



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Ingeniería Eléctrica

**“Estudio de interfases dieléctricas sólidas en
aisladores compuestos ante sollicitación de alta
tensión continua”**

Iván Ignacio Ramírez Calderón

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA

Profesor patrocinante: Roger Steffan Schurch Brandt

Profesor Co-referente: Leonardo Alfredo Vivas

29 de julio de 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

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

Título del trabajo: Estudio de interfases dieléctricas sólidas en aisladores compuestos ante sollicitación de alta tensión continua

Nombre del candidato(a): Iván Ignacio Ramírez Calderón

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Eléctrica

Campus: Casa Central Valparaíso ; **Departamento:** Departamento de ingeniería eléctrica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

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

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

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

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

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

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

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

4.- FIRMAS

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

Fecha: 12-08-2025

Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 12-08-2025

Firma:

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

Resumen Ejecutivo

La siguiente memoria de titulación, titulada “Estudio de interfases dieléctricas sólidas en aisladores compuestos ante sollicitación de alta tensión continua”, tiene por objetivo principal investigar y caracterizar los procesos de degradación y actividad de descargas parciales (DP) en la interfaz sólido–sólido de componentes representativos de aisladores compuestos bajo excitación de corriente continua de alto voltaje (HVDC). Debido al creciente despliegue de sistemas de transmisión HVDC a nivel global y nacional, y en particular al proyecto “HVDC Kimal-Lo Aguirre” en Chile, resulta esencial comprender los mecanismos de degradación en las interfaz sólido–sólido, punto más débil en el sistema de aislamiento, que son propensos a sufrir descargas parciales (DP) y tracking interno.

Para ello, se diseñaron y fabricaron probetas representativas de la interfaz sólido–sólido, conformadas por dos capas de material (resina epóxica MEPOX 1124U y silicona de goma RTV XL 8820T) de $100 \times 50 \times 4$ mm, con electrodos de cobre en configuración punta-plano y un gap de 2 mm. El setup experimental se validó con ensayos preliminares en AC, utilizando como fuente un amplificador de señales en conjunto a un generador de señales (Trek 20/20C-HS 1:2000 y Rigol DG-1022). Posteriormente se realizaron ensayos en DC utilizando como fuente el equipo BAUR VLF FRIDA, además se registraron los ensayos con fotografías macro.

El análisis de datos combinó métodos globales (indicadores IEC 60270: Q_{95} , tasa de repetición n , carga acumulada y tiempo a ruptura) y comparativos entre el inicio y fin de los ensayos, apoyados en histogramas y gráficos de DP y carga acumulada. Se aplicó además el Análisis de Secuencia de Pulso (PSA) para caracterizar correlaciones entre pulsos sucesivos bajo DC, e identificar variación en los patrones PSA a medida que evoluciona el ensayo.

El análisis de los resultados muestran que la tensión de ensayo requerida para observar crecimiento de defectos en la interfaz con excitación DC es el doble a la excitación AC. Los bajos niveles de Q_{95} y n (70 % y 99 % menos) revelan baja actividad de DP en los ensayos DC. El comportamiento observado de las DP durante los ensayos presentan una fuerte variabilidad sin patrones definidos. No se observaron cambios en los patrones PSA durante el ensayo lo que indica comportamiento relativamente estable, lo que hace que se vuelva más difícil realizar diagnósticos y prevenir fallas.

Un hallazgo importante fue el efecto del tiempo de preacondicionamiento en el tiempo a la ruptura (TTB), sugiriendo un fenómeno de memoria de carga en la interfaz. Este fenómeno, respaldado por estudios previos, indica que la acumulación de carga espacial podría estabilizar el campo eléctrico en la interfaz y reducir la actividad de DP. En la misma línea, los ensayos con grandes escalones de tensión o inversión de polaridad no produjeron ruptura, lo cual también podría estar relacionado con una estabilización temporal del sistema dieléctrico tras el transitorio.

Estos resultados permiten concluir que, aunque las DP en DC son menos intensas y frecuentes, también son más difíciles de interpretar y diagnosticar. La evolución de defectos ocurre de forma más errática y silenciosa, lo cual plantea nuevos desafíos para el monitoreo y la confiabilidad de sistemas HVDC.

Nomenclatura

Simbolo	Significado	Unidad
Δu_n	Diferencia de tensión del pulso siguiente	V
Δu_{n-1}	Diferencia de tensión del pulso anterior	V
Δq_n	Diferencia de carga del pulso siguiente	nC
Δq_{n-1}	Diferencia de carga del pulso anterior	nC
Δt_n	Diferencia de tiempo del pulso siguiente	s
Δt_{n-1}	Diferencia de tiempo del pulso anterior	s
Q_{pk}	Máxima carga aparente	nC
Q_{95}	Máxima carga al 95 %	nC
q	Carga aparente	nC
T	Periodo del ensayo	s
N	Pulsos registrados	rep
n	Tasa de repetición	rep/s
q_{mi}	Intervalo de carga	nC
R_x	Resistencia en serie	$M\Omega$
TTB	Tiempo a la ruptura	s
Siglas	Significado	
HVDC	Corriente Continua de Alto Voltaje	
AC	Corriente Alterna	
DC	Corriente Continua	
DP	Descargas Parciales	
EP	Resinas Epóxicas	
PVC	Policloruro de Vinilo	
SiR	Silicona de Goma	
XLPE	Polietileno Reticulado	
EPR	Caucho de etileno-propileno	
FRP	Polimeros Reforzados con Fibra	
GFRP	Polímero Reforzado con Fibra de Vidrio	
UV	Ultra Violeta	
HFCT	Transformador de Corriente de Alta Frecuencia	
RMS	Raíz Cuadrada Media	
PRPD	Descarga Parcial Resuelta en Fase	
PSA	Análisis de Pulso de Secuencia	

Índice General

1	Objetivos	5
1.1	Objetivo general	5
1.2	Objetivos específicos	5
2	Introducción	6
3	Marco Teórico	7
3.1	Aisladores	7
3.1.1	Interfaz externa	8
3.1.2	Interfaz interna	9
3.2	Descargas parciales	10
3.2.1	Descargas Parciales en DC	11
3.3	Análisis de descargas parciales	12
3.3.1	Análisis PRPD	12
3.3.2	Análisis PSA	13
3.3.3	Indicadores Norma IEC60270	14
4	Propuesta Experimental	15
4.1	Diseño y fabricación de probetas	15
4.2	Setup experimental	16
4.3	Ensayos	17
4.4	Métodos de análisis	19
5	Resultados y análisis	20
5.1	Análisis PRPD de los ensayos bajo excitación AC	20
5.2	Análisis global de las DP	21
5.2.1	Gráficos ensayos AC	22
5.2.2	Gráficos ensayos escalones DC	25
5.2.3	Gráficos ensayos escalón DC	31
5.2.4	Gráficos ensayos cambio de polaridad DC	33
5.3	Comparación entre estado inicial y final del ensayo	35
5.3.1	Gráficos ensayos AC	36
5.3.2	Gráficos ensayos escalones DC	40
5.3.3	Gráficos ensayos escalón DC	48
5.3.4	Gráficos ensayos inversión de polaridad DC	51
5.4	Comparación de imágenes	54
5.4.1	Imágenes ensayos AC	54
5.4.2	Imágenes ensayos escalones DC	55
5.4.3	Imágenes ensayos escalón DC	58
5.4.4	Imágenes ensayos inversión de polaridad DC	59
6	Conclusiones	61

7 Trabajo futuro recomendado	62
A Paper conferencia ISH 2025: Characterization of Internal Solid Interfaces In composite Insulators Under DC and AC Excitation.	64

Índice de Figuras

1	Aislador compuesto de tipo suspensión [1].	8
2	Distintas características de la interfaz externa de aisladores compuestos.	9
3	Microcavidades en la interfaz Sólido-Sólido [2].	9
4	Diagrama de las interfaces en aisladores compuestos. [3].	10
5	Tipos de descargas parciales [4].	11
6	Dispositivos de acoplamiento para medición de DP [5].	12
7	Gráfico PRPD.	13
8	Transformación de una secuencia de descargas a un patrón $\Delta u_n(\Delta u_{n-1})$ [6].	14
9	Modelos de probetas utilizadas en distintas investigaciones.	16
10	Modelo digital de la probeta (a) y probeta utilizada en ensayo (b).	17
11	Circuito para medición y monitoreo de DP	17
12	Equipos utilizados en el setup experimental.	18
13	Gráficos PRPD de los ensayos.	20
14	Gráficos ensayo AC1.	22
15	Gráficos ensayo AC2.	23
16	Gráficos ensayo AC3.	24
17	Gráficos ensayo DC1.	25
18	Gráficos ensayo DC2.	26
19	Gráficos ensayo DC3.	27
20	Gráficos ensayo DC4.	28
21	Gráficos ensayo DC5.	29
22	Gráficos ensayo DC6.	30
23	Gráficos ensayo DC7.	31
24	Gráficos ensayo DC8.	32
25	Gráficos ensayo DC9.	33
26	Gráficos ensayo DC10.	34
27	Gráficos comparativos AC1.	37
28	Gráficos comparativos AC2.	38
29	Gráficos comparativos AC3.	39
30	Gráficos comparativos DC1.	41
31	Gráficos comparativos DC2.	42
32	Gráficos comparativos DC3.	43
33	Gráficos comparativos DC4.	44
34	Gráficos comparativos DC5.	46
35	Gráficos comparativos DC6.	47
36	Gráficos comparativos DC7.	49
37	Gráficos comparativos DC8.	50
38	Gráficos comparativos DC9.	52
39	Gráficos comparativos DC10.	53
40	Imágenes ensayo AC1.	54
41	Imágenes ensayo AC2.	54
42	Imágenes ensayo AC3.	55
43	Imágenes ensayo DC1.	55

44	Imágenes ensayo DC2.	56
45	Imágenes ensayo DC3.	56
46	Imágenes ensayo DC4.	57
47	Imágenes ensayo DC5.	57
48	Imágenes ensayo DC6.	58
49	Imágenes ensayo DC7.	59
50	Imágenes ensayo DC8.	59
51	Imágenes ensayo DC9.	60
52	Imágenes ensayo DC10.	60

Índice de Tablas

1	Comparación de características entre aisladores cerámicos y compuestos	7
2	Dimensiones de cada capa de material sólido de la probeta.	15
3	Resumen de ensayos realizados con ambas excitaciones.	18
4	Resumen de los parámetros obtenidos de los ensayos.	21
5	Resumen de parámetros para estado inicial y final.	36

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Investigar y analizar el efecto de la aplicación de alta tensión continua en interfaces dieléctricas sólidas representativas de aisladores compuestos utilizados en sistemas de transmisión HVDC.

1.2. Objetivos específicos

- Diseñar probetas y set de experimentación para el estudio de la aplicación de alta tensión continua en interfaces dieléctricas sólidas.
- Habilitar el set de experimentación y sistema de medición mediante experimentos con alta tensión alterna.
- Implementar experimentos en excitación DC en las probetas diseñadas utilizando el set de experimentación implementando en AC.
- Caracterizar los procesos de degradación en las interfaces sólidas de las probetas en laboratorio bajo excitación DC a través de métodos cualitativos y cuantitativos.

2. Introducción

Existe una creciente demanda a nivel global de sistemas de transmisión HVDC debido a sus múltiples ventajas tanto técnicas como económicas respecto a los sistemas de transmisión HVAC. Estos sistemas permiten la transmisión de energía a mayores distancias, mayor capacidad de transmisión y menos pérdidas [7]. En Chile se comenzará a construir el primer proyecto de transmisión HVDC, el cual se espera entre en operación para el año 2029. El proyecto “HVDC Kimal-Lo Aguirre”, consta de un sistema bipolar de 600 kV y una longitud de 1400 km aproximadamente que conectará el norte con el centro del país. Este proyecto permitirá aprovechar la energía generada de fuentes renovables que hoy en día no es posible utilizar debido a limitaciones técnicas en la infraestructura actual. Los vertimientos eólicos y solares alcanzaron 1.47 TWh durante el año 2022, triplicando el valor del año 2021 [8]. Este proyecto es clave en el proceso de descarbonización y la integración de grandes volúmenes de energía generada por fuentes renovables, contribuyendo a crear un sistema eléctrico más robusto y resiliente.

En el sistema HVDC pueden ocurrir fallas que representan un riesgo para la estabilidad de la red. El sistema de aislamiento es una parte fundamental que se encarga de proporcionar soporte mecánico para los conductores de la línea de transmisión, y aislación eléctrica de los conductores a otros elementos del sistema que se encuentren a distinto nivel de tensión, evitando posibles fallas que puedan poner en riesgo la operación e integridad del sistema.

Los aisladores compuestos son comúnmente utilizados en estos sistemas debido a sus ventajosas propiedades tanto dieléctricas como mecánicas. Estos aisladores se componen principalmente de un núcleo de fibra de vidrio y una capa externa de goma de silicona. Es inevitable que en equipamientos sólidos de aislamiento existan interfaces y en la mayoría de los casos, esta interfaz es el punto más débil del sistema de aislamiento [9]. Estos puntos débiles se ven afectados generalmente por procesos de degradación como DP las cuales se definen como “Descarga eléctrica localizada que solo cortocircuita parcialmente el aislamiento entre dos conductores y que puede ocurrir adyacente o no a alguno de ellos” [10].

Existe una gran cantidad de estudios e investigación respecto a la degradación y descargas parciales en interfaces sólido-sólido bajo esfuerzos de alta tensión alterna. Por otro lado, estos mismos procesos para sollicitación continua no se encuentran completamente entendidos todavía [11], difieren a la situación conocida bajo sollicitación AC y no hay experiencia análoga para sollicitación DC. Debido a esto, es necesario estudiar, investigar y mejorar la comprensión de estos procesos de degradación que ocurren en las interfaces de los materiales dieléctricos, con la finalidad de mejorar el diagnóstico de aisladores en sistemas HVDC.

En función de la poca experiencia relativa a estos sistemas, se fabricarán probetas representativas de un aislador compuesto para ensayar bajo excitación DC. El diseño y fabricación de estas probetas significa un gran desafío debido a la naturaleza del ensayo. Una vez ensayadas las probetas se analizará la degradación provocada en la interfaz de los materiales para tener un mejor entendimiento del comportamiento de la interfaz sólido-sólido en sistemas de aislamiento sometidos a esfuerzos de alta tensión continua.

3. Marco Teórico

3.1. Aisladores

Los aisladores son dispositivos desarrollados para brindar soporte mecánico y eléctrico entre dos puntos a diferente potencial, evitando el flujo de corriente a través de su estructura. Los materiales utilizados en los aisladores se pueden clasificar según la composición química [12] en:

- **Inorgánicos:** Porcelana y vidrio.
- **Orgánicos:** EP-resins, PVC, SiR, XLPE, EPR y goma.
- **Compuestos:** Papel impregnado, FRP y GFRP.

Los aisladores pueden ser fabricados de estos distintos materiales y se clasifican principalmente en aisladores cerámicos y aisladores compuestos [1]. En la tabla 1 se observan las principales características que diferencian estos dos tipos de aisladores.

Aisladores Cerámicos	Aisladores Compuestos
Mayor experiencia en la industria	Excelente hidrofobicidad
Resistencia mecánica y térmica elevada	Resistente a impactos
Fácil inspección	Menor acumulación de contaminación
Mayor peso	Menor costo de fabricación
Frágil a impactos	Envejecimiento por radiación UV
Requiere mayor mantenimiento	Menor vida útil

Tabla 1: Comparación de características entre aisladores cerámicos y compuestos

En la actualidad, debido a las principales ventajas técnicas y económicas que presentan los aisladores compuestos, es que son los preferidos a utilizar en los sistemas eléctricos de potencia. Esto debido al desarrollo de la energía renovable, ya que ha expandido las líneas de transmisión hacia zonas de mayor contaminación, donde estos presentan mejor desempeño, incluso alcanzando 30 años de vida útil en ambientes de contaminación extrema [13].

En la Figura 1 se puede observar un ejemplo clásico de un aislador compuesto de tipo suspensión. Este se compone principalmente de un núcleo de GFRP, el cual brinda soporte mecánico, la cubierta de SiR, la cual protege el núcleo con sus excelentes propiedades hidrofóbicas y menor tendencia a acumular contaminación, y por último los faldones (o sheds), que se encargan de incrementar la corriente distancia de fuga y evitar la acumulación de contaminantes en la superficie. En los aisladores compuestos, el área de contacto entre los materiales dieléctricos se denomina interfaz y pueden ser externas o internas [3].

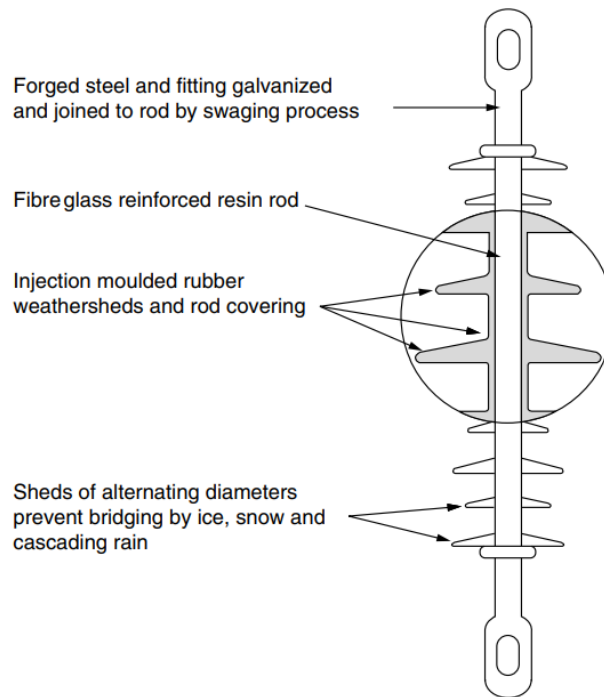


Figura 1: Aislador compuesto de tipo suspensión [1].

3.1.1. Interfaz externa

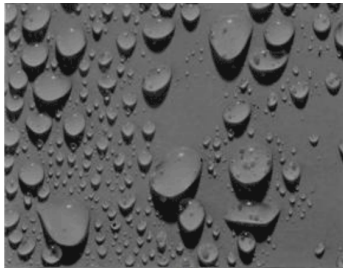
La interfaz externa corresponde a la superficie del aislador que se encuentra en contacto directo con el aire y el ambiente, la cual se clasifica entonces como una interfaz del tipo Sólido-Gas. En estos sistemas la rigidez dieléctrica es determinada mayormente por el medio gaseoso, ya que es el que generalmente tiene menor rigidez dieléctrica [2].

En la interfaz externa, una propiedad clave es la hidrofobicidad de la superficie. Gracias a ella, el agua se aglomera formando gotas aisladas en lugar de un film continuo, lo que disminuye drásticamente el riesgo de formación de arcos eléctricos bajo condiciones de humedad.

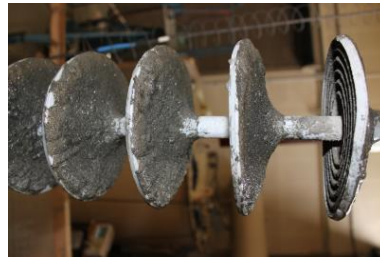
Algunos fenómenos característicos de esta interfaz son:

- **Contaminación:** Partículas contaminantes pueden acumularse y alterar el campo eléctrico. Estos pueden ser polvo, sal o gases industriales.
- **Erosión superficial o tracking:** Descargas superficiales pueden dañar la cubierta de material polimérico formando canales carbonizados (tracking) o erosión.

En la Figura 2 se pueden observar las distintas características de la interfaz externa en aisladores compuesto como la hidrofobicidad, la acumulación de contaminación y la degradación por tracking y erosión.



(a) Hidrofobicidad en aislador compuesto [14].



(b) Aislador compuesto contaminado con ceniza volcánica [15].



(c) Tracking y erosión en aislador compuesto [16].

Figura 2: Distintas características de la interfaz externa de aisladores compuestos.

3.1.2. Interfaz interna

La interfaz interna corresponde al área de contacto entre los materiales sólidos que componen el aislador, en este caso el núcleo de GFRP y la cubierta de SiR, formando un sistema aislante de tipo Sólido-Sólido. La rugosidad de los materiales sólidos que se encuentran en contacto da origen a microcavidades en la interfaz, las cuales se encuentran llenas de gas/aire y generan concentraciones de campo eléctrico como se puede observar en la Figura 3. Esto permite el desarrollo de DP y en consecuencia degradan la interfaz disminuyendo la rigidez dieléctrica hasta alcanzar el punto de la ruptura dieléctrica [2].

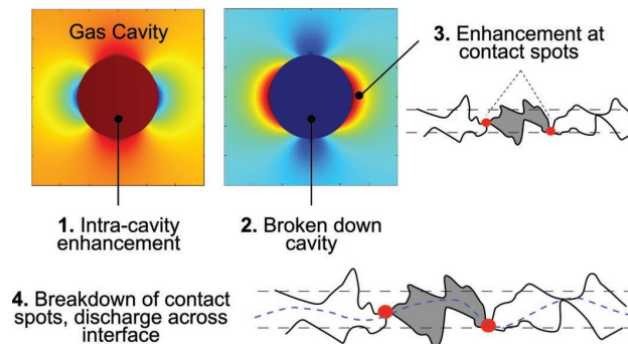


Figura 3: Microcavidades en la interfaz Sólido-Sólido [2].

Estudios sobre los efectos de las propiedades mecánicas en los esfuerzos de ruptura de la interfaz han evidenciado que mayor presión de contacto, materiales y superficies más suaves pueden reducir el tamaño de estas cavidades y mejorar el desempeño dieléctrico de la interfaz [17], [18], [19].

En la Figura 4 se presenta un diagrama de las interfaces en aisladores compuestos.

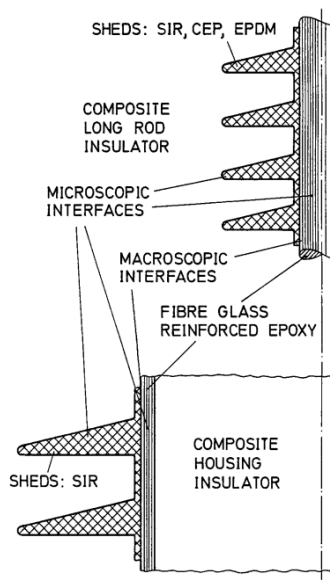


Figura 4: Diagrama de las interfaces en aisladores compuestos. [3].

3.2. Descargas parciales

Las DP se definen según la norma IEC 60270 [10] como una descarga eléctrica localizada que solo atraviesa parcialmente el aislamiento entre conductores y puede o no ocurrir adyacente a alguno de ellos. Generalmente son la consecuencia de concentración de campo eléctrico local dentro o en la superficie del aislamiento y se presentan como pulsos de duración menor a $1 \mu s$. Estas vienen acompañadas de sonidos, ondas electromagnéticas, luz, calor y reacciones químicas.

Las DP se caracterizan por su comportamiento estocástico y la necesidad de electrones libres y iones para desencadenar su ocurrencia [20]. Se ha comprobado que la existencia de DP en un sistema de aislación tiene relación directa con el deterioro del sistema, ya que la energía de las descargas erosiona el material formando caminos que a lo largo del tiempo pueden provocar ruptura dieléctrica. Además, los residuos provocados por las DP interactúan física y químicamente degradando el material.

Existen distintos tipos de DP (Figura 5) según en que lugar ocurren y se pueden clasificar de la siguiente manera:

- **Internas:** Pueden ocurrir en materiales aislantes sólidos o líquidos. Se deben principalmente a vacuolas de aire, cavidades o defectos del material.
- **Superficiales:** Se producen en la interfaz entre el material aislante y el aire. La componente tangencial del campo eléctrico es responsable de estas descargas y se propicia debido a la baja rigidez dieléctrica de la interfaz, además de la contaminación y humedad.
- **Corona:** Ocurren en el aire circundante a electrodos o conductores con bordes afilados o irregulares, debido al campo eléctrico no homogéneo.

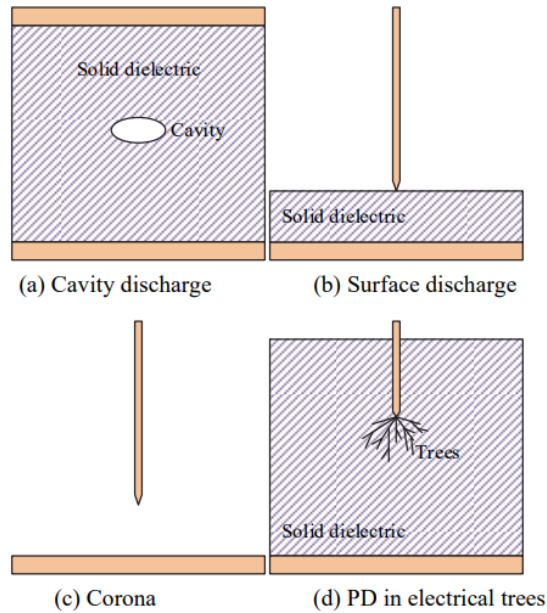


Figura 5: Tipos de descargas parciales [4].

Debido a los distintos fenómenos físicos que derivan de las DP es que se han desarrollado métodos para su detección y medición. Estos métodos se pueden agrupar en cuatro categorías distintas que son el método acústico, óptico, químico y eléctrico. Los métodos eléctricos se pueden clasificar en métodos convencionales y no convencionales, los cuales se pueden aplicar para detectar y medir DP en equipos de alta tensión en operación o fuera de operación, lo cual conlleva a distintas ventajas y desventajas respectivamente [21].

