descarga. La normativa establece tanto circuitos de medición directa como indirecta. En el circuito directo (Figura 9(a)), la impedancia de medida se coloca en serie con el aislante bajo prueba, mientras que en el circuito indirecto (Figura 9(b)), la impedancia de medida se ubica en serie con el condensador de acoplamiento.



(a) Circuito de medición directa

(b) Circuito de medición indirecta

Figura 9: Circuito de medición para la detección de DP
Adaptación de: IEC 60270 [26].

2.4.2. Norma IEC 60815

La norma IEC 60815: *Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in pollution conditions* es un conjunto de especificaciones técnicas que proporciona definiciones generales y métodos para la evaluación de la gravedad de la contaminación del sitio (SPS), además de exponer los principios para realizar una evaluación informada sobre el desempeño esperado de un aislador en diversos escenarios de contaminación. Esta normativa se encuentra dividida en cinco partes:

- **IEC 60815-1**: Definiciones, información y principios generales. [38]
- **IEC 60815-2**: Aisladores cerámicos y de vidrio para sistemas em AC.
- **IEC 60815-3**: Aisladores poliméricos para sistemas en AC.
- **IEC 60815-4**: Equivalente IEC 60815-2 para sistemas en DC. [39]
- **IEC 60815-5**: Equivalente IEC 60815-3 para sistemas en DC[3].

Tipos de contaminación La norma define dos tipos principales de contaminación en los aisladores que pueden provocar el fenómeno de contorneo: contaminación Tipo A y Tipo B. Además, pueden presentarse una combinación de ambos tipos.

- **Contaminación Tipo A:** Corresponde a depósitos sólidos en la superficie del aislador, con dos componentes principales: contaminación soluble y no soluble, los cuales se vuelven conductores en presencia de humedad. La contaminación soluble forma una capa conductora al humedecerse, mientras que la no soluble proporciona una superficie adherente para la contaminación soluble.

  - Contaminación soluble: Se clasifica en sales de alta solubilidad, que se disuelven rápidamente en agua, y sales de baja solubilidad, que requieren mayor esfuerzo para disolverse. La contaminación se mide en términos de densidad de depósitos de sal (ESDD) en mg/cm^2.
  - Contaminación no soluble: Ejemplos de contaminación no soluble incluyen polvo, arena, arcilla y aceites. Esta se mide en términos de densidad de depósitos no solubles (NSDD) en mg/cm^2.

  La contaminación tipo A está asociada a zonas interiores, áreas desérticas o regiones con polución industrial. En algunos casos, se presenta en zonas costeras donde se acumulan capas de sal seca que se humedecen rápidamente por el rocío, niebla o llovizna.

- **Contaminación Tipo B:** Se caracteriza por la presencia de líquidos electrolitos con una cantidad nula o muy baja de componentes no solubles depositados en la superficie del aislador. Este fenómeno puede correlacionarse con la conductancia o mediante mediciones de corrientes de fuga en aisladores individuales o en cadenas de aisladores.

  Este tipo de contaminación puede ser relacionada con la conductancia o con las mediciones de corrientes de fuga del aislador o cadena de aisladores. Alternativamente, es posible determinar la salinidad de niebla (SES) en $[kg/m^3]$, para métodos de niebla salina, especificados en la norma IEC 60507.

  La contaminación tipo B está asociada a áreas costeras, donde el agua salina o niebla conductora se deposita sobre la superficie del aislador. Otros ejemplos incluyen la contaminación derivada de la fumigación de cultivos, niebla con productos químicos y la lluvia ácida.

[3]Esta norma aún no se encuentra publicada

Tipos de ambientes Para efectos de especificación técnica, la norma describe cinco tipos de ambientes caracterizados por la contaminación típica de ciertas regiones, donde pueden presentarse ejemplos de contaminación tipo A o B. En la práctica, este tema es más complejo debido a la existencia de regiones con múltiples tipos de contaminación, como en playas, donde se encuentran tanto depósitos de sal como arena. En estos casos, es crucial determinar el tipo de contaminación predominante.

1. **Ambiente tipo desértico:** Se caracteriza por suelos arenosos y largos períodos de sequía en zonas extensas. Las capas de contaminación en estas áreas contienen sales que se disuelven lentamente, combinadas con altos niveles de NSDD (tipo A). La limpieza natural ocurre solo durante esporádicos períodos de lluvia o tormentas de arena causadas por fuertes vientos.

2. **Ambiente tipo costero:** Presente en áreas que están directamente relacionadas con las costas, aunque, dependiendo de la topografía, la contaminación puede extenderse hasta 50 km tierra adentro. La contaminación se deposita principalmente por rocío, viento o niebla, y la acumulación es rápida, especialmente en presencia de niebla conductora (tipo B).

3. **Ambiente tipo industrial:** Ubicado cerca de áreas que presentan capas contaminantes compuestas por partículas conductivas, como carbón, depósitos metálicos o gases disueltos como NO_x y SO_x (tipo B), o por contaminación que se disuelve lentamente, como cemento o yeso (tipo A).

4. **Ambiente tipo agrícola:** Corresponden a zonas de actividad agrícola, donde la contaminación puede incluir químicos, excrementos de aves o sales presentes en los suelos. La limpieza natural es generalmente efectiva, dependiendo del tipo de sal depositada.

5. **Ambiente tipo tierra de interior:** Se caracteriza por bajos niveles de contaminación, sin fuentes claras de contaminantes en las proximidades.

Evaluación de la severidad de la contaminación del sitio La severidad de la contaminación del sitio (SPS) corresponde, generalmente, a los valores máximos de ESDD y NSDD, o SES, o, DDGIS y DDGIN, medidos de acuerdo con los métodos indicados en la norma y registrados durante un período de tiempo significativo, es decir, uno o más años. Si llueve durante este período de medición, las mediciones deben repetirse a intervalos apropiados para determinar el efecto del lavado natural; la SPS será el valor más alto registrado durante esta serie de mediciones.

La evaluación del grado de contaminación del sitio puede realizarse, con un grado decreciente de confianza, de las siguientes formas:

- Mediciones *in situ*.
- Información sobre el comportamiento de los aisladores de línea y subestaciones existentes.
- Simulaciones basadas en clima y parámetros ambientales.
- Evaluación cualitativa a partir de las indicaciones de la Tabla 3.

Tabla 3: Descripción de ambientes típicos de contaminación
Fuente: IEC 60815-1 [38]

Ejemplo	Descripción del ambiente típico
E1	$>$ 50 km[a] de cualquier mar, desierto o tierra abierta seca. $>$ 10 km de cualquier fuente de contaminación artificial[b]. Dentro de una distancia más corta a la anteriormente mencionada, pero: • El viento predominante no proviene directamente desde la fuente de contaminación • y/o lavado mensual regular por lluvia.
E2	10-50 km[a] de cualquier mar, desierto o tierra abierta seca. 5-10 km de cualquier fuente de contaminación artificial[b]. Dentro de una distancia más corta a la anteriormente mencionada en E1 pero: • El viento predominante no proviene directamente desde la fuente de contaminación • y/o lavado mensual regular por lluvia.
E3	3-10 km[c] de cualquier mar, desierto o tierra abierta seca. 1-5 km de cualquier fuente de contaminación artificial[b]. Dentro de una distancia más corta a la anteriormente mencionada, pero: • El viento predominante no proviene directamente desde la fuente de contaminación • y/o lavado mensual regular por lluvia.
E4	Más lejos de la fuente de contaminación mencionada en E3, pero: • La niebla densa o llovizna que ocurre a menudo después de una larga acumulación de contaminación en seco • y/o ocurre lluvia con conductividad alta • y/o hay un nivel alto de NSDD, entre 5 a 10 veces el ESDD.
E5	Dentro de 3 km de cualquier mar, desierto o tierra abierta seca. Dentro de 1 km de una fuente de contaminación artificial[b].
E6	Más lejos de la fuente de contaminación mencionada en E5, pero: • La niebla densa o llovizna que ocurre a menudo después de una larga acumulación de contaminación en seco • y/o hay un nivel alto de NSDD, entre 5 a 10 veces el ESDD.
E7	Dentro de la misma distancia de las fuentes de contaminación especificadas como alta y: • Sometidas directamente al rociado matutino o niebla salina densa • o sometidas directamente a contaminación de alta conductividad, o polvo tipo cemento de alta densidad sujetos a humedad frecuente por niebla o llovizna • o áreas desérticas con una rápida acumulación de arena y sal bajo condensación regular.

[a] Durante una tormenta, el nivel de ESDD puede tomar un nivel de contaminación mayor.
[b] En grandes ciudades, la influencia de la distancia especificada para el mar, desiertos es mayor.
[c] Dependiendo de la topografía del área costera y de la intensidad del viento.

Caracterización de la severidad de la contaminación Para efectos de normalización, se caracteriza la severidad de la contaminación cualitativamente en cinco clases:

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

Para la contaminación tipo A, podemos identificar el nivel de contaminación según el rango de valores de la Figura 10, referente a aisladores de suspensión. Estos valores se obtienen de la medición en campo, experiencia y

ensayos con contaminación. Este índice corresponde al valor máximo obtenido en mediciones regulares durante un período de al menos un año. Dichos índices son aplicables solo a aisladores de referencia y tienen en consideración sus propiedades de acumulación específica.

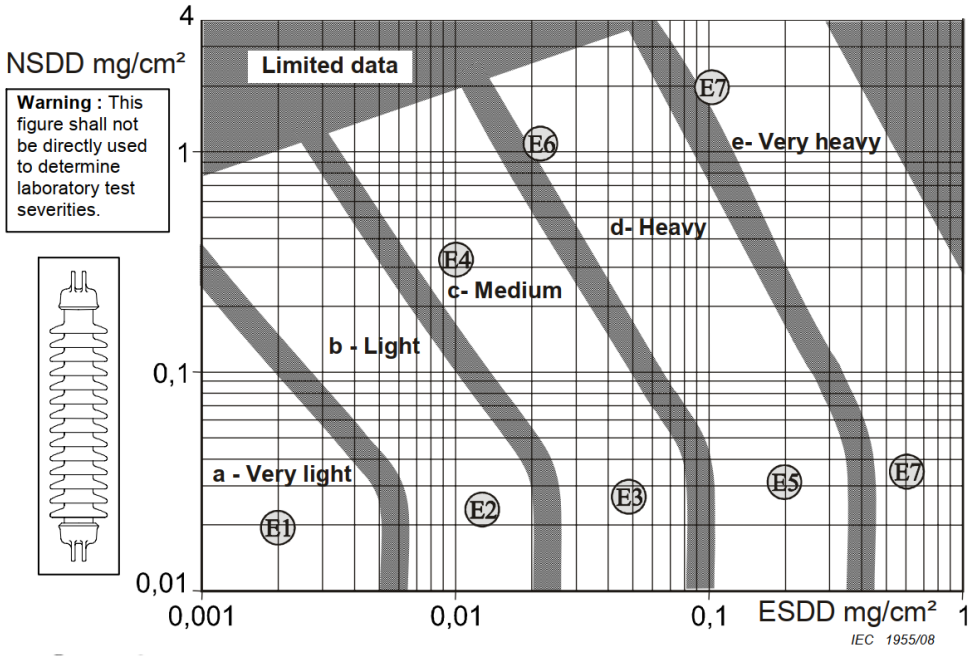


Figura 10: Severidad de contaminación tipo A. Relación entre ESDD/NSDD y SPS.
Fuente: IEC 60815-1 [38]

Para la contaminación tipo B, la Figura 11 muestra la relación entre las mediciones de SES y la clase de SPS para ambos tipos de aisladores de referencia. Los valores mostrados en la Figura 11 se basan en la contaminación natural que se deposita en los aisladores.

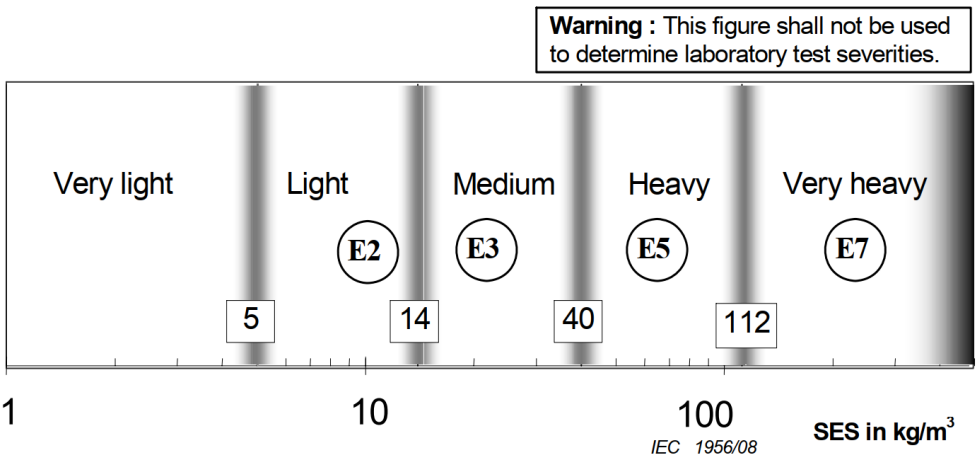


Figura 11: Severidad de contaminación tipo B. Relación entre SES y SPS.
Fuente: IEC 60815-1 [38]

Cálculo de ESDD Para determinar la ESDD, se requiere de la medición del volumen, la conductividad y la temperatura del agua que contiene los contaminantes utilizados en la limpieza del aislador bajo estudio, además de la superficie de este, según se detalla en el Anexo C de la norma IEC 60815-1. Se define ESDD mediante (2.11).

$$ESDD = S_a \cdot \left(\frac{V}{A}\right) \tag{2.11}$$

Donde:

- ESDD: Densidad equivalente de depósito soluble, en $\mathtt{mg/cm^2}$.
- V: Volumen de agua desmineralizada, en $\mathtt{cm^3}$.
- A: Área de la superficie del aislador, en $\mathtt{cm^2}$.
- S_a: Salinidad, en $\mathtt{kg/m^3}$.

A su vez, la salinidad (S_a) se determina, con base en la conductividad corregida por temperatura. Se presentan los cálculos de: salinidad, corrección de conductividad por temperatura y parámetro b en (2.12), (2.13) y (2.14) de forma respectiva:

$$S_a = (5.7\sigma_{20})^{1.03} \tag{2.12}$$

$$\sigma_{20} = \sigma_\theta \left[1 - b(\theta - 20)\right] \tag{2.13}$$

$$b = -3.2 \cdot 10^{-8}\theta^3 + 1.032 \cdot 10^{-5}\theta^2 - 8.272 \cdot 10^{-4}\theta + 3.544 \cdot 10^{-2} \tag{2.14}$$

Donde:

- θ: temperatura de la solución, en $\mathtt{°C}$.
- σ_θ: conductividad volumétrica a temperatura θ°C, en $\mathtt{S/m}$.
- σ_{20}: conductividad volumétrica a 20 $\mathtt{°C}$, en $\mathtt{S/m}$.
- b: factor que depende de la temperatura.

Cálculo de NSDD Para la el cálculo de la NSDD, se requiere determinar la superficie del aislador bajo estudio, junto con la masa del papel filtro, de grado GF/A 1,6 μ o similar, empleado para el proceso de filtración descrito en el anexo C de la norma IEC 60618-1. Se define NSDD mediante(2.15):

$$NSDD = 1000 \left(\frac{W_f - W_i}{A}\right) \tag{2.15}$$

Donde:

- NSDD: Densidad del depósito no soluble, en $\mathtt{mg/cm^2}$.
- W_f: Peso del papel filtro que contiene contaminantes en condiciones secas, en $\mathtt{g}$.
- W_i: Peso del papel filtro en condiciones secas, en $\mathtt{g}$.
- A: Área de la superficie del aislador, en $\mathtt{cm^2}$.

NOTA: Selección de Aisladores La Norma aborda el proceso de selección y dimensionamiento de los aisladores. Sin embargo, dicho proceso no será detallado en este documento, ya que la presente investigación se enfoca principalmente en la replicación de las condiciones ambientales de un entorno específico, y no en la selección del perfil de los aisladores.

2.4.3. Norma IEC 61245

La norma IEC 61245: *Artificial pollution tests on high-voltage ceramic and glass insulators to be used on d.c. systems* [40], es una especificación técnica que proporciona pruebas y métodos de contaminación con los objetivos de obtener información sobre el comportamiento de los aisladores frente a la contaminación y/o comprobar el rendimiento de una configuración lo más cercana posible a las condiciones de servicio.

Las pruebas cubren tensiones de hasta 600 $\texttt{kV}$ y recomiendan dos métodos principales de contaminación: Método de capa sólida y Método de niebla salina. En ambos métodos, la tensión se mantiene constante durante un periodo de varios minutos. Existe la opción de elevar la tensión continuamente hasta la ruptura, pero dicha práctica no está estandarizada.

Método de capa sólida Este método simula la **Contaminación tipo A**, donde una capa sólida, compuesta por sales y materiales inertes, se acumula en la superficie del aislante. La prueba incluye los siguientes pasos:

1. Se aplica una humectación de la capa sólida posterior a la energización del aislador, simulando situaciones comunes de servicio en ambientes rurales, industriales o desérticos.
2. La solución contaminante incluye caolín (polvo de arcilla), sal y agua. Se aplica por aspersión, flujo o brocha, o sumergiendo el aislador en la solución. La capa se deja secar antes de la prueba.
3. Posterior a la contaminación, se retira el depósito para medir ESDD y NSDD, caracterizando la contaminación de tipo A.

La norma específica el procedimiento de la **prueba** que permite confirmar la resistencia del aislador a un nivel de contaminación (tipo A) específico y a una tensión determinada. Este se detalla:

- El aislador se posiciona verticalmente con la capa de contaminación seca y se humedece mediante niebla de vapor con una tasa de entrada de vapor nominal de (0.05 ± 0.01) $\texttt{kg/h}$ por metro cúbico del volumen de la cámara de prueba.
- Se energiza a la tensión de prueba y se aplica niebla de vapor hasta la ocurrencia de una descarga disruptiva o hasta 100 minutos, dependiendo del riesgo de ruptura.
- Se considera exitosa si no se produce contorneo durante tres pruebas consecutivas. En caso de una ruptura, se realiza una cuarta prueba, y el aislador pasa si no se producen más descargas.

Método de niebla salina Este procedimiento simula la **Contaminación de tipo B**, donde una capa conductora de líquido cubre la superficie del aislante, sin materiales insolubles significativos. El grado de contaminación se determina por la salinidad de la niebla salina, expresada en kg de sal (NaCl) por metro cúbico de agua. La prueba se divide en dos etapas:

1. Proceso de pre-acondicionamiento, que limpia la superficie del aislador.
2. Ensayo de energización, recomendado para tensiones de hasta 600 $\texttt{kV}$.

Previo a estas, el aislador se lava para eliminar cualquier suciedad y grasa.

La solución salina a emplear debe estar hecha de cloruro de sodio (NaCl) de pureza comercial y agua potable. Con ello, la niebla salina se genera en una cámara de prueba con boquillas de pulverización, logrando una distribución uniforme sobre el aislador. El flujo de solución hacia cada boquilla debe ser (0.5 ± 0.05) dm^3/min, con una tolerancia del flujo total del $\pm 5\,\%$.

- **Pre-acondicionamiento:** El aislador se somete a un nivel de salinidad igual o superior al de la prueba bajo tensión alterna durante 20 minutos. Si no ocurre una ruptura, la tensión se incrementa en pasos del 10 % cada 5 minutos hasta la ruptura. Este proceso se repite ocho veces antes de lavar el aislador y comenzar las pruebas finales.
- **Procedimiento de la prueba:** El objetivo de la prueba es confirmar la resistencia del aislador a un grado de salinidad y tensión de prueba especificado.
  - La prueba comienza cuando el aislador y la cámara alcanzan las condiciones adecuadas, después del pre-acondicionamiento.
  - La tensión de prueba se mantiene durante una hora, a menos que ocurra una descarga disruptiva.
  - La prueba se considera exitosa si no se produce ruptura durante tres pruebas consecutivas. En caso de una ruptura, se realiza una cuarta prueba, y el aislador pasa si no se producen más descargas.
- **NOTA: Pruebas** Los procedimientos de prueba y los métodos de contaminación expuestos en la norma, y referenciados en este documento, están diseñados para aisladores cerámicos y de vidrio, que son diferentes de los aisladores poliméricos objeto de este documento. Se considerarán, por tanto, como una referencia para la elaboración de procedimientos y métodos de contaminación equivalentes para los propósitos de este documento.

2.4.4. Norma IEC 62073

La Norma IEC 62073: *Guidance on the measurement of hydrophobicity of insulator surfaces* [41], es una guía técnica que incluye métodos para la medición de la humectabilidad del material de aisladores compuestos para líneas aéreas, subestaciones y equipos, o aisladores de vidrio o cerámicos con y sin recubrimiento.

Las propiedades humectantes de una superficie se describen mediante los términos de hidrofobicidad e hidrofilia. Una superficie hidrófoba repele el agua, mientras que una superficie hidrófila se humedece fácilmente. Factores como el tipo de material, rugosidad, heterogeneidades, composición química y presencia de contaminación afectan este fenómeno. Las propiedades de humectación pueden variar con el tiempo debido a la influencia de las condiciones ambientales. Se describen a continuación los métodos mencionados en la norma para la cuantificación de la *Clase de hidrofobicidad* (HC):

Método del ángulo de contacto Este método mide el ángulo de contacto entre el borde de una gota de agua y la superficie de un material sólido. Dicho ángulo depende en gran medida de la rugosidad de la superficie y, en superficies contaminadas, puede diferir significativamente respecto a superficies limpias y planas.

Método de tensión superficial Este método determina la tensión superficial de un aislante mediante la capacidad de una serie de mezclas líquidas orgánicas, cuya tensión superficial aumenta gradualmente, para mojar la superficie. Es una extensión de la norma IEC 60674-2, donde se aplican líquidos reactivos para determinar un rango de tensión superficial.

Método *Spray* Este método evalúa la respuesta de una superficie al ser humectada con neblina de agua. Se utiliza una botella rociadora con agua pura, libre de impurezas como detergentes o disolventes que puedan alterar la tensión superficial.

- **Procedimiento:** El procedimiento consiste en aplicar la neblina a una distancia de 25 ± 10 $\mathtt{cm}$, durante 20 a 30 $\mathtt{s}$, utilizando entre 10 y 30 $\mathtt{ml}$ de agua. La medición debe proporcionar una imagen clara de la variación de la humectabilidad a lo largo y alrededor del aislador.
- **Evaluación:** La apariencia de la superficie tras la exposición a la niebla, se clasifica en una de las siete clases de hidrofobicidad establecidas por la norma. Los criterios para la determinación de las diferentes clases se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4: Criterio para la determinación de la clase de hidrofobicidad
Fuente: IEC 62073.

HC	Descripción
1	Solo se forman gotas discretas. Vistas perpendicularmente, las gotas son prácticamente circulares.
2	Gotas discretas. La mayor parte de la superficie está cubierta por gotas que, vistas perpendicularmente, tienen una forma regular pero no completamente circular.
3	Gotas discretas. La mayoría de la superficie está cubierta por gotas de forma irregular.
4	Gotas discretas y trazas humedecidas. Menos del 10 % del área está cubierta por canales o película de agua.
5	Gotas discretas y trazas humedecidas. Entre el 10 % y 90 % del área está cubierta por canales o película de agua.
6	Más del 90 % del área está cubierta por canales o película de agua, pero aún se observan pequeñas áreas no humedecidas.
7	Toda el área está cubierta por una película continua de agua.

La Figura 12 muestra imágenes de guía para seis clases de hidrofobicidad. La clase siete (HC7) corresponde a una superficie 100 % humedecida sin zonas secas visibles.