El método eléctrico convencional, también conocidos como método clásico de detección y medición de DP, se basa mayormente en la norma IEC60270 [10] la cual se enfoca en la medición de DP para solicitaciones alternas de hasta 400 Hz y/o solicitación DC [21]. Este se basa principalmente en conectar un dispositivo de acoplamiento, como los mostrados en la Figura 6, el cual permite la detección de los pulsos de DP y se conecta a un dispositivo de adquisición de datos para poder extraer y almacenar la información de las DP.

3.2.1. Descargas Parciales en DC

Las DP han sido extensamente estudiadas bajo excitación de fuentes AC, permitiendo que a través del análisis de estas se logre realizar un diagnóstico de la condición del aislamiento y posibles fallas en los equipos [22]. Sin embargo, estos estudios no son directamente aplicables para el caso de DP bajo solicitación DC debido a la naturaleza de la excitación, a diferencia de AC esta mantiene constante su magnitud y polaridad.

Se ha evidenciado en distintos estudios ([22], [23], [20], [24] y [25]) que el comportamiento de las DP bajo solicitación DC dista de parecerse al de AC, encontrándonos con características como:



Figura 6: Dispositivos de acoplamiento para medición de DP [5].

- La resistividad del medio aislante está relacionada con el comportamiento de las DP, por lo que la temperatura del medio influye directamente en la tasa de repetición.
- La magnitud de los pulsos de DP son significativamente menor bajo excitación DC.
- Factores como la conductividad, temperatura, presión, defectos y degradación tienen una mayor influencia en los procesos de descarga.
- DP superficiales se han manifestado intermitentes en el tiempo.
- Intentos de caracterizar los patrones de DP han reportado este como errático.

Debido a estas características es que se continúa estudiando las DP bajo sollicitación DC, buscando métodos para comprender su comportamiento y desarrollar protocolos de mantenimiento de equipos sometidos a HVDC.

3.3. Análisis de descargas parciales

Actualmente existen distintos métodos que permiten analizar los resultados obtenidos de las mediciones de los pulsos de DP. Estos análisis nos permiten interpretar la información y tomar acción ante posibles fallas en los sistemas de aislamiento de los equipos.

3.3.1. Análisis PRPD

Este método de análisis es una de las herramientas comúnmente utilizadas para análisis de DP y diagnóstico de equipos que operan bajo excitación AC. Este método consiste en representar gráficamente las DP registradas en función de su magnitud y fase de ocurrencia, permitiendo identificar y clasificar las fuentes de DP comparando los patrones obtenidos con los patrones estudiados y conocidos para distinguir distintos defectos [26], [27].

En la Figura 7 se observa un gráfico PRPD de las DP en una probeta fabricada para esta memoria. Se representa la magnitud de las DP en nC en el eje Y, y la fase en que ocurre la descarga en el eje X. Se utiliza un código de colores para una representación más gráfica de las descargas que se repiten en magnitud y fase.

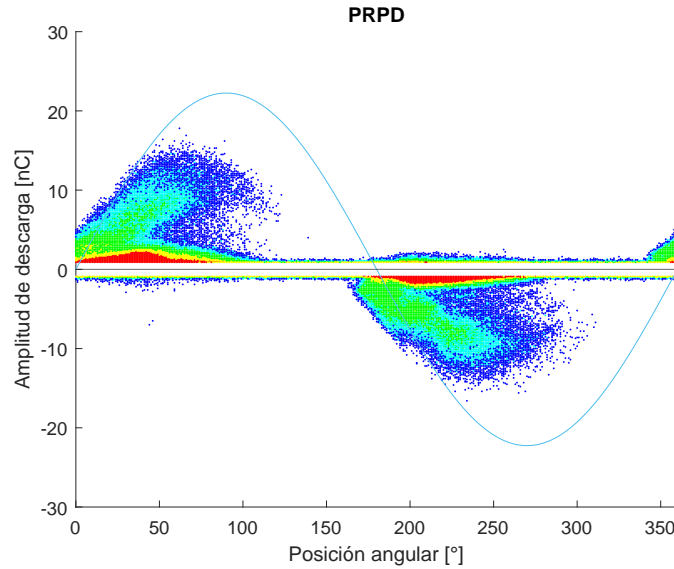


Figura 7: Gráfico PRPD.

Este método no puede ser utilizado para el análisis de DP bajo excitación DC ya que la tensión es constante, entonces no se puede asociar la descarga a una fase, impidiendo el desarrollo del gráfico PRPD.

3.3.2. Análisis PSA

Este método de análisis, a diferencia del PRPD, utiliza la correlación individual de los pulsos de descarga consecutivos obteniendo información característica de las descargas, la cual se pierde cuando se utiliza solo la magnitud y fase. Es por esto que el análisis PSA nos entrega una mejor perspectiva de los parámetros característicos de los defectos [28].

En la construcción de los gráficos PSA se utiliza principalmente la diferencia de tensión entre dos descargas continuas. En la Figura 8 se puede observar gráficamente como se construye, obteniendo en el eje Y la diferencia de tensión Δu_n que corresponde al pulso $n + 1$ menos el n y para el eje X la diferencia de tensión Δu_{n-1} , correspondiente al pulso n menos el $n - 1$.

Este método también se puede modificar utilizando las diferencias de carga $\Delta q_n(\Delta q_{n-1})$ o las diferencias de tiempo $\Delta t_n(\Delta t_{n-1})$ como se utiliza en REF. Esto resulta conveniente para utilizar excitación DC, ya que no se utiliza la tensión para la construcción de gráficos [29].

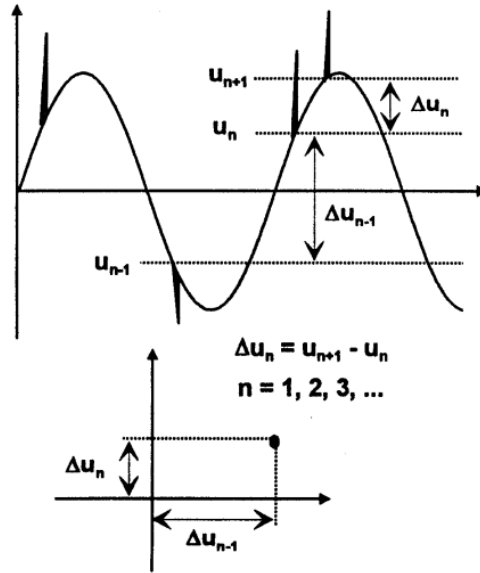


Figura 8: Transformación de una secuencia de descargas a un patrón $\Delta u_n(\Delta u_{n-1})$ [6].

3.3.3. Indicadores Norma IEC60270

La Norma IEC60270 entrega indicadores para evaluar las DP bajo condiciones de excitación DC, estos indicadores son los siguientes:

- Máxima carga aparente registrada Q_{pk} : Corresponde al máximo valor de descarga registrado durante el periodo analizado. También se puede utilizar el indicador Q_{95} que corresponde a la magnitud máxima donde están contenidas el 95 % de las descargas.
- Carga aparente en función del tiempo: Corresponde a la carga aparente q de cada DP en función del periodo de ensayo T a un nivel de tensión DC constante.
- Carga aparente acumulada: Es la suma de la carga aparente q de todas la DP registradas en el periodo de ensayo.
- Tasa de repetición n : Corresponde a la cantidad de DP por unidad de tiempo y se calcula como cuociente entre la cantidad de pulsos N registrados y el periodo de ensayo T .
- Histograma de DP acumulado: Consiste en el recuento acumulado de DP que exceden un nivel de carga q_m .
- Histograma de DP en intervalo: Consiste en el recuento de DP que se encuentran en un intervalo de carga q_{mi}

Estos indicadores no son capaces de identificar tipos de DP pero son útiles para comparar entre distintos objetos de prueba bajo las mismas condiciones. También se utilizan para pruebas de aceptación de fábrica, pruebas de puesta en servicio y monitoreo de equipos de alta tensión en servicio [30].

4. Propuesta Experimental

En esta sección se describe la propuesta experimental que se utilizó para lograr el estudio de las interfaces dieléctricas solidas bajo excitación DC, que consiste en:

1. Diseño y fabricación de probetas de estudio.
2. Habilitación del setup experimental mediante ensayos con excitación AC.
3. Implementar el setup para ensayos con excitación DC.
4. Analizar los datos obtenidos de los ensayos utilizando los métodos de análisis presentados en la sección 3.3 y métodos cualitativos.

4.1. Diseño y fabricación de probetas

Para el desarrollo de esta memoria se necesitó diseñar y fabricar probetas que sean representativas de la interfaz dieléctrica de un aislador compuesto. Para esto se realizó un estudio y recopilación de las principales investigaciones realizadas en interfaces dieléctricas sólidas. En estos estudios se encontraron probetas principalmente rectangulares o cuadradas de distintas dimensiones (ver Figura 9), dos capas de distintos materiales y uso de electrodos planos o filamentosos (conductores rectangulares o agujas) separados por un gap. No se explica la razón de las dimensiones utilizadas pero se supone que son suficientes para observar y estudiar los fenómenos que ocurren en la interfaz dieléctrica.

Para representar la interfaz sólida de un aislador compuesto se decidió utilizar una capa de resina epóxica, representativa del núcleo de GFRP, y una capa de SiR, que representa la cubierta. Las dimensiones que se definieron para cada capa de material sólido de la probeta se presentan en la tabla 2. La resina epóxica utilizada es MEPOX 1124U en relación 2:1 con su catalizador, para el SiR se utilizara RTV XL 8820T en proporción 50:1 con su catalizador.

El proceso de curado que se utiliza para la resina epóxica y el SiR se compone de dos etapas. La primera etapa consiste en un curado por 24 horas a $25^{\circ}C$ para ambos componentes, luego la segunda etapa se aplica solo para la resina epóxica con una etapa de post curado a $50^{\circ}C$ por 15 horas. Ambos materiales se sometieron a un proceso de desgasificación, previo al curado, mediante vacío para evitar burbujas.

Dimensión	Valor [mm]
Largo	100
Ancho	50
Grosor	4

Tabla 2: Dimensiones de cada capa de material sólido de la probeta.

Los electrodos definidos para la probeta son dos electrodos de cobre planos de un grosor de $10\mu m$. El electrodo energizado tiene forma de punta y el electrodo a tierra tiene forma de plano,

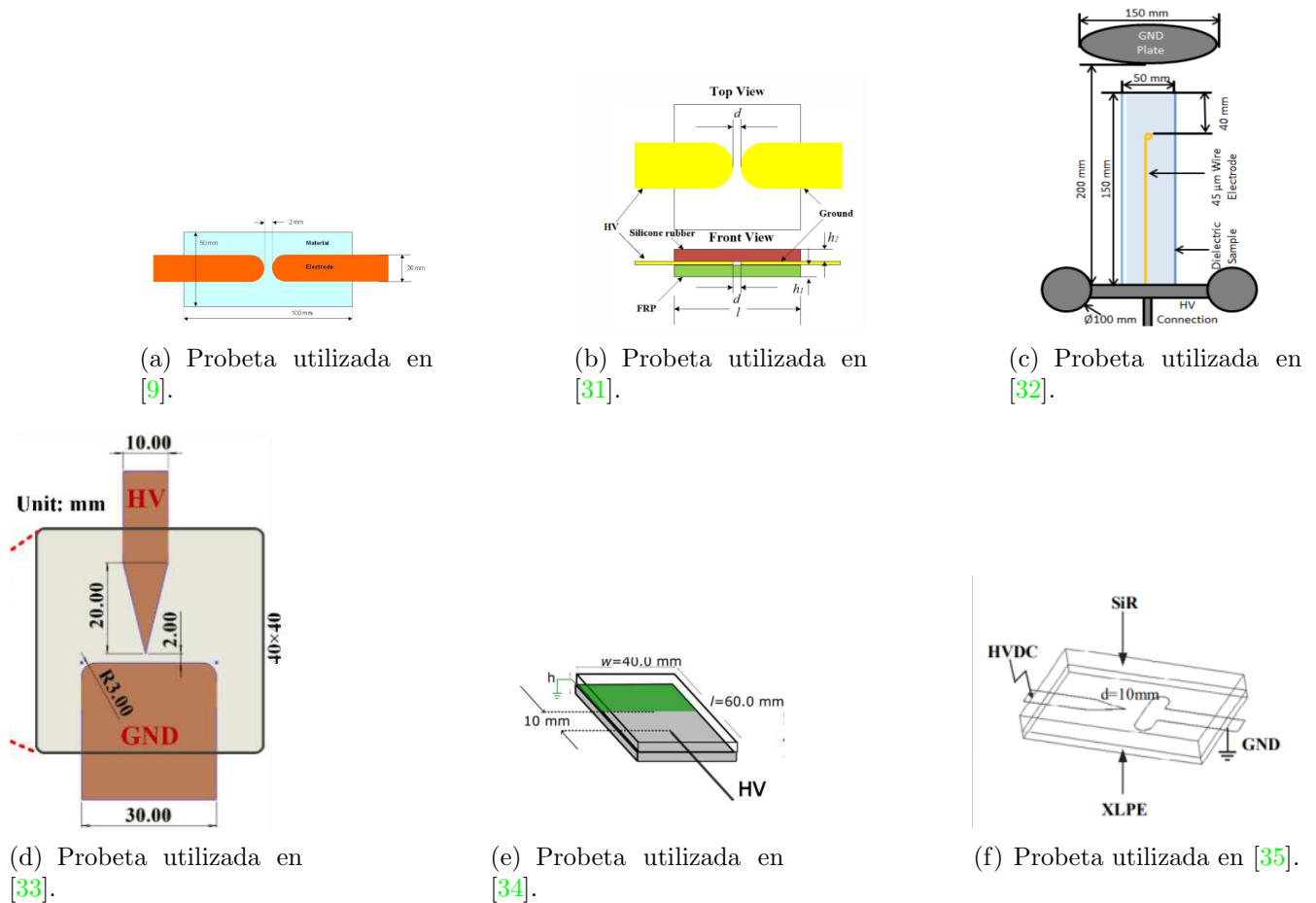


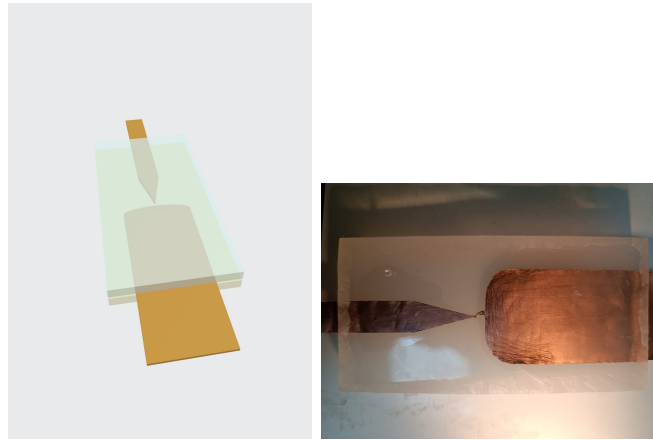
Figura 9: Modelos de probetas utilizadas en distintas investigaciones.

logrando una configuración punta-plano con un gap de 2 mm. En la Figura 10 se muestra un modelo digital de la probeta completa y su geometría (a), y una probeta real utilizada para ensayos (b).

4.2. Setup experimental

Para la medición y adquisición de DP se utilizó el circuito mostrado en la Figura 11. Para lo ensayos con excitación AC se utilizó un generador de señales RIGOL DG-1022 que se conectó a un amplificador de alta tensión Trek 20/20C-HS de ganancia 1:2000 (ver Figura 12 (a)). Para los ensayos con excitación DC se utilizó el equipo BAUR VLF Frida (ver Figura 12 (b)), el cual puede generar tensión DC en polaridad positiva y negativa. El amplificador de alta tensión tiene la capacidad de alcanzar hasta 14 kV_{rms} si la señal de entrada es sinusoidal, mientras que el equipo BAUR VLF logra alcanzar una tensión DC de 34 kV .

El circuito también cuenta con una resistencia R_x de $1M\Omega$ en serie al electrodo punta, mientras que el electrodo plano se encuentra aterrizado. Para la medición y adquisición de descargas parciales en la probeta se utilizó un sensor HFCT Techimp de un ancho de banda de 1-80 MHz y



(a) Modelo de la probeta. (b) Probeta utilizada para ensayos (presenta ruptura dieléctrica).

Figura 10: Modelo digital de la probeta (a) y probeta utilizada en ensayo (b).

el equipo OMICRON MPD600. Para la adquisición de imágenes de la interfaz estudiada se utilizó una cámara fotográfica Canon T6 reflex con un lente macro MP-E 65mm f/2.8 1-5X.

Al momento de ensayar las probetas, estas se someten a una presión uniforme (no cuantificada). Esto se realizó para disminuir el espacio de aire que queda en el borde del electrodo debido al pequeño grosor de este, aunque no fue posible eliminarlo completamente.

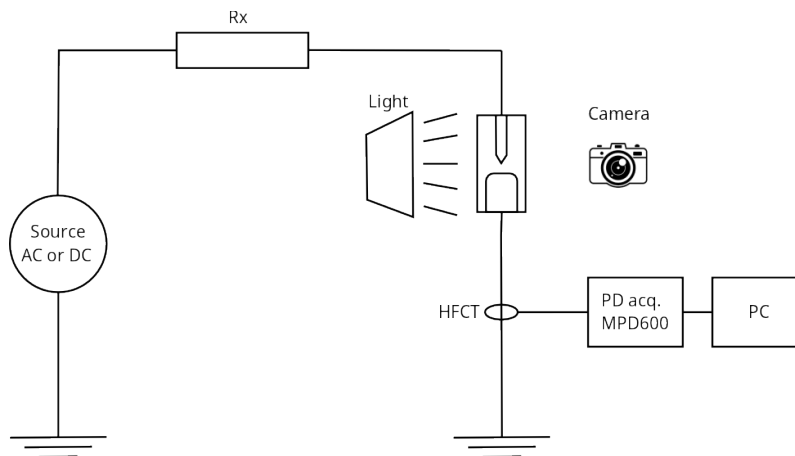


Figura 11: Circuito para medición y monitoreo de DP

4.3. Ensayos

Se realizaron un total de trece ensayos distintos, tres corresponden a ensayos con excitación AC y diez con excitación DC en polaridad negativa. Se definió esta polaridad para los ensayos debido a que la iniciación de descargas parciales comienza a menor tensión en polaridad negativa respecto a



(a) Amplificador de alta tensión Trek.



(b) BAUR VLF Frida.



(c) Probeta y sistema de adquisición de imágenes.

Figura 12: Equipos utilizados en el setup experimental.

polaridad positiva [20], y un mayor nivel de tensión podría inducir ruido en las mediciones debido a las conexiones del setup. Además, la fuente disponible limita la tensión que se puede aplicar a $\pm 34kV$. En la tabla 3 se resumen los ensayos realizados para ambas excitaciones. La tensión aplicada que se reporta en la tabla 3 corresponde al valor RMS de la forma de onda sinusoidal. Estos ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Técnica Federico Santa María, campus Casa Central, Valparaíso.

Los ensayos consisten en aumentar la tensión aplicada a la probeta de forma escalonada cada cierto tiempo definido, denominado Tiempo de preconditionamiento, hasta observar crecimiento de tracking en la interfaz, a la tensión final se le denominó “Tensión de ensayo”. Esta tensión de ensayo se mantiene hasta que ocurra la ruptura dieléctrica, en caso de no ocurrir se registran datos por cinco minutos. Además para la excitación DC se propuso realizar algunos ensayos de escalón simple de mayor magnitud (ensayos DC7 y DC8) e inversión de polaridad (ensayos DC9 y DC10).

Los tres ensayos con excitación AC se realizaron para corroborar el correcto funcionamiento del setup y probetas fabricadas, además los datos obtenidos de estos ensayos nos entregan una referencia para poder comparar el comportamiento de las DP bajo distinta excitación.

Ensayo	Tipo ensayo	Tiempo preconditionamiento [min]	Escalón de tensión [kV]	Tensión inicial [kV]	Tensión de ensayo [kV]	Ruptura
AC1	Escalones	2	1	1	9	Si
AC2	Escalones	2	1	1	10	Si
AC3	Escalones	2	1	1	11	Si
DC1	Escalones	2	-1	-1	-19	Si
DC2	Escalones	4	-1	-1	-19	Si
DC3	Escalones	5	-1	-10	-22	Si
DC4	Escalones	30	-1	-6	-25	Si
DC5	Escalones	2	-1	-15	-25	Si
DC6	Escalones	2	-1	-15	-34	No
DC7	Escalón	5	-13	-10	-23	No
DC8	Escalón	5	-14	-10	-24	No
DC9	Inversión de polaridad	5	-40	20	-20	No
DC10	Inversión de polaridad	5	-44	22	-22	No

Tabla 3: Resumen de ensayos realizados con ambas excitaciones.

4.4. Métodos de análisis

Se utilizaron dos estrategias complementarias para el análisis de los datos de DP obtenidos mediante los ensayos realizados. Primero se realizó un análisis global de las DP que ocurren desde que se establece la tensión de ensayo hasta que ocurre la ruptura dieléctrica. Si no ocurre ruptura entonces se considera hasta que se detiene el ensayo. Para esto se extraen los parámetros principales mencionados en la sección 3.3.3 permitiendo caracterizar el comportamiento de las DP. Otro parámetro que se considerará es el tiempo a la ruptura (TTB).

La segunda estrategia consiste en comparar el estado inicial de las descargas (cuando se establece la tensión de ensayo) y el estado final (previo a la ruptura dieléctrica) de cada ensayo permitiendo analizar la evolución del comportamiento de las DP y analizar si existe alguna tendencia que permita predecir la ocurrencia de ruptura dieléctrica. Para esto se seleccionan un set de 800 DP correspondientes a los estados inicial y final. Para ciertos ensayos hubieron pocas DP por lo que se seleccionaron menos DP para estos set de datos.

Adicional a la segunda estrategia, se utilizaron gráficos PSA presentando gráficas de diferencias de carga y diferencias de tiempo, los cuales proveen información de la dinámica de las DP en la etapa inicial y final. Por último, mediante la adquisición de imágenes de la probeta, se estudió la evolución de la degradación de la interfaz dieléctrica. Esto permitió tener confirmación visual de la degradación generada por la actividad de DP y sirvió como apoyo para la interpretación del análisis realizado.

5. Resultados y análisis

En esta sección se presentan los resultados y análisis realizados a los datos adquiridos de los ensayos realizados en laboratorio, aplicando las estrategias de análisis mencionadas en la sección 4.4.

5.1. Análisis PRPD de los ensayos bajo excitación AC

En la Figura 13 se presentan los gráficos PRPD de los ensayos en AC.

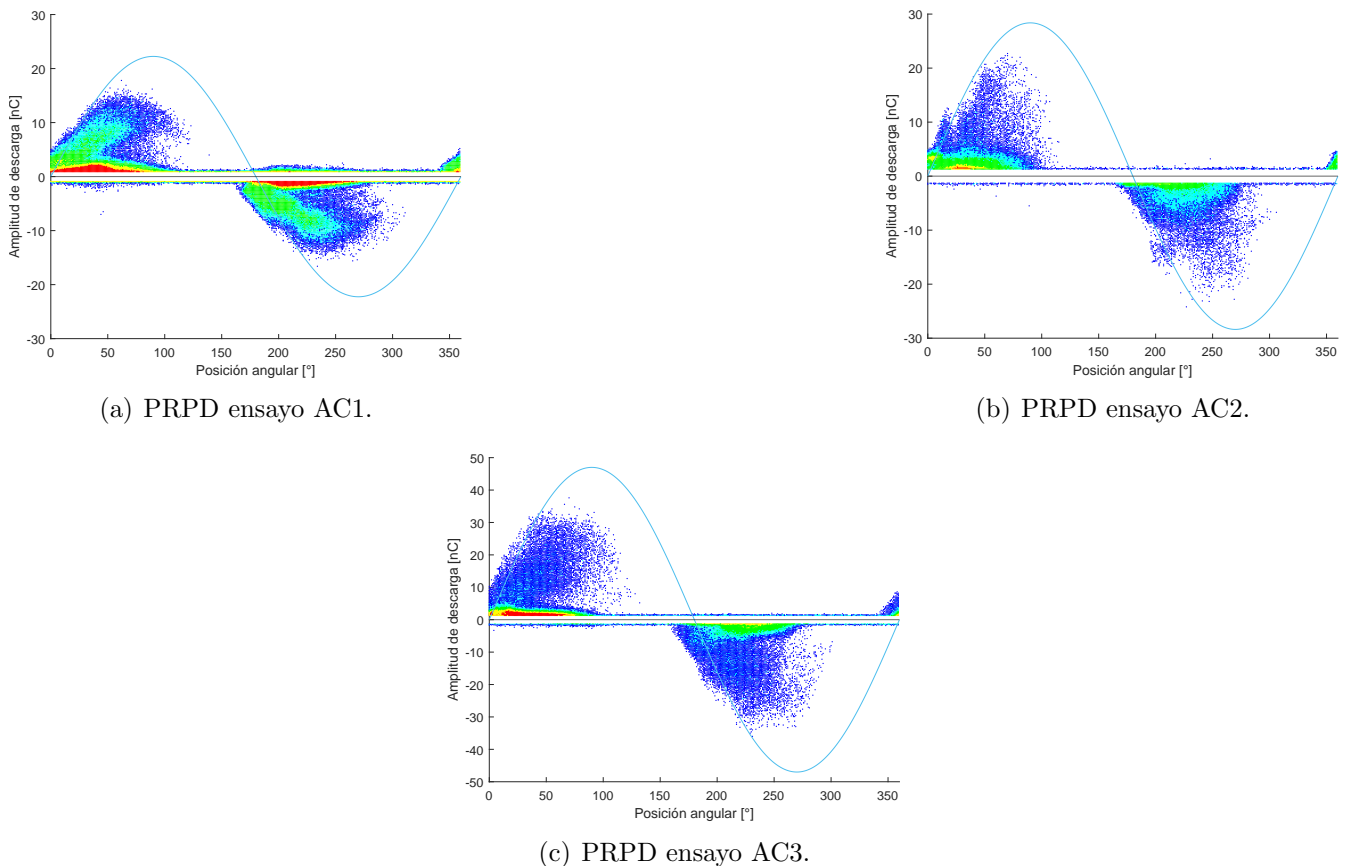


Figura 13: Gráficos PRPD de los ensayos.

Se observaron en los gráficos, patrones similares a los mostrados en la literatura presentada en [36] correspondientes a una mezcla de descargas superficiales, tracking interno y microcavidades. Esto es consistente con los fenómenos que ocurren en la interfaz dieléctrica, donde se produce concentración de campo debido a las irregularidades de la interfaz y formación de microcavidades, lo que gatilla las DP. Se observó también que la forma de los patrones PRPD son relativamente simétricas para el semiciclo positivo y negativo, y que la magnitud de las DP es mayor en el ensayo AC3 el cual tuvo la mayor tensión de prueba de los tres ensayos.

5.2. Análisis global de las DP

Los resultados globales de las DP se muestran en la Tabla 4. Además se presentan en forma gráficos correspondientes a la carga aparente en función del tiempo, carga aparente acumulada en el tiempo, histograma de DP acumulada e histograma de DP en intervalos para cada ensayo.

Ensayo	Tensión Ensayo [kV]	TTB [s]	Q_{95} [nC]	n [descargas/ s]	Carga acumulada [μC]
AC1	9	595	8.3	841	1165
AC2	10	110	8.3	999	350
AC3	11	272	13.6	994	944
DC1	-19	300	1.4	6	1
DC2	-19	120	7.3	6	2
DC3	-22	240	1.8	14	4
DC4	-25	1080	1.3	14	6
DC5	-25	117	6.4	8	2
DC6	-34	NA	1.8	9	3
DC7	-23	NA	3.2	13	6
DC8	-24	NA	1	21	3
DC9	-20	NA	3.1	25	10
DC10	-22	NA	2.7	9	4

Tabla 4: Resumen de los parámetros obtenidos de los ensayos.

Se observó que la “Tensión de ensayo” establecida para los ensayos en DC es aproximadamente el doble que para los ensayos en AC. Para los ensayos en AC la tensión fue de 9 a 11 kV_{rms} mientras que para los ensayos en DC estuvieron en un rango de -19 a -34 kV .

Los valores de TTB (para los ensayos que tuvieron ruptura dieléctrica) reportados en la Tabla 4 se encuentran entre los 110 y 596 segundos, a excepción del ensayo DC4 que tiene un TTB de 1080 segundos. No se observó una tendencia clara respecto a los valores de TTB a pesar de las diferentes tensiones de ensayo. Con respecto al ensayo DC4, es el que tiene mayor Tiempo de preacondicionamiento (30 minutos) por lo que esto sugiere que el tiempo de preacondicionamiento podría influenciar directamente el TTB bajo excitación DC. Para los ensayos DC7, DC8, DC9 y DC10 (ensayo escalón e inversión de polaridad) no ocurrió ruptura dieléctrica.

Con respecto a la tasa de repetición, se observó que es significativamente menor en los ensayos con excitación DC, aproximadamente un 1% del valor de la tasa de repetición de los ensayos en AC. Esta tendencia es consistente con lo presentado en la sección 3.2.1, en la cual también se indica que la magnitud de las DP bajo excitación DC tiende a ser menor. La magnitud de las descargas es consistentemente menor bajo excitación DC, el promedio de Q_{95} para los ensayos bajo excitación DC es aproximadamente un 70% menor respecto a los ensayos en AC.

Consistente con los valores de tasa de repetición y Q_{95} , el valor de carga acumulada de los ensayos en DC es aproximadamente un 99.5% menor al de los ensayos en AC, lo cual es una diferencia significativa pero esperable si se considera que bajo excitación DC ocurren menos DP y

son de menor magnitud.

5.2.1. Gráficos ensayos AC

Las Figuras 14(a), 15(a) y 16(a) presentan el comportamiento de las DP en el tiempo. Para el ensayo AC1 se observó que la magnitud de las DP comienza a aumentar hasta los 100 segundos aproximadamente y luego se mantiene variando en magnitud pero sin aumentar considerablemente hasta el final del ensayo. Para los ensayos AC2 y AC3 las magnitud de las DP aumentan sostenidamente hasta el final del ensayo.

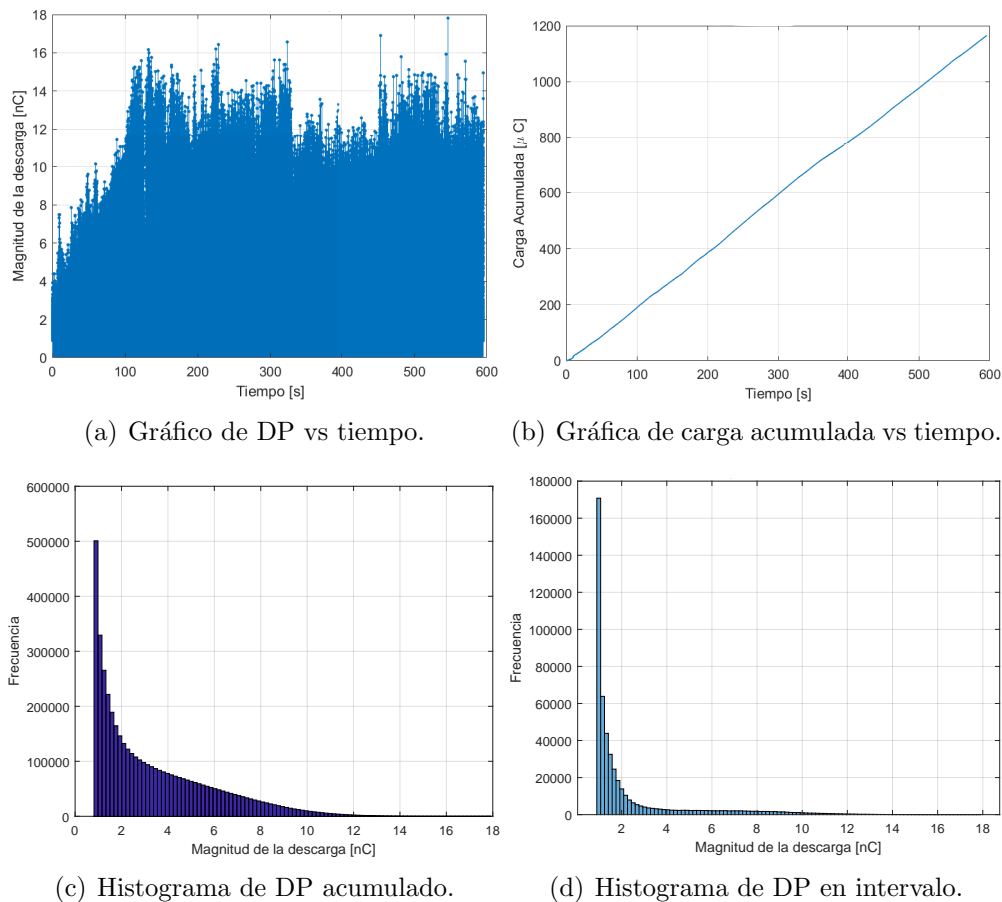
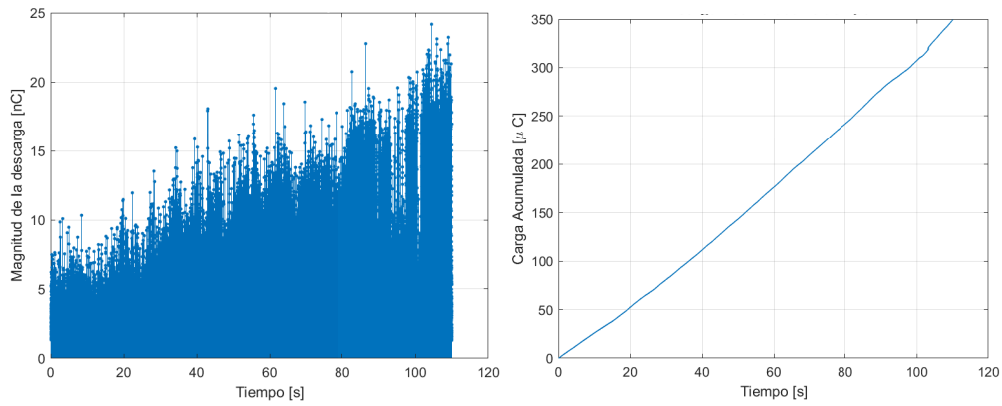


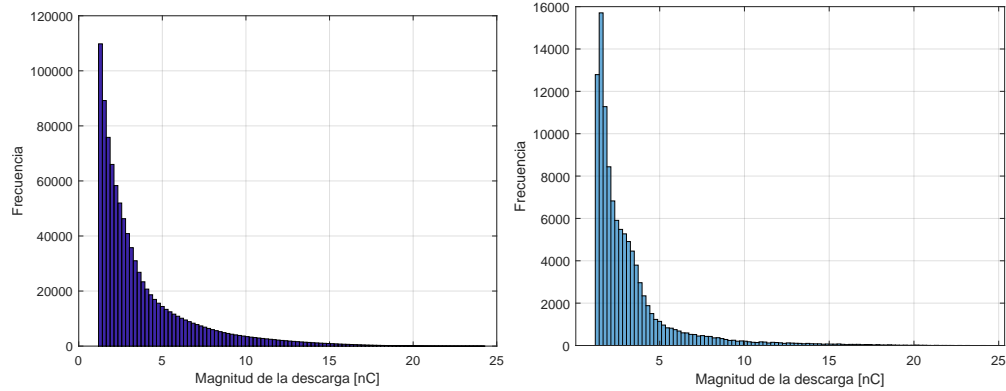
Figura 14: Gráficos ensayo AC1.

Las Figuras 14(b), 15(b) y 16(b) muestran la acumulación de carga durante los ensayos, donde se observó como aumenta la carga acumulada hasta alcanzar los valores reportados en la tabla 4. Se observó que la forma de la curva indica cuando hay aumentos o disminución de la actividad de descargas, pero debido a la gran cantidad de datos que entregan los ensayos AC, la curva tiende a ser suave.



(a) Gráfico de DP vs tiempo.

(b) Gráfica de carga acumulada vs tiempo.

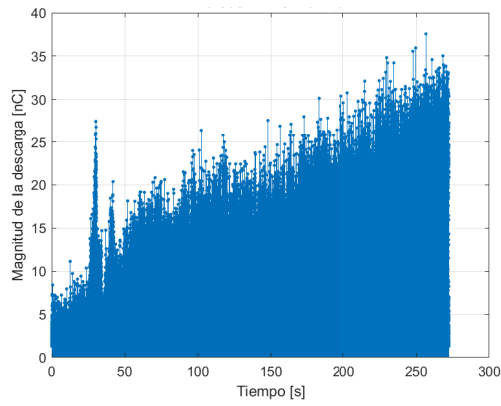


(c) Histograma de DP acumulado.

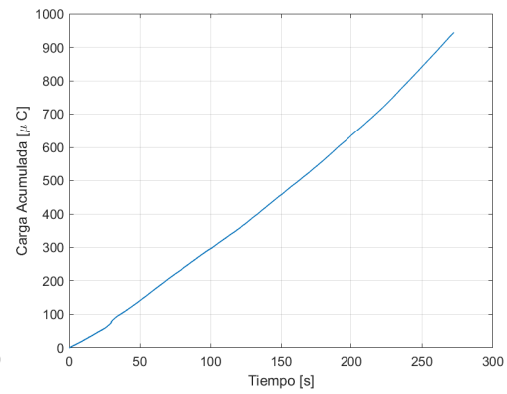
(d) Histograma de DP en intervalo.

Figura 15: Gráficos ensayo AC2.

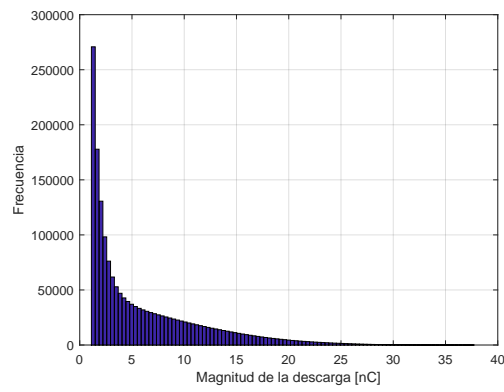
Por último, las Figuras 14(c), 14(d), 15(c), 15(d), 16(c) y 16(d) evidencian que la mayoría de las DP ocurren bajo los 2 nC para el ensayo AC1 y bajo los 5 nC para los ensayos AC2 y AC3. Luego de ese valor las DP disminuyen. Se evidenció que la frecuencia de las DP disminuye a medida que aumenta su magnitud. Estos gráficos corresponden a el Histograma de DP acumulado y en intervalo respectivamente. El primero representa el recuento acumulado de descargas sobre cierto umbral, y el segundo representa el recuento de descargas en un intervalo.



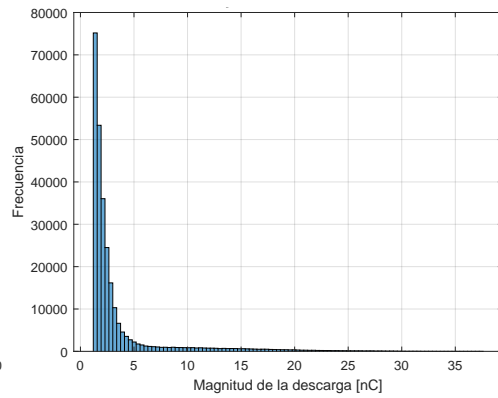
(a) Gráfico de DP vs tiempo.



(b) Gráfica de carga acumulada vs tiempo.



(c) Histograma de DP acumulado.



(d) Histograma de DP en intervalo.

Figura 16: Gráficos ensayo AC3.

5.2.2. Gráficos ensayos escalones DC

Desde la Figura 17 hasta la Figura 22 se presentan los cuatro gráficos, mencionados en la sección anterior, para los ensayos escalones DC.

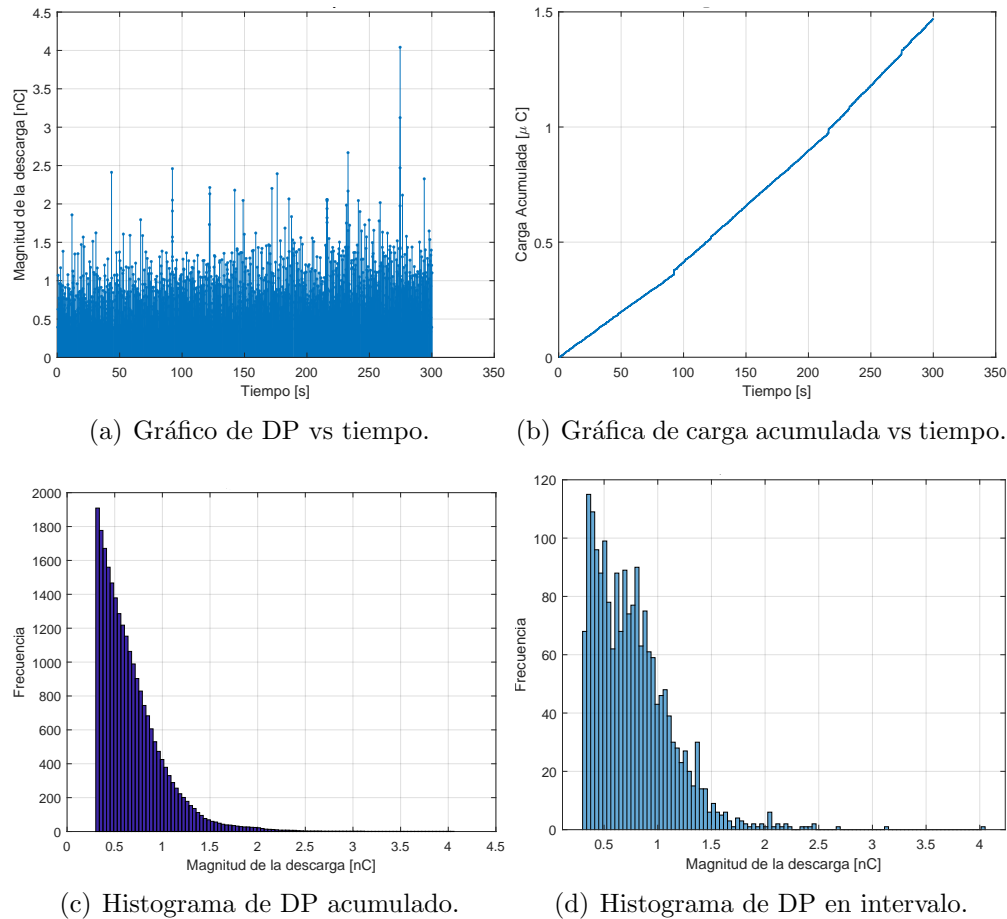


Figura 17: Gráficos ensayo DC1.

Para el ensayo DC1 se puede observar en la Figura 17(a) que el comportamiento de las DP en el tiempo, a diferencia de lo visto en AC, se mantiene casi estable sin un incremento notorio y con peaks de DP cada ciertos instantes de tiempo. Esto se ve reflejado en la Figura 17(b) donde se observan tramos lineales con saltos entre ellos, correspondientes a los peaks que ocurren durante el ensayo. En el histograma de intervalos la frecuencia de las descargas no sigue un decaimiento progresivo (contrario a lo que ocurría en AC), se observa un patrón errático en la frecuencia de las DP según su magnitud. Estas se concentran principalmente hasta 1.5 nC .

Para el ensayo DC2, se observó en la Figura 18(a) que las DP en el tiempo van ocurriendo mayormente con una magnitud alrededor de 3 nC y con menos frecuencia con magnitudes mayores. Este comportamiento se observa también en los histogramas, los cuales muestran que la frecuencia de las descargas se concentra principalmente en 3 nC . La curva de acumulación de carga (Figura 18(b)) tiene una forma lineal pero más escalonada, evidenciando que los peaks de magnitud son

mas regulares en el tiempo.

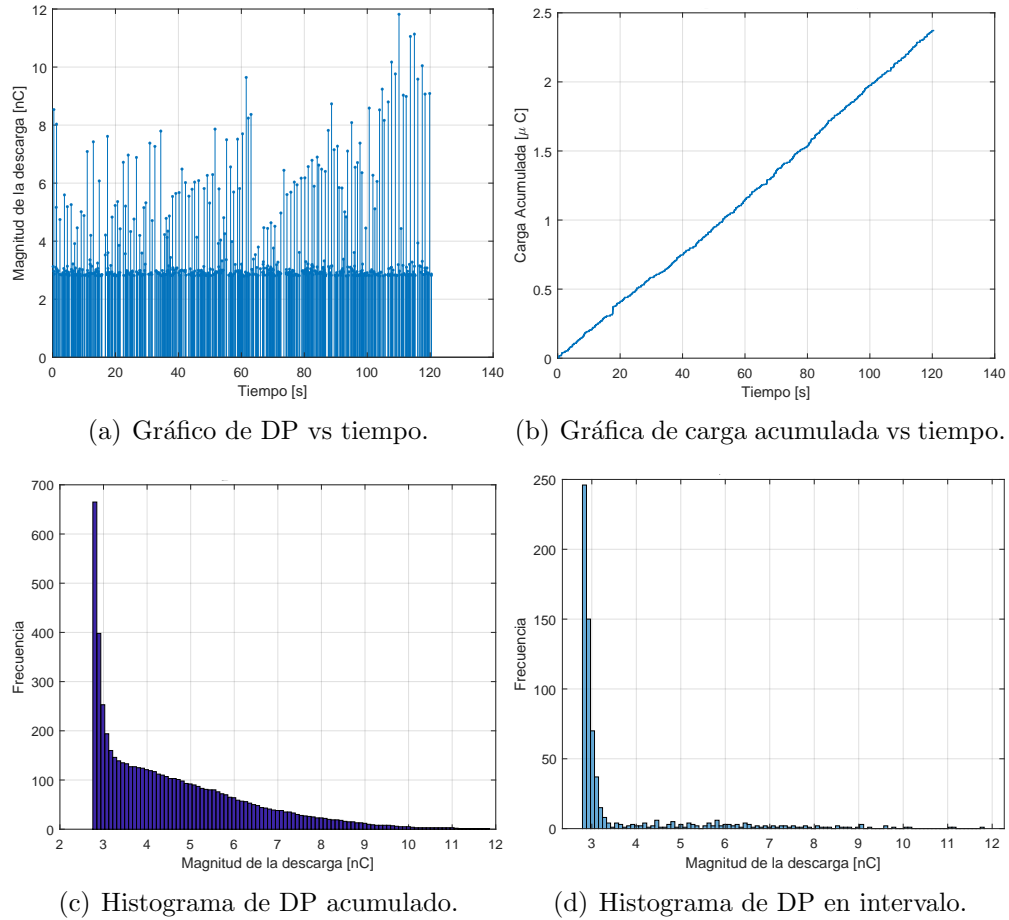
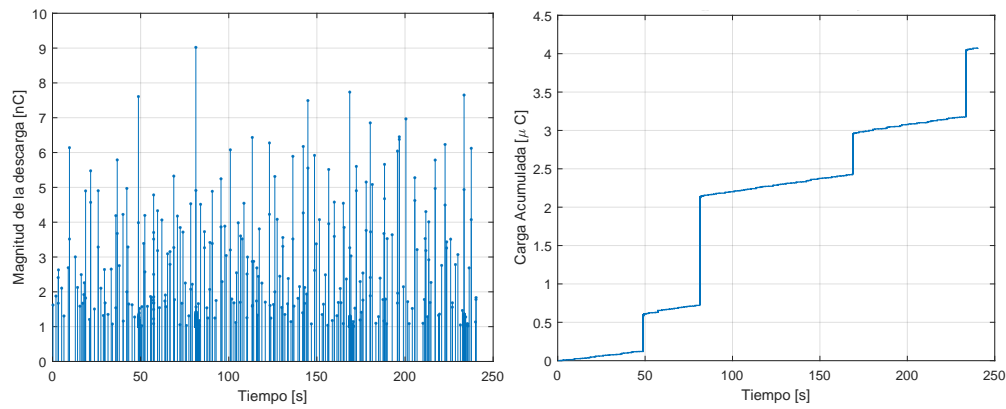


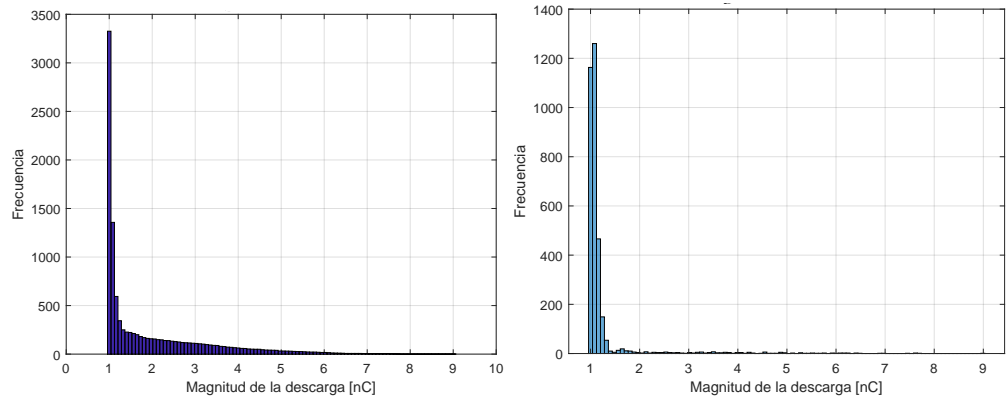
Figura 18: Gráficos ensayo DC2.

En el ensayo DC3 el comportamiento de las DP en el tiempo (19(a)) es errático y con distintas magnitudes. Con la Figura 19(b) se identificaron cuatro instantes del ensayo donde se concentraron la mayoría de las descargas, estas son en los segundos 50, 80, 170 y 230. Por lo observado en los histogramas se evidencia que estas concentraciones de descargas corresponden en su mayoría a descargas entre 1 y 1.5 nC.



(a) Gráfico de DP vs tiempo.

(b) Gráfica de carga acumulada vs tiempo.