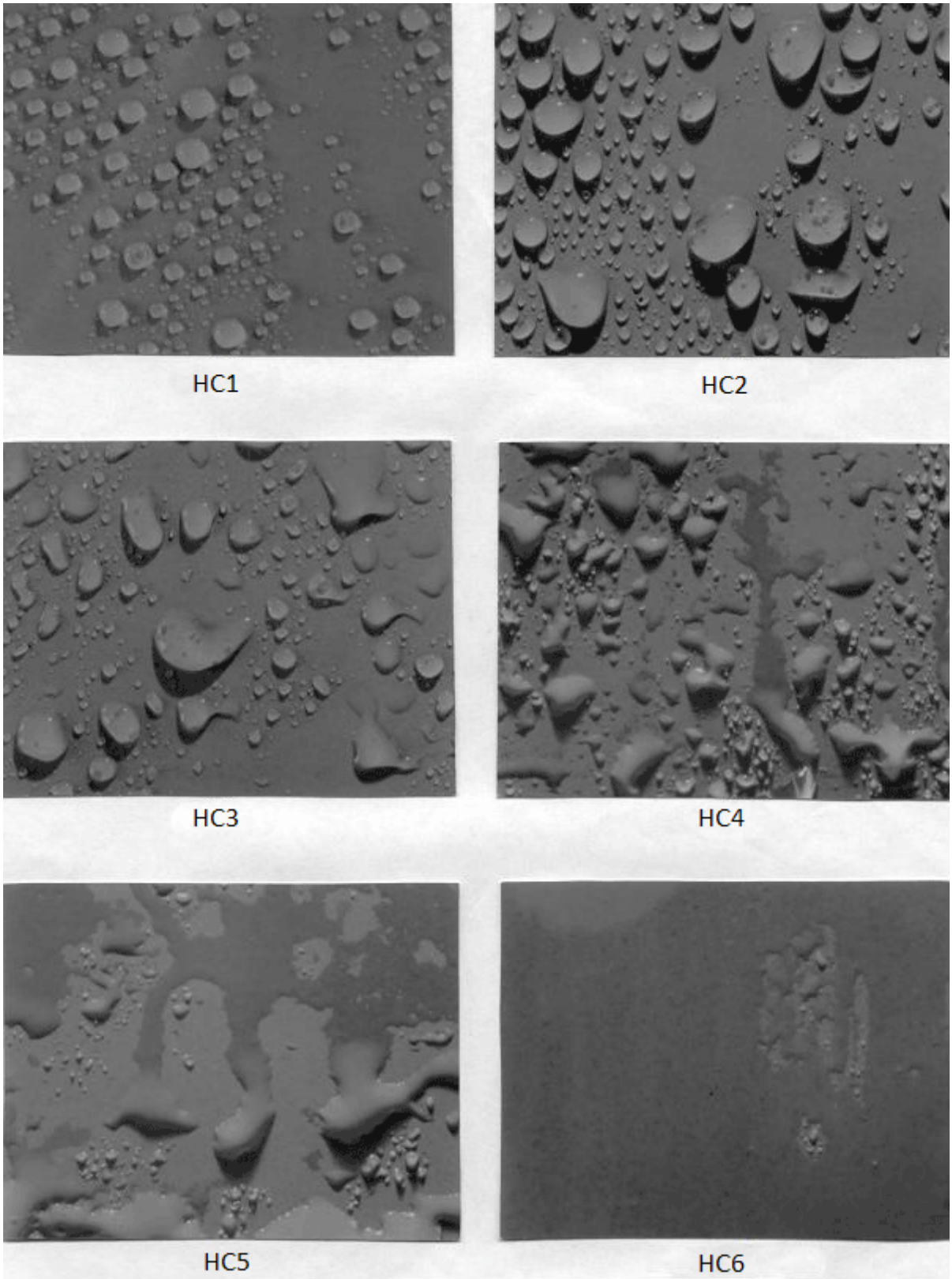


Figura 12: Ejemplos de superficies con clase de hidrofobicidad (HC) de 1 a 6..
Fuente: IEC 62073 [41]

3. Propuesta experimental

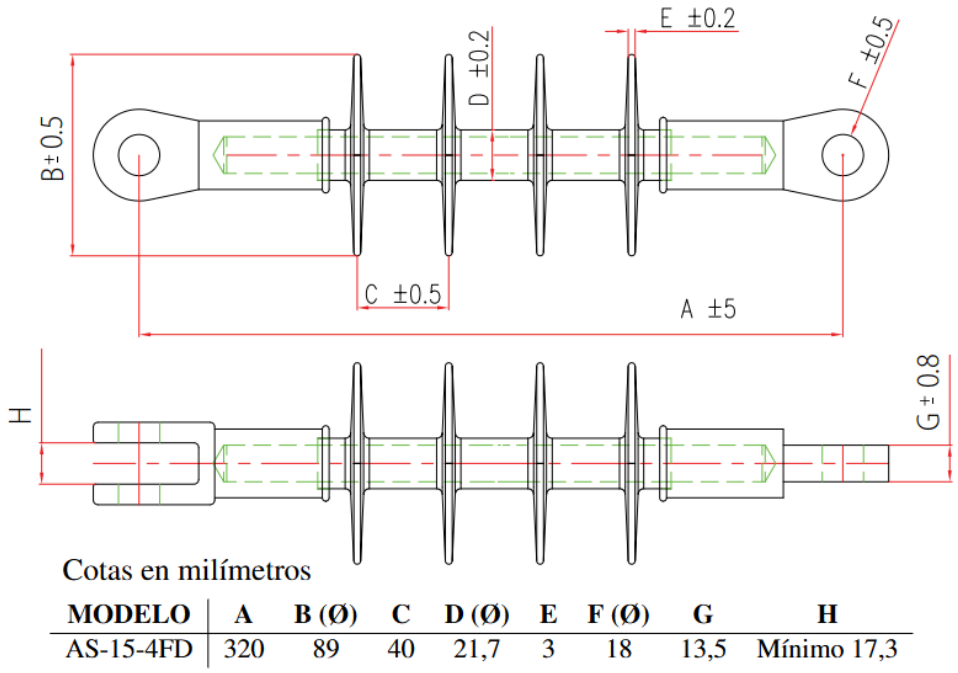
En esta sección se detalla la propuesta experimental que busca determinar si es posible correlacionar el estado de contaminación de un aislador con mediciones en DP bajo excitación en DC. Para ello, se plantean tres etapas:

1. Caracterización de la contaminación: En ella se determinan los entornos de contaminación del emplazamiento de la futura línea Kimal - Lo Aguirre, para luego recrear dichos entornos de forma artificial en laboratorio.
2. Determinación de *Clase de hidrofobicidad*: Parte de la caracterización de los entornos de contaminación implica la determinación de la clase de hidrofobicidad de superficie del aislador para cada escenario.
3. Ensayos de laboratorio en alta tensión: Otro aspecto de la caracterización de los entornos se logra mediante la medición de la tensión de ruptura y la corriente de fuga de los aisladores bajo ensayo. A esto se suma realizar mediciones de DP bajo excitación continua para cada entorno de contaminación.

Posterior a la adquisición de datos, se realiza una etapa de análisis de resultados, empleando los métodos expuestos en la sección 2.3, relacionándolos con la caracterización de los entornos de contaminación.

3.1. Objeto bajo estudio

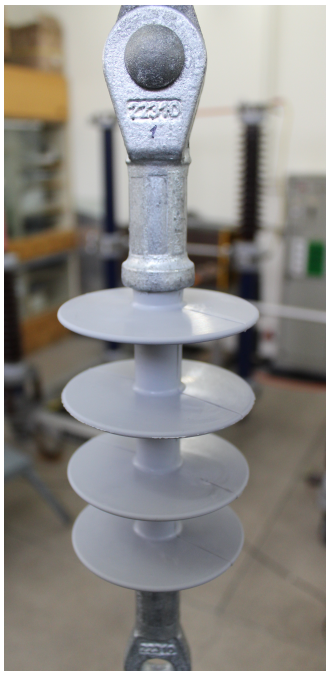
Para el desarrollo de este trabajo se emplean **Aisladores Poliméricos de Silicona, Suspensión - Retención**, de clase 15 kV. En la Figura 13(b) se presenta una imagen del aislador compuesto tomada en laboratorio, mientras que en 13(a) se exponen sus dimensiones. Para los diversos ensayos de laboratorios se cuenta con cinco aisladores idénticos, del lote 22310, proporcionados por la empresa fabricante Silpak S.A. Cabe destacar que el área total de la superficie de silicona es de 600 cm^2.



Cotas en milímetros

MODELO	A	B (Ø)	C	D (Ø)	E	F (Ø)	G	H
AS-15-4FD	320	89	40	21,7	3	18	13,5	Mínimo 17,3

(a) Plano Aislador



(b) Fotografía de aislador

Figura 13: Objeto bajo estudio
Adaptación de: ficha técnica Silpak [42].

El principal motivo para la elección de este tipo de probeta es su uso mayoritario en líneas HVDC [9]. Además, se opta por un aislador en lugar de una probeta de material estándar para aproximarse lo más posible a la geometría que se desea estudiar. Por último, el tamaño del aislador es tal que permite generar rupturas bajo las condiciones de laboratorio disponibles.

3.2. Contaminación artificial

3.2.1. Caracterización de la Contaminación

Primero, se determinan los entornos de contaminación que se replicarán en laboratorio. Para ello, se comparan las zonas identificadas en el trazado de la línea HVDC Kimal - Lo Aguirre (ver Figura 14) con los entornos típicos indicados en la norma IEC 60815-1 [38], seleccionando aquellos con mayor similitud respecto a las zonas identificadas.

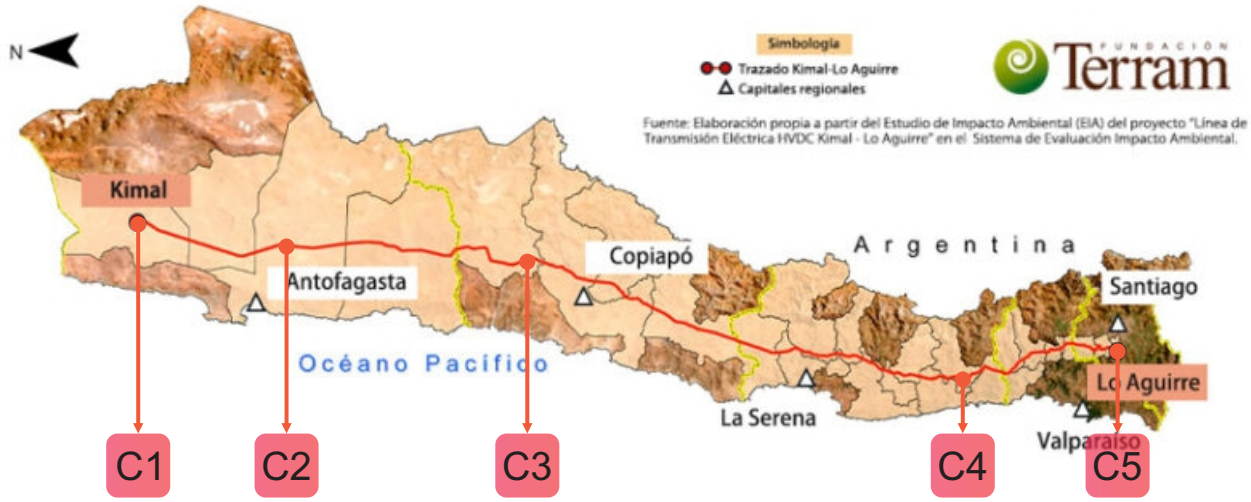


Figura 14: Trazado del proyecto Kimal - Lo Aguirre
Adaptación de: Nota de Climate Tracker [43]

De este modo, se determinan los entornos y se resumen en la Tabla 5:

Tabla 5: Casos y Entornos de Contaminación

Caso	Descripción	Entorno
C1	Sub Estación Kimal, ubicada	$E7s$
C2	Desierto de Atacama	$E7c$
C3	Límite Desierto de Atacama	$E5$
C4	Punto más cercano a la costa ($\sim$ 20 km)	$E4$
C5	Sub Estación Lo Aguirre	$E2$

Se resalta la necesidad de distinguir el entorno $E7$ de la norma IEC 60815-1 (ver Tabla 3) en los sub-entornos propuestos: $E7c$ y $E7s$. En la Figura 11 el entorno $E7$ (*Very heavy*) presenta una alta concentración de elementos solubles y no genera una diferencia frente a las variaciones de elementos no solubles como sí ocurre en la realidad. Es por ello que, para los fines de este documento, se definirá el entorno $E7s$ como un entorno con alta concentración de elementos solubles, mientras que el entorno $E7c$[4] se tratará como un entorno con alta contaminación tanto de elementos solubles como no solubles.

La determinación de estos entornos se basa en una evaluación cualitativa conforme a las indicaciones de la Tabla 3 y tiene un carácter referencial, por lo que no debe emplearse como criterio de diseño de la aislación para los niveles de contaminación mencionados.

[4]Alternativamente, se propone denominar como $E8$ al entorno con alta concentración de elementos no solubles, mantenido una de descripción similar a la del entorno $E4$

3.2.2. Generación de contaminación artificial

Con el objetivo de determinar las concentraciones de materiales solubles y no solubles en agua que permitan reproducir escenarios específicos de contaminación, se implementa un proceso iterativo en el cual:

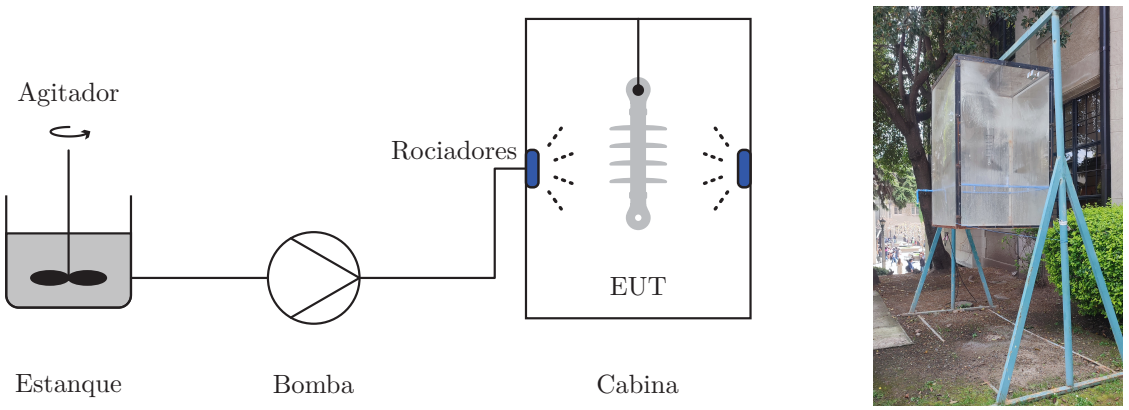
1. Se seleccionan concentraciones de materiales solubles y no solubles.
2. Se aplica la solución contaminante en aisladores.
3. Se determina el escenario de contaminación mediante el cálculo de ESDD y NSDD.

Luego, en caso de que las concentraciones no generen el escenario deseado, se vuelve al paso 1 modificando las concentraciones de materiales solubles y no solubles para aumentar o disminuir las concentraciones ESDD y NSDD. Se destaca que la concentración de sal tiene un efecto prácticamente lineal con el valor de ESDD.

Selección de concentraciones: Las soluciones contaminantes se preparan utilizando agua potable, junto con materiales solubles y no solubles en distintas concentraciones. Para simular la contaminación de tipo soluble, se emplea sal de pureza comercial, mientras que para la contaminación de tipo no soluble, se utiliza caolín.

Las concentraciones iniciales de sal y caolín se determinaron tomando como punto de partida los valores reportados en el trabajo de M. Pérez [44]. Es importante destacar que las concentraciones para generar un entorno determinado varían principalmente en función de la geometría del objeto de ensayo.

Procedimiento de contaminación: La contaminación de los aisladores se lleva a cabo en una cabina de acrílico con dimensiones de 110 x 110 x 170 `cm`, equipada con un sistema de pulverización de PVC de 20 `mm` y cuatro microjets alimentados por una bomba hidráulica de 0.5 `kW`. Esta cabina pulveriza homogéneamente una mezcla de agua, caolín y sal, con un caudal de aproximadamente 20 `l/min`. En la Figura 15(a) se muestra un esquema de los equipos contaminación, mientras que la Figura 15(b) muestra la cabina y el aislador suspendido en su interior.



(a) Esquema de contaminación

(b) Fotografía de cabina

Figura 15: Esquema y cabina de contaminación

A continuación se listan los pasos del proceso de contaminación:

1. Preparación del objeto de ensayo: Limpie y elimine suciedad y/o grasa superficial los aisladores poliméricos según la norma IEC 61245 usando agua potable y, si es necesario, detergente comercial. Enjuague con abundante agua y utilice guantes de acrílico para evitar recontaminación.

2. Purgado del sistema de pulverización: Purgue el sistema (sin el objeto de ensayo) con aproximadamente 5 litros de mezcla contaminante durante 15 segundos. Mantenga la mezcla en constante agitación para asegurar su homogeneización.

3. Colocación del aislador en la cabina: Suspenda los aisladores limpios y secos en la cabina de contaminación previamente purgada. Cabe destacar que este procedimiento se lleva a cabo sin energizar los aisladores.

4. Aplicación de la mezcla contaminante: Pulverice la mezcla contaminante sobre el aislador durante 30 segundos. Prepare al menos 20 litros de mezcla para asegurar disponibilidad suficiente, considerando que se requieren un mínimo de 15 litros por escenario.

5. Secado del aislador: Retire el aislador de la cabina manteniéndolo en posición vertical y trasládelo a un área libre de contaminantes para secar. El secado natural puede durar entre 4 y 8 horas.

Procedimiento de medición de contaminación: Después de aplicar la capa contaminante sobre la superficie del aislador, se deben realizar mediciones de depósitos solubles (ESDD) y no solubles (NSDD), conforme a los requisitos establecidos en la Norma IEC 60815-1. A continuación, se listan los materiales y el equipo requerido:

- Agua desmineralizada
- Vaso precipitado
- Guantes de vinilo
- Medidor de conductividad y temperatura
- Papel filtro de 0.7 μm (47 mm de diámetro)
- Sistema de filtración y bomba de vacío
- Horno de secado
- Balanza de precisión

A continuación se listan los pasos del proceso de medición de la contaminación:

1. Preparación de solución base: Colocar 300 ml de agua desmineralizada en un vaso precipitado, sumergiendo una tórula de algodón en dicha agua. La solución base debe tener una conductividad inferior a 10 μS/cm.

2. Limpieza del aislador: Usando guantes de vinilo, se retiran los contaminantes de la superficie del aislador (excepto las piezas metálicas) con una tórula de algodón. Que se sumerge y exprime en la solución base cada vez que se recoja una cantidad significativa de contaminantes. Esto se repite hasta que no haya más contaminantes en la superficie, manteniendo los 300 ml de la solución base y evitando pérdidas de agua.

3. Cálculo de ESDD: Se mide la conductividad y la temperatura de la solución con los contaminantes. Manteniendo la mezcla homogénea durante la medición. Luego, se calcula la ESDD según indica la sección 2.4.2.

4. Cálculo de NSDD: Se pesa el papel filtro seco antes del proceso de filtrado. Luego, se emplea para filtrar la solución contaminante, preferiblemente con un sistema de filtración al vacío para acelerar el proceso. Después, se seca el papel filtro con los contaminantes en un horno a 105 °C durante una hora y vuelve a pesar con la balanza de precisión. Finalmente, se calcula el NSDD según las indicaciones de la sección 2.4.2.

3.3. Clase de hidrofobicidad

En conformidad con la Norma IEC 62073 [41], mediante el Método *Spray*, se realizan pruebas de hidrofobicidad sobre la superficie de los aisladores. Inicialmente, se evalúa un aislador completamente limpio y seco como caso base. Posteriormente, se repite el procedimiento para cada capa de contaminación depositada en la superficie de los aisladores, después de la exposición a los entornos replicados.

3.4. Ensayos en alta tensión

Con el objetivo de analizar el desempeño de los aisladores bajo contaminación tipo A ante excitación continua, se desarrollan ensayos basados en el método de capa sólida (ver sección 2.4.3). Para ello se implementa un método alternativo de humectación para los aisladores.

Limitaciones del método de humectación: La cabina de contaminación disponible fue diseñada para replicar tanto el método de capa sólida como el método de niebla salina. Sin embargo, el caudal de 20 `l/min` resulta excesivo, considerando que los métodos antes mencionados requieren caudales de: 0.05 `kg/h` de vapor por metro cúbico del volumen de la cámara de prueba y 0.5 `l/min` de solución salina, respectivamente. El caudal de la cabina, como se aprecia en la Figura 16, "limpia" en lugar de humectar la capa contaminante, además de formar caminos conductores de agua que impiden la caracterización del entorno de contaminación. Por estas razones, se desarrolla un método alternativo de humectación.



Figura 16: Exceso de agua en aisladores. De izquierda a derecha, fotografías tomadas cada 3 segundos.

Método alternativo de humectación: Ante la ausencia de una cámara de generación de niebla, se propone un método de humectación inspirado en el procedimiento de medición de hidrofobicidad de la norma IEC 62073. Este método es una alternativa al proceso de humectación definido en la norma IEC 61245 para la aplicación del método de capa sólida. Su objetivo es replicar el efecto del rocío sobre aisladores con una capa de contaminación en su superficie. A continuación, se lista dicho procedimento:

1. El proceso de humectación se realiza empleando un atomizador de uso comercial a 15 `cm` de distancia del objeto de prueba, con el cual se rocía un total aproximado de 24 `ml` de agua destilada (>3 μ`S/cm`).
2. La aplicación se realiza en dos rondas idénticas. Durante cada ronda, se pulveriza a cada una de las cuatro caras del objeto de prueba, aplicando cuatro sprays por cara. Lo anterior se esquematiza en la Figura 17.

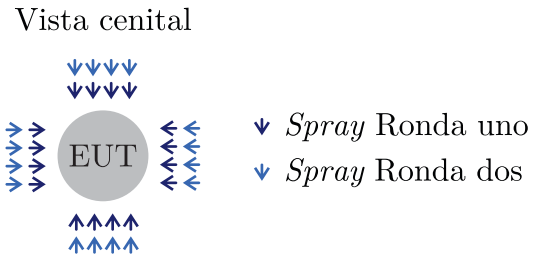


Figura 17: Esquema de método alternativo de humectación.

3. El proceso completo ha de durar de 25 y 30 segundos. Considerando 0.75 $\pm$ 0.1 `ml` por *spray*, se aplican 32 *spray* en total.
4. Luego, se deja reposar el objeto de prueba durante 120 segundos.

Este método es simple y rápido de aplicar. Sin embargo, presenta dos desventajas significativas. La primera es que no es posible energizar el objeto de prueba durante la humectación. La segunda es que, debido a que las corrientes de fuga secan la superficie del aislador, se cuenta con una ventana de tiempo corta (aproximadamente 2 minutos) para realizar las pruebas.

3.4.1. Medición de tensión de ruptura

En esta sección se describen los ensayos de medición de tensión de ruptura, para ambientes secos y húmedos, en aisladores poliméricos bajo contaminación artificial correspondiente a los entornos: $E2$, $E4$, $E5$, $E7c$ y $E7s$. Adicionalmente, se realiza un ensayo con un aislador completamente limpio, que se toma como caso base.

Equipos: Los ensayos siguen los lineamientos generales de la norma IEC 60060-1 [45]. Se aplica tensión de polaridad negativa y realizan pruebas de tensión progresiva de Clase 3. Además, los valores de tensión de ruptura deben corregirse a condiciones atmosféricas estándar, ajustando por presión, temperatura y humedad. En caso de realizar pruebas en entorno húmedo, no se realiza corrección por humedad.