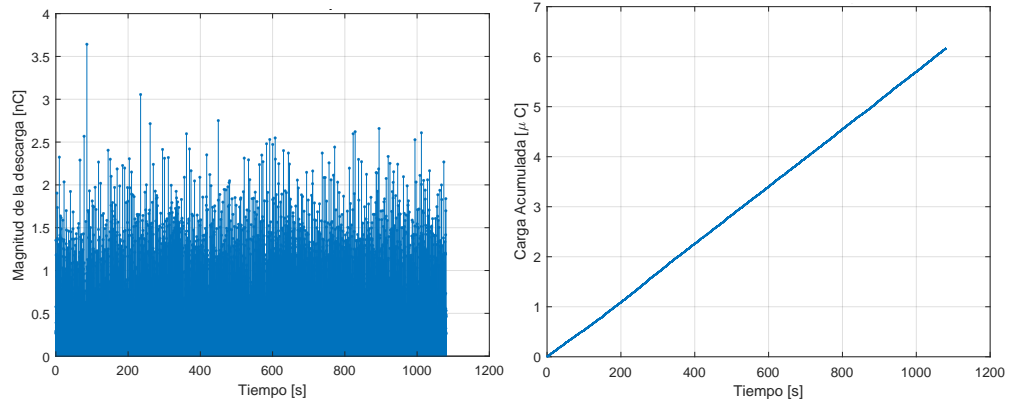


(c) Histograma de DP acumulado.

(d) Histograma de DP en intervalo.

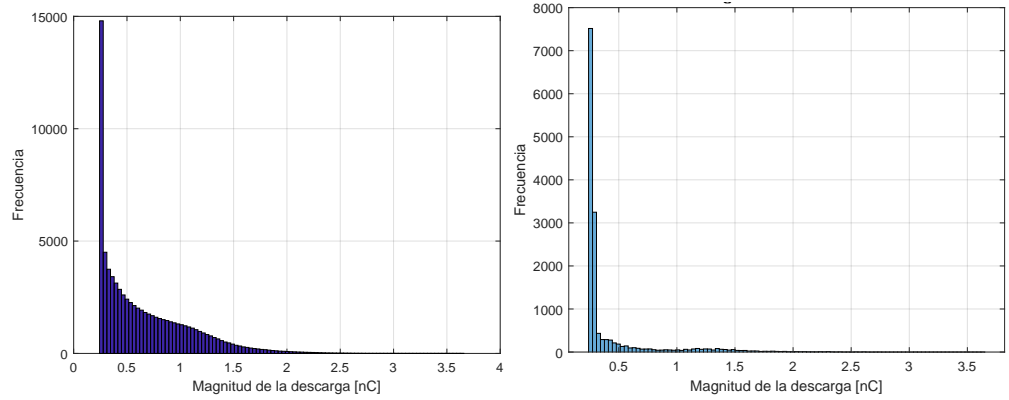
Figura 19: Gráficos ensayo DC3.

El ensayo DC4 es el ensayo de mayor duración, en la Figura 20(a) se observaron descargas de baja magnitud en general sin un notable incremento en la magnitud de las descargas, excepto por algunos peaks entre los 2 y 3.6 nC. Como se puede notar en los histogramas la mayoría de las descargas no superan los 0.4 nC. La acumulación de carga ocurre de forma lineal en el tiempo, como se puede observar en la Figura 20(b).



(a) Gráfico de DP vs tiempo.

(b) Gráfica de carga acumulada vs tiempo.



(c) Histograma de DP acumulado.

(d) Histograma de DP en intervalo.

Figura 20: Gráficos ensayo DC4.

En el ensayo DC5, con la observación de las Figuras 21(a) y (b) se puede notar cuatro zonas donde se concentran descargas, estas son en los segundos 4, 45, 63 y 90. Se observaron también descargas de mayor magnitud pero son menos frecuentes. Los histogramas muestran que gran concentración de las descargas se encuentran entre 1 y 2 nC y luego disminuyen.

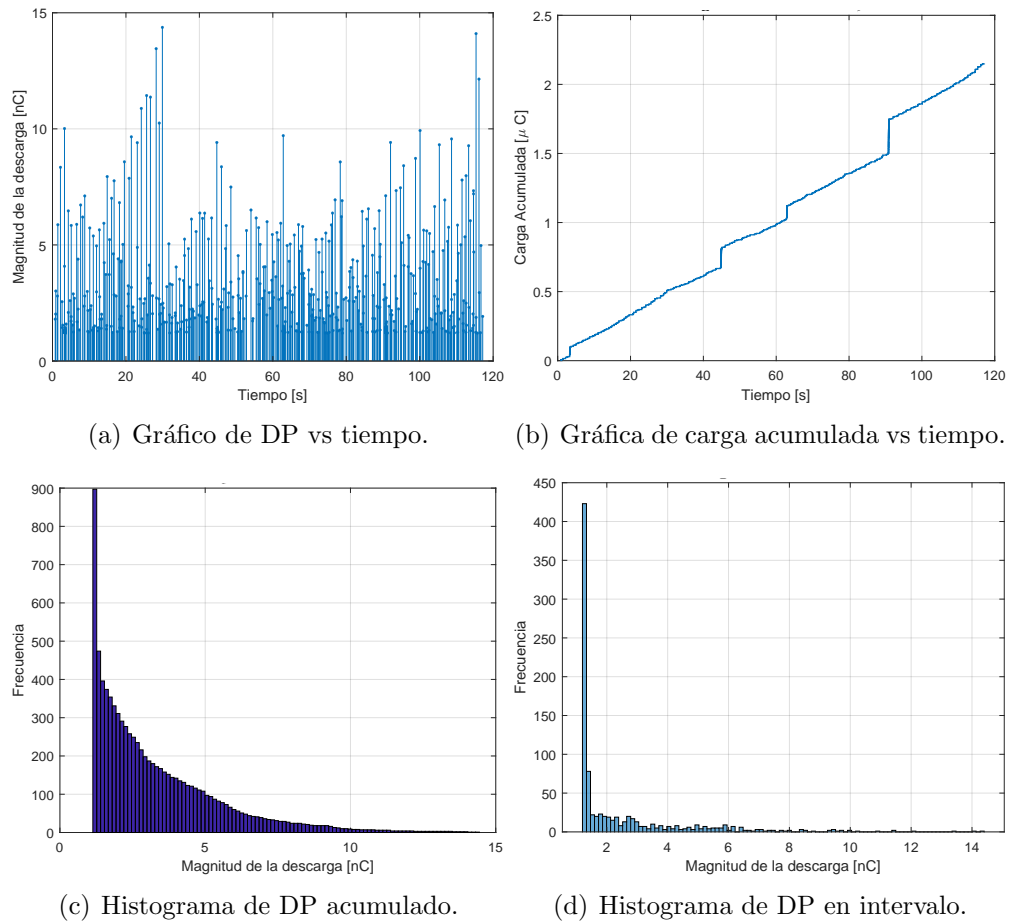


Figura 21: Gráficos ensayo DC5.

En el ensayo DC6 se observó en la Figura 22(a) y (b) que existe una gran concentración de descargas antes de los 100 segundos de ensayo, además de cuatro descargas puntuales de magnitud mayor a 10 nC . Los histogramas muestran que la concentración de las descargas ocurre entre 1 y 2 nC .

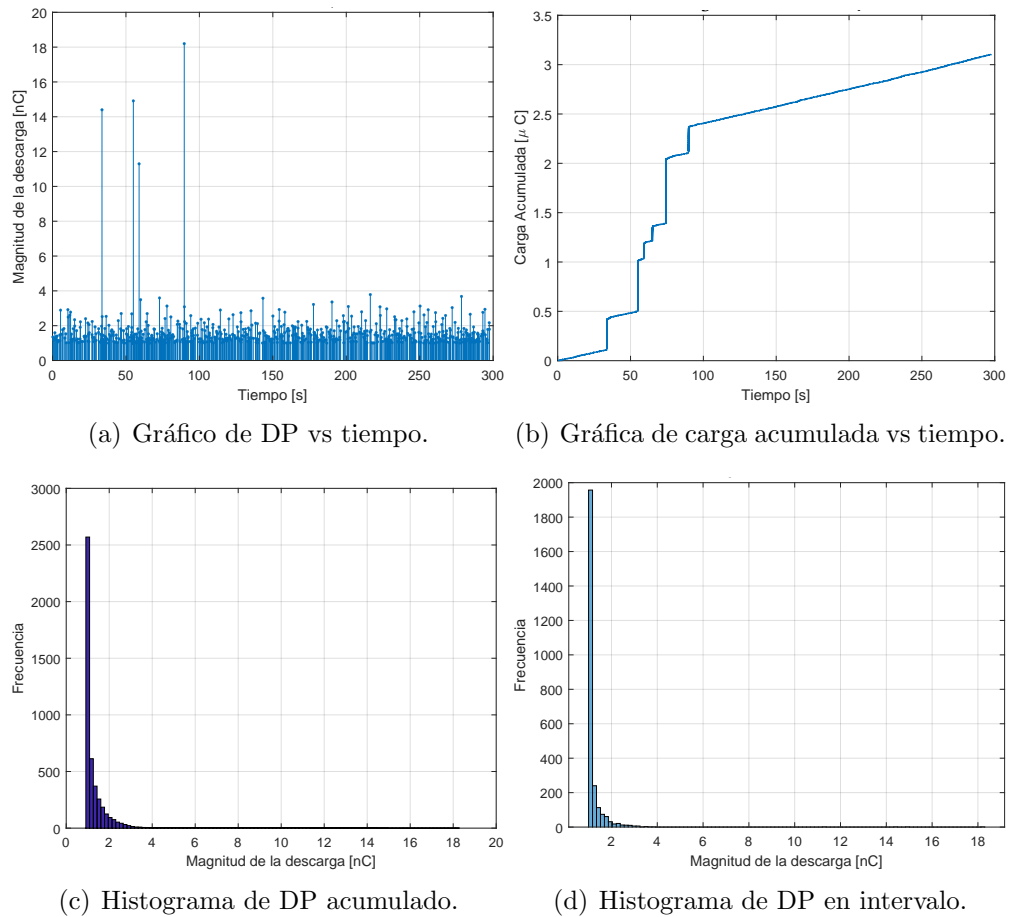


Figura 22: Gráficos ensayo DC6.

La observación y análisis de los gráficos de los ensayos escalones DC no mostró señales de seguir una tendencia clara o algún patrón repetitivo en el comportamiento de las DP en el tiempo, es más bien errático en su comportamiento. En los ensayos DC3, DC5 y DC6 se observó mediante el gráfico de acumulación de carga, zonas donde existe una gran concentración y acumulación de carga, indicada por los grandes saltos identificados en la curva. Por último se observó que las descargas generalmente son más frecuentes en magnitudes menores.

5.2.3. Gráficos ensayos escalón DC

En el ensayo DC7 y DC8 se aplicó un solo escalón y se registro la actividad de DP. Se observó que el ensayo DC7 tuvo descargas de mayor magnitud que el ensayo DC8. Como muestran las Figuras 23(a) y 24(a), el comportamiento de las DP es similar en el tiempo de ensayo solo que a diferente escala. Se identificó con las Figura 23(b), en el ensayo DC7, una concentración de descargas cercana a los 50 segundos. Este comportamiento no se observó en el ensayo DC8. Los histogramas muestran que gran parte de las descargas se concentran en magnitudes de descargas bajas respecto al valor máximo de cada ensayo, ya que para el ensayo DC8 la magnitud de las DP son bastante menores respecto al ensayo DC7.

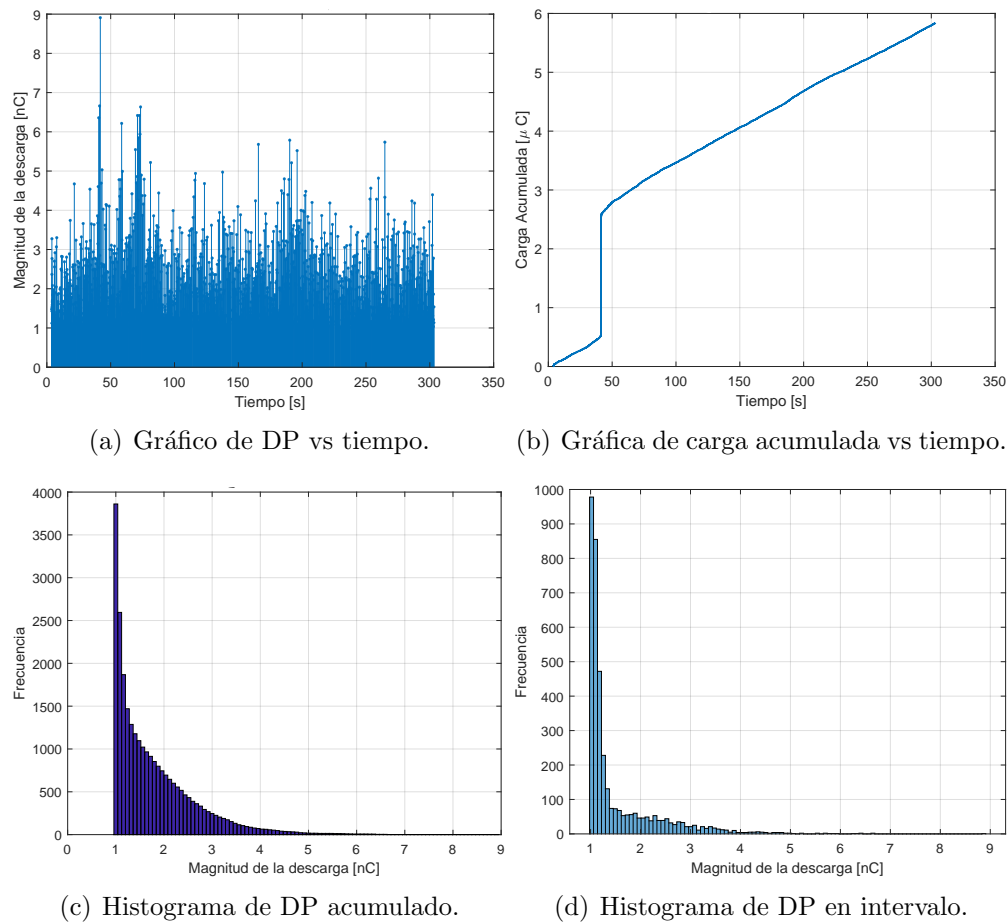
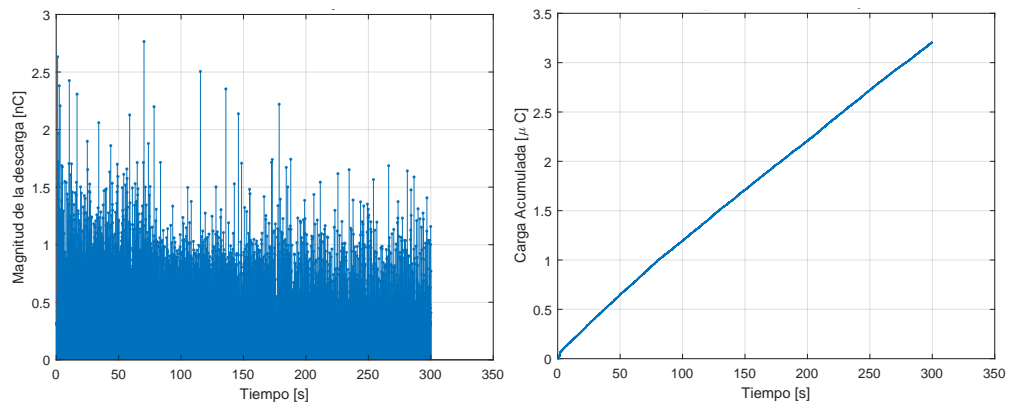
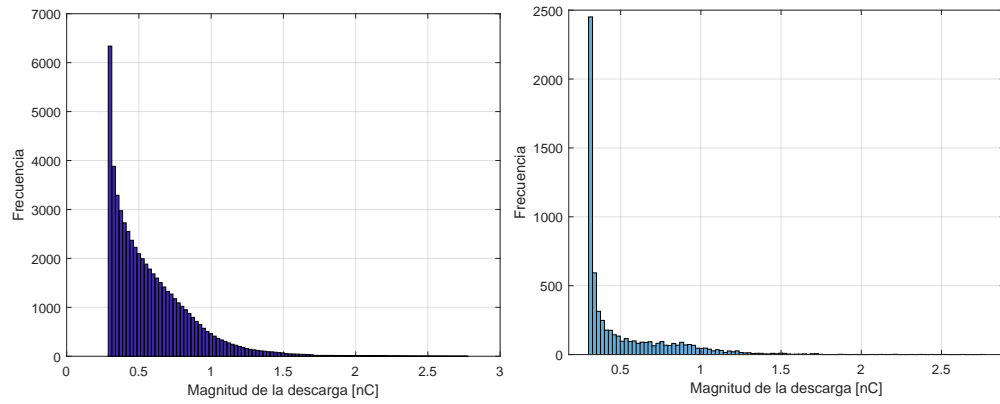


Figura 23: Gráficos ensayo DC7.



(a) Gráfico de DP vs tiempo.

(b) Gráfica de carga acumulada vs tiempo.



(c) Histograma de DP acumulado.

(d) Histograma de DP en intervalo.

Figura 24: Gráficos ensayo DC8.

5.2.4. Gráficos ensayos cambio de polaridad DC

En los ensayos DC9 y DC10 se realizó un cambio de polaridad para luego registrar la actividad de DP. Esto significa que se llevó la tensión desde polaridad positiva a la misma magnitud pero en polaridad negativa.

En el ensayo DC9 se observó en la Figura 25(a) un comportamiento donde las descargas se concentran en peaks cada ciertos periodos del ensayo. En la curva de acumulación de carga, mostrada en la Figura 25(b), se logró identificar estas zonas y mostró una curva escalonada. Para este ensayo la frecuencia de las descargas es mayor en magnitudes bajas entre 1 y 1.5 nC .

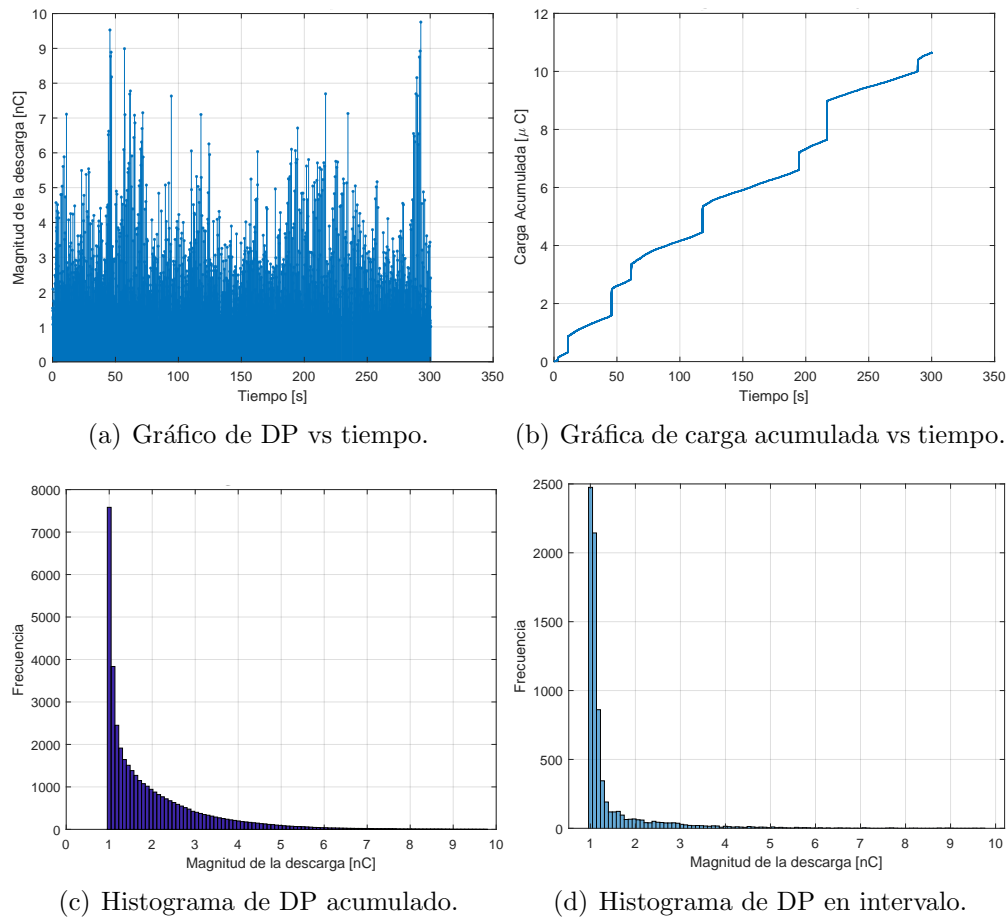
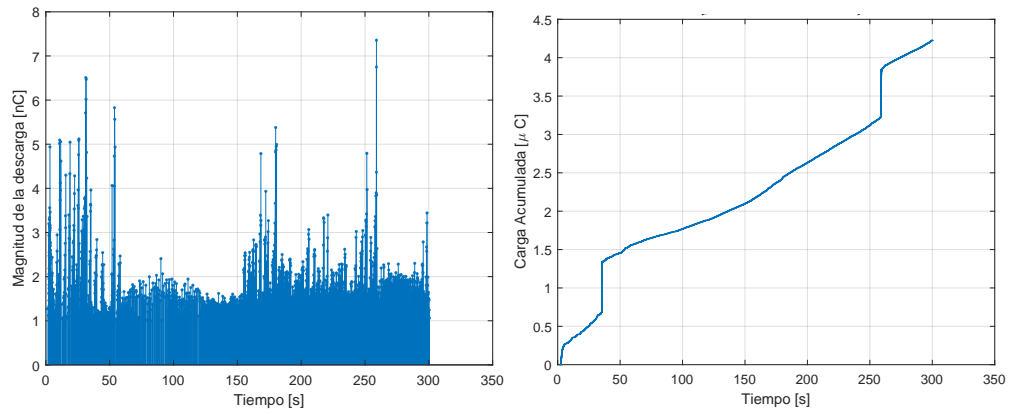


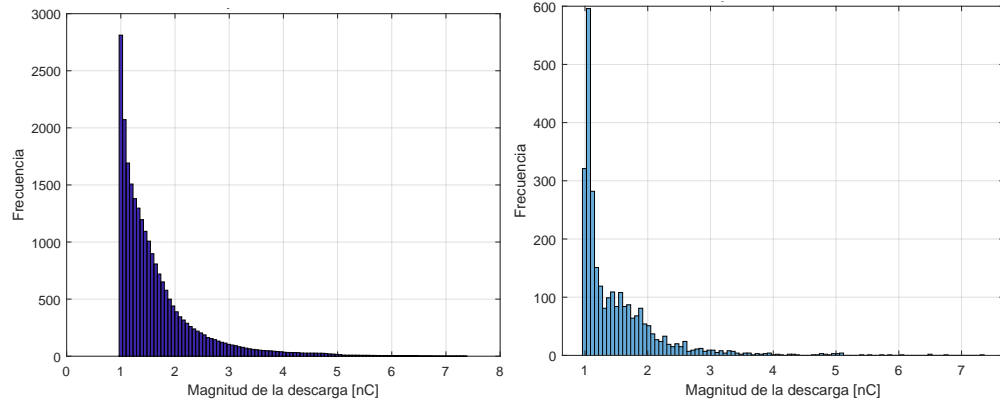
Figura 25: Gráficos ensayo DC9.

Por último en el ensayo DC10 la Figura 26(a) se observó que en los primeros 50 segundos del ensayo existen descargas de mayor magnitud, luego se observó una zona de baja magnitud de descargas hasta el segundo 150 aproximadamente. Luego de ese tiempo retorna el comportamiento de peaks de magnitud. En la Figura 26(b) se observa que los aumentos de acumulación de carga ocurren en la mismas zonas donde existe mayor actividad de descargas, en los segundo 40 y 250 aproximadamente. Los histogramas muestran mayor frecuencia de descargas entre 1 y 2 nC .



(a) Gráfico de DP vs tiempo.

(b) Gráfica de carga acumulada vs tiempo.



(c) Histograma de DP acumulado.

(d) Histograma de DP en intervalo.

Figura 26: Gráficos ensayo DC10.

5.3. Comparación entre estado inicial y final del ensayo

La Tabla 5 entrega los parámetros principales para el estado inicial 1 (cuando se establece la Tensión de ensayo) y el estado final 2 (previo a la ruptura dieléctrica) para cada ensayo. También se presentan los histogramas de DP en intervalos, los gráficos PSA de diferencias de carga y diferencias de tiempo.

Para los ensayos AC se observa que el valor de Q_{95} aumenta significativamente hacia el final para los tres ensayos, indicando que existe un aumento en la magnitud de las descargas. La tasa de repetición disminuyó para el ensayo AC1 y AC3, mientras que aumentó para el ensayo AC2. La carga acumulada en el final del ensayo aumentó para los tres ensayos. La duración de los intervalos iniciales t_1 y finales t_2 se encuentra en el orden de un segundo aumentando en AC1 y AC3 respecto al intervalo inicial, disminuyendo para el ensayo AC2.

Para los ensayos escalones DC (DC1 hasta DC6) no se observó una variación significativa en el valor de Q_{95} , se notó un ligero aumento en los ensayos DC1, DC2, DC4 y DC6, mientras que disminuyó ligeramente para los ensayos DC3 y DC5. La tasa de repetición, que ya es considerablemente baja, no mostró variaciones significativas excepto por el ensayo DC6 que disminuyó de 26 a 4 *descargas/s*. La carga acumulada se mantiene constante para los ensayos excepto para los ensayos DC2, DC5 y DC6, donde aumenta $0.5 \mu C$, disminuye $0.2 \mu C$ y aumenta $0.1 \mu C$ respectivamente. El tiempo de duración de los intervalos finales e iniciales es del orden de un minuto, para los ensayos DC1, DC5 y DC6 varía en 15, -50 y 170 segundos respecto al intervalo inicial, para los demás ensayos se mantiene constante. En general se observó que los parámetros principales se mantienen constante entre el comienzo y el final del ensayo.