Para la realización de los ensayos se utiliza la fuente de alimentación *Multi Test Set* (MTS) de la marca HAEFELY, la cual puede suministrar tensiones en AC de 50/60 `Hz` de hasta 80 `kV` RMS, tensiones en DC de hasta 400 `kV`, y tensiones de impulso de hasta 400 `kV`. Además, se emplea una resistencia limitadora de agua, fabricada para tener un valor de 2 $M\Omega$. La configuración se detalla en la Figura 18.

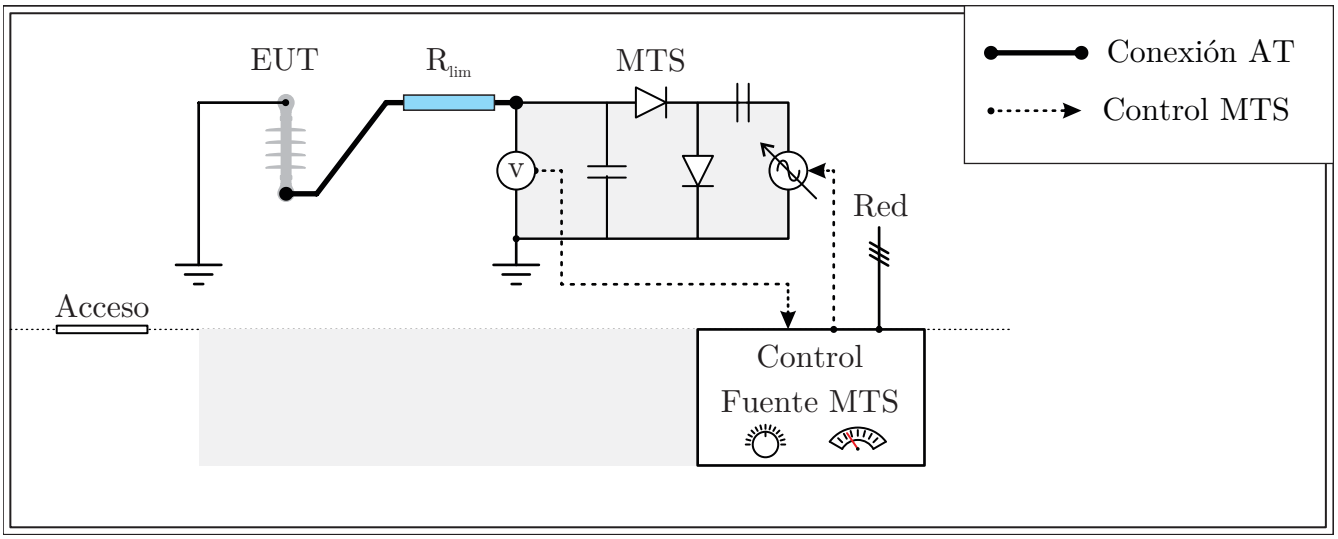
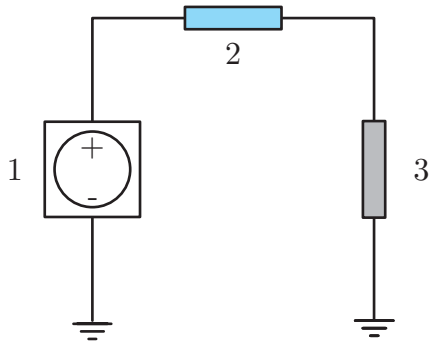


Figura 18: Disposición de equipos para medición de tensión de ruptura.

Procedimiento: El proceso para la medición de la tensión de ruptura se realiza una vez que los aisladores, que poseen una capa de contaminación bajo estudio, estén completamente secos. El procedimiento es el siguiente:

1. Se monta el circuito mostrado en la Figura 19, equivalente a la disposición de la Figura 18.
2. Se tiene especial cuidado en disponer la fuente en polaridad negativa. Se destaca que es la parte superior del aislador la que se aterriza.
3. En caso de realizar una prueba en un entorno húmedo, se humedece el aislador siguiendo el procedimiento descrito en 3.4. De lo contrario, se omite este paso.
4. Se energiza el aislador de forma progresiva hasta alcanzar la ruptura, registrando el valor de la misma. El valor de tensión de ruptura se registra cuando se observa, al menos, uno de los siguientes escenarios:
   a) Aumento brusco de la corriente en la fuente de alimentación.
   b) Caída de tensión observada en la fuente de alimentación.
   c) Ver o escuchar el fenómeno de contorneo en el aislador.

5. Tras la ruptura, se reduce la tensión hasta la mitad del valor de ruptura.
6. Luego, se repite el procedimiento desde el paso 3, con un periodo de reposo de 5 segundos posterior a cada ruptura, hasta obtener al menos 10 mediciones válidas de V_{rup}.
7. Finalmente, se reduce la tensión a cero. Se define V_{rup} como el promedio simple de los valores obtenidos.



1: Fuente de alimentación MTS.
2: Resistencia limitadora.
3: Probeta de ensayo.

Figura 19: Circuito para medición de tensión de ruptura.

3.4.2. Medición de corriente de fuga

En esta sección se describen los ensayos de medición de corriente de fuga, para ambientes secos y húmedos, en aisladores poliméricos bajo contaminación artificial correspondiente a los entornos: $E2$, $E4$, $E5$, $E7c$ y $E7s$. Adicionalmente, se realiza un ensayo con un aislador completamente limpio, que se toma como caso base.

Los ensayos siguen los lineamientos generales de la norma IEC 60060-1 [45]. En estos se aplica tensión de polaridad negativa.

Equipos: Para la realización de los ensayos se utiliza la fuente de alimentación *Multi Test Set* (MTS) de la marca HAEFELY, la cual puede suministrar tensiones en DC de hasta 400 $\mathtt{kV}$. Además, se emplea como resistencia en derivación, un multímetro marca KEYSIGHT modelo U1232A, el cual tiene un valor de resistencia de 3.2 $[\mathtt{k}\Omega]$, en la escala de $\mu\mathtt{A}$. Este valor de resistencia se mantiene constante siempre y cuando no se modifique la escala de corriente, por tanto, para los ensayos, se mantuvo fija en el rango μA, pudiendo medir hasta 600 $\mu\mathtt{A}$. La configuración se detalla en la Figura 20.

Procedimiento: El proceso para la medición de corriente de fuga se realiza una vez que los aisladores, que poseen una capa de contaminación bajo estudio, estén completamente secos. El procedimiento es el siguiente:

1. Se monta el circuito mostrado en la Figura 21, equivalente a la disposición de la Figura 20.
2. Se ajusta el multímetro en modo amperímetro con un rango fijo, asegurando que la resistencia interna se mantenga en 3.2 $k\Omega$. [5]
3. Para energizar, se debe conocer previamente el valor de la tensión de ruptura, asegurándose de no sobrepasar el 70 % de dicha tensión en ningún caso.

[5] Si se utiliza un multímetro que no registre las mediciones de forma temporal, es posible grabar la pantalla del dispositivo con una cámara de video para su posterior análisis.

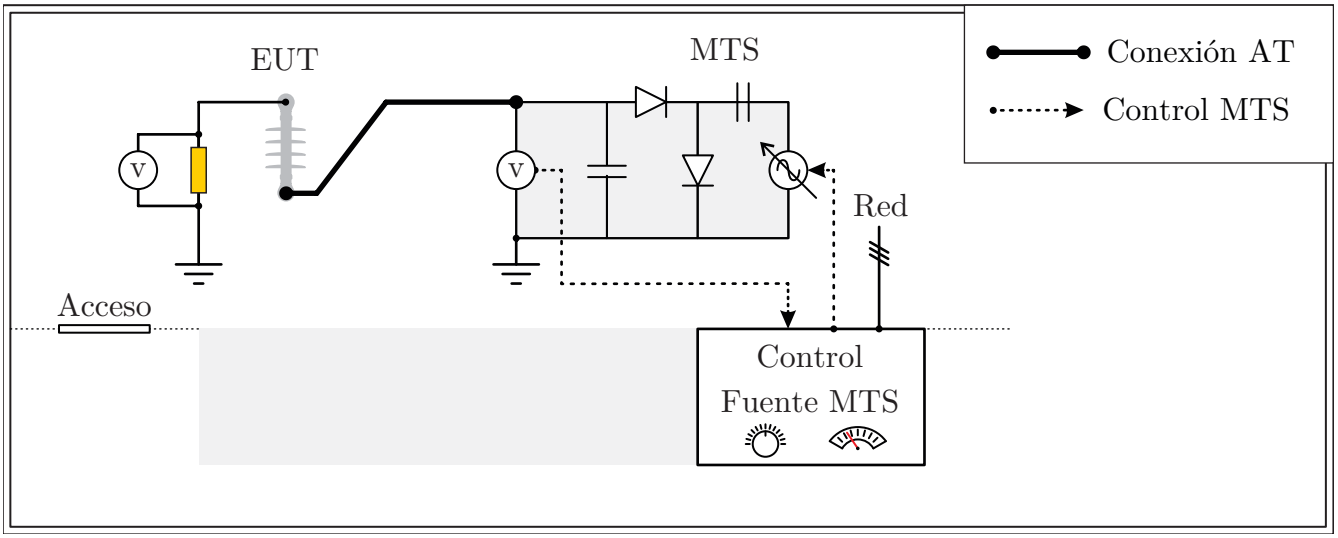
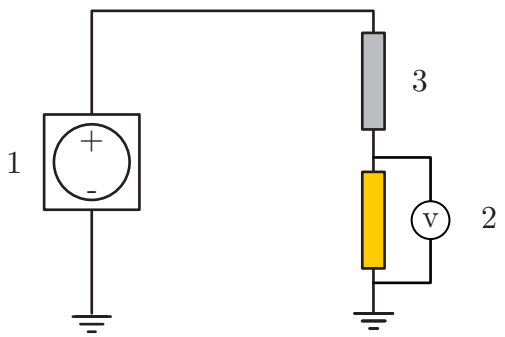


Figura 20: Disposición de equipos para medición de corriente de fuga.

4. Dependiendo del ambiente (húmedo o seco), se definen los niveles de tensión a ensayar, basados en la tensión de ruptura. Los niveles de tensión empleados particularmente para este trabajo son los siguientes:
   - **Ambiente Seco:** 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 y 110 `kV`.
   - **Ambiente Húmedo:** 10, 20, 30 y 40 `kV`.
5. En caso de realizar la prueba en un entorno húmedo, se humedece el aislador siguiendo el procedimiento 3.4. Si el entorno es seco, este paso se omite.
6. Se energiza el aislador de forma progresiva a una tasa de 2 kV/s, hasta alcanzar el nivel de tensión de prueba.
7. Se registra de forma continua el valor de la corriente en el amperímetro durante 180 segundos.
8. Una vez transcurrido el tiempo de prueba, se reduce la tensión a cero y se finaliza la medición.



1: Fuente de alimentación MTS.
2: Multitester en modo Amperímetro.
3: Probeta de ensayo.

Figura 21: Circuito para medición de corriente de fuga.

3.4.3. Medición de descargas parciales

En esta sección se describen los ensayos de medición de DP, para un ambiente húmedo, en aisladores poliméricos bajo contaminación artificial correspondiente a los entornos: $E2$, $E4$, $E5$, $E7c$ y $E7s$.

Para la medición de DP, se siguen los lineamientos generales de la norma IEC 60270, empleando simultáneamente métodos directos e indirectos de medición. Para el método directo se utiliza un equipo de medición comercial, mientras que para la realización de mediciones indirectas se emplean una antena UHF y un HFCT.

Equipos: Se utiliza como fuente de alimentación el equipo *Multi Test Set* (MTS) de la marca HAEFELY capaz de suministrar tensiones en DC hasta 400 `kV`. Mientras que para la detección de DP se emplean, simultáneamente:

- Un equipo comercial de detección directa de la marca OMICRON modelo MPD600 (Figura 22(a))
- Una antena bioinspirada de UHF, fabricada en la UTFSM [46]. Esta posee una ganancia media de 3.07 dBi y cubre el espectro de frecuencias entre 300 `MHz` y 2000 `MHz`. (Figura 22(b))
- Un HFCT (*Hight Frequency Current Transformer*) de la marca pdTECH, modelo *CT17*. (Figura 22(c))



(a) Equipo OMICRON (b) Antena (c) HFCT

Figura 22: Equipos para la detección de DP.

Las señales de la antena y del HFCT se llevan a un osciloscopio Keysight InfiniiVision DSOX2024, de un ancho de Banda 200 `MHz` y una frecuencia de muestreo de 2 `GSPS`. La capacitancia de acoplamiento C_k es de 2000 `pF`. La disposición de los equipos se detalla en la Figura 23.

Procedimiento: El proceso para la medición de DP se realiza una vez que los aisladores que poseen una capa de contaminación bajo estudio estén completamente secos. El procedimiento es el siguiente:

1. Se monta el circuito mostrado en la Figura 24, equivalente a la disposición de la Figura 23.
2. Se humedece el aislador, siguiendo el procedimiento descrito en la Sección 3.4.
3. Se energiza el aislador hasta alcanzar la tensión de descarga parcial (V_{DP}), propuesta en la Sección 3.4.3.
4. Después de 30 segundos, en post de la estabilización, se registran simultáneamente las DP mediante:
   - **Equipo OMICRON:** Registra la actividad de DP durante 140 segundos continuos.
   - **Osciloscopio Keysight:** Programado para capturar las primeras 50,000 DP. Dependiendo del nivel de contaminación del entorno, esta medición puede durar entre 2 minutos y 14 segundos.
5. Una vez finalizadas ambas mediciones, se reduce la tensión de excitación a cero.

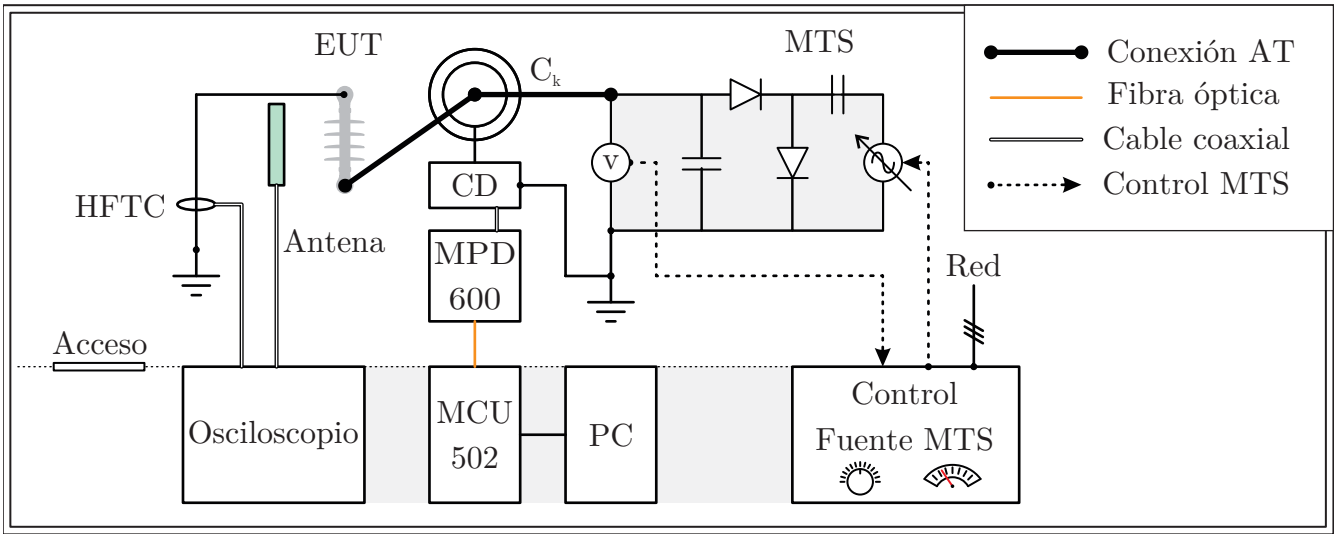


Figura 23: Disposición de equipos para medición de descargas parciales.

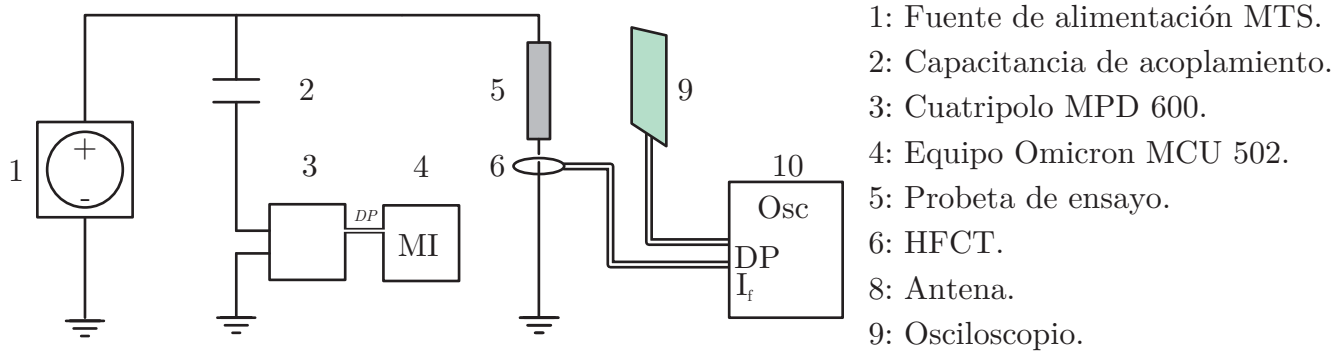


Figura 24: Esquema para medición de descargas parciales.

Tensión de prueba: La tensión de prueba V_{DP} definida para estos ensayo de DP es seleccionada considerando las diferentes tensiones de ruptura de los aisladores en los entornos de contaminación.

Su busca que los ensayos de DP varíen únicamente en los entornos de contaminación. Con ello se propone utilizar la misma tensión de prueba, independientemente de la PDIV, para cada probeta.

La tensión de prueba se define como la máxima tensión con la cual no ocurre ruptura en el caso más crítico. La mínima tensión de ruptura registrada es de 33 kV (ver 4.3) para un entorno de contaminación salina en condiciones húmedas. Se opta por utilizar un 85 % de esta, lo que da como resultado una $V_{DP} = 28$ kV.

Para este valor de tensión, el caso base correspondiente al aislador limpio no presenta actividad de DP hasta los 60 kV. Este nivel de tensión resulta insostenible para los demás entornos. Por tanto, se excluye el caso base y se adopta el entorno $E2$ como punto de comparación.

4. Resultados experimentales

En esta sección se presentan y analizan las mediciones efectuadas en laboratorio. Se evalúan los resultados obtenidos en: la generación de entornos de contaminación, medición del nivel de hidrofobicidad, tensión de ruptura, corriente de fuga y respuestas en DP.

4.1. Escenarios de contaminación

Mediante el procedimiento descrito en la sección 3.2.2 se caracterizaron los cinco escenarios propuestos de contaminación y se determinaron las concentraciones necesarias de material soluble y no soluble para recrear dichos escenarios de forma artificial. En la siguiente Tabla se resumen los valores de las concentraciones y el promedio de los valores de ESDD y NSDD para cada entorno de contaminación.

Tabla 6: Tabla de concentración de sal y caolín, junto con ESDD y NSDD.

Tipo de entorno	Concentración de Sal g/l	Concentración de Caolín g/l	ESDD mg/cm^2	NSDD mg/cm^2	Relación ESDD/NSDD
E2	1	1	0.016	0.017	0.9
E4	1	10	0.016	0.130	0.1
E5	20	2	0.212	0.032	6.5
E7c	10	100	0.133	1.848	0.1
E7s	80	2	0.861	0.032	26.6

En la Figura 25 se muestran y resumen las mediciones de ESDD y NSDD con los cuales es posible definir los entornos de contaminación. Se destaca que cada escenario de contaminación fue medido en cada uno de los cinco aisladores disponibles. En la Sección de anexos A.1 se resume la totalidad de mediciones.

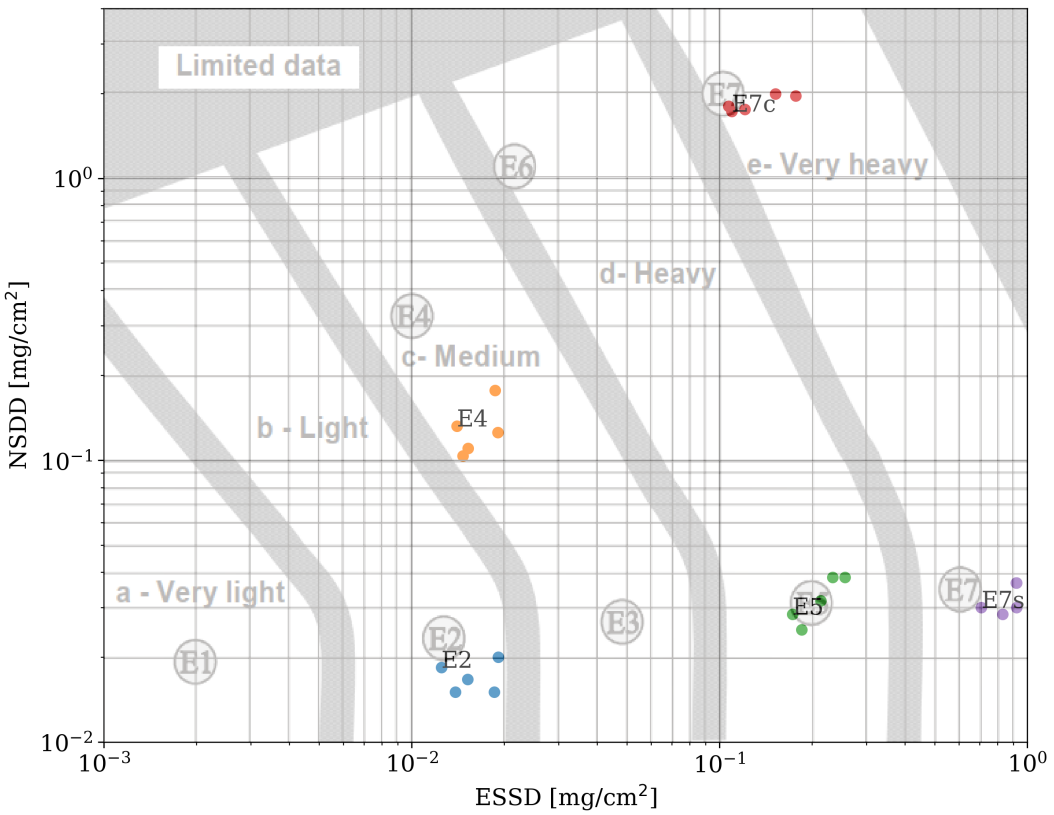
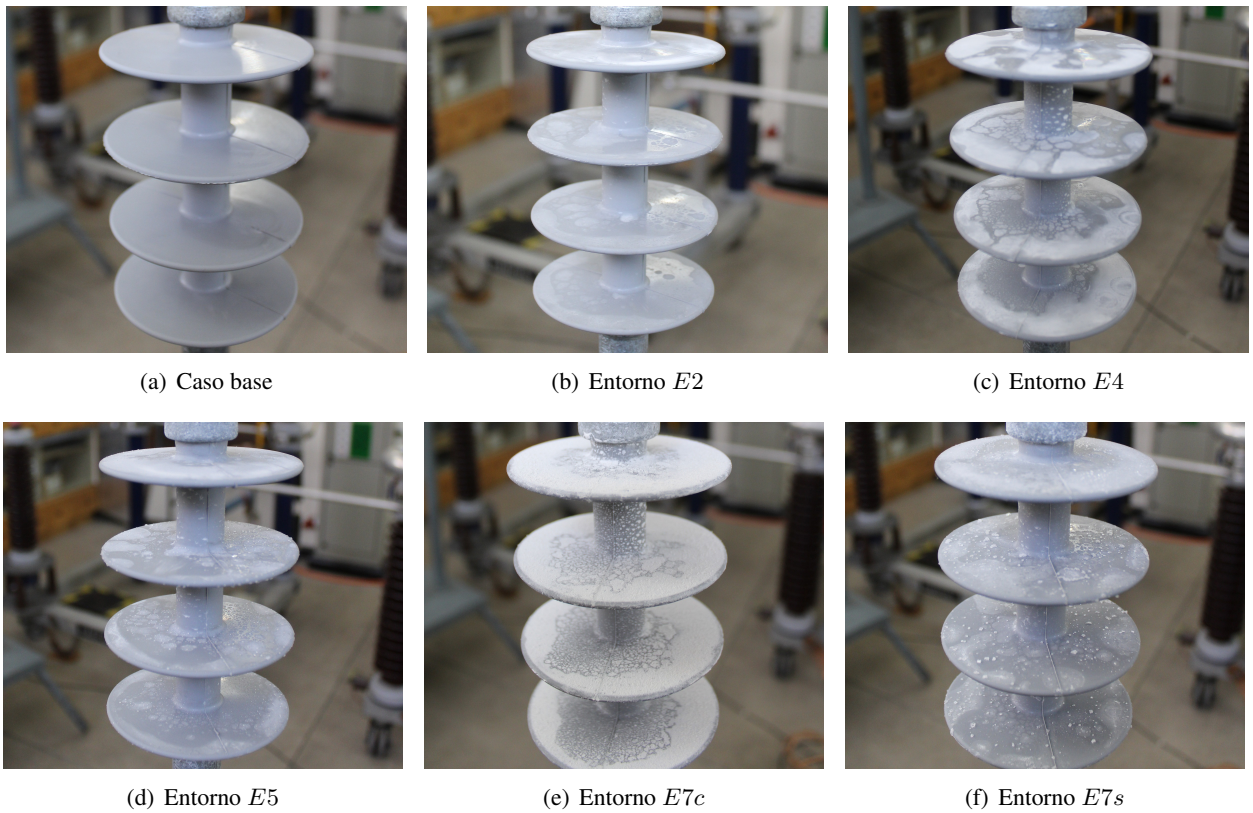


Figura 25: Diagrama de entornos de contaminación.