En los ensayos escalón (DC7 y DC8) el valor de Q_{95} aumentó en $1 nC$ para el ensayo DC7 y disminuyó en $0.3 nC$ para el ensayo DC8. La tasa de repetición para el ensayo DC7 disminuyó de 24 a 6 *descargas/s*, mientras que en el ensayo DC8 disminuyó de 22 a 21 *descargas/s* manteniéndose casi constante. Por último la carga acumulada para el ensayo DC7 aumentó en $0.5 nC$ y para el ensayo DC8 disminuyó en $0.2 nC$. En general el comportamiento de los parámetros Q_{95} y carga acumulada son distintos, aumentando para el ensayo DC7 y disminuyendo para el ensayo DC8, mientras que la tasa de repetición disminuyó para el ensayo DC7 y se mantuvo casi constante en el ensayo DC8. La duración de los intervalos iniciales y finales aumenta para ambos ensayos en 100 y 2 segundos respecto al intervalo inicial, para los ensayos DC7 y DC8 respectivamente.

Por último para los ensayos de inversión de polaridad (DC9 y DC10) se repite el comportamiento de los ensayos escalón. El parámetro Q_{95} y la carga acumulada aumenta para el ensayo DC9 y disminuye para el ensayo DC10. La tasa de repetición disminuye más para el ensayo DC9 y ligeramente para el ensayo DC10. La duración de los intervalos iniciales y finales aumenta respecto al intervalo inicial en 38 y 12 segundos. para los ensayos DC9 y DC10 respectivamente.

Ensayo	$Q_{95}1[nC]$	$Q_{95}2[nC]$	$n1[descargas/s]$	$n2[descargas/s]$	Carga acumulada 1 [μC]	Carga acumulada 2 [μC]	Tiempo t1 [s]	Tiempo t2 [s]
AC1	2.7	9.4	1045	712	14	27	0,77	1,12
AC2	4.3	13.7	1065	1145	24	37	0,75	0,70
AC3	3.5	25.2	1065	905	20	50	0,75	0,88
DC1	1.2	1.5	6	7	0.6	0.6	133,33	114,29
DC2	6.2	7.2	6	6	1	1.5	133,33	133,33
DC3	1.5	1.3	25	25	0.9	0.9	32,00	32,00
DC4	1.1	1.3	14	14	0.3	0.3	57,14	57,14
DC5	7	6.2	6	10	0.9	0.7	133,33	80,00
DC6	1.4	2.3	26	4	0.9	1	30,77	200,00
DC7	2.6	3.6	24	6	1	1.5	33,33	133,33
DC8	1.2	0.9	22	21	0.5	0.3	36,36	38,10
DC9	2.8	3.6	42	14	1	1.3	19,05	57,14
DC10	3.3	2.2	25	18	1.1	1	32,00	44,44

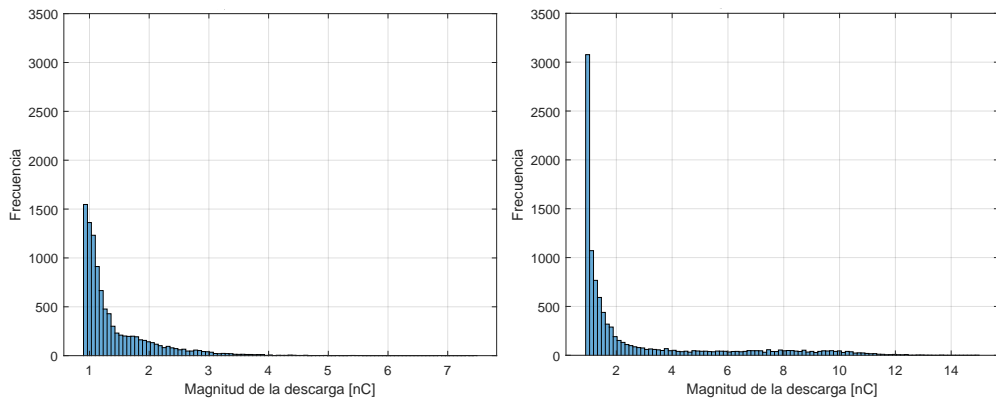
Tabla 5: Resumen de parámetros para estado inicial y final.

5.3.1. Gráficos ensayos AC

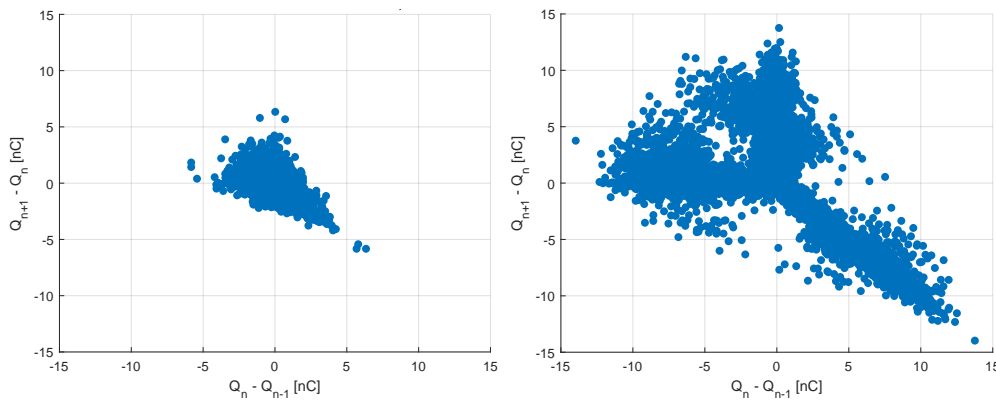
En las Figuras 27, 28 y 29 se presentan los histogramas de DP en intervalos, gráficos PSA de diferencias carga y de diferencias tiempo del estado inicial y final del ensayo, para los ensayos AC1, AC2 y AC3 respectivamente. Para los tres ensayos se observó un comportamiento similar, los histogramas revelaron que al comienzo del ensayo las descargas se concentran en magnitudes pequeñas y de forma descendente, luego al final del ensayo la frecuencia de las descargas de menor magnitud aumenta y se observaron nuevas descargas de mayor magnitud.

Los gráficos PSA de diferencias de carga revelaron, al comienzo de del ensayo, una forma triangular inclinada que se posiciona en el origen. En el final del ensayo la forma triangular se transforma en una “Y” inclinada y se expande en magnitud, agrupándose en las puntas, indicando una secuencia de DP posiblemente asociada al desarrollo del defecto en la interfaz.

Por último en los gráficos PSA de diferencias de tiempo al inicio del ensayo mostraron tres zonas bien definidas, luego hacia el final del ensayo se observó más dispersión de estas zonas. Esto indica que en el comienzo de los ensayos las DP eran temporalmente repetitivas y estables, luego se vuelven más más dispersas y variables previo a la ruptura.

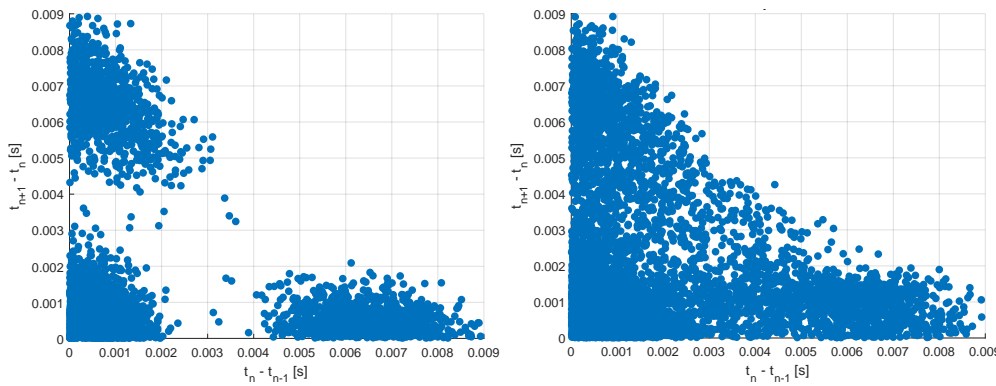


(a) Histograma de DP en intervalo inicial. (b) Histograma de DP en intervalo final.



(c) Gráfico PSA carga inicial.

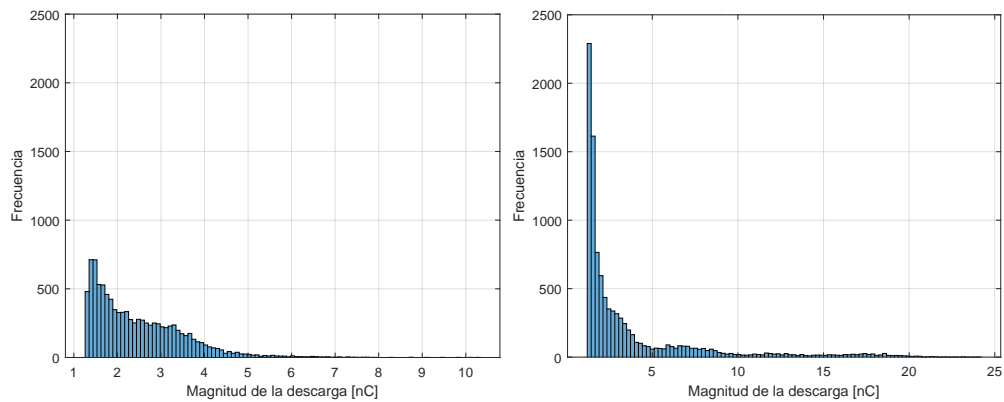
(d) Gráfico PSA carga final.



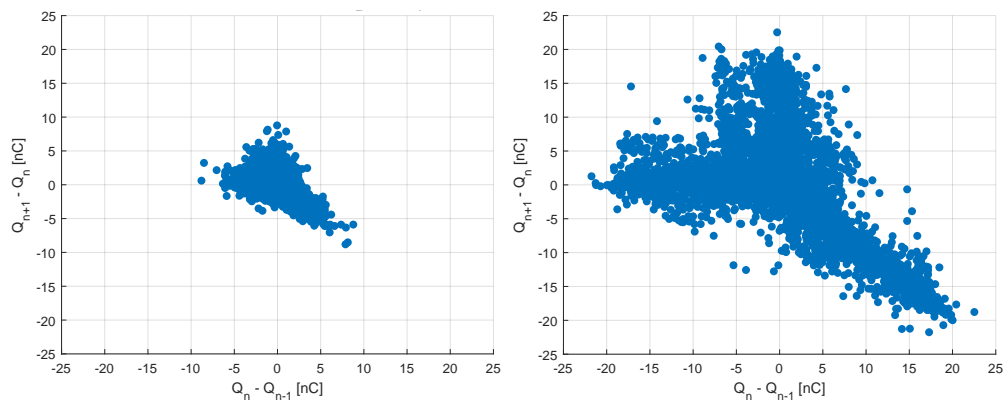
(e) Gráfico PSA tiempo inicial.

(f) Gráfico PSA tiempo final.

Figura 27: Gráficos comparativos AC1.

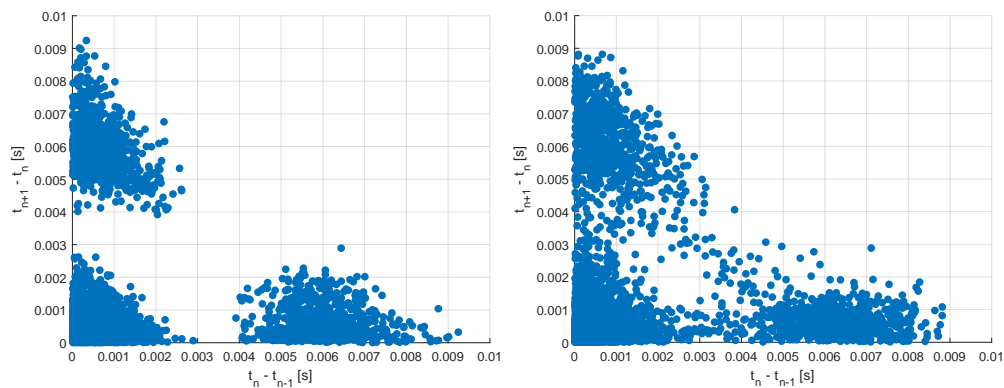


(a) Histograma de DP en intervalo inicial. (b) Histograma de DP en intervalo final.



(c) Gráfico PSA carga inicial.

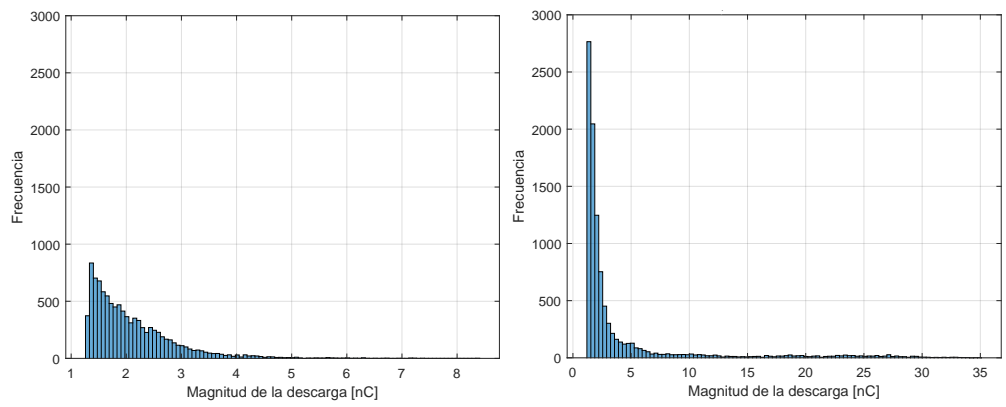
(d) Gráfico PSA carga final.



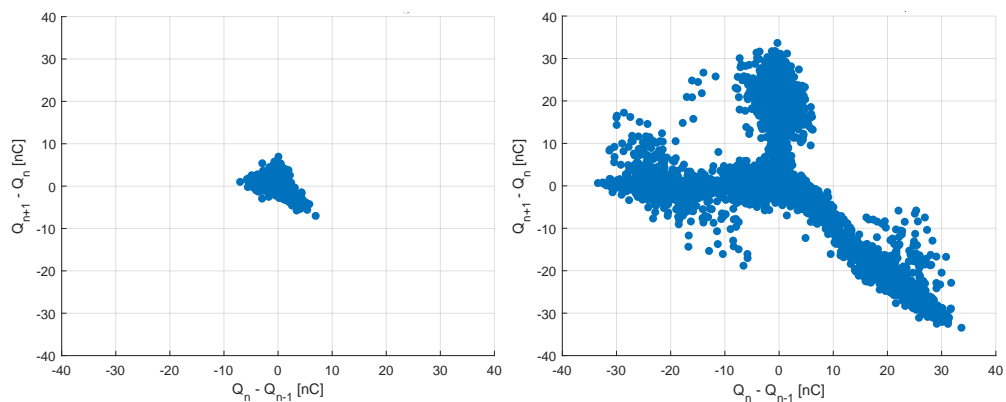
(e) Gráfico PSA tiempo inicial.

(f) Gráfico PSA tiempo final.

Figura 28: Gráficos comparativos AC2.

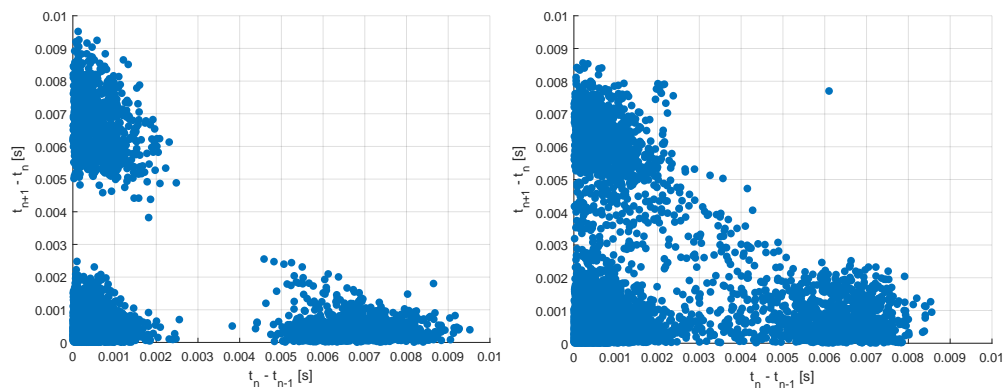


(a) Histograma de DP en intervalo inicial. (b) Histograma de DP en intervalo final.



(c) Gráfico PSA carga inicial.

(d) Gráfico PSA carga final.



(e) Gráfico PSA tiempo inicial.

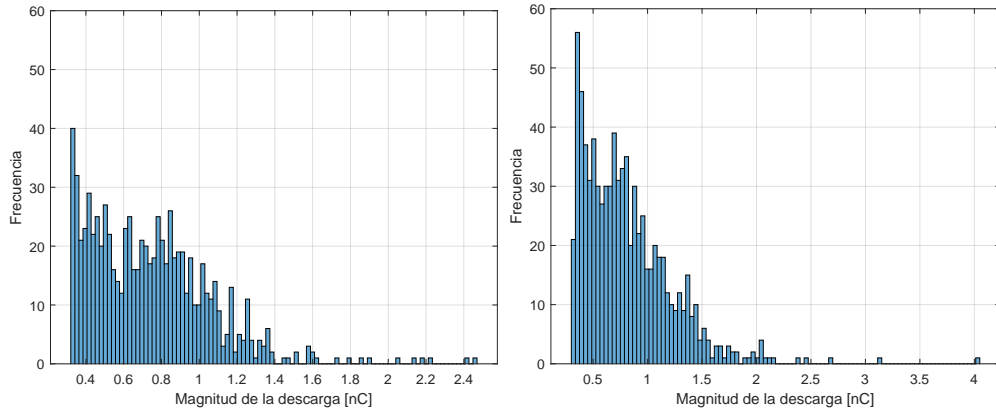
(f) Gráfico PSA tiempo final.

Figura 29: Gráficos comparativos AC3.

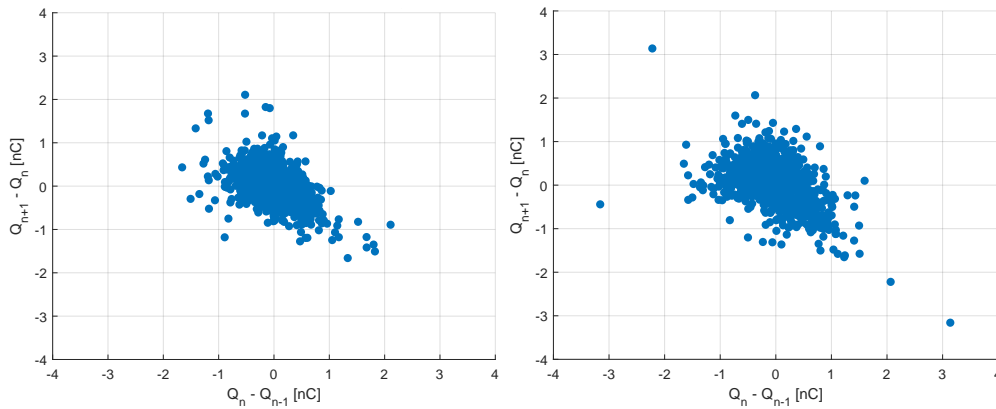
5.3.2. Gráficos ensayos escalones DC

Desde la Figura 30 hasta la Figura 35 se presentan los gráficos comparativos para los ensayos escalones DC, en estos se observan los histogramas acumulativos, PSA de diferencias de carga y diferencias de tiempo de cada ensayo.

En el histograma en intervalos se observó un incremento en la frecuencia de las descargas hacia el final del ensayo, con algunas descargas de mayor magnitud que en el comienzo. El gráfico PSA de diferencias de carga mostró una forma triangular con algunas descargas dispersas alrededor, pero hacia el final del ensayo no cambió su forma. Los gráficos PSA de diferencias de tiempo muestran una mayor densidad de descargas hasta los 0.3 s. No se observó cambios significativos en el comportamiento entre el inicio y el final del ensayo.

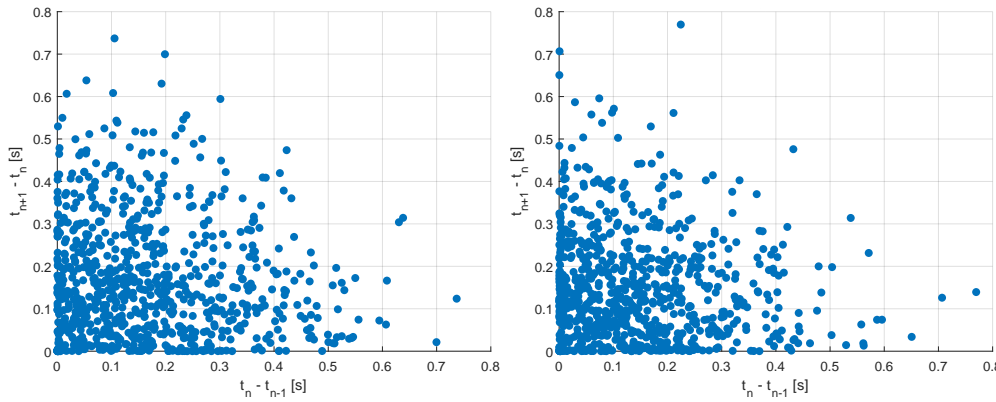


(a) Histograma de DP en intervalo inicial. (b) Histograma de DP en intervalo final.



(c) Gráfico PSA carga inicial.

(d) Gráfico PSA carga final.

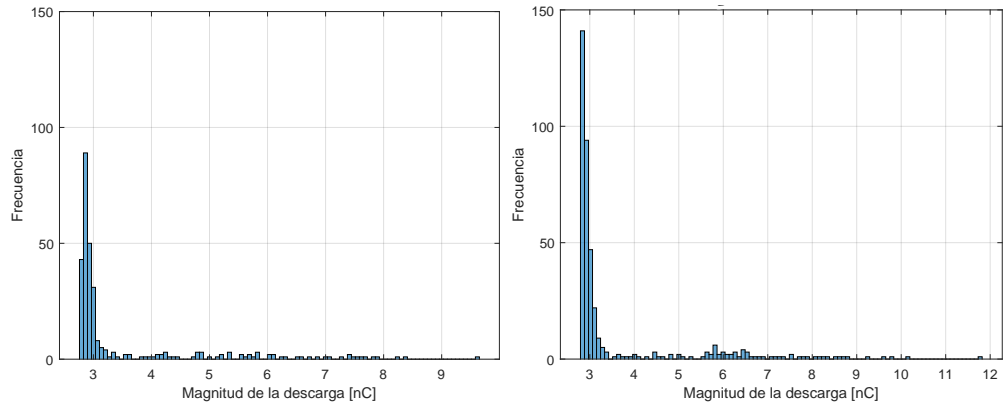


(e) Gráfico PSA tiempo inicial.

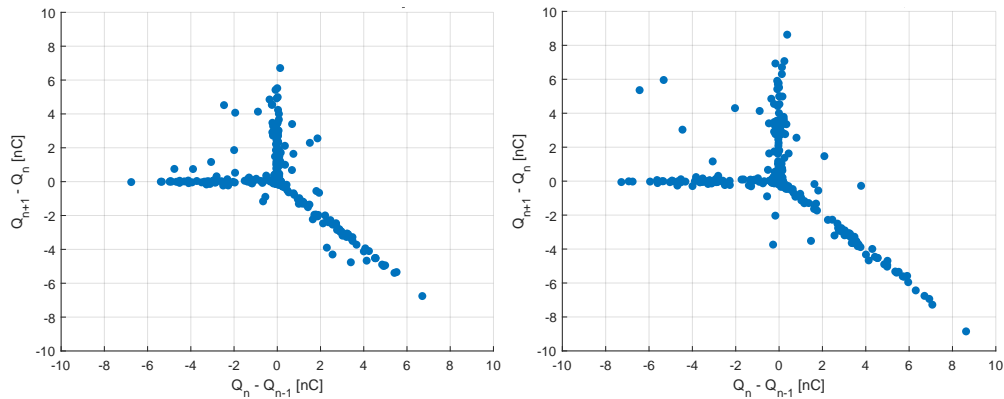
(f) Gráfico PSA tiempo final.

Figura 30: Gráficos comparativos DC1.

Para el ensayo DC2 los histogramas en intervalos se observó un incremento en la frecuencia de la descargas de alrededor de 3 nC . El gráfico PSA de diferencias de carga presentó una forma de “Y” inclinada al comienzo y al final del ensayo, las puntas de la “Y” se elongaron en los extremo debido al aumento de la magnitud de las descargas. Los gráficos PSA de diferencias de tiempo mostraron descargas mas concentradas hasta los 0.4 s . No se observó cambios significativos en el comportamiento entre el inicio y el final del ensayo.

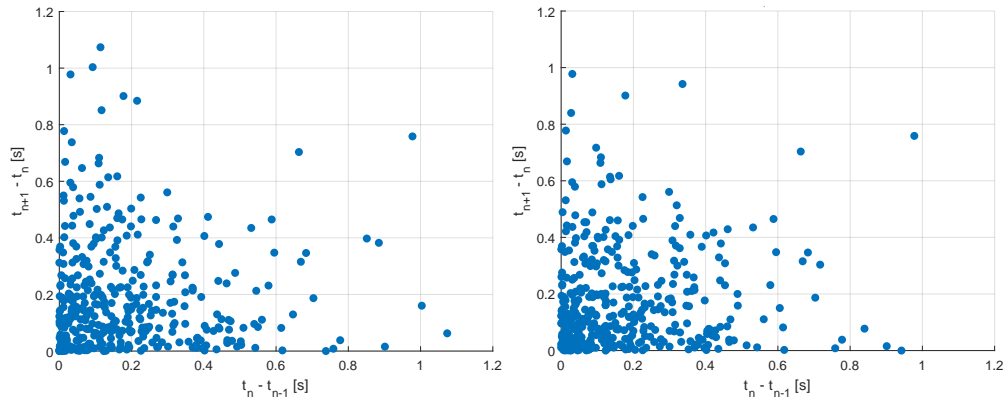


(a) Histograma de DP en intervalo inicial. (b) Histograma de DP en intervalo final.