En la Figura 26 se expone el resultado de aplicar los entornos de contaminación a los aisladores en comparación con el caso base, siendo evidentes las diferencias sobre las superficies de los aisladores. Se destacan la formación de cristales de sal en la superficie del aislador en el entorno E7s y la capa de material no soluble del caso E7c.



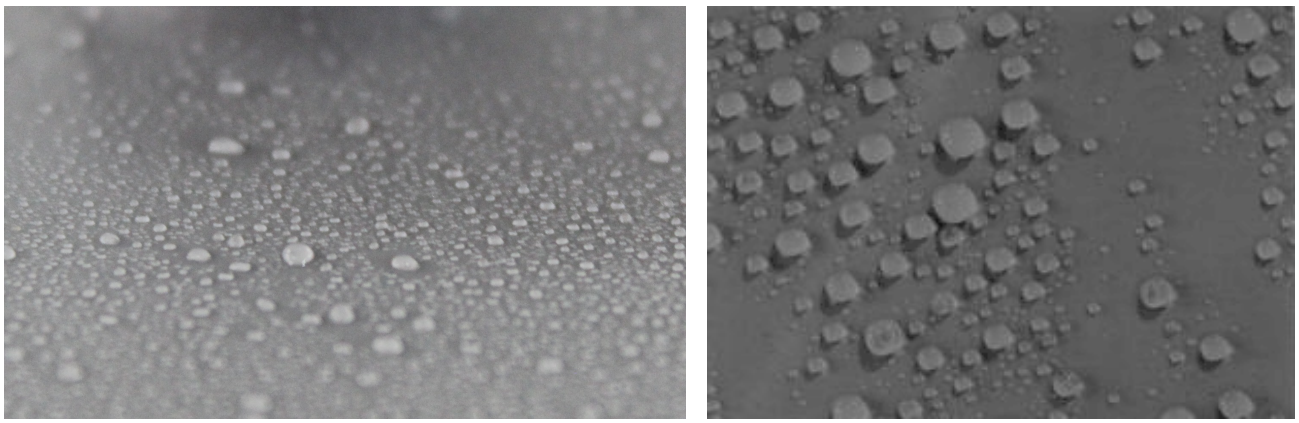
(a) Caso base (b) Entorno $E2$ (c) Entorno $E4$

(d) Entorno $E5$ (e) Entorno $E7c$ (f) Entorno $E7s$

Figura 26: Fotografías de aisladores contaminados en condición seca.

4.2. Clase de hidrofobicidad

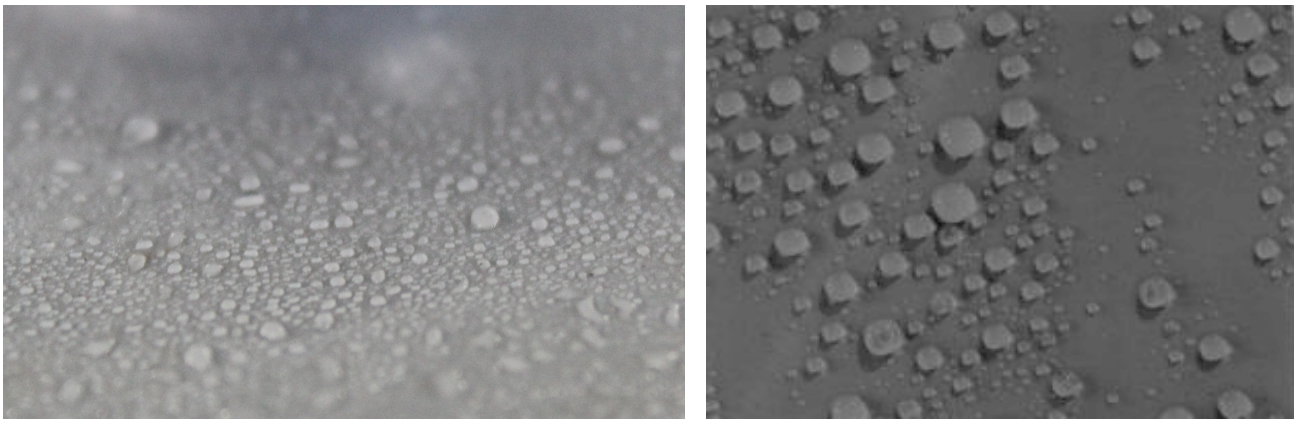
De acuerdo con la norma IEC 63073, se llevan a cabo las pruebas de hidrofobicidad mediante el Método *Spray*. Se compara visualmente la respuesta los aisladores en los escenarios de contaminación propuestos y en el caso base, ver Figura 27. Se obtiene que el aislador, en un caso base (Figura 27(a)), se tiene una clase HC1, observándose que en su superficie se forman predominantemente gotas discretas.



(a) Caso base (b) Clase de hidrofobicidad HC1

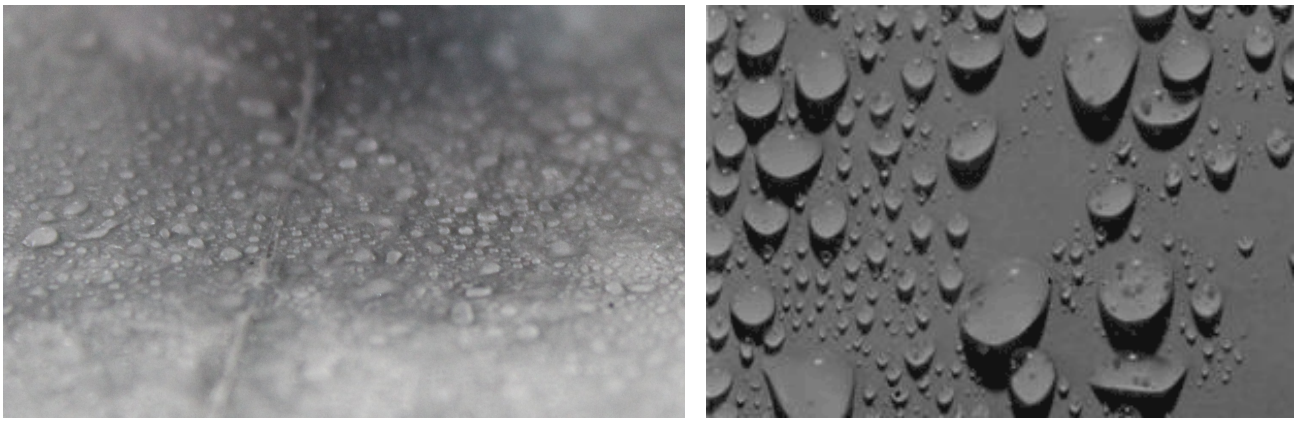
Figura 27: Prueba de hidrofobicidad para aislador en caso base.

Del mismo modo, las Figuras 28, 29, 30, 31 y 32 presentan las pruebas de hidrofobicidad de cada aislador para los entornos $E2$, $E4$, $E5$, $E7c$ y $E7s$, de forma respectiva.



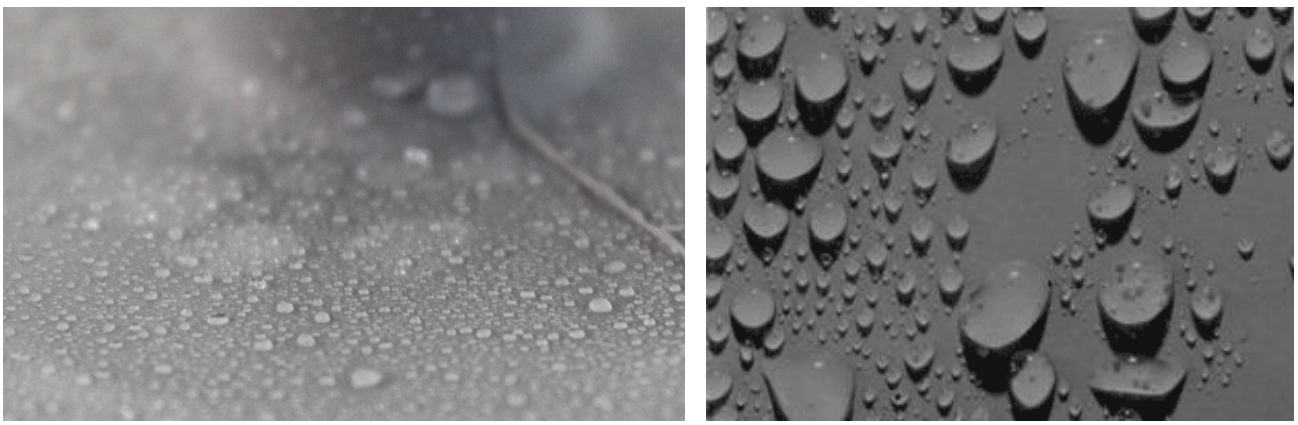
(a) E2 (b) Clase de hidrofobicidad HC1

Figura 28: Prueba de hidrofobicidad para aislador en entorno E2.



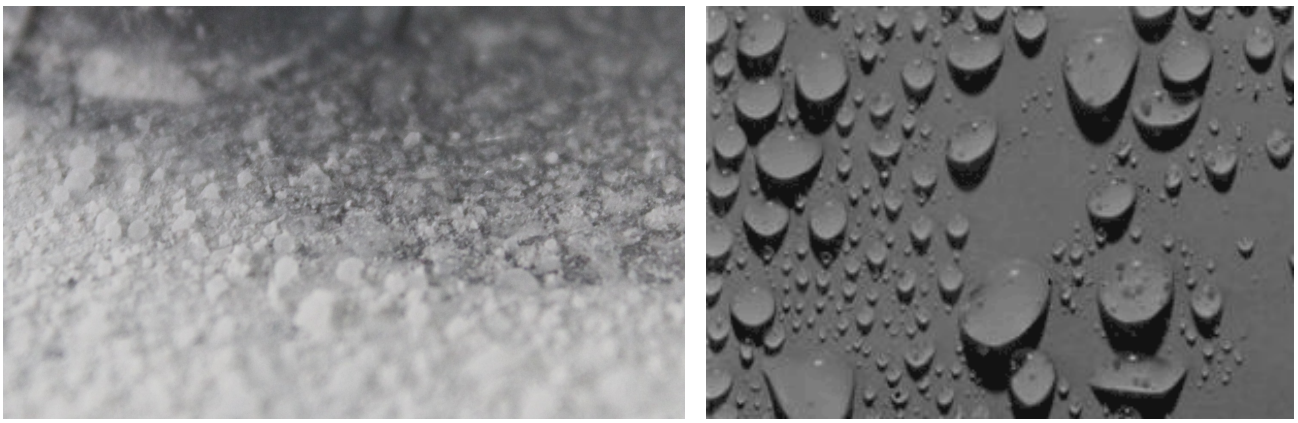
(a) E4 (b) Clase de hidrofobicidad HC2

Figura 29: Prueba de hidrofobicidad para aislador en entorno E4.



(a) E5 (b) Clase de hidrofobicidad HC2

Figura 30: Prueba de hidrofobicidad para aislador en entorno E5.



(a) E7c (b) Clase de hidrofobicidad HC2

Figura 31: Prueba de hidrofobicidad para aislador en entorno E7c.



(a) E7s (b) Clase de hidrofobicidad HC3

Figura 32: Prueba de hidrofobicidad para aislador en entorno E7s.

Tanto para el caso base, como para el entorno E2, se presenta una clase HC1, observándose que en su superficie se forman predominantemente gotas discretas. Por otro lado, en los entornos E4, E5 y E7c[6], el aislador muestra una clase HC2, observándose que la mayor parte de la superficie está cubierta por gotas discretas, algunas de las cuales presentan deformaciones en su forma circular. Por último, el entorno E7s muestra una clase HC3, en donde es posible observar que la superficie está cubierta por gotas de forma irregular.

En la Tabla 7 se resumen los resultados de las pruebas de clase de hidrofobicidad.

Tabla 7: Resumen de resultados de clase de hidrofobicidad.

Escenario de contaminación	Grado de contaminación del sitio SPS	HC del aislador
Caso base	-	HC1
$E2$	*Light*	HC1
$E4$	*Medium*	HC2
$E5$	*Heavy*	HC2
$E7c$	*Very Heavy*	HC2
$E7s$	*Very Heavy*	HC3

[6]En este caso, se esperaba una clase de hidrofobicidad similar a la obtenida en el caso E7s. Se sostiene la hipótesis de que el caolín, al encontrarse seco, aumenta la tensión superficial del agua, formando gotas más esféricas y alterando el resultado del ensayo.

4.3. Medición de tensión de ruptura

De acuerdo con el procedimiento descrito en la sección 3.4.1, se presentan las tensiones de ruptura registradas para los distintos entornos de contaminación, incluyendo el caso base. En la Figura 33, se resumen las tensiones de ruptura normalizadas para cada tipo de entorno de contaminación mediante diagramas de caja y bigotes, distinguiendo entre el ambiente seco (en azul) y el húmedo (en rojo). Cabe destacar que los valores para el caso base es el promedio de los cinco aisladores bajo ensayo sin contaminación. Adicionalmente, en la Sección de anexos (A.2) se incluyen todos los valores individuales de tensión de ruptura obtenidos.

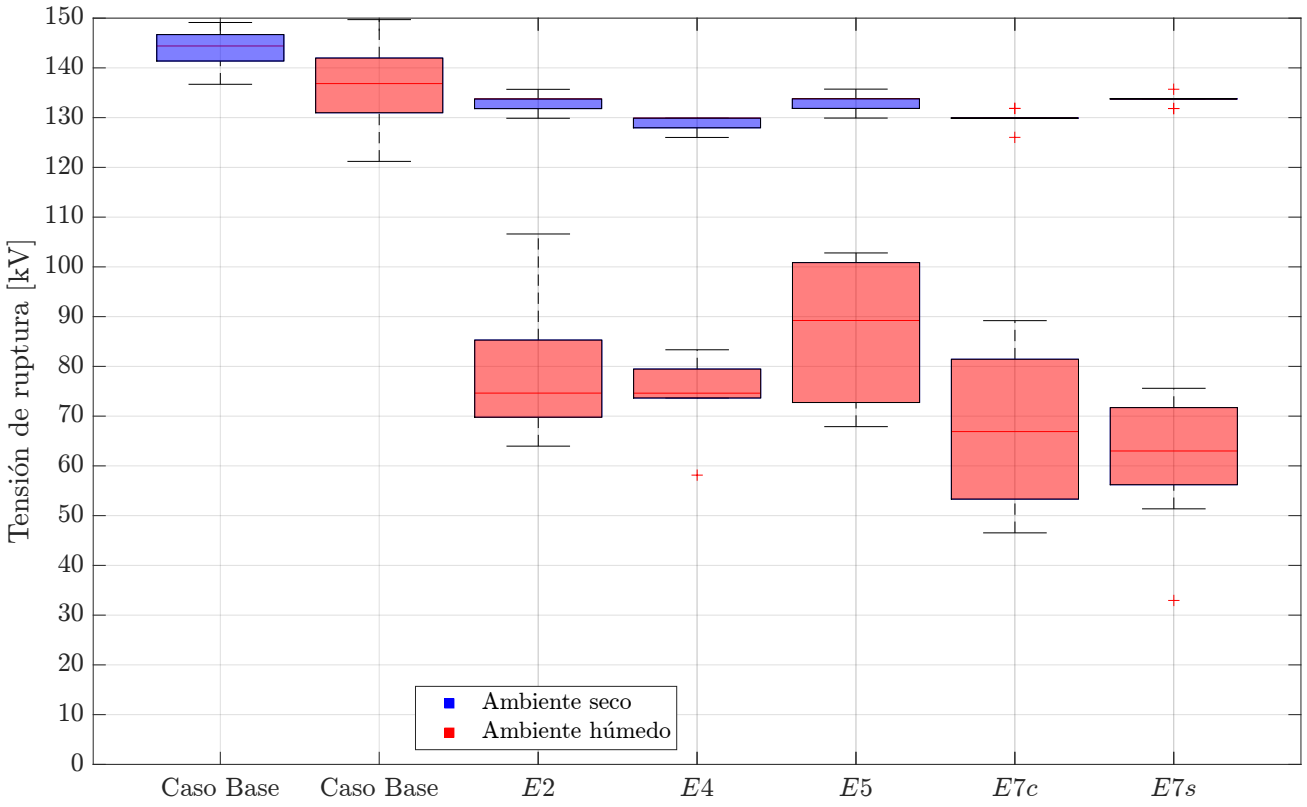


Figura 33: Tensiones preliminares de ruptura ante escenarios de contaminación.

De la gráfica se evidencian distintos efectos sobre la tensión de ruptura en función de los entornos de contaminación evaluados. Se destacan los siguientes puntos:

- Para un entorno seco, si bien se observa una disminución en el valor de la tensión de ruptura para los diferentes niveles de contaminación, esta resulta leve, disminuyendo con respecto al caso base de un 7 % a un 10 %.
- En presencia de humedad, las tensiones de ruptura se reducen considerablemente para los respetivos entornos contaminados propuestos. Mientras que para el caso base (sin contaminación), la disminución es leve, con una reducción de aproximadamente del 5 %.

Paralelamente, se observa un aumento considerable en la dispersión de los datos. Bajo humedad, las mediciones de tensión alcanzan coeficientes de variación del orden del 20 %, significativamente mayor al 1 % del caso seco. Esto sugiere variaciones (en concreto, la disminución) de los niveles de humedad durante los ensayos. Dicha situación resulta indeseable, ya que el valor promedio de la tensión de ruptura deja de ser representativo del entorno bajo condiciones húmedas. Para analizar este fenómeno, la Figura 34 muestra los valores de tensión de ruptura individuales registradas durante el proceso de medición, el cual se realizó con una duración aproximada de 10 minutos por ensayo.

De la gráfica se evidencia el aumento de la tensión de ruptura en el caso húmedo a medida que se desarrolla la prueba. Con ello, es posible afirmar que el aumento de la tensión de ruptura sugiere una pérdida de humedad en la superficie del aislador, situación plausible dadas las limitaciones del método de humectación empleado.

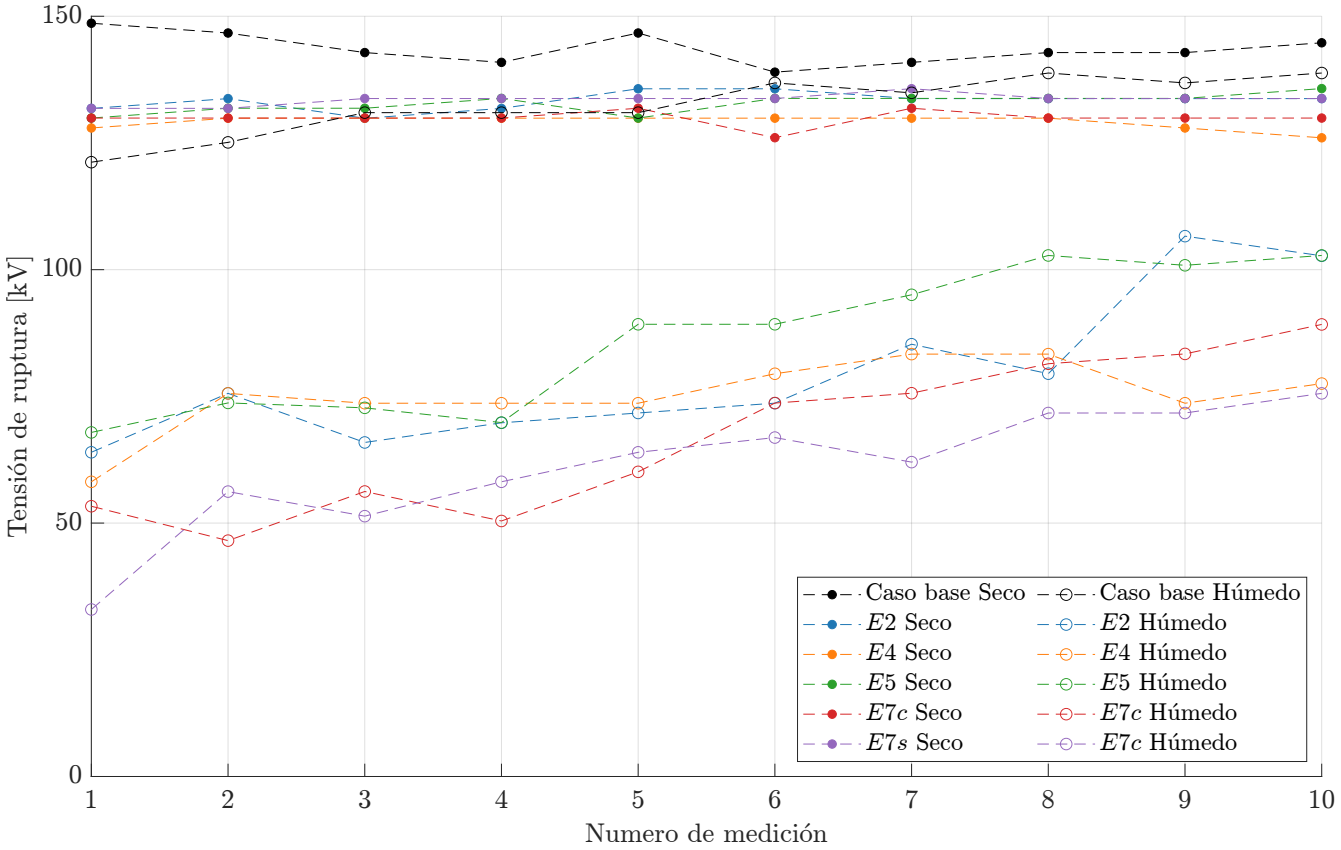


Figura 34: Valores del ensayo de tensión de ruptura.

Se propone, para el análisis de la tensión de ruptura, considerar el promedio de los primeros dos valores registrados, con el fin de aproximarse lo más posible al estudio de los entornos húmedos. En la Tabla 8 se definen los valores de ruptura para cada entorno, además de la disminución porcentual entre ambiente seco y ambiente húmedo.

Tabla 8: Resultados de tensión de ruptura en ambientes secos y húmedos.

Entorno	Ambiente seco V_r kV	Ambiente húmedo V_r kV	Disminución ante humedad
Caso Base	144	128	11 %
E2	133	70	47 %
E4	129	67	48 %
E5	131	71	46 %
E7c	130	50	62 %
E7s	132	45	66 %

Se observa un comportamiento anómalo en la tensión de ruptura para el caso $E5$. Dado el nivel de contaminación SPS *Heavy* y los elevados valores de ESDD, se esperaba una disminución significativa en la tensión de ruptura en comparación con otros entornos (*Light* y *Medium*). Esta discrepancia podría estar relacionada con una humectación insuficiente durante las pruebas, lo que habría atenuado el impacto de la contaminación en la reducción de la tensión de ruptura.

Excluyendo el caso del entorno $E5$, se puede afirmar que la tensión de ruptura disminuye a medida que in-

crementa la concentración de contaminante soluble. Respecto al aumento de NSDD, no se observan variaciones significativas en la tensión de ruptura. Al considerar la exclusión del entorno $E5$ y los antecedentes mencionados en [44], donde se concluye que el NSDD actúa como un inhibidor, se sostiene que el aumento del NSDD afecta ligeramente el valor de la tensión de ruptura, a diferencia del ESDD, cuyo incremento sí reduce dicho valor.

4.4. Medido de corriente de fuga

De acuerdo con el procedimiento descrito en la Sección 3.4.2, en la Figura 35 se presenta el comportamiento de las corrientes de fuga en función de la tensión de ensayo para cada tipo de entorno de contaminación, tanto en ambientes secos como húmedos (para mayor detalle, en la Sección de anexos A.3 se incluyen todos los valores de las corrientes de fuga registrados).

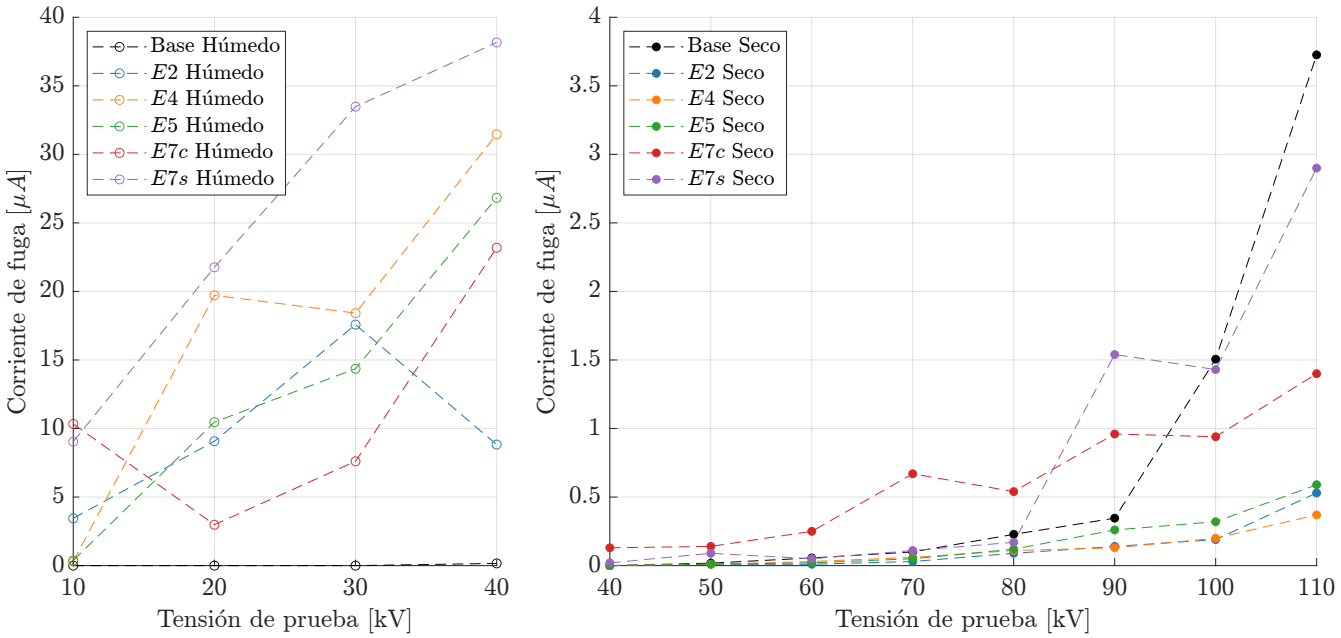


Figura 35: Relación entre corriente de fuga y tensión de ensayo.

En la Figura 35, las corrientes medidas corresponden a los datos de I_{fuga} promedio[7] posteriores a $t = 120$ segundos desde el inicio de la medición. Este instante de tiempo fue seleccionado porque, a partir de este momento, la corriente de fuga se estabiliza en torno a un valor casi constante.

Las diferencias entre los ambientes húmedos y secos son notables:

- En primer lugar, las tensiones mínimas a las que se detectan corrientes distintas de cero son aproximadamente 40 kV en entornos secos, mientras que en ambientes húmedos este umbral disminuye a 10 kV.
- En segundo lugar, se destaca la magnitud de las corrientes. En ambientes secos, las corrientes no superan los 4 $\mu\mathrm{A}$, mientras que en los mismos niveles de contaminación, pero en ambientes húmedos, las corrientes son mayores en al menos un orden de magnitud.

En general, se observa una relación directamente proporcional entre la tensión de ensayo y la corriente de fuga, la cual tiene un carácter exponencial en el ambiente seco, mientras que en ambientes húmedos dicha tendencia, no es del todo clara, encontrándose en un punto intermedio entre directamente proporcional y exponencial.

En los entornos secos, las corrientes de fuga muestran variaciones menores al $\mu\mathrm{A}$, lo que impide realizar mayores inferencias sobre los resultados.

[7] Se decanta por el uso del promedio de los datos dado el alto nivel de variación de las mediciones en el tiempo

Paralelamente, en 36, se presentan las mediciones de la corriente de fuga en función del tiempo, para los distintos entornos en un ambiente húmedo. Se muestran de forma simultánea cuatro niveles de tensión de prueba entre 10 y 40 kV.

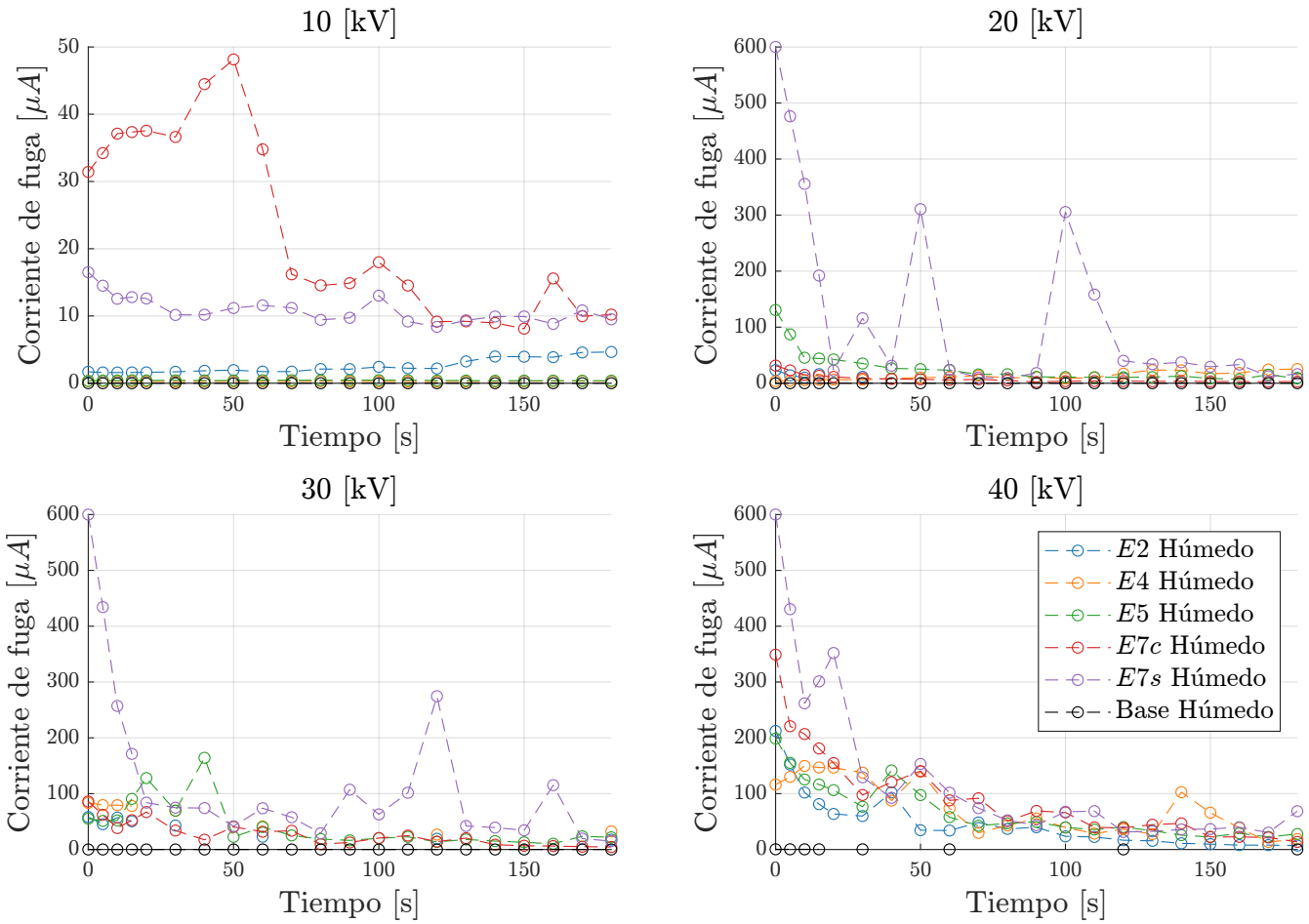


Figura 36: Evolución de la corriente de fuga en el tiempo bajo humedad.

Al analizar las corrientes de fuga en función del tiempo, se observa una tendencia decreciente similar a una exponencial negativa. En las pruebas realizadas en entornos húmedos, se destaca que durante el proceso de medición el instrumento alcanzó su límite de saturación (600 μA) al incrementar la tensión, incluso antes de llegar a la tensión de ensayo. Esto dificulta la comparación entre pruebas, ya que resulta complicado identificar el inicio del fenómeno de decaimiento de corriente en cada entorno.

Se observa además la aparición de "pulsos" en las corrientes. Durante el decaimiento, de forma espontánea, se registra un aumento en la corriente de fuga, seguido por su disminución. La explicación de este fenómeno está fuera del alcance de este documento. Sin embargo, se propone como hipótesis que los pulsos están relacionados con la formación de nuevos caminos en la superficie del aislador, debido a la evaporación de la humedad.

4.5. Mediciones de DP

De acuerdo con las mediciones realizadas bajo el procedimiento descrito en la Sección 3.4.3, se presentan, en los siguientes apartados, los distintos análisis realizados a las mediciones de DP efectuadas mediante métodos convencionales (equipo comercial OMICRON) y no convencionales (HFCT y antena de UHF) para los distintos escenarios de contaminación bajo una condición húmeda.

4.5.1. Indicadores simples

Con base en los datos proporcionados directamente por el software OMICRON, se obtienen indicadores simples. En este caso, se registra el parámetro Q_{IEC} y la tasa de repetición de pulsos para cada escenario evaluado. Dichos parámetros se resumen en la siguiente Tabla.

Tabla 9: Datos de Carga Q y Tasa de repetición

	Q_{IEC} `pC`	Tasa de repetición `Pulsos/s`
E2	14.65	314
E4	7.67	13088
E5	5.49	17119
E7c	69.79	64677
E7s	84.21	66405

Se destaca que el valor de Q_{IEC} presenta una alta variabilidad a lo largo de los ensayos. El valor reportado en la Tabla corresponde a la medición obtenida en $t = 1$ min.

Adicionalmente, en la Figura 37 se presentan los histogramas de carga Q para cada escenario de contaminación. Dado que los órdenes de magnitud de Q varían entre los escenarios, se ha considerado necesario generar un segundo conjunto de histogramas (Figura 38) con escalas ajustadas para mejorar la visualización en los entornos con contaminación $E7c$ y $E7s$ (con severidad *Very Heavy*).

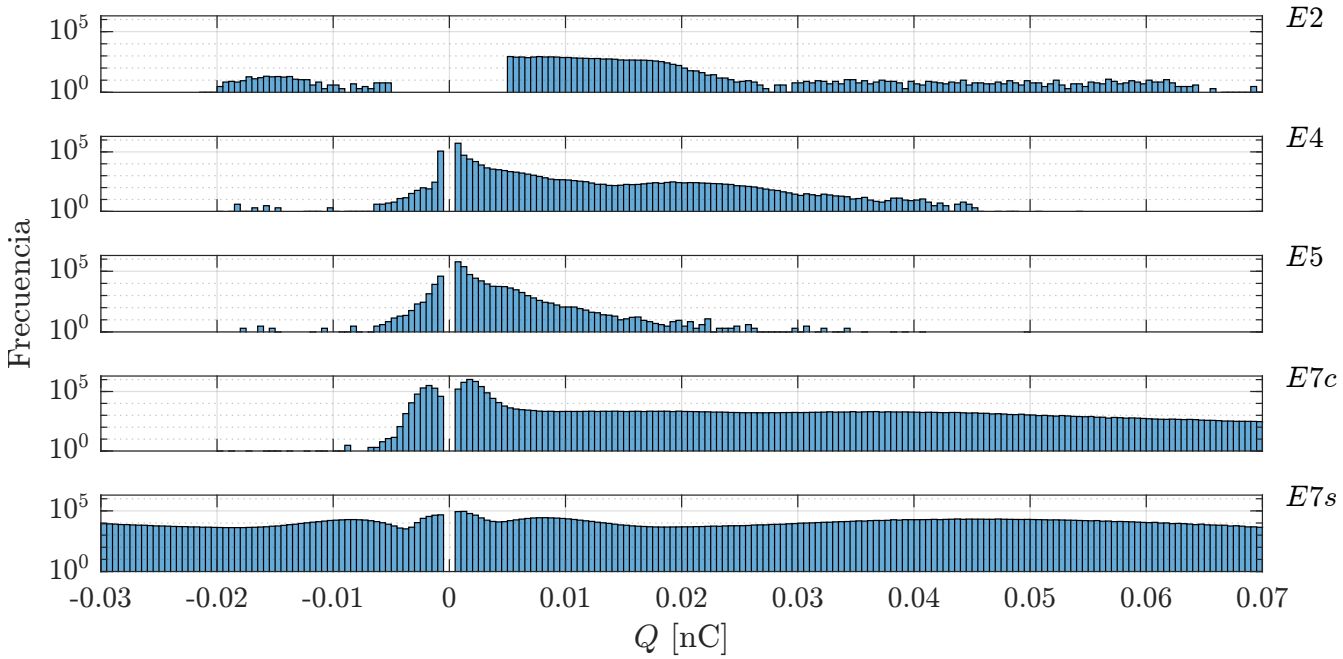


Figura 37: Histogramas de Q para los distintos escenarios de contaminación.

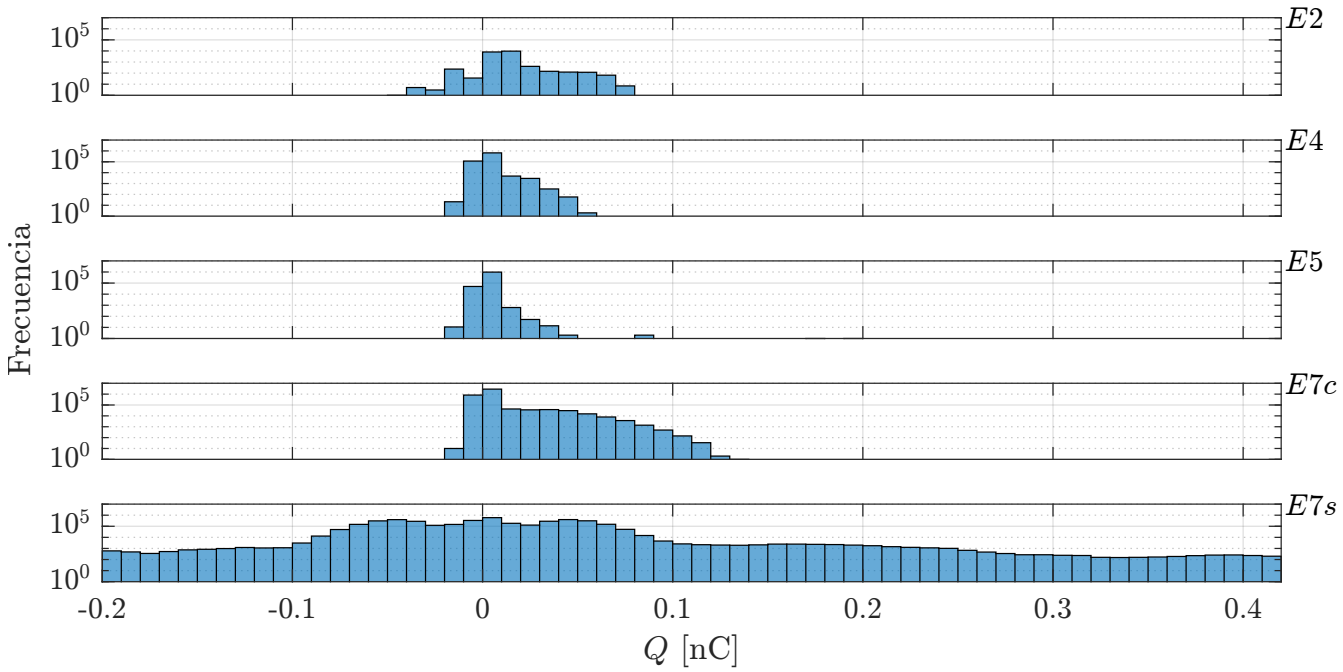


Figura 38: Histogramas de Q para los distintos escenarios de contaminación escalados para E7.

Del análisis de los histogramas[8], se observa un incremento significativo en los valores de Q para el entorno de contaminación *Very Heavy*, superando en más de un orden de magnitud a los demás escenarios evaluados. Además, en este mismo entorno, se registran valores de Q negativos, lo que sugiere la presencia de mecanismos de descarga adicionales o una mayor complejidad en los procesos de ionización en condiciones de alta contaminación salina.

Por otro lado, se identifica una tendencia inesperada en el entorno $E5$. Dado alto nivel de contaminación (SPS *Heavy*) y los elevados valores de ESDD, se espera una mayor similitud con el comportamiento del el entorno $E7s$, en lugar de con el entorno $E4$. Esta discrepancia podría deberse a una humectación insuficiente durante las pruebas, lo que afectaría la respuesta del aislamiento.

En términos generales, los parámetros muestran variabilidad entre los escenarios de contaminación, sin embargo, por sí solos no permiten identificar una tendencia clara. Por otro lado, la tasa de repetición de pulsos se presenta como un indicador prometedor, el cual es analizado con mayor detalle en la Sección 5.

[8]Con el propósito de evitar confusiones, se aclara que la región sin descargas en torno al valor cero es consecuencia de la configuración del instrumento de medición (rango: 5 pC a 10 nC), y no está relacionada con la fenomenología bajo estudio.

4.5.2. Mapas PSA

El análisis PSA es realizado utilizando el primer minuto de medición registrado mediante el equipo OMICRON. En la Figura 39 se muestran los patrones formados al evaluar la relación ΔQ_n / ΔQ_{n-1} conforme a los lineamientos planteados en la Sección 2.3.2.

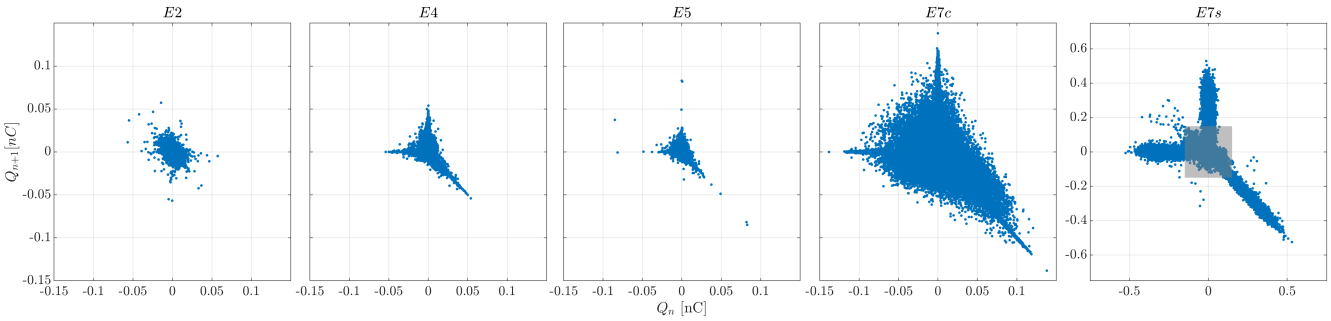


Figura 39: Mapa PSA para entornos bajo estudio.

La Figura presenta, simultáneamente, los mapas PSA correspondientes a los cinco entornos de contaminación estudiados. Para los primeros cuatro escenarios, se ha mantenido una escala común con el objetivo de facilitar su comparación directa. Mientras que, en el entorno $E7s$, los resultados requieren una escala mayor debido a la magnitud de los valores registrados. Además, en este último mapa, se ha delineado un rectángulo que representa el área cubierta por la escala utilizada en los escenarios anteriores, permitiendo así la comparación visual.

Al analizar los mapas se identifica una tendencia en la formación de patrones comunes en los diferentes entornos de contaminación, caracterizados por su configuración triangular. Dichos patrones coinciden con los documentados en la referencia [24], donde se asocian con actividad de corona bajo excitación en DC con polaridad negativa. Al comparar los escenarios de contaminación, se observa:

- Con excepción del entorno $E5$, existe una expansión geométrica del patrón triangular formado al aumentar el grado de contaminación del entorno.
- En el entorno $E2$ no se observa el patrón triangular mencionado anteriormente, en su lugar se tiene un cúmulo de datos amorfo.
- El entorno $E7s$ presenta un aumento significativo en geometría del patrón triangular y la presencia de al menos un patrón diferente. Situación que sugiere la presencia de un mecanismo de descarga adicional.

Se propone cuantificar la dispersión de los distintos entornos mediante la varianza (V) de las distancias de los puntos al centroide de cada clúster. El cálculo del centroide y la posterior varianza de las distancias se detalla en el Anexo B. Los resultados obtenidos se resumen en la siguiente Tabla.

Tabla 10: Datos de dispersión de datos según método PSA

Entorno	$E2$	$E4$	$E5$	$E7c$	$E7s$
Severidad	*Light*	*Medium*	*Heavy*	*Very Heavy*	*Very Heavy*
V_{PSA}	21.2	15.2	2.0	196.0	1369.0

Se observa que los entornos $E2$ y $E5$ no concuerdan con la tendencia de los valores de dispersión de los demás entornos. Esta situación es plausible, dado que, por un lado, el entorno $E2$ no mantiene una forma triangular como los demás entornos, mientras que el entorno $E5$ no registra actividad de corona.