(c) Gráfico PSA carga inicial.

(d) Gráfico PSA carga final.



(e) Gráfico PSA tiempo inicial.

(f) Gráfico PSA tiempo final.

Figura 31: Gráficos comparativos DC2.

En el ensayo DC3, los histogramas en intervalos no presentan mucha variación excepto un ligero aumento en las frecuencia de las descargas de 1 nC. Los gráficos PSA de diferencias de carga presentaron una pequeñas forma triangular asentada en el origen con un conjunto de descargas dispersas alrededor. Los gráficos PSA de diferencias de tiempo presentaron descargas muy

dispersas y la mayoría concentrada en el origen. No se evidenciaron cambios significativos en el comportamiento de las descargas.

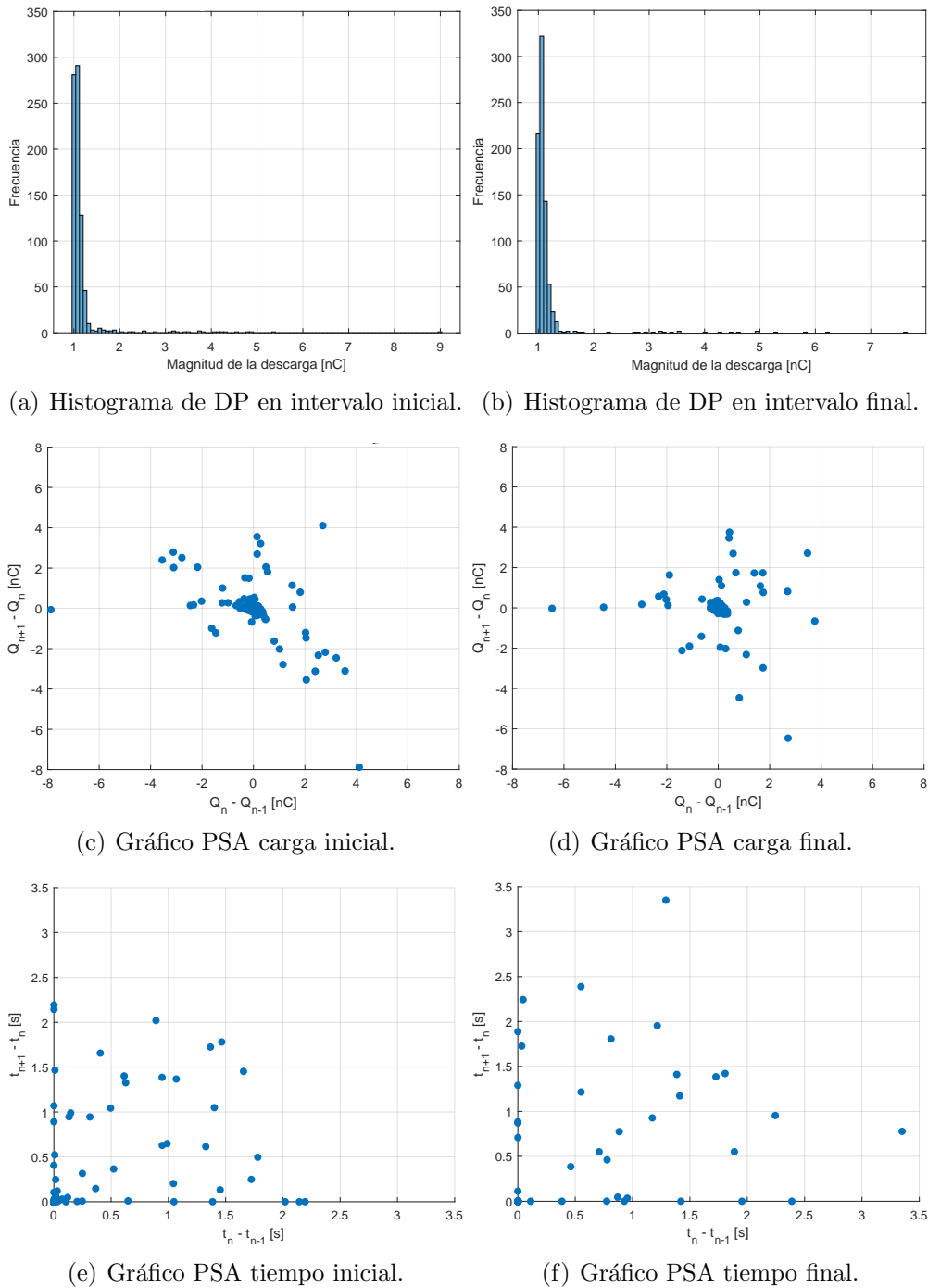
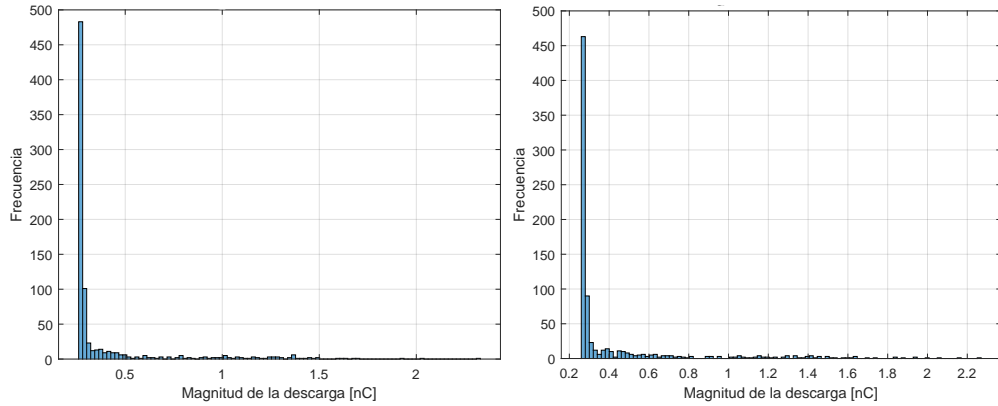


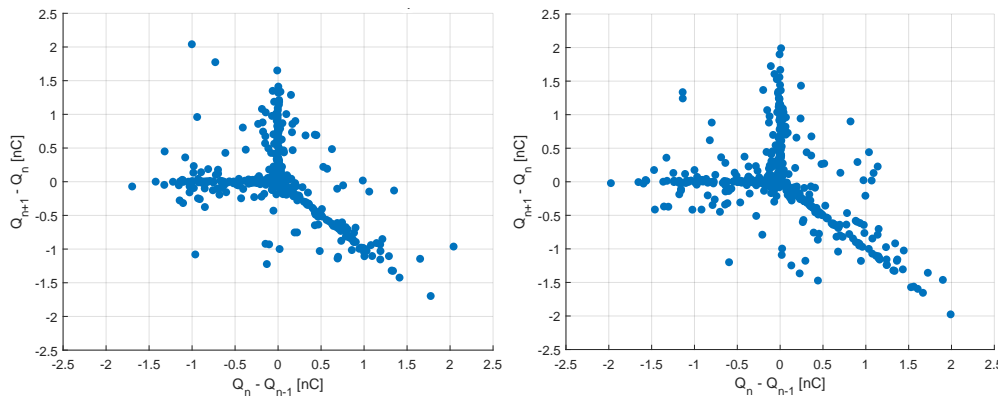
Figura 32: Gráficos comparativos DC3.

En el ensayo DC4 los histogramas en intervalo para inicio y final del ensayo no mostraron cambio significativo excepto por una pequeña disminución de la frecuencia de las descargas en el

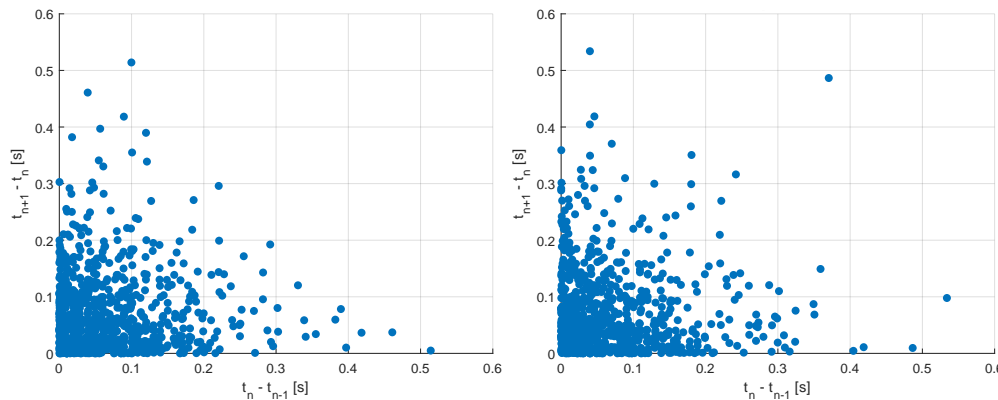
intervalo de $3 nC$. Los gráficos PSA de diferencias de carga mostraron una forma de “Y” inclinada en el inicio y final del ensayo. Hacia el final del ensayo las puntas se elongaron ligeramente debido a un pequeño aumento de la magnitud de las descargas. Los gráficos PSA de diferencias de tiempo mostraron descargas más concentradas hasta los 0.2 s. No se observaron variaciones significativas entre el inicio y el final del ensayo.



(a) Histograma de DP en intervalo inicial. (b) Histograma de DP en intervalo final.



(c) Gráfico PSA carga inicial. (d) Gráfico PSA carga final.



(e) Gráfico PSA tiempo inicial. (f) Gráfico PSA tiempo final.

Figura 33: Gráficos comparativos DC4.

En el ensayo DC5 los histogramas en intervalo mostraron un comportamiento similar entre el inicio y el final, mostrando un ligero aumento la frecuencia en el intervalo de $1.2 nC$. Al inicio del ensayo el gráfico PSA de diferencias de carga muestra una forma triangular más concentrada hacia el origen y con descargas más dispersas hacia los extremos del triangulo, hacia el final del ensayo la forma triangular se redujo en tamaño y se se observaron menos descargas dispersas alrededor. Los gráficos PSA de diferencias de tiempo, en el comienzo y final del ensayo, mostraron que las cargas se concentraron principalmente hasta los 0.6 s pero no se observaron diferencias significativas entre el inicio y el final.

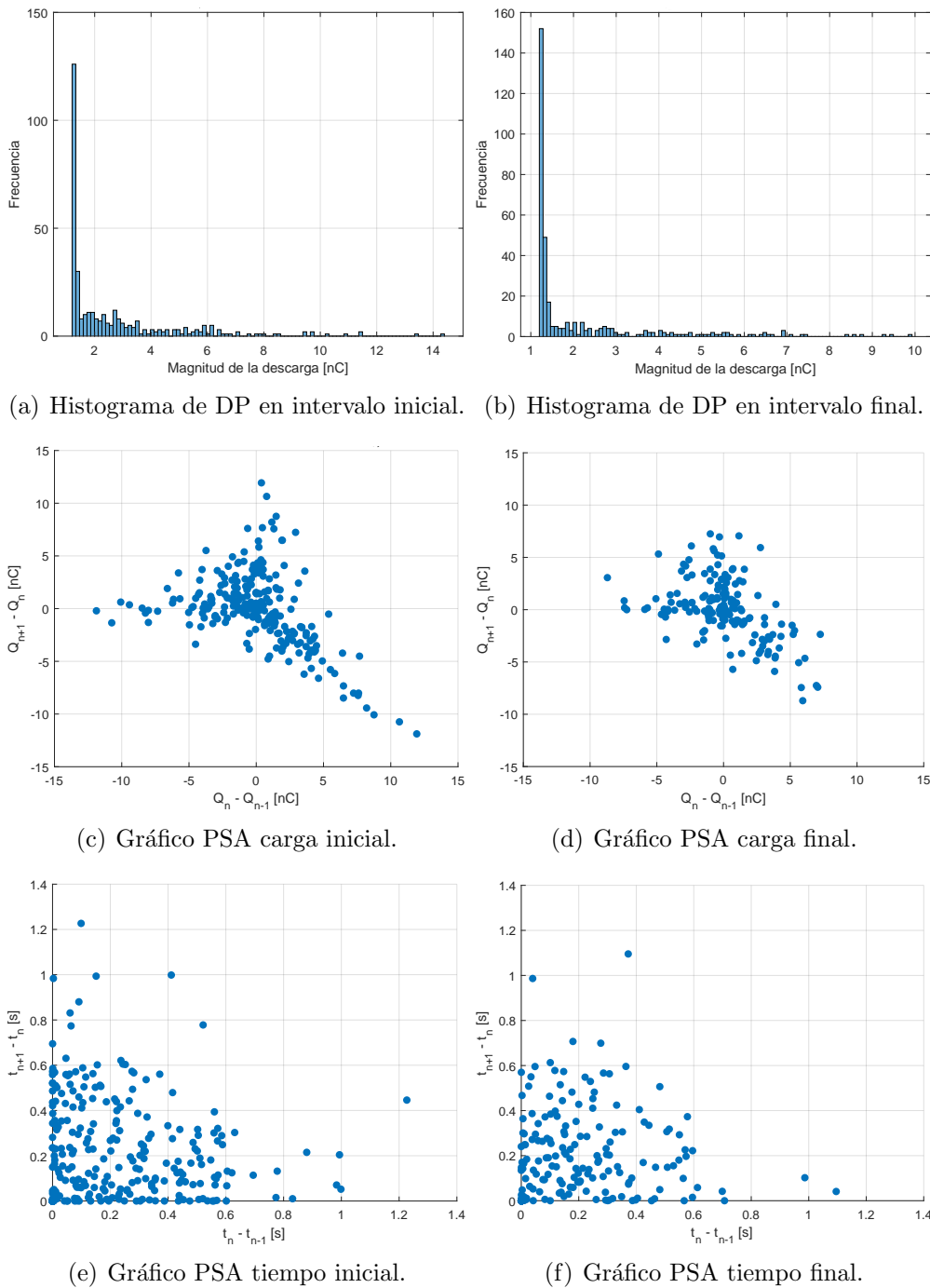


Figura 34: Gráficos comparativos DC5.

En el ensayo DC6 los histogramas en intervalo revelaron una disminución en la frecuencia de las descargas de 1 nC y un ligero aumento en las descargas entre 1 y 2 nC . El gráfico PSA de diferencias de cargas al inicio del ensayo mostró una forma triangular asentada en el origen con puntuales descargas de alta magnitud en la misma dirección de los extremos del triangulo. El comportamiento es el mismo al final del ensayo con el triangulo central de tamaño ligeramente mayor que al comienzo del ensayo. En los gráficos PSA de diferencias de tiempo se observó que hacia el

final del ensayo se dispersan las descargas hacia valores mayores de tiempo.

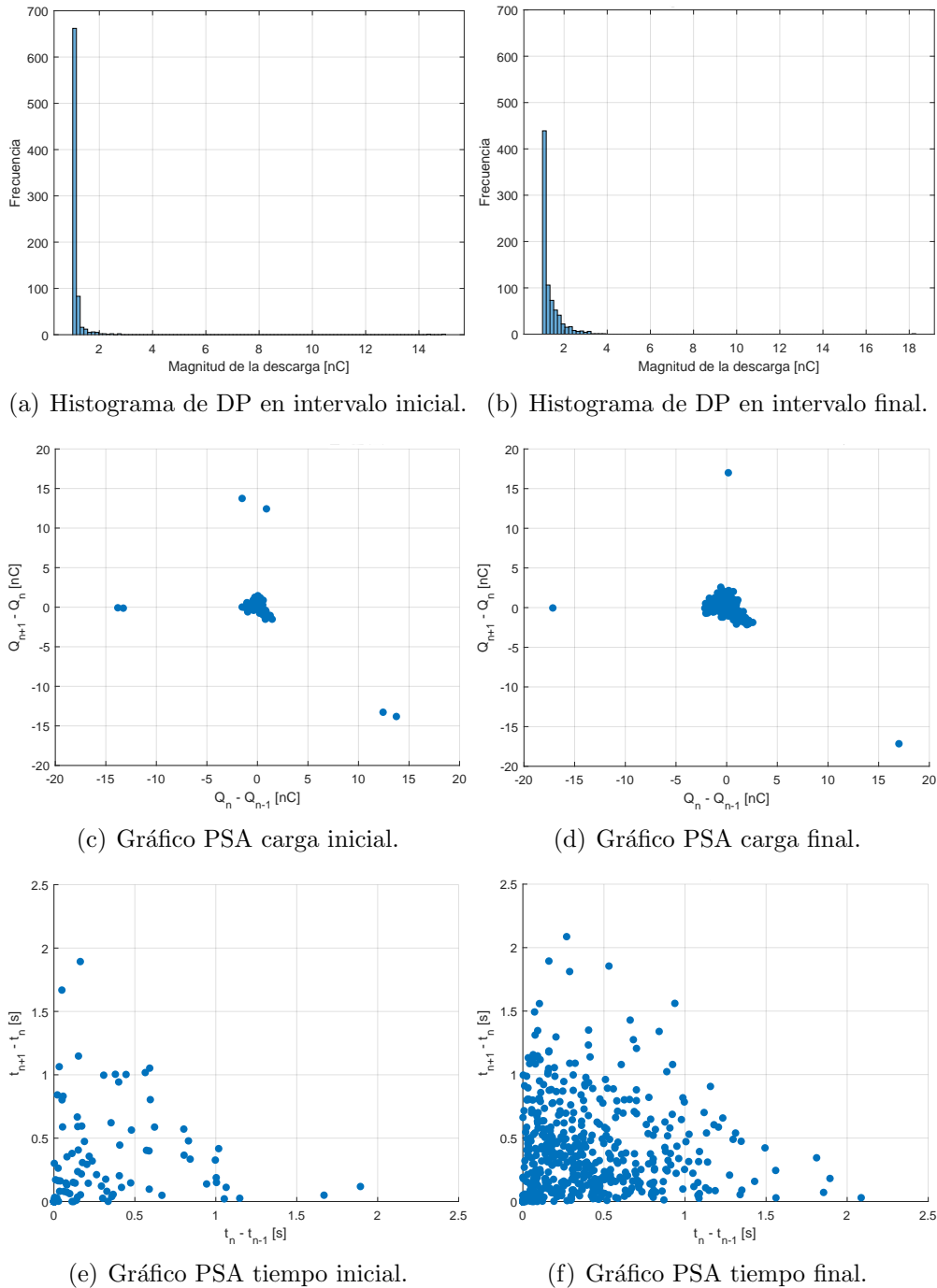


Figura 35: Gráficos comparativos DC6.

En general, para los cinco ensayos que alcanzaron la ruptura dieléctrica, los histogramas en intervalo no mostraron diferencias significativas entre las etapas iniciales y finales mas que pequeños aumentos o disminuciones en los primeros intervalos de carga. Los gráficos PSA de diferencias de

carga mostraron formas de “Y” o triangulares inclinadas y asentadas en el origen y con pequeños aumentos o disminuciones en el tamaño pero sin cambios significativos. Los gráficos PSA de diferencias de tiempo no mostraron cambios significativos entre las etapas iniciales y finales. Por lo que en general la evolución del ensayo hasta previo a la ruptura dieléctrica no presentó un patrón característico o que se pueda reconocer.

Entre los ensayos se observó bastante variación entre los gráficos PSA de diferencias de carga y diferencias de tiempo. Los gráficos PSA de diferencias de carga mostraron formas triangulares o de “Y” inclinados de distintos tamaños algunos con mayor o menor dispersión. Los gráficos PSA de diferencias de tiempo se presentan en forma más concentrada hacia el origen y luego se dispersan, pero entre ensayos suelen variar en magnitud. Se observó que las diferencias de tiempo entre descargas para excitación DC son considerablemente mayores que las diferencias de tiempo en AC.

En el ensayo DC6 no ocurrió ruptura dieléctrica, por lo que el intervalo final es considerado simplemente como lo único que se midió. De la misma forma para los ensayos DC7, DC8, DC9 y DC10.

5.3.3. Gráficos ensayos escalón DC

En las Figuras 36 y 37 se presentan los histogramas en intervalos y gráficos PSA de diferencias de carga y diferencias de tiempo para los ensayos escalón DC7 y DC8.

Para el ensayo DC7 los histogramas en intervalos mostraron una considerable disminución en los intervalos entre 1 y 1.5 nC y un ligero aumento entre 1.5 y 3 nC . Los gráficos PSA de diferencias de carga presentaron una forma triangular inclinada que hacia el final del ensayo aumenta en tamaño pero con la misma forma. Los gráficos PSA de diferencias de tiempo mostraron un aumento en las diferencias de tiempo entre las descargas hacia el final del ensayo.

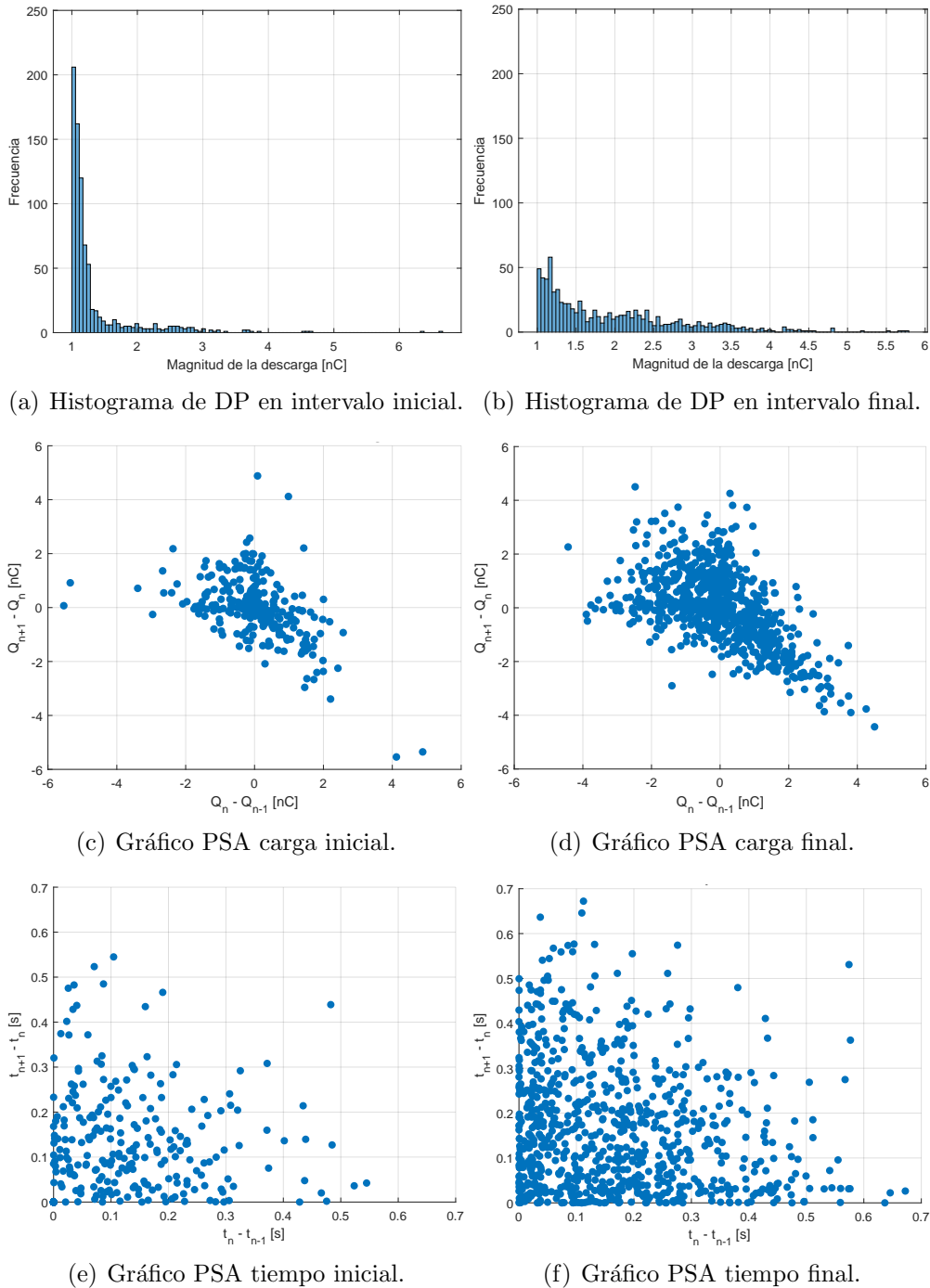
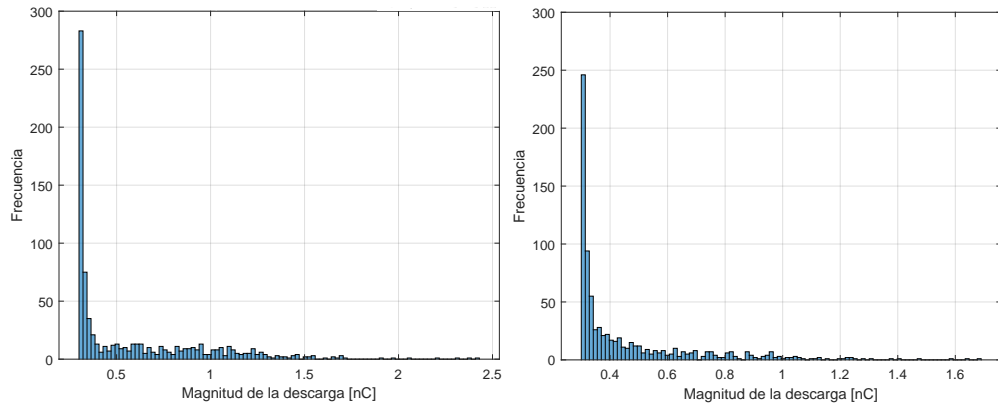
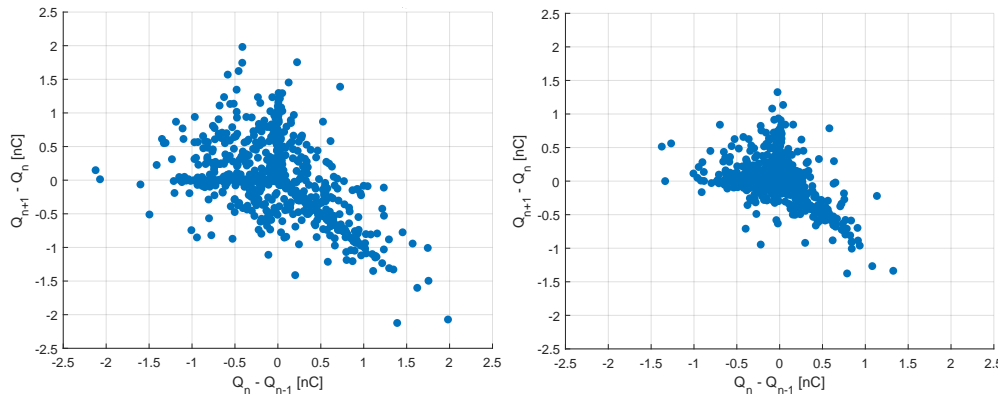


Figura 36: Gráficos comparativos DC7.