4.5.3. Mapas TF

Para la elaboración de los mapas TF, se utilizó la información recopilada mediante métodos no convencionales de medición de DP, específicamente a través de un HFCT y una antena UHF. Conforme a lo expuesto en la Sección 2.3.3, se presentan los resultados obtenidos.

En las Figuras 40 y 41 se presentan los mapas TF obtenidos mediante el HFCT y la antena UHF, respectivamente. En ambos gráficos, se comparan los diferentes escenarios de contaminación bajo estudio. Además, se incorpora de manera cromática el valor *peak* tensión alcanzada por cada impulso registrado, proporcionando una referencia adicional para la evaluación del comportamiento.

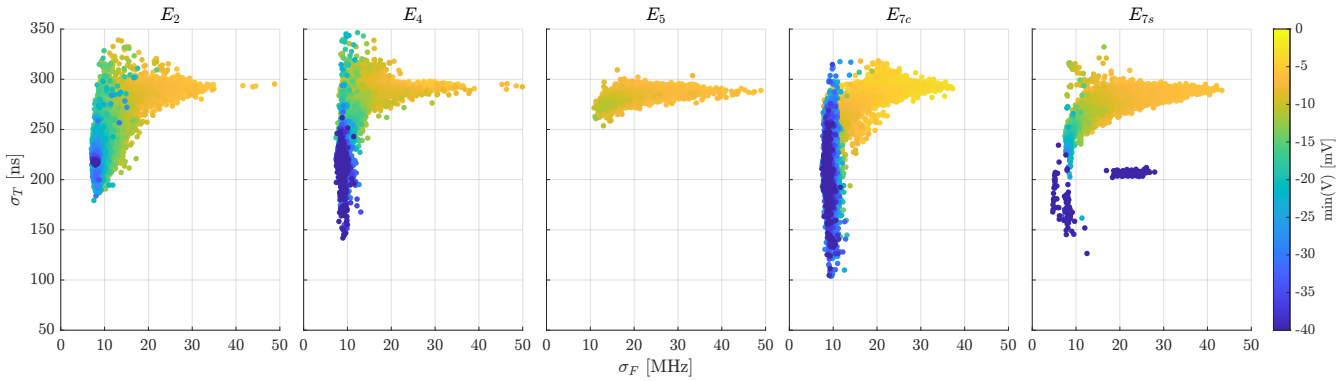


Figura 40: Mapa TF registrado mediante HFCT.

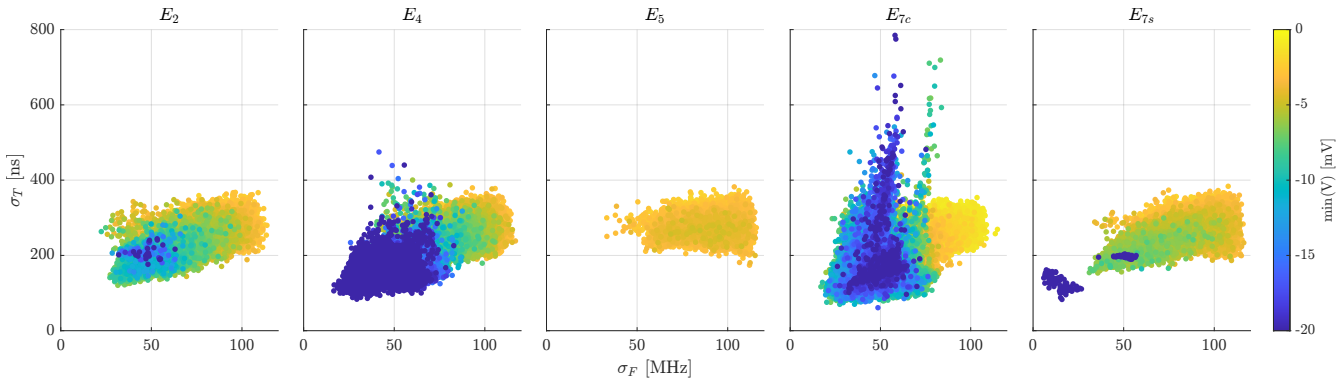


Figura 41: Mapa TF registrado mediante antena UHF.

Ambos instrumentos muestran un comportamiento similar, diferenciándose principalmente en la magnitud de valores de σ_T y σ_F. Diferencias coherentes, dado que los métodos de detección y las geometrías de los instrumentos son distintos. Entre las principales características observadas en el comportamiento de los mapas destacan:

- La presencia de al menos dos grupos diferenciados en los mapas, con las únicas excepciones de los entornos $E5$, donde se observa un único agrupamiento, y $E7s$, donde se evidencia la formación de un tercer grupo.
- Al comparar con el trabajo [19], es posible asociar el grupo con menor valor de σ_F con descargas tipo corona (en tonos celestes y azules), mientras que el resto de los datos puede ser clasificado como ruido de medición. Esta hipótesis es consistente con los valores de *peak* de tensión observados en los pulsos.
- En el entorno $E5$ no fue posible detectar actividad diferenciable. Al igual que en los análisis anteriores, esto podría estar relacionado con una humectación insuficiente durante las pruebas.
- El entorno $E7s$ no presenta los mayores valores de *peak* de los pulsos; sin embargo, muestra un tercer agrupamiento, lo que indica la presencia de un mecanismo adicional de descarga.

- En ambas figuras se observa que el grupo con mayor magnitud de descarga se sitúa principalmente en $\sigma_F = 10$ para el HFCT, y en $\sigma_F = 50$ para la antena UHF. En ambos casos, se aprecia un aumento en la dispersión del parámetro σ_T a medida que el entorno de contaminación se vuelve más severo.

Con lo anterior, el mapa TF, y en particular la variación del parámetro σ_T para un σ_F específico, se presenta como un método prometedor para el reconocimiento de la severidad de la contaminación.

En las Figuras 40 y 41 se aprecian agrupaciones de DP que identifican actividad tipo corona y ruido, medidas mediante el HFCT y la antena UHF, respectivamente. Con el objetivo de aislarla dichas agrupaciones, para luego cuantificar su dispersión, se aplica un filtrado simple utilizando los siguientes criterios, basados en la mera observación de los mapas:

- HFCT: Se emplea σ_T menor a 10 `ns` y un valor de tensión *peak* de al menos 25 `mV`
- Antena UHF: Se emplea σ_T en el intervalo 27 - 80 `ns` y un valor de tensión *peak* de al menos 10 `mV`

Como resultado se logran aislar las agrupaciones tipo corona para cada escenario. (Figuras 42 y 43).

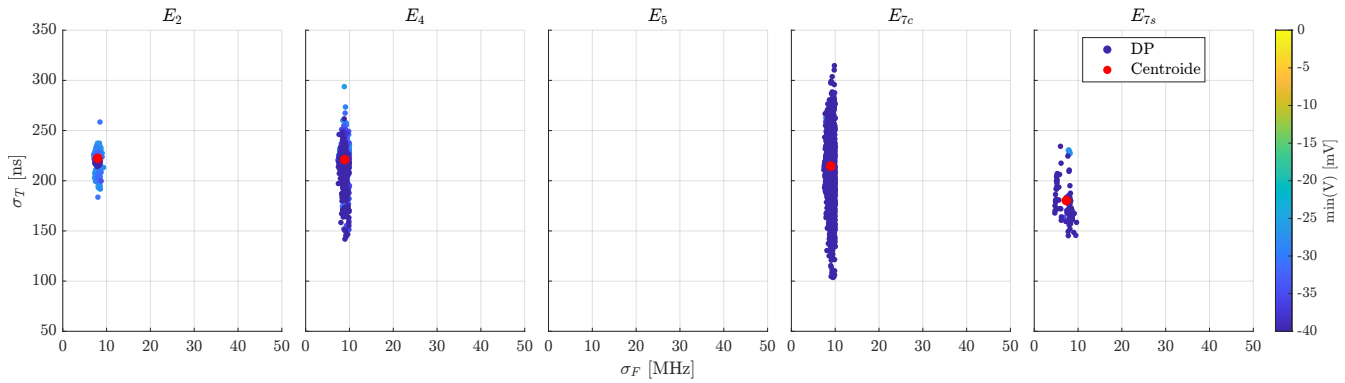


Figura 42: Mapa TF filtrado registrado mediante HFCT.

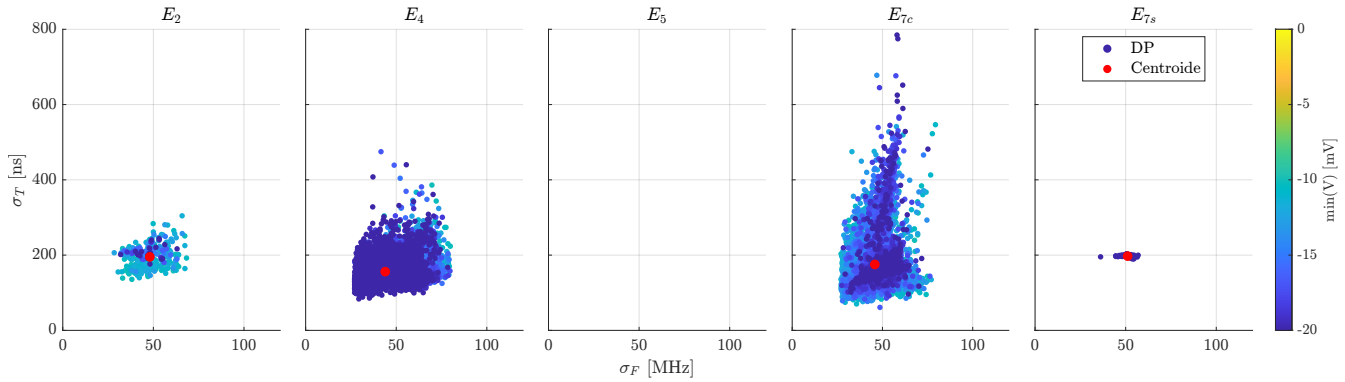


Figura 43: Mapa TF filtrado registrado mediante antena.

En ambas figuras, los centroides de los agrupamientos se marcan en rojo. Cabe destacar que:

- Para el caso $E7s$, se omite[9] el segundo agrupamiento de DP (visible en la Figura 40 y 41) para facilitar la comparación con los otros entornos.
- En el entorno $E5$ no fue posible realizar este análisis dado que no se logra identificar actividad corona.

[9]No es trivial omitir este mecanismo adicional de descarga, ya que influye en el resto de la actividad de DP. Su eliminación en los análisis, dado el alcance de este trabajo, se justifica para simplificar el estudio.

4.5.4. Parámetros $A_p - A_t - f - T_w - F_w$

Los datos para el análisis de los parámetros propuestos $A_t - A_p - f - T_w - F_w$, comentados en 2.3.4, son recopilados mediante métodos no convencionales de medición de DP, específicamente a través de un HFCT y una antena UHF.

En las Figuras 44 y 45 se presentan mapas con los parámetros $A_t - A_p - f$, obtenidos mediante el HFCT y la antena UHF, respectivamente. En ambos gráficos, se comparan los diferentes escenarios de contaminación bajo estudio, usando los parámetros A_p y A_t en los ejes y el parámetro f de manera cromática.

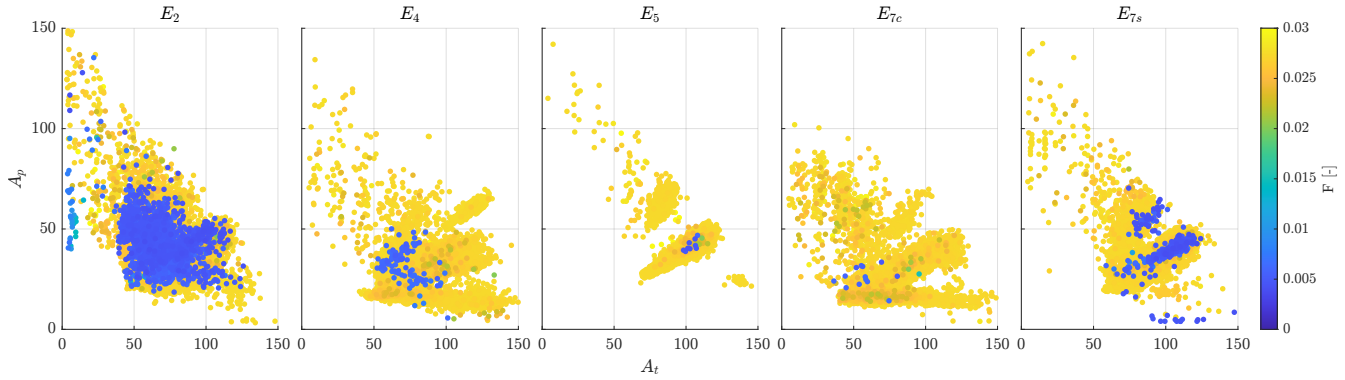


Figura 44: Mapa $A_t - A_p - f$ registrado mediante HFCT.

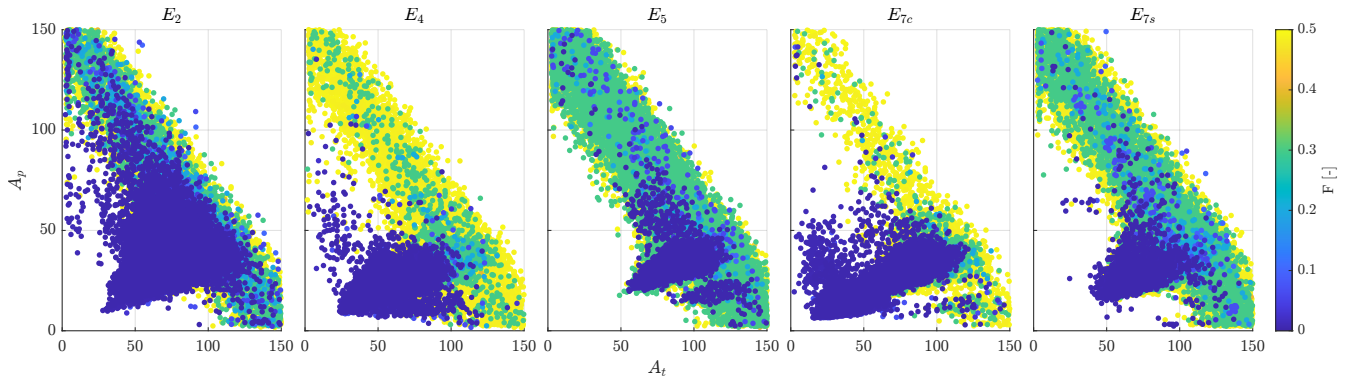


Figura 45: Mapa $A_t - A_p - f$ registrado mediante antena UHF.

No se observa una tendencia clara que relacione los parámetros bajo análisis con los diferentes escenarios de contaminación. Aunque tanto en el caso del HFCT como de la antena UHF, los parámetros permiten identificar patrones similares para cada entorno, estos no muestran una progresión o tendencia entre un escenario y otro.

Por otro lado, el parámetro f, de manera individual, permite identificar grupos de datos. En el caso del HFCT, se observan agrupaciones en torno a los valores 0.025 y 0.005, mientras que para la antena UHF se identifican tres grupos de datos en 0.5, 0.3 y 0.05, los cuales se superponen en el mapa A_p/A_t.

Es importante destacar que los datos analizados no fueron sometidos a ningún tipo de filtrado previo al proceso de obtención de los parámetros. Esto implica que los resultados presentados reflejan directamente la información, sin ningún tipo de procesamiento adicional que pudiera eliminar ruidos o atenuar señales no deseadas.

En las Figuras 46 y 47 se presentan mapas con los parámetros $T_w - F_w$, obtenidos mediante el HFCT y la antena UHF, respectivamente. En ambos gráficos, se comparan los diferentes escenarios de contaminación bajo estudio. Además, se incorpora de manera cromática el valor *peak* tensión de cada impulso registrado en cada caso.

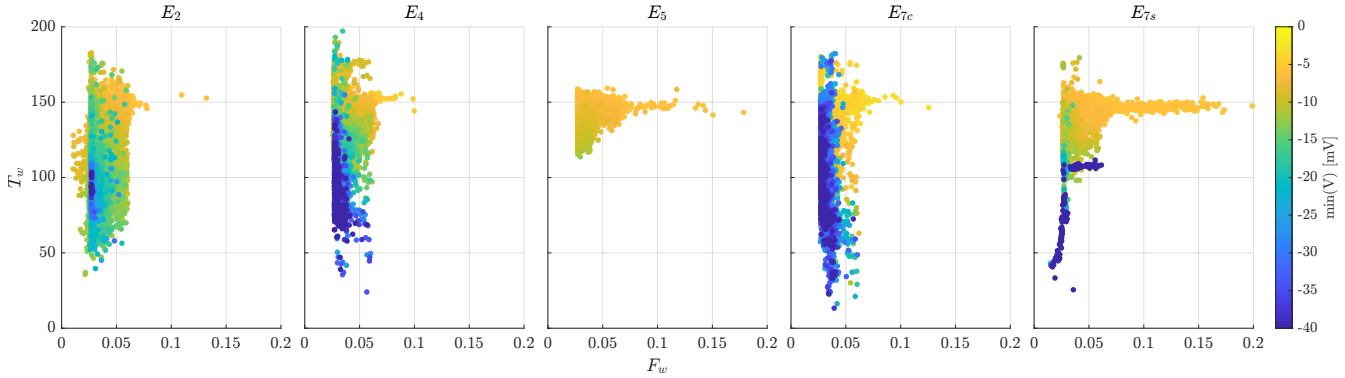


Figura 46: Mapa $T_w F_w$ registrado mediante HFCT.

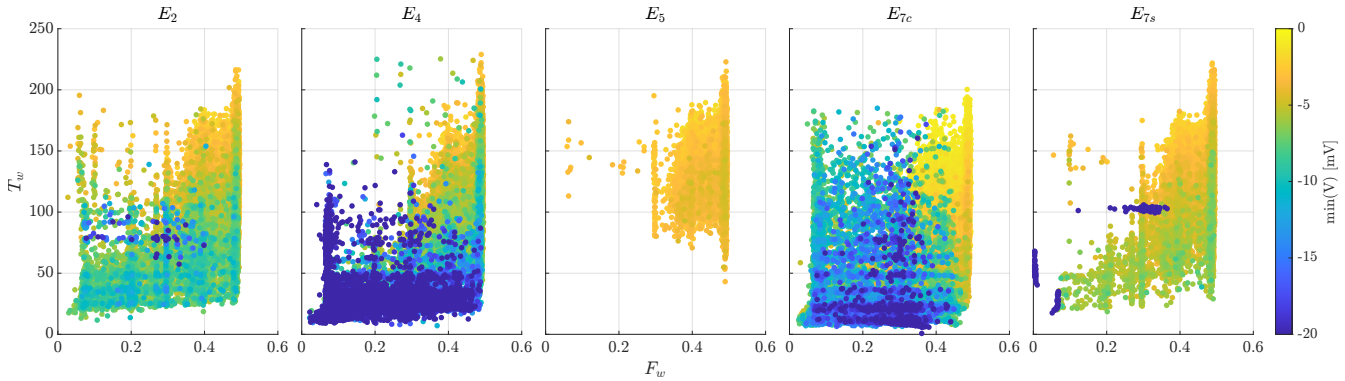


Figura 47: Mapa $T_w F_w$ registrado mediante Antena UHF.

Los mapas generados a partir de los parámetros T_w y F_w son comparables con los obtenidos mediante el método TF (véanse las Figuras 40 y 46 para realizar dicha comparación).

En los mapas registrados mediante el HFCT, se observan agrupamientos similares en cuanto a la identificación de descargas tipo corona y ruido. Sin embargo, los parámetros T_w y F_w no logran generar una clara separación de las descargas parciales en los entornos de menor severidad de contaminación ($E2$ y $E4$).

Por otro lado, en el caso de las mediciones realizadas con la antena UHF, no se observa una tendencia clara. Los agrupamientos tienden a superponerse, y solo son identificables gracias al antecedente del análisis TF y la separación cromática basada en el valor *peak* de tensión.

En resumen, los parámetros T_w y F_w muestran una respuesta similar a la del método TF, aunque con menor claridad en los agrupamientos de las fuentes de las DP.

5. Análisis de resultados y Conclusiones

En esta sección se presentan las conclusiones y el análisis conjunto de los resultados experimentales obtenidos en este estudio. Se realiza una correlación entre las mediciones de DP y las características de los entornos de contaminación, evidenciando el potencial para la separación de fuentes y la identificación del grado de severidad de contaminación. A partir de los resultados experimentales, se proponen las siguientes conclusiones:

Tensión de ruptura

- Se sostiene que la presencia de contaminantes en la superficie del aislador, incluso en concentraciones bajas (caso *Light*), impacta negativamente en el rendimiento de los aisladores. Esto se traduce en una disminución de su tensión de ruptura en todos los escenarios de contaminación evaluados.
- Dicha disminución se genera de forma abrupta, es decir, no existe una reducción progresiva en la tensión de ruptura en función de la severidad de la contaminación. En su lugar, los valores ruptura, se agrupan en tres categorías: aislador completamente limpio (caso base), severidad de *Light* a *Heavy*, y severidad *Very Heavy*. Se resume en la Figura 48 los resultados relevantes.

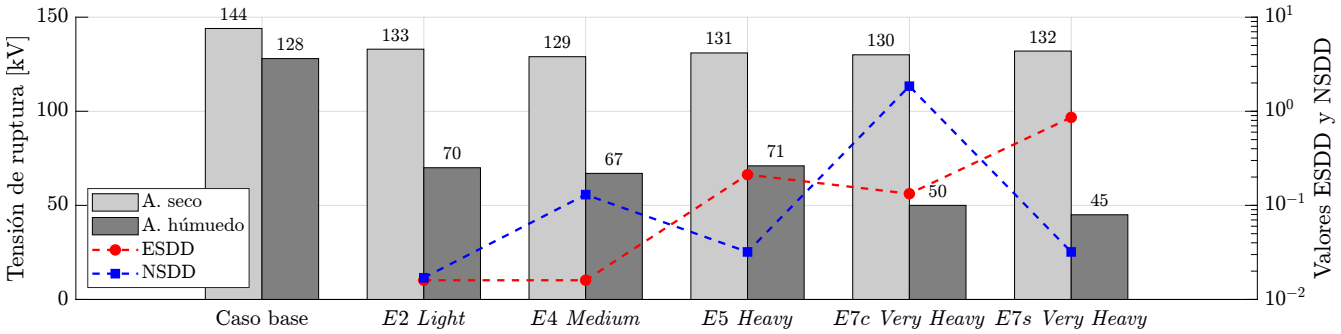


Figura 48: Tensiones de ruptura y entornos de contaminación.

- Las diferencias entre ambientes secos y húmedos son significativas. En condiciones secas, no se observan diferencias en las tensiones de ruptura para los distintos entornos de contaminación, en estos casos se presenta una reducción del 10 % en su valor. Por otro lado, bajo un ambiente húmedo, los entornos se pueden clasificar en dos grupos según su reducción en la tensión de ruptura:
  - El primer grupo incluye los entornos $E2$, $E4$ y $E5$ (con sus respectivas severidades: *Light*, *Medium* y *Heavy*), los cuales presentan una disminución promedio del 47 % en la tensión de ruptura.
  - En contraste, el segundo grupo está formado por los entornos $E7c$ y $E7s$ (con severidad *Very Heavy*), donde la disminución de la tensión de ruptura alcanza un 66 % en comparación con el caso base.
- Ambos tipos de contaminación, soluble y no soluble, afectan negativamente el rendimiento de los aisladores. Siendo la contaminación soluble quien mantiene un rol predomínente en este fenómeno.

Corriente de fuga

- En relación con las corrientes de fuga, se puede afirmar que, al igual que la tensión de ruptura, la presencia de contaminantes en ambientes húmedos provoca un aumento abrupto en los valores registrados en todos los entornos estudiados. Este fenómeno no se presenta en condiciones de ambiente seco.
- No obstante, bajo el método de medición empleado, no es posible obtener resultados concluyentes que correlacionen un ambiente específico con un valor determinado de corriente de fuga, debido a la alta variabilidad de los valores registrados. Se comprende que el proceso de medición en ambientes húmedos es dinámico, ya

que la corriente de fuga tiende a secar el aislador, lo que altera las condiciones que definen el valor de dicha corriente y dificulta su medición precisa.

Descargas parciales

A continuación se mencionan brevemente los resultados obtenidos de todos los métodos de análisis de DP empleados, para luego profundizar en aquellos con mayor potencial para la identificación de entornos y fuentes de DP.

1. Entre los parámetros simples estudiados, destaca la tasa de repetición debido a su capacidad para identificar la severidad de contaminación. Sin embargo, los recuentos en histogramas del valor de carga (Q) no aportan información relevante, limitándose a identificar únicamente el entorno $E7s$.

2. El método PSA presenta potencial para identificar activad corona. Además, el análisis de su distribución, muestra resultados prometedores para la identificación de ESDD.

3. Los mapas TF sobresalen por su potencial para identificar fuentes de descargas. Este método muestran resultados prometedores para la identificación de entornos de contaminación.

4. El parámetro f ha demostrado capacidad para agrupar fuentes de DP; sin embargo, la identificación precisa de estas no se logra de forma inmediata. Por si parte los parámetros A_p y A_t, si bien muestran una tendencia a formar agrupamientos, estos no permiten una identificación inmediata.

5. Los parámetros T_w y F_w también permiten emular, aunque en menor medida, los resultados obtenidos con los mapas TF, esto únicamente en mediciones realizadas con HFCT.

Tasa de repetición

- La tasa de repetición de DP resulta en un parámetro sensible a los efectos de contaminación. Aumentando a medida que aumenta la severidad de contaminación. En la Figura 49 se muestra dicha relación.

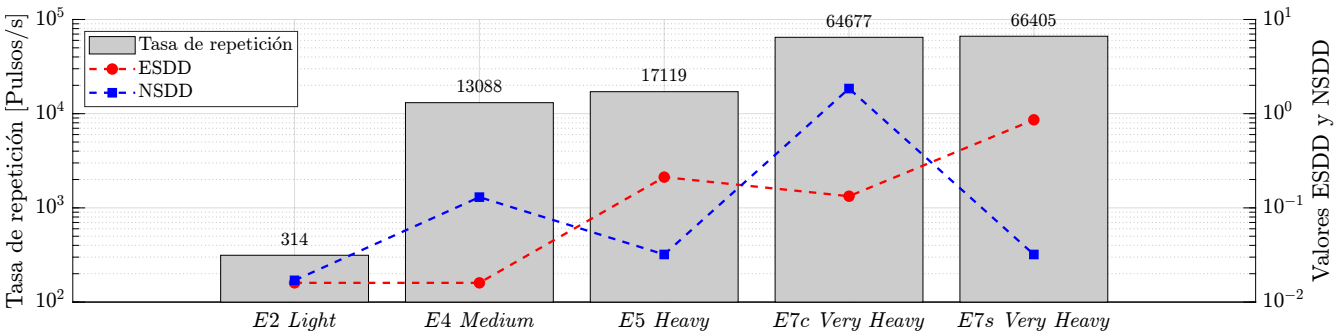


Figura 49: Tasa de repetición y entornos de contaminación.

- Para nivel de severidad de contaminación se observa una tasa de repetición distinta, con valores relativamente separados (en el orden de miles de pulsos por segundo). Con ello, el mero conteo de pulsos en el tiempo se propone como métrica para la identificación de la severidad del estado de contaminación.

- Sin embargo, dado que en excitación DC la tasa de repetición es un parámetro que también varía con la temperatura [19], deja de ser práctico emplearlo como método de seguimiento del estado de contaminación *in situ* de los aisladores.

PSA

- La cuantificación de la dispersión de los datos obtenidos mediante el método PSA resultan en un parámetro sensible a los efectos de contaminación, especialmente al ESDD. Aumentando a medida que aumenta la concentración de elementos solubles. En la Figura 50 se muestra dicha relación.

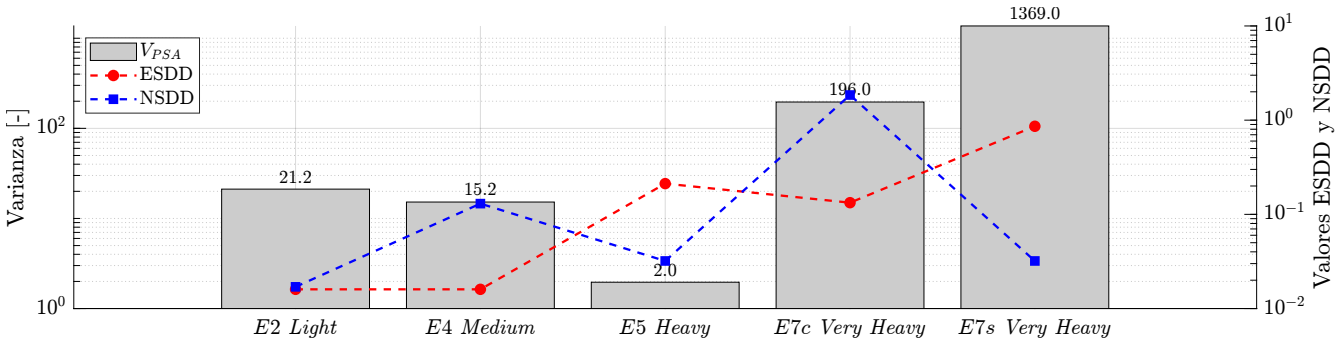


Figura 50: Parámetro de dispersión del mapa PSA y entornos de contaminación.

- Descartando el entorno $E5$, el parámetro de dispersión del mapa PSA parece guardar una relación directa con el aumento de ESDD.
- Del mismo modo, dicho parámetro resulta indiferente a los valores de NSDD.

Mapas TF

Al igual que para los mapas PSA, se propone la varianza en las agrupaciones de DP como un indicador de los entornos de contaminación. Mediante su cálculo se cuantifican las dispersiones y se comparan en la Figura 51.

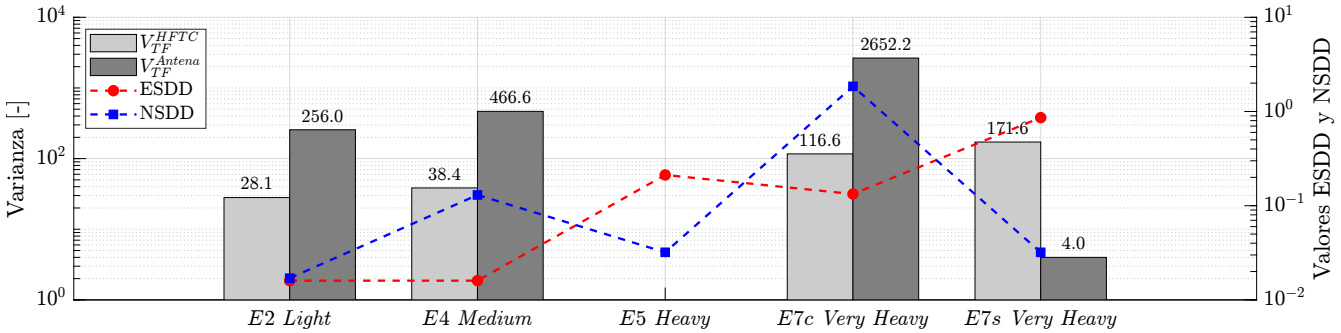


Figura 51: Parámetro de dispersión de mapa TF y entornos de contaminación.

- En primero lugar, ambos instrumentos de medición (el HFTC y la antena) presentan una respuesta similar, con la clara la excepción del orden de magnitud y la respuesta en el caso del entorno $E7s$.
- Se observa que dispersión aumenta a medida que se agravan los entornos de contaminación, a excepción del caso $E7s$. Esta irregularidad es comprensible debido a la existencia de un mecanismo de descarga adicional. Este mecanismo influye en las descargas tipo corona que se pretenden analizar. En el caso de las mediciones tomadas por la antena, estas se ven altamente influenciadas, obteniendo un valor para el entorno $E7s$ relativamente bajo.

- Se destaca la ausencia de actividad en el entorno $E5$. Los resultados anormales en este entorno son recurrentes en las mediciones de tensión de ruptura, hidrofobicidad y DP. A la hipótesis de un error en el proceso de humectación se le suma la posibilidad es que el aislador presente alguna diferencia en su composición. En cualquier caso, se propone descartar las mediciones del aislador utilizado en el estudio del entorno $E5$.
- Los resultados obtenidos sugieren la relación entre las mediciones tomadas por la antena y el contaminante NSDD. Sin embargo, dadas las consideraciones de los dos puntos anteriores, para los entornos $E5$ u $E7s$, no resulta del todo clara dicha relación.

5.1. Propuesta para criterio de diagnóstico

Se resumen en la siguiente Tabla los valores de los parámetros propuestos en conjunto con los valores de contaminación.

Tabla 11: Resumen de parámetros propuestos e indicadores de contaminación.

(1) Entorno	$E2$	$E4$	$E5$	$E7c$	$E7s$
(2) Severidad	*Light*	*Medium*	*Heavy*	*Very Heavy*	*Very Heavy*
(3) ESDD	0.016	0.016	0.212	0.133	0.861
(4) NSDD	0.017	0.130	0.032	1.848	0.032
(2) Tasa de repetición	314	13088	17119	64677	66405
(3)V_{PSA}	4.6	3.9	1.4	14	37
(1) V_{TF}^{HFTC}	28.1	38.4	NaN	116.6	171.6
(4) V_{TF}^{Antena}	256.0	466.6	NaN	2652.2	4.0

- En los entornos de contaminación más severos (*Very Heavy*), existe una mayor probabilidad de contorneo, ya que la tensión de ruptura puede disminuir hasta un 66 %. Se propone, como método de diagnóstico para el mantenimiento de aisladores, la definición de umbrales operativos basados en el análisis histórico de los siguientes indicadores:

  1. El parámetro de dispersión del método PSA (V_{PSA}), que muestra una relación directa con la concentración de contaminación soluble (ESDD).
  2. El parámetro de dispersión de los mapas TF (V_{TF}) propuesto como un indicador de la progresión del entorno de contaminación, además de permitir identificar el tipo de fuente de DP.
  3. En menor medida, la tasa de repetición de DP, ya que, aunque se relaciona con la severidad de la contaminación, es también sensible a cambios de temperatura y humedad.

De este modo, con un umbral de 3 a 5 veces el valor inicial (suponiendo un estado base con nivel de contaminación *Medium*), se tendrá la posibilidad de detectar cuando la acumulación de contaminación en la superficie del aislador alcance entornos de contaminación más severos.

No obstante, es necesario ampliar los estudios para corroborar esta propuesta. Para ello resulta fundamental emplear una cámara de niebla y aumentar el número de escenarios considerados, analizando de forma individual (utilizando el principio de ceteris paribus) la respuesta ante las variaciones en los niveles de ESDD y NSDD.

A. Anexos: Registros de mediciones

A.1. Contaminación

Se presentan los valores medidos para la determinación de los entornos de contaminación. Se destaca que el valor del volumen de agua empleada en cada caso es de 300 ml.

Título de la tabla

Fecha	Aislador	Sal	Caolín	Conductividad base	Conductividad solución contaminada	Temperatura solución contaminada	Peso papel filtro	Peso papel filtro con contaminantes	b	Conductividad 20°C	Salinidad	ESSD	NSDD	Caso
		g/l	g/l	µS/cm	µS/cm	°C	g	g	-	S/m	kg/m3	mg/cm2	mg/cm2	
15-ene	A1	1	1	2.3	46.4	17.9	0.132	0.143	0.0238	0.0049	0.0249	0.0125	0.0184	E2
15-ene	A2	1	1	2.3	51.3	17.9	0.134	0.143	0.0238	0.0054	0.0277	0.0139	0.0150	E2
15-ene	A3	1	1	2.1	56.0	17.8	0.134	0.144	0.0238	0.0059	0.0303	0.0152	0.0167	E2
15-ene	A4	1	1	2.9	69.9	17.8	0.134	0.146	0.0238	0.0074	0.0381	0.0191	0.0200	E2
15-ene	A5	1	1	2.4	68.3	18.0	0.132	0.141	0.0237	0.0072	0.0370	0.0186	0.0150	E2
17-abr	A1	1	10	2.1	53.4	19.1	0.136	0.215	0.0232	0.0055	0.0280	0.0140	0.1319	E4
17-abr	A2	1	10	2.1	55.6	19.0	0.139	0.201	0.0232	0.0057	0.0293	0.0147	0.1035	E4
17-abr	A3	1	10	2.0	57.9	19.1	0.136	0.202	0.0232	0.0059	0.0304	0.0152	0.1102	E4
17-abr	A4	1	10	2.0	70.4	19.1	0.136	0.242	0.0232	0.0072	0.0372	0.0186	0.1770	E4
17-abr	A5	1	10	2.1	71.3	18.8	0.137	0.212	0.0233	0.0073	0.0380	0.0190	0.1253	E4
18-abr	A1	20	2	1.9	616	19.5	0.136	0.153	0.0230	0.0623	0.3443	0.1725	0.0284	E5
18-abr	A2	20	2	2.0	765	20.0	0.134	0.153	0.0228	0.0765	0.4253	0.2131	0.0317	E5
18-abr	A3	20	2	1.9	660	19.6	0.137	0.152	0.0230	0.0666	0.3688	0.1848	0.0251	E5
18-abr	A4	20	2	2.2	902	19.5	0.139	0.162	0.0230	0.0912	0.5100	0.2555	0.0384	E5
18-abr	A5	20	2	2.0	825	19.5	0.137	0.160	0.0230	0.0834	0.4652	0.2331	0.0384	E5
22-abr	A1	10	100	1.9	399	19.8	0.136	1.171	0.0229	0.0401	0.2186	0.1095	1.7285	E7c
22-abr	A2	10	100	1.9	390	19.8	0.135	1.213	0.0229	0.0392	0.2135	0.1070	1.8003	E7c
22-abr	A3	10	100	2.0	434	19.3	0.137	1.187	0.0231	0.0441	0.2412	0.1208	1.7535	E7c
22-abr	A4	10	100	2.0	624	19.0	0.138	1.313	0.0232	0.0638	0.3531	0.1769	1.9623	E7c
22-abr	A5	10	100	1.9	541	19.2	0.135	1.330	0.0231	0.0551	0.3034	0.1520	1.9957	E7c
19-abr	A1	80	2	2.0	2430	19.5	0.136	0.154	0.0230	0.2458	1.4153	0.7091	0.0196	E7s
19-abr	A2	80	2	2.0	1850	19.5	0.138	0.151	0.0230	0.1936	1.0900	0.5450	0.0245	E7s
19-abr	A3	80	2	2.0	1200	19.5	0.135	0.152	0.0230	0.3195	1.7956	0.8980	0.0308	E7s
19-abr	A4	80	2	2.0	3850	19.5	0.137	0.155	0.0231	0.3836	2.2174	1.1091	0.0315	E7s
19-abr	A5	80	2	2.0	4100	19.3	0.135	0.153	0.0231	0.4075	2.3689	1.1789	0.0281	E7s

A.2. Tensión de ruptura

Para las mediciones de tensión de ruptura se emplean dos equipos: *MTS* y *TP*. Estos requieren un factor de escala que corrige su medición en el lado de baja tensión a la medición real (en V) en el lado de alta tensión (de V a kV). Dichos factores fueron verificados y medidos en laboratorio, y se resumen en la siguiente tabla.

Factores de escala de los equipos.

Equipo	Factor de escala
TP	2.0215
MTS x2	1.9736
MTS x1	0.9868

A.2.1. Mediciones en DC

A continuación se muestran las mediciones realizadas para los ensayos de tensión de ruptura bajo excitación en DC. Se destaca que los valores registrados se encuentran solo corregidos por el factor de escala del instrumento.

Factores de escala de los equipos.

Escenario	Seco/Húmedo	$N°$Probeta	Equipo	Día	Hora inicio	Hora fin	Temperatura $°C$	Humedad %	Presión hPa	Mediciones kV									
Base	S	1	MTS x2	08-05-2024	9:21	10:00	16	48	1022	152	150	146	144	150	142	144	146	146	148
		2	MTS x2		10:26	10:46	15	52	1021	148	150	148	146	144	146	152	148	150	150
		3	MTS x2		10:52	11:09	15	52	1021	146	140	148	144	144	146	152	144	152	148
		4	MTS x2		11:39	12:50	16	52	1020	144	146	150	142	152	146	142	148	146	144
		5	MTS x2		12:51	13:05	16	51	1019	148	150	150	150	144	152	152	144	148	150
Base	H	1	MTS x2	09-05-2024	15:01	15:36	18	51	1015	122	126	132	132	132	138	136	140	138	140
		2	MTS x2		10:45	11:05	16	52	1015	128	138	138	140	142	146	148	144	146	152
		3	MTS x2		11:20	11:42	16	53	1016	130	136	140	144	144	144	144	148	148	150
		4	MTS x2		14:24	14:59	17	50	1015	132	134	132	138	136	128	136	134	148	142
		5	MTS x2		10:00	10:25	16	53	1015	124	126	126	132	144	140	144	138	142	146
E2	S	1	MTS x2	15-05-2024	13:58	14:04	16	56	1018	134	136	132	134	138	138	136	136	136	136
E4		2	MTS x2		12:53	13:01	16	56	1018	130	132	132	132	132	132	132	132	130	128
E5		3	MTS x2		12:12	12:25	16	56	1017	132	134	134	136	132	136	136	136	136	138
E7c		4	MTS x2		11:27	11:41	16	56	1017	132	132	132	132	134	128	134	132	132	132
E7s		5	MTS x2		10:46	10:56	16	56	1017	134	134	136	136	136	136	138	136	136	136
E2	H	1	MTS x1	15-05-2024	14:15	14:45	16	56	1018	65	77	67	71	73	75	87	81	54	52
E4		2	MTS x2		13:02	13:37	16	56	1018	59	77[10]	75	75	75	81	85	85	75	79
E5		3	MTS x2		12:38	12:45	16	56	1017	69[10]	75[10]	74[10]	71[10]	91	91	97	105	103	105
E7c		4	MTS x1		11:42	12:02	16	56	1017	54	47	57	51	61	75	77	83	85	91
E7s		5	MTS x1		11:05	11:19	16	56	1017	34	57	52	59	65	68	63	73	73	77

A.2.2. Mediciones en AC

Para las mediciones en AC, se utiliza un procedimiento similar al descrito para el caso DC (ver Sección 18), diferenciándose en el equipo empleado como fuente de alimentación. Se realizan mediciones de tensión de ruptura en AC para los cinco aisladores disponibles en su condición base, tanto en un ambiente seco como en ambiente húmedo.

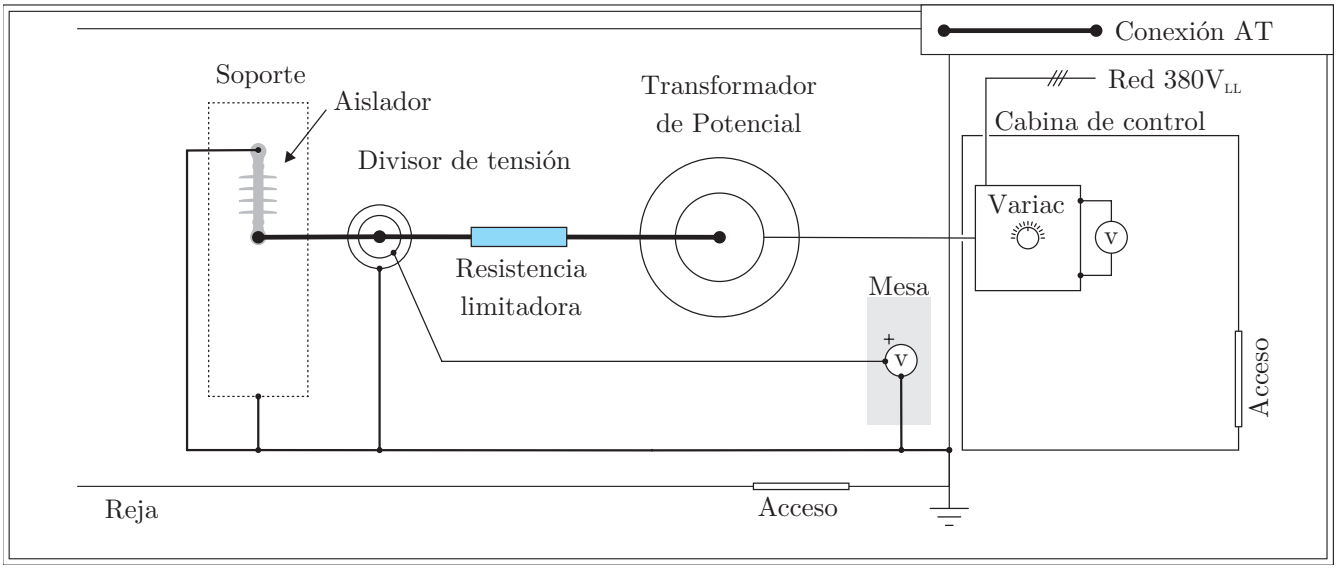
Equipos: Los ensayos siguen los lineamientos establecidos en la norma IEC 60060-1 [45]. Se llevan a cabo pruebas de tensión progresiva de Clase 3. Los valores de tensión de ruptura deben corregirse a condiciones atmosféricas estándar, ajustando por presión, temperatura y humedad. En pruebas realizadas en entorno húmedo, no se aplica corrección por humedad.

Para la realización de los ensayos, se emplea como fuente de alimentación el equipo *TP*, ubicado en el patio de alta tensión de la UTFSM, el cual puede suministrar tensiones en AC de 50 Hz de hasta 200 kV RMS. Además, se utiliza una resistencia limitadora de agua, diseñada para tener un valor de 2 $M\Omega$. La configuración del sistema se detalla en la siguiente figura:

Procedimiento: El proceso para la medición de la tensión de ruptura comienza una vez que los aisladores bajo estudio estén limpios y secos. El procedimiento es el siguiente:

1. Se monta el circuito mostrado en la Figura 53, equivalente a la disposición de la Figura 52. Se destaca que es la parte superior del aislador la que se aterriza.
2. En caso de realizar una prueba en un entorno húmedo, se humedece el aislador siguiendo el procedimiento descrito en 3.4. De lo contrario, se omite este paso.
3. Se energiza el aislador de forma progresiva hasta alcanzar la ruptura, registrando el valor de la misma. El valor de tensión de ruptura se registra cuando se observa, al menos, uno de los siguientes escenarios:
   a) Aumento brusco de la corriente en la fuente de alimentación.
   b) Caída de tensión observada en la fuente de alimentación.
   c) Ver o escuchar el fenómeno de contorneo en el aislador.
4. Tras la ruptura, se reduce la tensión hasta la mitad del valor de ruptura.

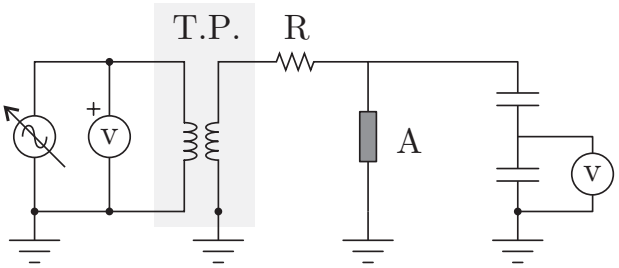
[10]Esta medición es realizada mediante el equipo MTS x1



Disposición de equipos para medición de tensión de ruptura en AC.