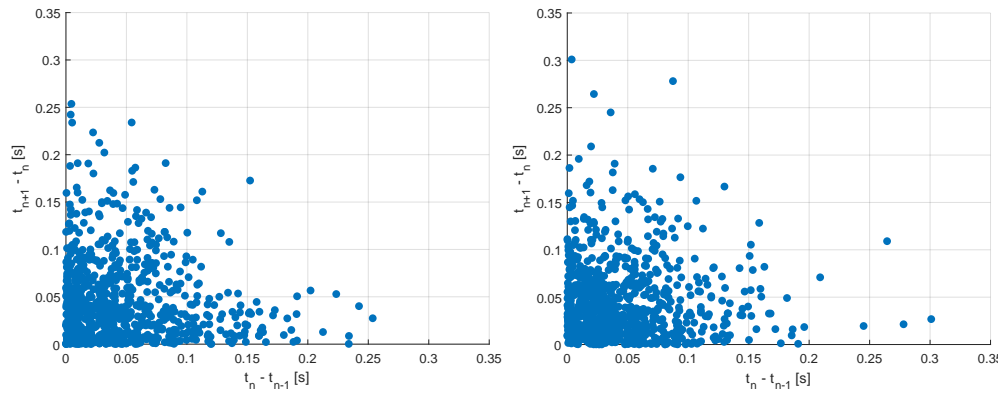
En el ensayo DC8 los histogramas en intervalos mostraron una ligera disminución para las descargas en el intervalo de 0.3 nC . En el comienzo del ensayo el gráficos PSA de diferencias de carga mostró una forma de “Y” inclinada con descargas dispersas alrededor. Hacia el final del ensayo las descargas se concentraron más en el centro disminuyendo su tamaño y se transformó en un triángulo inclinado con pocas descargas dispersas alrededor. Los gráficos PSA de diferencias de tiempo nos mostraron diferencias significativas.



(a) Histograma de DP en intervalo inicial. (b) Histograma de DP en intervalo final.



(c) Gráfico PSA carga inicial. (d) Gráfico PSA carga final.



(e) Gráfico PSA tiempo inicial. (f) Gráfico PSA tiempo final.

Figura 37: Gráficos comparativos DC8.

5.3.4. Gráficos ensayos inversión de polaridad DC

En las Figuras 38 y 39 se presentan los histogramas en intervalos y gráficos PSA de diferencias de carga y diferencias de tiempo para los ensayos escalón DC9 y DC10.

En el ensayo DC9 los histogramas mostraron ligeros incrementos en los intervalos entre 1 y 3 nC . El gráfico PSA de diferencias de carga al comienzo del ensayo mostró una forma triangular inclinada, luego al final del ensayo se observó que la forma triangular aumentó levemente en tamaño y se elongó en los extremos. El gráfico PSA de diferencias de tiempo en el inicio del ensayo muestra que la concentración de las descargas se encuentra hasta 0.3 s, luego hacia el final del ensayo las diferencias de tiempo aumentaron indicando descargas con mayor tiempo entre ellas.

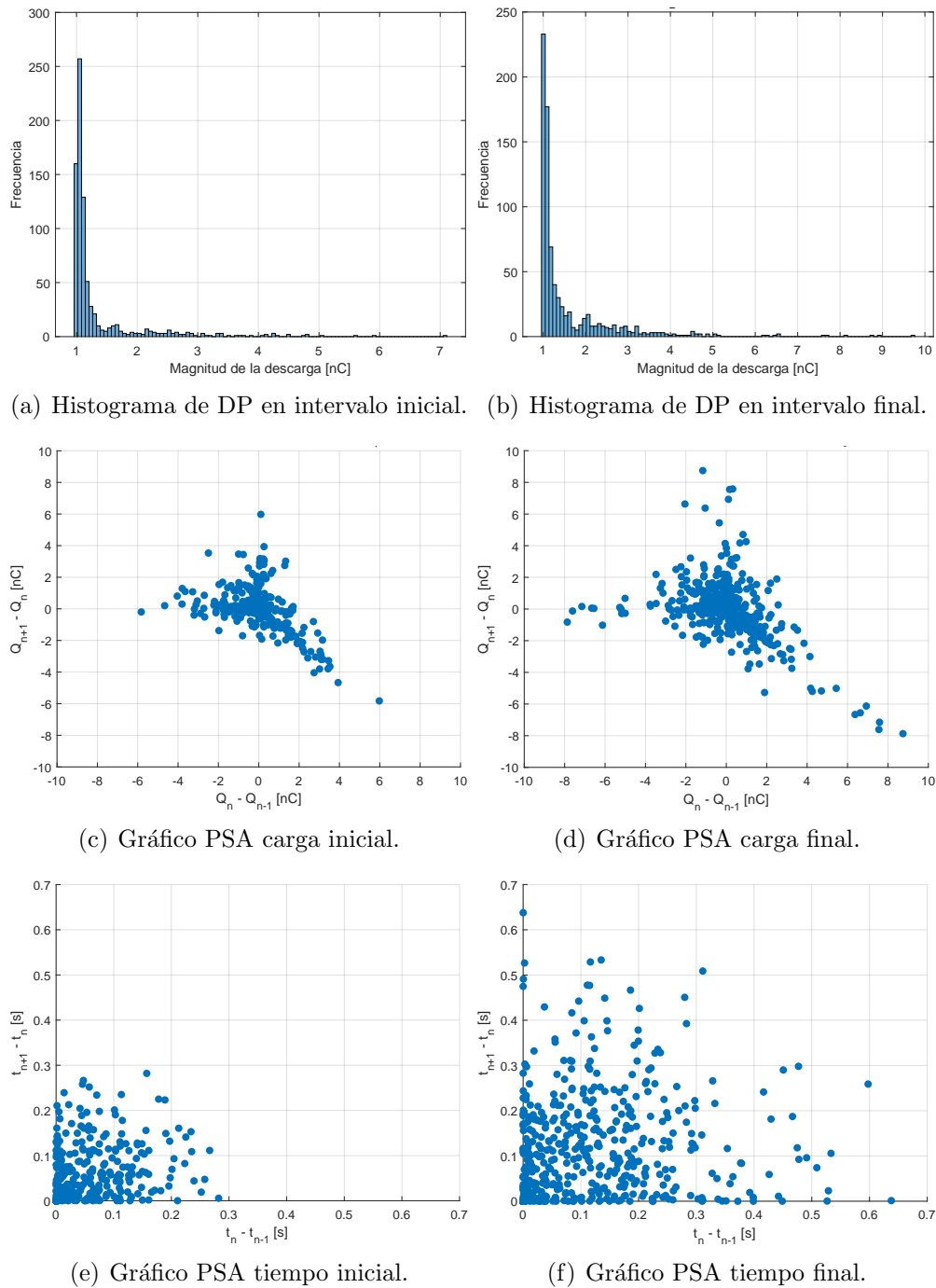


Figura 38: Gráficos comparativos DC9.

Para el ensayo DC10 los histogramas en intervalo mostraron una ligera disminución en el intervalo entre 1 a 1.2 nC mientras que se notó un ligero aumento entre 1.5 y 2 nC . El gráfico PSA de diferencias de carga al inicio del ensayo mostró que las descargas se concentran en el origen pero sin una forma definida y con descargas dispersas alrededor, luego hacia el final del ensayo sigue la misma forma en el origen pero las descargas dispersas alrededor son menos. El gráfico PSA de diferencias de tiempo al inicio del ensayo mostró una clara concentración en el tiempo de 0.2

s con pocas descargas dispersas de mayor tiempo, mientras que al final del ensayo se acentuó la concentración alrededor de 0.2 s

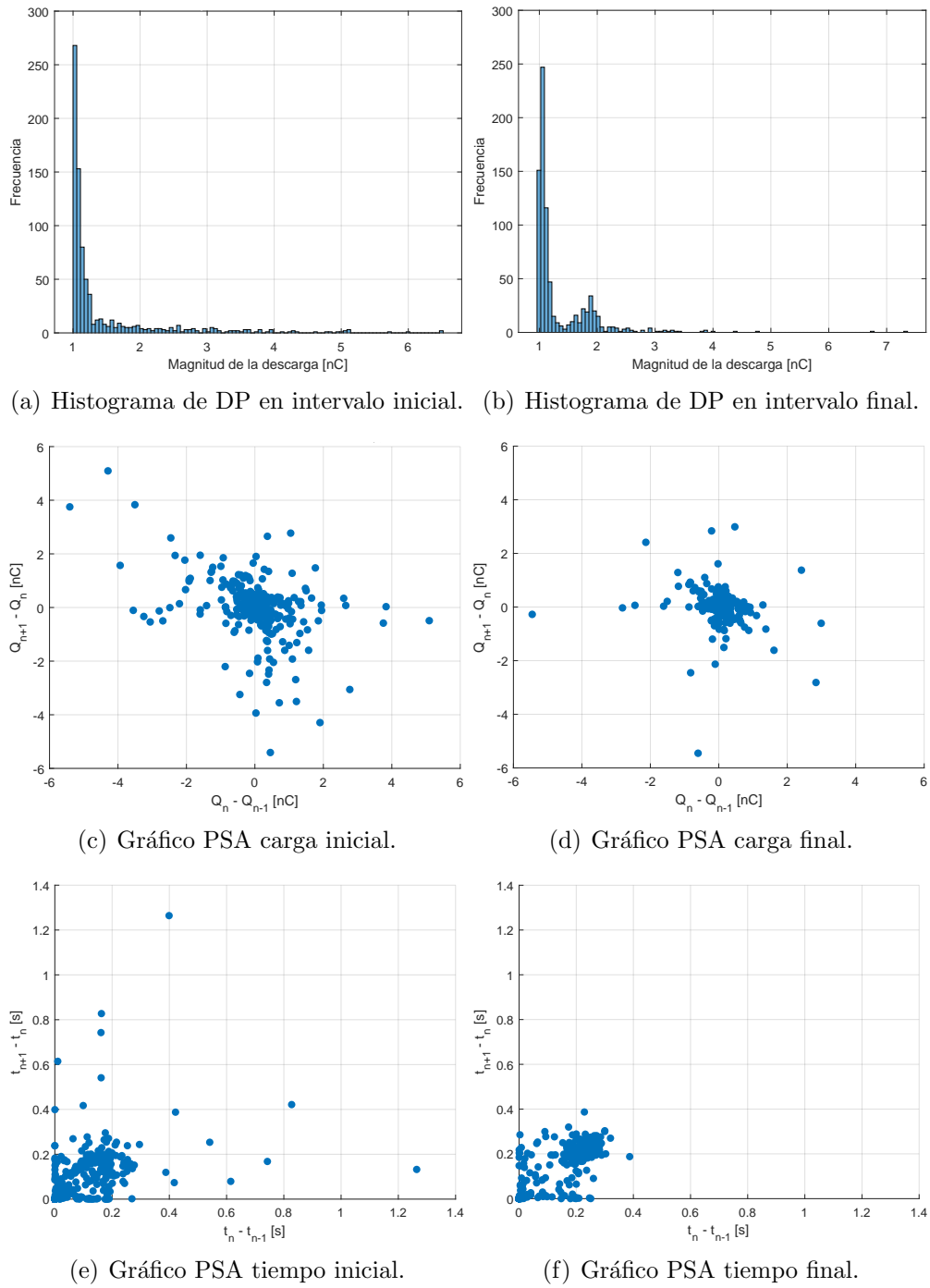


Figura 39: Gráficos comparativos DC10.

5.4. Comparación de imágenes

En esta sección se presentan las fotografías tomadas a las probetas el inicio y final del ensayo.

5.4.1. Imágenes ensayos AC

Las Figuras 40, 41 y 42 corresponden a las imágenes del principio y final de los ensayos AC1, AC2 y AC3 respectivamente. En los tres ensayos se observaron patrones de degradación que son típicos de tracking interfacial, los cuales presentaron características de arboles que se ramifican desde el electrodo energizado hasta el electrodo aterrizado. Se observó carbonización en los caminos ramificados, lo cual indica degradación irreversible en la interfaz.

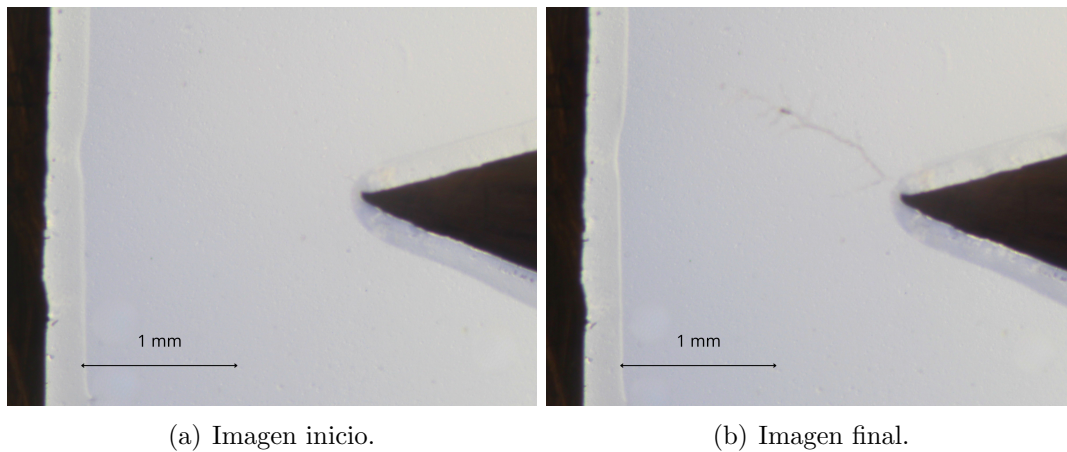


Figura 40: Imágenes ensayo AC1.

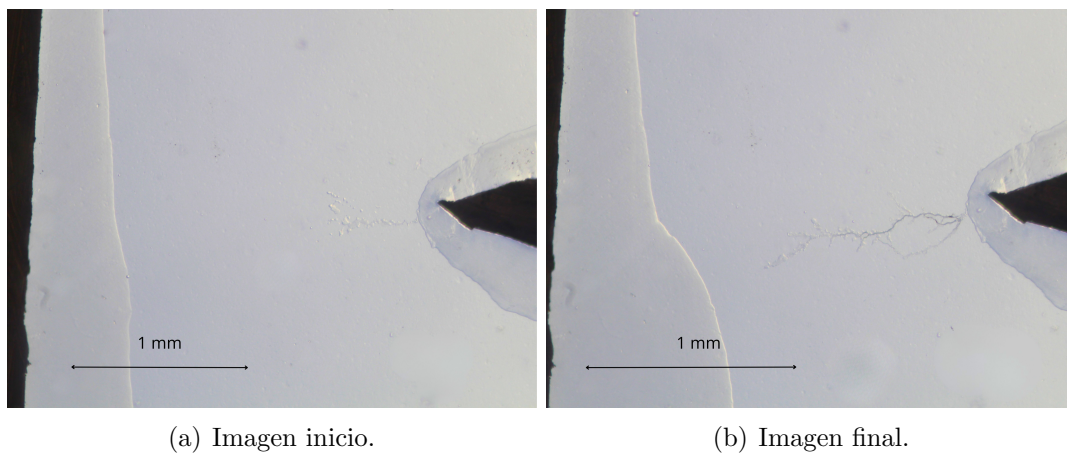
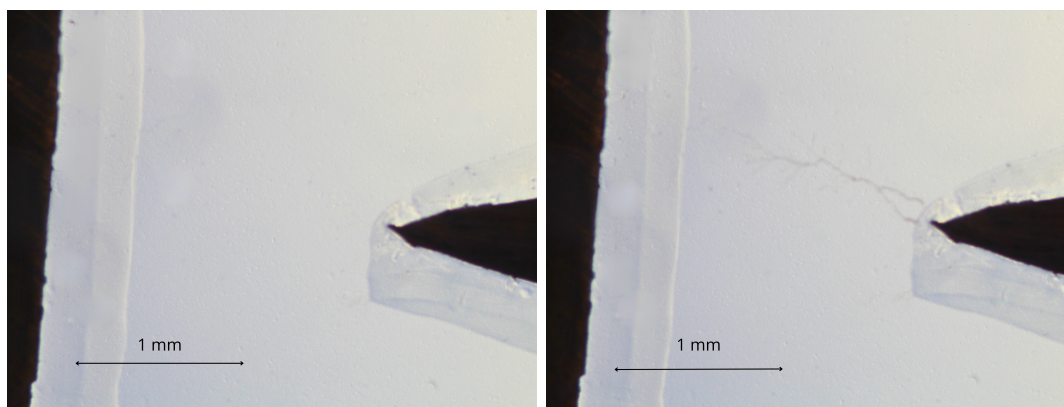


Figura 41: Imágenes ensayo AC2.



(a) Imagen inicio.

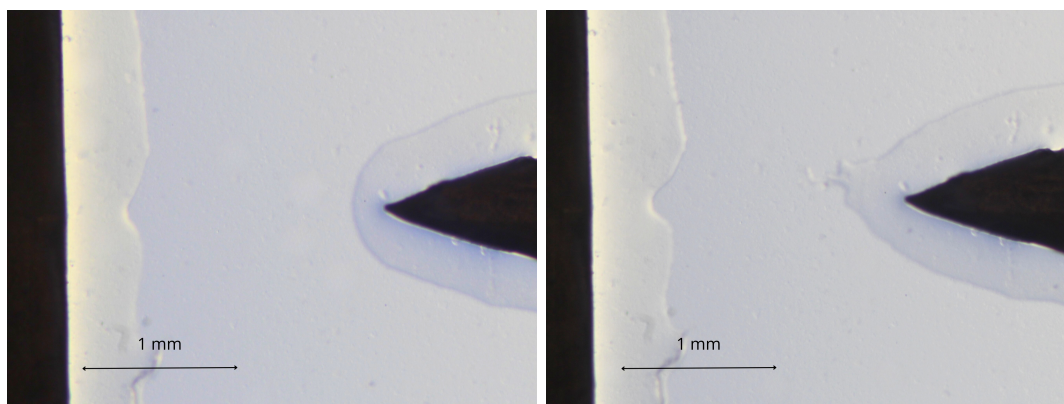
(b) Imagen final.

Figura 42: Imágenes ensayo AC3.

5.4.2. Imágenes ensayos escalones DC

Desde la Figura 43 hasta la 48 se presentan las imágenes correspondientes a los ensayos DC1 hasta DC6.

En el ensayo DC1 se observó que, contrario a lo que ocurrió en AC, se forma un camino de vacuolas pulsátiles con forma de que se expanden desde el electrodo energizado hacia el electrodo aterrizado. Se observó también que la vacuola circundante al electrodo aterrizado se expandió también hacia el electrodo contrario.

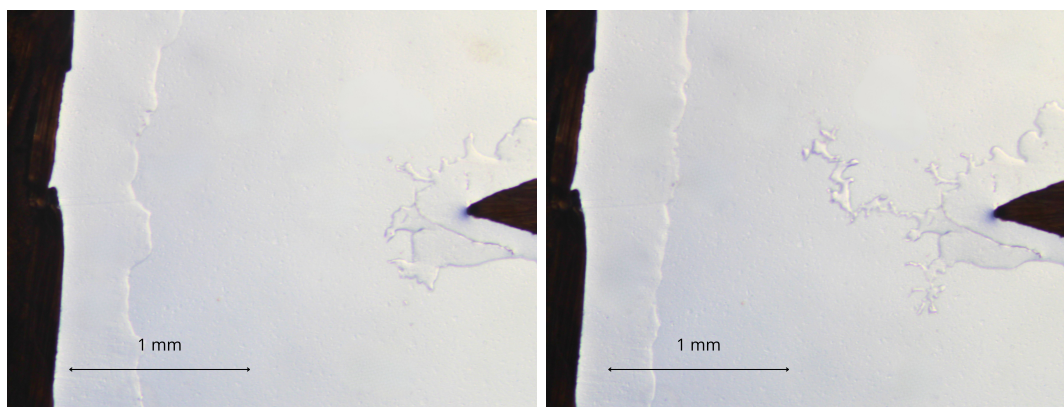


(a) Imagen inicio.

(b) Imagen final.

Figura 43: Imágenes ensayo DC1.

En el ensayo DC2 se observó de mejor forma como las vacuolas se inflaman y se expanden desde el electrodo energizado al aterrizado.

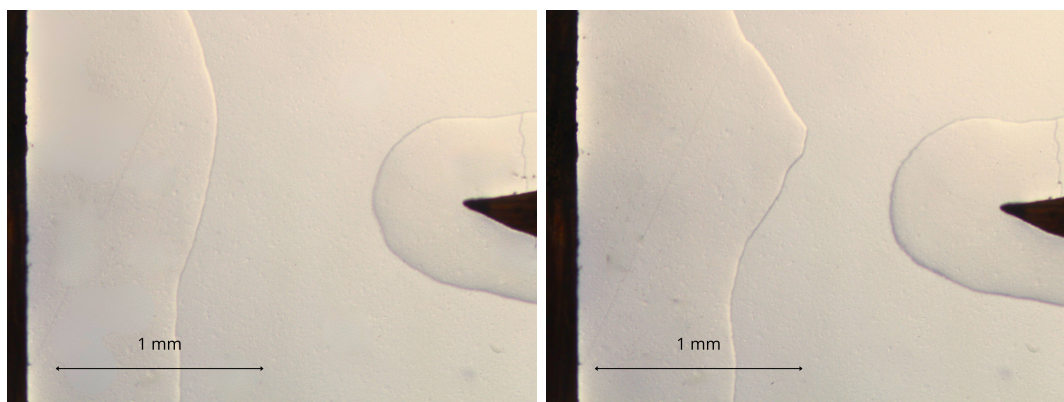


(a) Imagen inicio.

(b) Imagen final.

Figura 44: Imágenes ensayo DC2.

En el ensayo DC3 no se observó un camino de vacuolas ramificadas, si no que las vacuolas circundantes a ambos electrodos se elongaron y expandieron hasta la ruptura.

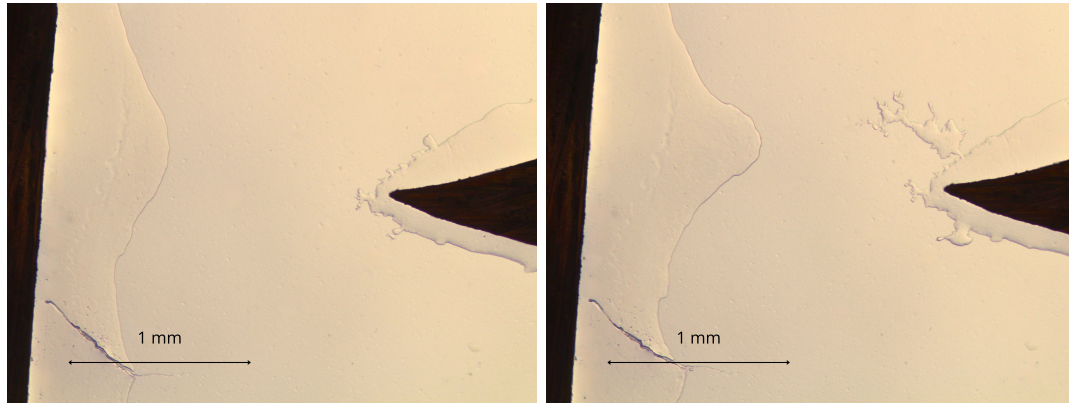


(a) Imagen inicio.