5. Luego, se repite el procedimiento desde el paso 3, con un periodo de reposo de 5 segundos posterior a cada ruptura, hasta obtener al menos 10 mediciones válidas de V_{rup}.

6. Finalmente, se reduce la tensión a cero. Se define V_{rup} como el promedio simple de los valores obtenidos.



Circuito para medición de tensión de ruptura en AC.

En la siguiente tabla se exponen los valores de ruptura. Los valores registrados solo están corregidos por el instrumento.

Factores de escala de los equipos.

Escenario	Seco/Húmedo	$N°$Probeta	Equipo	Día	Hora inicio	Hora fin	Temperatura $°C$	Humedad %	Presión hPa	Mediciones kV									
Base	S	1	TP	14-05-2024	13:23	13:31	14	61	1016	91	92	90	91	90	91	91	90	90	90
		2			12:14	12:59	13	68	1017	88	87	89	87	88	89	89	89	89	89
		3			10:58	11:21	12	70	1017	91	89	89	89	90	86	89	88	87	88
		4			10:27	10:45	11	69	1017	89	91	89	90	91	91	91	92	92	91
		5			9:48	10:05	11	70	1017	87	87	87	86	86	85	86	87	86	86
Base	H	1	TP	14-05-2024	13:32	13:43	14	60	1016	88	89	89	88	89	89	89	88	89	89
		2			13:00	13:22	14	63	1017	86	86	87	88	87	88	86	87	88	88
		3			11:22	12:13	12	70	1017	88	91	87	86	85	82	82	82	81	88
		4			10:46	10:57	11	70	1017	86	87	85	86	86	86	87	88	83	90
		5			10:06	10:26	11	68	1017	88	89	85	86	83	85	85	89	86	81

A.3. Corriente de fuga

Se presentan los valores de corriente de fuga en μA para los casos estudiados.

Coorientes de fuga en μA para el caso base en ambientes secas y humedas.

Entorno	Estado	Aislador	Tensión kV	t = 0 s	t = 5 s	t = 10 s	t = 15 s	t = 30 s	t = 60 s	t = 120 s	t = 180 s
Base	Seco	1	70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Base	Seco	1	80	0.12	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09
Base	Seco	1	90	0.22	0.21	0.20	0.20	0.18	0.17	0.16	0.16
Base	Seco	1	100	0.41	0.34	0.32	0.31	0.30	0.28	0.26	0.25
Base	Seco	1	110	0.48	0.42	0.40	0.39	0.38	0.35	0.33	0.34
Base	Seco	1	120	0.75	0.68	0.63	0.61	0.55	0.51	0.50	0.49
Base	Seco	1	130	3.90	3.60	3.20	3.00	2.70	1.56	1.32	1.18
Base	Seco	2	70	0.09	0.08	0.08	0.07	0.06	0.04	0.01	0.01
Base	Seco	2	80	0.17	0.17	0.17	0.17	0.15	0.12	0.09	0.08
Base	Seco	2	90	0.21	0.19	0.18	0.18	0.17	0.15	0.15	0.16
Base	Seco	2	100	0.38	0.33	0.32	0.32	0.31	0.28	0.27	0.27
Base	Seco	2	110	0.60	0.52	0.50	0.48	0.44	0.40	0.40	0.38
Base	Seco	2	120	0.82	0.79	0.67	0.65	0.57	0.53	0.51	0.48
Base	Seco	2	130	4.20	4.20	4.10	4.06	3.60	2.50	2.54	2.49
Base	Seco	3	70	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01
Base	Seco	3	80	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04
Base	Seco	3	90	0.14	0.13	0.12	0.12	0.13	0.11	0.11	0.11
Base	Seco	3	100	0.27	0.27	0.25	0.24	0.21	0.21	0.20	0.20
Base	Seco	3	110	0.46	0.42	0.39	0.38	0.36	0.32	0.32	0.31
Base	Seco	3	120	2.31	2.20	1.80	1.70	1.61	2.30	2.82	2.88
Base	Seco	3	130	7.20	6.88	6.72	6.33	6.62	6.49	6.17	6.07
Base	Seco	3	135	8.15	7.70	7.70	7.70	7.83	7.52	7.87	7.66
Base	Seco	4	70	0.15	0.13	0.10	0.07	0.07	0.04	0.03	0.03
Base	Seco	4	80	0.09	0.08	0.07	0.06	0.06	0.02	0.02	0.02
Base	Seco	4	90	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.05
Base	Seco	4	100	0.33	0.32	0.32	0.33	0.36	0.35	0.30	0.28
Base	Seco	4	110	0.58	0.53	0.51	0.47	0.44	0.39	0.35	0.29
Base	Seco	4	120	3.41	3.15	2.89	2.59	4.59	3.96	3.20	3.13
Base	Seco	4	130	8.02	7.72	7.68	7.72	7.77	7.76	7.42	7.61
Base	Seco	4	135	12.19	12.00	11.66	11.70	11.82	10.92	11.02	11.82
Base	Seco	5	70	0.00	0.02	0.02	0.02	0.03	0.01	0.03	0.01
Base	Seco	5	80	0.10	0.09	0.08	0.08	0.06	0.03	0.03	0.04
Base	Seco	5	90	0.07	0.05	0.05	0.05	0.07	0.06	0.04	0.05
Base	Seco	5	100	0.14	0.18	0.21	0.20	0.20	0.18	0.11	0.09
Base	Seco	5	110	0.50	0.45	0.43	0.40	0.39	0.34	0.33	0.32
Base	Seco	5	120	0.78	0.67	0.66	0.65	0.59	0.49	0.50	0.48
Base	Seco	5	130	1.12	1.10	0.90	1.06	0.97	0.83	1.18	1.12
Base	Húmedo	5	40	0.48	0.43	0.38	0.46	0.41	0.34	0.24	0.20
Base	Húmedo	5	50	0.35	0.32	0.29	-	0.23	0.16	0.13	0.10
Base	Húmedo	5	60	0.25	-	0.19	0.16	0.13	0.10	0.09	0.04
Base	Húmedo	4	60	0.20	0.17	0.18	0.18	0.16	0.17	0.22	0.23
Base	Húmedo	4	80	1.80	1.52	1.43	1.72	0.92	0.73	0.69	0.55
Base	Húmedo	4	100	3.54	3.72	3.52	3.45	3.33	3.25	3.03	3.13
Base	Húmedo	3	100	6.83	4.92	3.86	3.48	2.71	4.24	3.55	2.79
Base	Húmedo	3	110	4.80	4.44	4.21	4.11	4.27	4.41	3.42	2.81
Base	Húmedo	2	110	44.00	31.00	28.22	20.20	20.70	16.66	7.98	7.72
Base	Húmedo	1	40	0.20	0.17	0.15	0.14	0.11	0.08	0.08	0.05
Base	Húmedo	2	60	0.31	0.25	0.24	0.21	0.19	0.17	0.12	0.09
Base	Húmedo	3	80	3.55	2.44	1.75	1.36	1.18	1.04	0.15	0.12
Base	Húmedo	4	100	6.66	5.52	5.13	4.22	3.71	6.31	5.73	5.43
Base	Húmedo	5	110	60.00	51.03	30.44	22.01	17.81	14.41	7.31	7.66
Base	Húmedo	4	120	6.70	4.80	-	3.95	3.14	4.23	5.25	4.92
Base	Húmedo	4	130	31.00	33.00	20.00	33.99	33.44	20.66	6.89	4.57

Entorno	Estado	Aislador	Tensión kV	t = 0 s	t = 5 s	t = 10 s	t = 15 s	t = 30 s	t = 60 s	t = 120 s	t = 180 s
E2	Seco	1	40	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
E2	Seco	1	50	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
E2	Seco	1	60	0.05	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01
E2	Seco	1	70	0.06	0.06	0.05	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03
E2	Seco	1	80	0.13	0.13	0.13	0.12	0.11	0.10	0.09	0.09
E2	Seco	1	90	0.25	0.24	0.24	0.23	0.17	0.16	0.14	0.13
E2	Seco	1	100	0.37	0.34	0.33	0.33	0.29	0.25	0.19	0.19
E2	Seco	1	110	0.57	0.49	-	0.48	0.46	0.35	0.53	0.48
E4	Seco	2	40	0.01	0.02	0.04	0.06	0.06	0.00	0.00	0.00
E4	Seco	2	50	0.06	0.04	0.03	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01
E4	Seco	2	60	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02
E4	Seco	2	70	0.05	0.09	0.05	0.07	0.06	0.05	0.06	0.05
E4	Seco	2	80	0.12	0.11	0.11	0.10	0.01	0.11	0.11	0.09
E4	Seco	2	90	0.21	0.20	0.24	0.21	0.21	0.19	0.13	0.12
E4	Seco	2	100	0.30	0.33	0.31	0.28	0.27	0.24	0.20	0.19
E4	Seco	2	110	0.39	0.36	0.34	0.32	0.34	0.56	0.37	0.32
E5	Seco	3	40	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
E5	Seco	3	50	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01
E5	Seco	3	60	0.06	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02
E5	Seco	3	70	0.07	0.06	0.05	0.07	0.05	0.06	0.05	0.04
E5	Seco	3	80	0.30	0.12	0.24	0.20	0.21	0.16	0.12	0.12
E5	Seco	3	90	0.41	0.36	0.36	0.33	0.37	0.33	0.26	0.24
E5	Seco	3	100	0.67	0.49	0.47	0.45	0.39	0.35	0.32	0.30
E5	Seco	3	110	1.13	4.00	6.93	5.22	4.64	0.69	0.59	0.52
E7c	Seco	4	40	0.05	0.10	0.10	0.10	0.08	0.06	0.02	0.02
E7c	Seco	4	50	0.13	0.12	0.11	0.12	0.11	0.08	0.09	0.08
E7c	Seco	4	60	0.12	0.07	0.07	0.06	0.07	0.08	0.05	0.03
E7c	Seco	4	70	0.92	0.64	0.25	0.29	0.17	0.14	0.11	0.11
E7c	Seco	4	80	0.24	0.29	0.23	0.19	0.21	0.18	0.17	0.13
E7c	Seco	4	90	1.71	1.46	1.15	1.02	1.72	1.71	1.54	1.14
E7c	Seco	4	100	3.20	30.10	2.43	2.46	1.70	1.64	1.43	1.55
E7c	Seco	4	110	2.70	2.90	3.10	2.50	2.00	2.50	2.90	1.70
E7s	Seco	5	40	0.41	0.32	0.31	0.27	0.23	0.16	0.13	0.12
E7s	Seco	5	50	0.66	0.36	0.30	0.28	0.27	0.23	0.14	0.12
E7s	Seco	5	60	0.77	0.54	0.48	0.44	0.40	0.29	0.25	0.22
E7s	Seco	5	70	1.37	1.08	0.98	0.81	0.73	0.64	0.67	0.52
E7s	Seco	5	80	1.67	1.31	1.23	1.11	0.93	0.73	0.54	0.63
E7s	Seco	5	90	1.89	1.66	1.49	1.52	1.29	1.11	0.96	0.80
E7s	Seco	5	100	1.87	1.65	1.58	1.44	1.20	1.20	0.94	0.87
E7s	Seco	5	110	2.70	2.80	2.90	2.70	1.70	1.70	1.40	1.20
E2	Húmedo	1	10	1.70	1.60	1.59	1.60	1.70	1.73	2.19	4.64
E2	Humedo	1	20	23.44	14.09	9.97	16.24	11.55	11.26	8.64	9.50
E2	Humedo	1	30	58.11	45.25	57.15	50.49	42.93	22.85	19.26	17.58
E2	Húmedo	1	40	212.40	152.20	102.00	81.24	59.90	33.90	16.60	7.00
E4	Húmedo	2	10	0.34	0.32	0.29	0.29	0.25	0.28	0.26	0.29
E4	Húmedo	2	20	3.76	4.55	5.29	6.20	6.09	10.85	17.17	25.26
E4	Húmedo	2	30	-	-	-	-	-	-	-	-
E4	Húmedo	2	40	116.20	130.00	149.60	146.90	137.70	73.70	36.40	18.60
E5	Húmedo	3	10	0.34	0.40	0.40	0.44	0.43	0.45	0.40	0.37
E5	Húmedo	3	20	130.60	87.20	45.50	44.10	35.20	23.20	10.60	8.60
E5	Húmedo	3	30	55.20	51.20	52.10	90.60	69.50	40.20	13.50	21.80
E5	Húmedo	3	40	198.70	155.20	125.40	116.40	76.60	58.00	40.10	27.70
E7	Húmedo	4	10	31.42	34.22	37.11	37.35	36.62	34.78	9.16	10.20
E7	Húmedo	4	20	31.46	22.90	14.87	13.30	8.72	5.79	3.84	2.95
E7	Húmedo	4	30	86.00	62.10	38.30	52.50	33.90	31.80	14.10	4.50
E7	Húmedo	4	40	349	220.8	206.80	180.90	97.60	88.00	38.63	13.55
E7	Húmedo	5	10	16.50	14.50	12.56	12.80	10.15	11.58	8.38	9.51
E7	Húmedo	5	20	600.00	476.20	355.70	192.20	115.90	24.00	39.90	16.30
E7	Húmedo	5	30	600.00	434.20	257.20	171.20	74.90	73.90	274.60	15.10
E7	Húmedo	5	40	600	430.5	261.8	301.1	129.3	101.7	67.2	68.6

B. Cuantificación de la dispersión mediante Varianza

Sea un conjunto de puntos en el plano bidimensional $\mathbb{R}^2$ definido por las coordenadas $\mathbf{x}_i = (x_i, y_i)$ para $i = 1, 2, \ldots, N$, donde N es el número de puntos.

B.1. Cálculo del Centroide

El centroide $\mathbf{C} = (C_x, C_y)$ del conjunto de puntos se define como el promedio de las coordenadas de cada punto. Esto se expresa como:

$$C_x = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i \qquad \wedge \qquad C_y = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} y_i \tag{B.16}$$

B.2. Cálculo de la Varianza

La varianza se calculará utilizando las distancias de cada punto al centroide. La distancia euclidiana entre el punto $\mathbf{x}_i = (x_i, y_i)$ y el centroide $\mathbf{C} = (C_x, C_y)$ está dada por:

$$d_i = \sqrt{(x_i - C_x)^2 + (y_i - C_y)^2} \tag{B.17}$$

Con lo anterior, la varianza de las distancias de los puntos al centroide se define:

$$\text{Var} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} d_i^2 \tag{B.18}$$

Este valor cuantifica la dispersión de los puntos respecto al centroide en el plano bidimensional.

Referencias

[1] J. Peralta, "Hvdc project kimal-lo aguirre," *Coordinador Electrico Nacional*, Nov. 2020.

[2] Coordinador Eléctrico Nacional (CEN), "Hoja de ruta para una transición energética acelerada - visión del coordinador eléctrico nacional," 2022.

[3] R. R. Cordero, A. Damiani, J. Jorquera, E. Sepúlveda, M. Caballero, S. Fernandez, S. Feron, P. J. Llanillo, J. Carrasco, D. Laroze, and F. Labbe, "Ultraviolet radiation in the atacama desert," *Antonie van Leeuwenhoek*, vol. 111, no. 8, pp. 1301–1313, Aug. 2018.

[4] A. D. Fatta, P. Romano, A. Imburgia, G. Rizzo, V. L. Vigni, M. Albertini, and S. F. Bononi, "Statistical analysis techniques for partial discharges measurement under dc voltage," in *2022 IEEE 4th International Conference on Dielectrics (ICD)*, 2022, pp. 344–347.

[5] Y. Liu, Y. Guo, P. Li, and X. Huang, "Research on pollution agglomeration characteristics of insulator in dc electric field," in *2023 IEEE 4th International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE)*, 2023, pp. 1–4.

[6] W. Lampe, T. Hoglund, C. Nellis, P. Renner, and R. Stearns, "Long-term tests of hvdc insulators under natural pollution conditions at the big eddy test center," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, no. 1, pp. 248–259, 1989.

[7] M. Fazelian, C. Wu, T. Cheng, H. Nour, and L. Wang, "A study on the profile of hvdc insulators-dc flashover performance," *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. 24, no. 1, pp. 119–125, 1989.

[8] J. P. Holtzhausen, P. J. Pieterse, H. J. Vermeulen, and S. Limbo, "Insulator aging tests with hvac and hvdc excitation using the tracking wheel tester," in *2010 International Conference on High Voltage Engineering and Application*, 2010, pp. 445–448.

[9] D. Jovcic, *High Voltage Direct Current Transmission: Converters, Systems and DC Grids*. Wiley, 2019.

[10] S. Khatoon and A. A. Khan, "Influence of different contaminants with clean steam fog on the flashover behavior of porcelain and polymeric insulators: An experimental study," in *2019 International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON)*, 2019, pp. 1–6.

[11] CIGRE, "Outdoor insulation in polluted conditions: Guidelines for selection and dimensioning – part 2: The dc case," CIGRE, Technical Brochure WG C4.303, 2008.

[12] G. A. Hussain, L. Kumpulainen, J. V. Klüss, M. Lehtonen, and J. A. Kay, "The smart solution for the prediction of slowly developing electrical faults in mv switchgear using partial discharge measurements," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 4, pp. 2309–2316, 2013.

[13] J. Long, X. Wang, W. Zhou, J. Zhang, D. Dai, and G. Zhu, "A comprehensive review of signal processing and machine learning technologies for uhf pd detection and diagnosis (i): Preprocessing and localization approaches," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 69 876–69 904, 2021.

[14] G. A. Hussain, W. Hassan, F. Mahmood, M. Shafiq, H. Rehman, and J. A. Kay, "Review on partial discharge diagnostic techniques for high voltage equipment in power systems," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 51 382–51 394, 2023.

[15] P. Morshuis, "Degradation of solid dielectrics due to internal partial discharge: some thoughts on progress made and where to go now," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 12, no. 5, pp. 905–913, 2005.

[16] C. Li, T. Shahsavarian, M. A. Baferani, K. Davis, Y. Cao, and D. Zhang, "Understanding dc partial discharge: Recent progress, challenges, and outlooks," *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 8, no. 3, pp. 894–909, 2022.

[17] P. Romano, R. Candela, A. Imburgia, G. Presti, E. R. Sanseverino, and F. Viola, "A new technique for partial discharges measurement under dc periodic stress," in *2017 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomenon (CEIDP)*, 2017, pp. 303–306.

[18] E. A. Morris, W. Siew, and M. J. Given, "Methods of characterisation of dc partial discharge in polymeric cable insulation," in *2018 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, 2018, pp. 494–497.

[19] A. Cavallini, G. C. Montanari, M. Tozzi, and X. Chen, "Diagnostic of HVDC systems using partial discharges," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 18, no. 1, pp. 275–284, 2011.

[20] A. D. Elben, T. Fechner, X. Lei, R. Plath, and M. Zhou, "Modern noise rejection methods and their applicability in partial discharge measurements on hvdc cables," in *2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, 2018, pp. 1–4.

[21] C. Madariaga, R. Schurch, J. Ardila-Rey, O. Muñoz, and S. Fingerhuth, "Partial discharge electrical tree growth identification by means of waveform source separation techniques," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 64 665–64 675, 2021.

[22] A. Cavallini, G. 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.

[23] A. D. Fatta, P. Romano, A. Imburgia, G. Ala, G. Rizzo, V. L. Vigni, M. Albertini, and S. F. Bononi, "Use of time-frequency map combined with dbscan algorithm for separation of partial discharge pulses under dc voltage," in *2022 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, 2022, pp. 427–430.

[24] J. Pihera, P. Trnka, O. Kozák, and J. Hornak, "Pulse sequence analysis of corona discharge at dc voltage," in *2016 Diagnostic of Electrical Machines and Insulating Systems in Electrical Engineering (DEMISEE)*, 2016, pp. 71–76.

[25] F. Alvarez, J. Ortego, F. Garnacho, and M. Sanchez-Uran, "A clustering technique for partial discharge and noise sources identification in power cables by means of waveform parameters," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 23, no. 1, pp. 469–481, 2016.

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

[27] F. H. Kreuger, *Partial Discharge Detection in High Voltage Equipment*, 2nd ed. Butterworth Co. & (Publishers) Ltd., 1989.

[28] G. Stone, A. Cavallini, G. Behrmann, and C. Serafino, *Practical Partial Discharge Measurement on Electrical Equipment*, ser. IEEE Press Series on Power and Energy Systems. Wiley, 2023.

[29] IEC/TS 62478-1, "High voltage test techniques — measurement of partial discharges by electromagnetic and acoustic methods," International Electrotechnical Commission, Technical Specification 62478, 2016.

[30] M. Ren, J. Zhou, and J. Miao, "Adopting spectral analysis in partial discharge fault diagnosis of gis with a micro built-in optical sensor," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 36, no. 2, pp. 1237–1240, 2021.

[31] Y. Kikuchi, T. Murata, Y. Uozumi, N. Fukumoto, M. Nagata, Y. Wakimoto, and T. Yoshimitsu, "Effects of ambient humidity and temperature on partial discharge characteristics of conventional and nanocomposite enameled magnet wires," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 15, no. 6, pp. 1617–1625, 2008.

[32] N. A. Othman, M. A. M. Piah, Z. Adzis, and N. A. Al-Geelani, "Partial discharge characterization based on leakage current pulses waveform for contaminated glass insulator string," *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 835–843, 2016.

[33] M. Hoof and R. Patsch, "Voltage-difference analysis, a tool for partial discharge source identification," in *Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, vol. 1, 1996, pp. 401–406 vol.1.

[34] A. Cavallini, G. Montanari, F. Puletti, and A. Contin, "A new methodology for the identification of pd in electrical apparatus: properties and applications," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 12, no. 2, pp. 203–215, 2005.

[35] R. Schurch, O. Munoz, and J. Ardila-Rey, "Electrical tree growth under harmonic frequencies characterized by partial discharges waveforms," in *2020 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, 2020, pp. 168–171.

[36] F. Álvarez, F. Garnacho, A. Khamlichi, and J. Ortego, "Classification of partial discharge sources by the characterization of the pulses waveform," in *2016 IEEE International Conference on Dielectrics (ICD)*, vol. 1, 2016, pp. 514–519.

[37] M.-X. Zhu, J.-N. Zhang, Y. Li, Y.-H. Wei, J.-Y. Xue, J.-B. Deng, H.-B. Mu, G.-J. Zhang, and X.-J. Shao, "Partial discharge signals separation using cumulative energy function and mathematical morphology gradient," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 23, no. 1, pp. 482–493, 2016.

[38] IEC/TS 60815-1, "Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions," International Electrotechnical Commission, Technical Specification 60815-1, October 2018.

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

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

[41] IEC/TS 62073, "Guidance on the measurement of hydrophobicity of insulator surfaces," International Electrotechnical Commission, Technical Specification 62073, 2016.

[42] Silpak S.A., "Aisladores poliméricos de silicona suspensión - retención," Silpak S.A., Santiago de Chile, Ficha técnica AS-15-4FD, 2024.

[43] Climate Tracker. (2023) Kimal lo aguirre: La carretera eléctrica clave para la transición energética en chile bajo la lupa.

[44] M. P. Riffo, "Desempeño de aisladores en hvdc en condiciones de contaminación severas," Memoria para optar al título de Ingeniero Electricista, Universidad Técnica Federico Santa María, 2022.

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

[46] D. J. F. Karmelic, "Diseño de una antena bioinspirada de ultra alta frecuencia para la detección de descargas parciales en equipos de alta tensión," Memoria para optar al título de Ingeniero Electricista, Universidad Técnica Federico Santa María, 2023.