(b) Imagen final.

Figura 45: Imágenes ensayo DC3.

En el ensayo DC4 se observó nuevamente el fenómeno de las vacuolas pulsantes expandiéndose hacia electrodo aterrizado. La vacuola circundante al electrodo aterrizado también se expandió hacia el electrodo energizado coincidentemente en la misma zona donde crece el defecto desde el electrodo energizado.

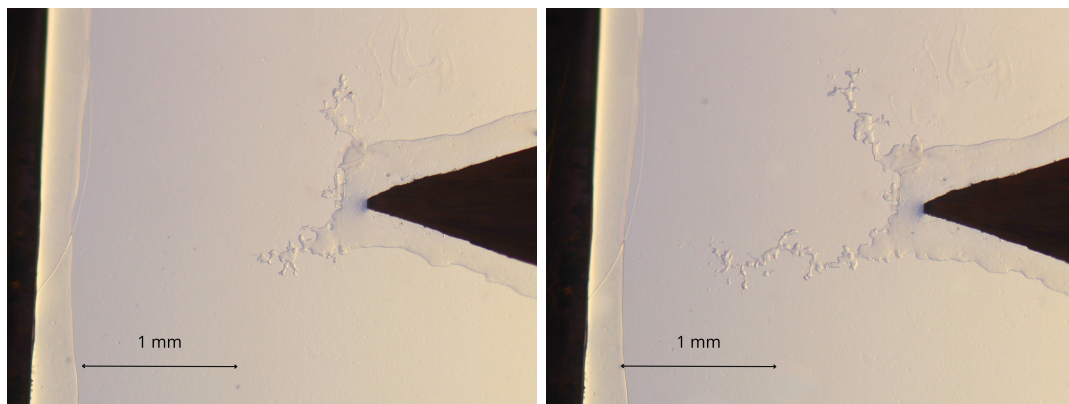


(a) Imagen inicio.

(b) Imagen final.

Figura 46: Imágenes ensayo DC4.

En el ensayo DC5 se observaron dos caminos de vacuolas, uno que se expandió directo hacia el electrodo energizado y otro que se desvió ligeramente hacia arriba, ambos con la forma ramificada observada en los ensayos DC anteriores.

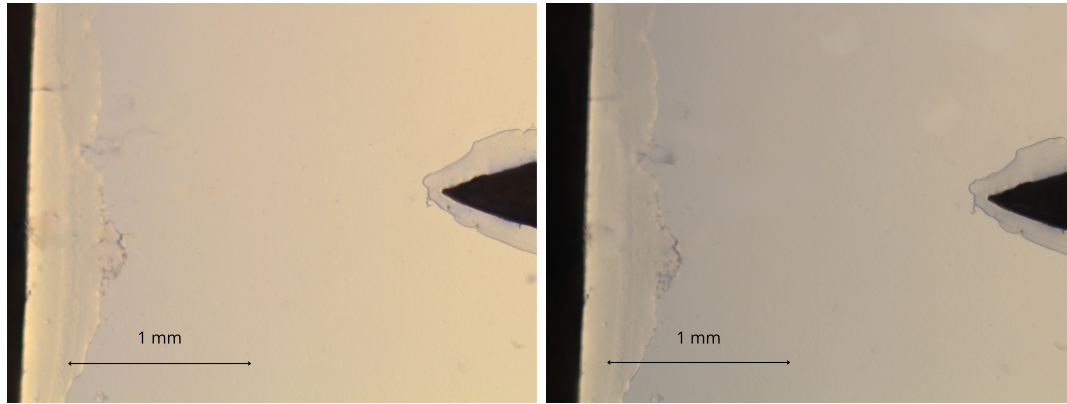


(a) Imagen inicio.

(b) Imagen final.

Figura 47: Imágenes ensayo DC5.

En el ensayo DC6 no se observó crecimiento de defecto alguno. En este ensayo no ocurrió ruptura dieléctrica y no se aumentó la tensión aplicada ya que se alcanzó el límite de -34 kV permitidos por la fuente.



(a) Imagen inicio.

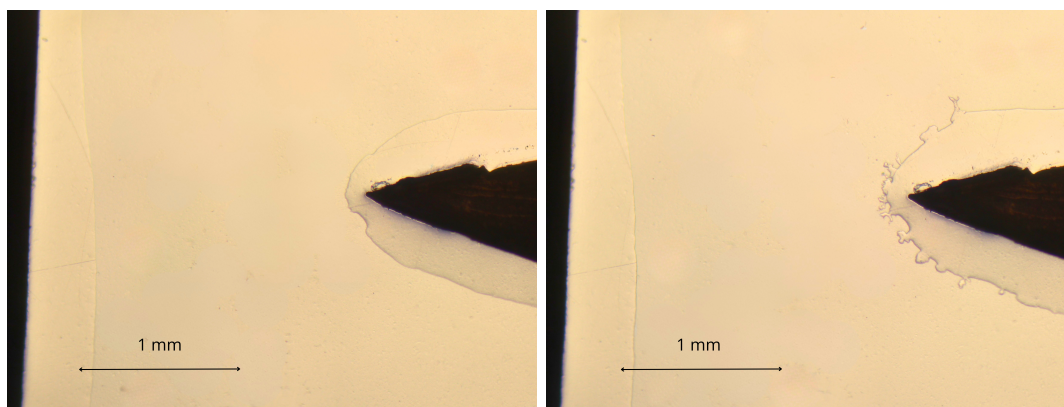
(b) Imagen final.

Figura 48: Imágenes ensayo DC6.

En general para los ensayos DC se observó que el defecto que se desarrolla corresponde a una inflamación de las vacuolas, las cuales se expanden de forma pulsante desde el electrodo energizado hacia el electrodo aterrizado. También se observó que las vacuolas circundantes al electrodo aterrizado tienden a expandirse aumentando su tamaño. El ensayo DC3 fue el único de estos seis ensayos que no mostró un desarrollo del defecto en forma de camino ramificado pero debido a la expansión de las vacuolas igual se produjo ruptura. No se observó indicios de caminos carbonizados como en los ensayos AC.

5.4.3. Imágenes ensayos escalón DC

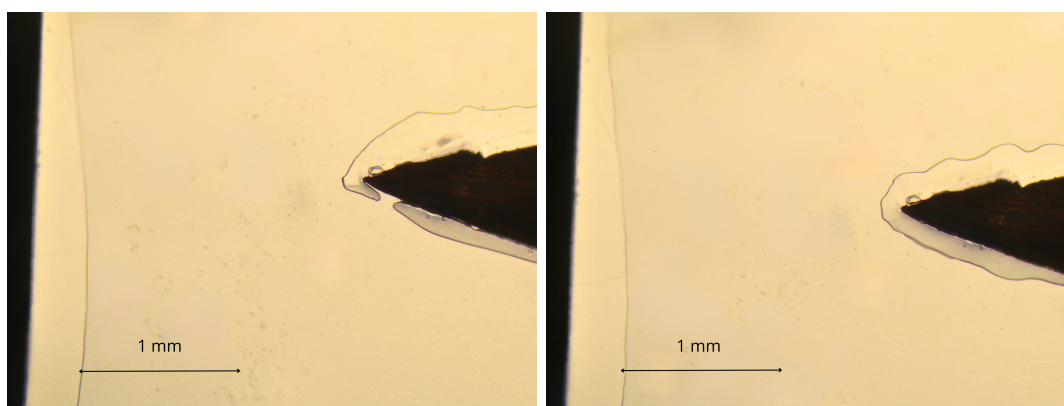
En las Figuras 49 y 50 se presentan las imágenes al inicio y final del ensayo para los ensayos DC7 y DC8 respectivamente. En ambos casos se observó que al final del ensayo, la vacuola circundante al electrodo energizado se expandió ligeramente y se mantuvo durante el ensayo con movimientos pulsantes. Solo en el ensayo DC7 se mostraron indicios de vacuolas con formas ramificadas pero no se desarrollaron hacia el electrodo aterrizado.



(a) Imagen inicio.

(b) Imagen final.

Figura 49: Imágenes ensayo DC7.



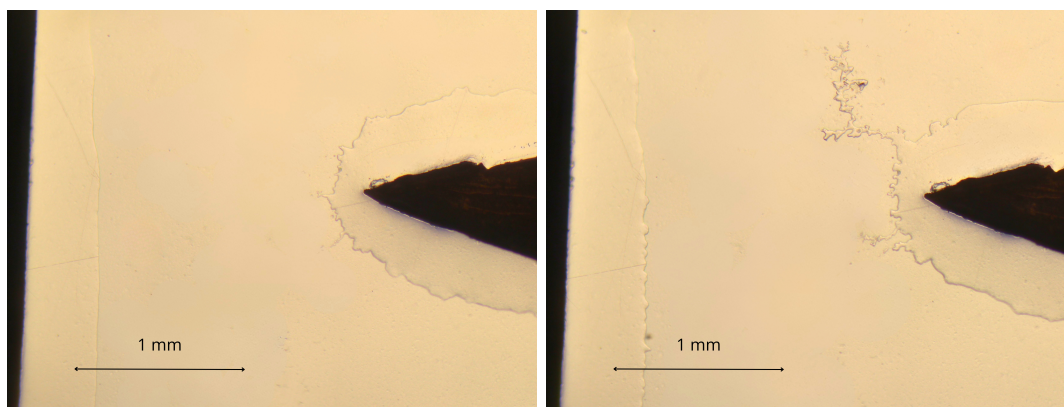
(a) Imagen inicio.

(b) Imagen final.

Figura 50: Imágenes ensayo DC8.

5.4.4. Imágenes ensayos inversión de polaridad DC

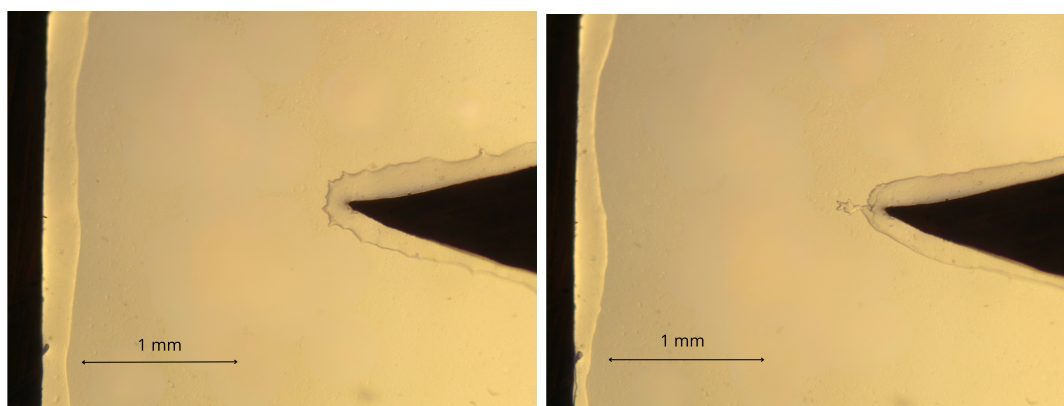
Las Figuras 51 y 52 presentan las imágenes del inicio y final del ensayo para los ensayos DC9 y DC10 respectivamente. Se observó que solo en el ensayo DC9 se expandió un defecto pulsante pero no de forma directa hacia el electrodo aterrizado, luego de eso no continuó expandiéndose. En el ensayo DC10 se observa una pequeña expansión de una vacuola ramificada pero que tampoco logró expandirse en su totalidad.



(a) Imagen inicio.

(b) Imagen final.

Figura 51: Imágenes ensayo DC9.



(a) Imagen inicio.

(b) Imagen final.

Figura 52: Imágenes ensayo DC10.

En general para los ensayos escalón e inversión de polaridad DC, a pesar de que el escalón de tensión aplicada es considerablemente mayor que para los ensayos escalones DC, no se desarrollaron los defectos ni ocurrió ruptura dieléctrica, este comportamiento podría dar indicios que la etapa de precondicionamiento afecta considerablemente el desarrollo de los defectos hasta alcanzar la ruptura dieléctrica.

6. Conclusiones

En este trabajo se estudiaron las interfases dieléctricas sólidas de probetas que representaban aisladores compuestos, ante sollicitación de alta tensión continua. Para esto se diseñaron y fabricaron las probetas utilizadas en los ensayos, las cuales se componen de resina epoxica y SiR. Se utilizó un procedimiento experimental donde se incluyó ensayos bajo excitación alterna para habilitar el set de experimentación y luego bajo excitación continua, donde se midió y adquirió los datos de descargas parciales y se tomaron fotografías del proceso. Con estos datos se cuantificaron parámetros como TTB, Q_{95} , n y carga acumulada. Además se presentaron gráficos de DP en el tiempo, carga acumulada, histogramas de DP en intervalos y acumulados, los cuales sugiere la norma IEC50270. También se presentaron gráficos PSA de diferencias de carga, de diferencias de tiempo y fotografías tomadas en el ensayo.

El análisis global de los parámetros generales mostró evidentes diferencias entre los ensayos en AC y DC. Primero se encontró que la tensión necesaria para desencadenar procesos de degradación en la interfaz para los ensayos en DC fue aproximadamente del doble que para los ensayos en AC reflejando una mayor rigidez dieléctrica del sistema. Los ensayos en DC presentaron valores de Q_{95} y n un 99% y 70% más pequeños que los ensayos AC, lo cual evidencia que las DP son menos frecuentes y de menor magnitud para excitación DC. En consecuencia, la carga acumulada también fue significativamente menor para los ensayos en DC.

Los gráficos de DP en el tiempo revelaron que el comportamiento de estas para los ensayos en DC presenta una fuerte variabilidad, no se observaron patrones definidos. Los gráficos de acumulación de carga ayudaron a encontrar concentraciones y peaks de DP durante el ensayo, ya que los escalones que se observaron en la curva coinciden con las descargas de mayor magnitud o zonas de mayor concentración de descargas (o ambas). En general los histogramas de DP evidenciaron que las descargas de menor magnitud en el ensayo ocurren con mayor frecuencia.

Con respecto al TTB se observó que el ensayo con mayor tiempo de precondicionamiento (30 minutos) presentó el mayor TTB, el cual dobla en tiempo al segundo mayor TTB de los ensayos. El hecho de que el ensayo con mayor precondicionamiento presente un TTB significativamente mayor respecto a los demás ensayos, sugiere un claro efecto de memoria de carga en la interfaz. Estudios como el de Pant et al. [4] muestran que mantener una tensión continua de forma prolongada genera acumulación de cargas en la interfaz, disminuyendo la actividad de descargas parciales. En la misma línea, Li et al. [20] igual documenta el efecto que tiene la carga acumulada en las descargas parciales, reduciéndolas.

Por otra parte, en los ensayos con grandes escalones de tensión y cambio de polaridad no se llegó a la ruptura. Esto podría explicarse con lo mencionado en el párrafo anterior, por lo que luego del estado transitorio, la tensión continua volvería a estabilizar la interfaz debido a la acumulación de cargas y no se desarrollaría ruptura dieléctrica.

Los resultados obtenidos en la comparación entre el estado inicial y final de los ensayos en AC mostraron una notable evolución que se observó en el histograma de DP, gráfico PSA de diferencias de carga y diferencias de tiempo. No así para los ensayos en DC. Los PSA de diferencias de

cargas mostraron en general formas triangulares inclinadas o de “Y” inclinada lo cual indica un comportamiento estable y repetitivo de las descargas. Complementario a esto, los histogramas no muestran variaciones significativas en las frecuencias de las distintas magnitudes, indicando estabilidad en las descargas. Los PSA de diferencias de tiempo al inicio de los ensayos tiende a estar más concentrado cerca del origen indicando que las descargas ocurren relativamente rápido entre ellas. Luego hacia el final del ensayo se diferencia un pequeño aumento en el tiempo entre descargas, lo cual puede estar asociado a que las descargas se vuelven temporalmente inestables. No se observó algún patrón PSA en los ensayos DC que permite identificar la evolución de la degradación.

La observación de las imágenes de los ensayos evidenció el crecimiento de tracking interfacial en los ensayo AC, con notoria erosión de la interfaz provocado por los caminos carbonizados, causando daño irreversible en el material. En contraste con esto, para los ensayos DC se observó un tipo distinto de defecto en la interfaz. Vacuolas regenerativas y pulsantes que se expanden de un electrodo a otro sin signos de erosión o daño irreversible, pero que de igual forma termina provocando una ruptura dieléctrica.

Este estudio demuestra que caracterizar la degradación de la interfaz bajo excitación DC es complejo. Los parámetros generales muestran que las DP suelen ser pocas, de baja magnitud y erráticas. Además debido a que el comportamiento de las DP durante los ensayos tendió a permanecer estable, se vuelve más difícil realizar diagnósticos e identificar posibles fallas.

Por último se utilizó el análisis de los ensayos AC1, AC2, AC3, DC1, DC2 y DC3 para desarrollar un paper presentado en el Apéndice A. En este paper, de igual forma que en esta memoria, se concluyó que es complejo caracterizar la degradación de la interfaz con excitación DC.

7. Trabajo futuro recomendado

- Incorporar un sistema para aplicar y medir de forma precisa la presión ejercida sobre la probeta. Esto ayudaría a controlar de mejor manera las condiciones de los ensayos y también a evaluar como influye la presión en la degradación bajo excitación DC.
- Diseñar ensayos donde se pueda variar y controlar la temperatura y humedad. Dado que la resistividad del material varía con la temperatura y la conductividad varía con la presencia de humedad, los ensayos podrían replicar condiciones de operación más cercanas a las reales.
- Se recomienda mejorar las uniones, conexiones y fabricación de los conductores del setup experimental con la finalidad de reducir cualquier fuente de ruido posible, mejorando así la calidad de las mediciones y datos obtenidos. Además, con el mismo objetivo de reducir el ruido, se recomienda aplicar un circuito balanceado incluyendo una probeta libre de descargas.
- En el análisis de los resultados se observó que el tiempo de preacondicionamiento puede influenciar el TTB. Por lo que se recomienda diseñar series de ensayos con diferentes tiempos de preacondicionamiento.

-
- Realizar ensayos en polaridad positiva para comparar resultados y analizar como varían los resultados con respecto a polaridad negativa.

A. Paper conferencia ISH 2025: Characterization of Internal Solid Interfaces In composite Insulators Under DC and AC Excitation.

Este paper de conferencia corresponde a una parte de los ensayos presentados en esta memoria. En particular corresponde a los ensayos AC1, AC2, AC3, DC1, DC2 y DC3. El análisis que se utilizó es el mismo explicado en esta memoria y el objetivo es analizar el comportamiento de la interfaz dieléctrica sólido-sólido bajo excitación continua y comparar los resultados con los obtenidos con excitación alterna.

Este paper ya se encuentra aprobado y será presentado en “ISH 2025” entre el 24 y 29 de agosto del presente año, en la ciudad de Karuizawa, Japon.

CHARACTERIZATION OF INTERNAL SOLID INTERFACES IN COMPOSITE INSULATORS UNDER DC AND AC EXCITATION

Roger Schurch*, Ivan Ramirez, Diego Herrera, and Jorge Ardila-Rey

Department of Electrical Engineering, Universidad Tecnica Federico Santa Maria, Chile

*Email: roger.schurch@usm.cl

The increasing deployment of High Voltage Direct Current (HVDC) systems has brought renewed attention to the long-term reliability of composite insulators, particularly the solid–solid dielectric interfaces within them. These interfaces, such as those between silicone rubber and epoxy resin, are known weak points, yet their degradation behavior under DC stress remains poorly understood. This study investigates the electrical performance and degradation patterns of internal solid interfaces in composite insulation through controlled laboratory experiments under both AC and negative DC excitation. Samples composed of bonded epoxy resin and silicone rubber were subjected to AC and DC excitation for interfacial tracking analysis. Partial discharge (PD) activity was recorded and analyzed using conventional parameters—repetition rate, Q_{95} , accumulated charge—and Pulse Sequence Analysis (PSA) plots. Results showed that although PD activity in DC was two orders of magnitude lower than in AC, the time-to-breakdown (TTB) remained similar. PSA patterns and discharge parameters exhibited significant evolution in the AC case, but remained nearly unchanged in DC, limiting their diagnostic value. These findings highlight the fundamental differences in degradation mechanisms under AC and DC, and the need for alternative indicators to assess insulation condition in HVDC systems.

Keywords: HVDC, DIELECTRIC, INTERFACES, COMPOSITE INSULATOR, TRACKING

1. Introduction

The increasing demand for High Voltage Direct Current (HVDC) systems is driven by their well-known technical and economic advantages over conventional HVAC systems, particularly for long-distance power transmission and grid interconnection applications [1]. In Chile, the ± 600 kV Kimal–Lo Aguirre HVDC project marks a critical step in the national energy transition strategy, enabling the integration of renewable energy sources and strengthening the country’s transmission infrastructure [2]. As this and other HVDC systems are deployed, ensuring the long-term reliability of their components becomes essential.

A key element in HVDC transmission is outdoor insulation, where composite insulators are widely adopted due to their favorable mechanical and hydrophobic properties. However, these systems must operate in increasingly harsh environmental conditions—such as those found in northern Chile, characterized by high UV radiation and pollution levels—which can accelerate insulation degradation [3]. In composite insulators, dielectric interfaces represent structurally and electrically vulnerable regions, particularly the internal interface between the silicone rubber (SiR) housing and the glass-fiber reinforced (GFR) epoxy rod. Despite their relevance, the aging mechanisms and failure processes at solid–solid dielectric interfaces under DC excitation remain poorly understood [4].

Partial discharges (PD) are both a mechanism of degradation and a diagnostic indicator of insulation condition. Under AC excitation, PD phenomena have been extensively studied, leading to well-established diagnostic techniques [5]. However, direct application of this knowledge to the DC case is limited by fundamental

differences in the discharge dynamics and detection complexity [6]. In DC systems, the repetition rate of PD events is significantly lower, and the process is influenced by material resistivity, spatial charge, and field recovery dynamics [7]–[10]. This results in a more erratic and less predictable PD behavior compared to the AC case, posing challenges for diagnostics and reliability assessment in HVDC equipment.

To advance the understanding of solid dielectric interfaces under DC conditions, this work investigates the behavior of a model interface composed of epoxy resin and silicone rubber, representing the internal structure of a composite insulator. Laboratory experiments were conducted under both AC and DC excitation, and the interface performance was analyzed through partial discharge measurements, charge magnitude statistics (including Q_{95}), repetition rate (n), and pulse sequence analysis (PSA). The results are compared across excitation types to assess the sensitivity of the measured parameters to interfacial degradation processes. This study is part of an ongoing research project focused on characterizing aging phenomena in dielectric interfaces and developing diagnostic models to enhance HVDC outdoor insulation reliability.

2. Methodology

2.1 Experimental Setup

A series of AC tests was initially conducted to validate the experimental setup, given the broader experience available in AC partial discharge testing. Three tests were carried out using the same type of sample, varying only the applied RMS voltage: 9, 10, and 11 kV. Subsequently, three additional tests were performed under negative DC excitation, at voltage levels of 19, 22, and 25 kV.

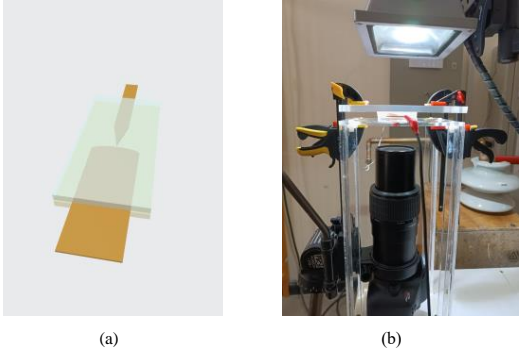


Fig. 1: (a) Sample geometry. (b) Sample and optical imaging setup

The samples consisted of two bonded dielectric layers: one of epoxy resin and the other of silicone rubber, as shown in Fig. 1a. Both layers had dimensions of $100 \times 50 \times 4$ mm and were joined under equal, but not quantified, mechanical pressure. These materials formed a solid–solid interface where the discharge activity was concentrated. At this interface, copper electrodes were placed in a flat, quasi two-dimensional point-to-plane configuration, with a tip-to-plane gap of 2 mm. The electrodes were 10 μm thick and embedded within the interface.

The epoxy resin used was MEPOX 1124U, a locally available DGEBA-type (diglycidyl ether of bisphenol A) epoxy resin. The resin was mixed with its catalyst in a 2:1 ratio by weight. The silicone rubber was RTV XL 8820T, mixed with its catalyst at a 50:1 ratio. Both materials were degassed prior to curing. The initial curing was conducted at 25 °C for 24 hours, followed by a post-curing stage for the epoxy resin at 50 °C for 15 hours to ensure proper cross-linking and mechanical stability.

The test circuit is shown in Fig. 2. For AC excitation, a signal generator (Rigol DG-1022) was connected to a high-voltage amplifier (Trek 20/20C-HS, gain 1:2000). For DC excitation, a BAUR VLF Frida unit was used, capable of generating both positive and negative DC voltages. In both AC and DC tests, a 1 M Ω current-limiting resistor was placed in series with the point electrode, while the plane electrode was grounded. Partial discharge activity was measured using a Techimp High Frequency Current Transformer (HFCT) sensor with 1-80 MHz bandwidth and an OMICRON MPD600 system. Optical images of the samples before and after breakdown were acquired using a Canon T6 reflex camera equipped with an MP-E 65 mm f/2.8 1-5X macro lens (see Fig. 1b). To initiate interfacial tracking, a stepwise voltage increase was applied over time until the formation of a visible artifact at the

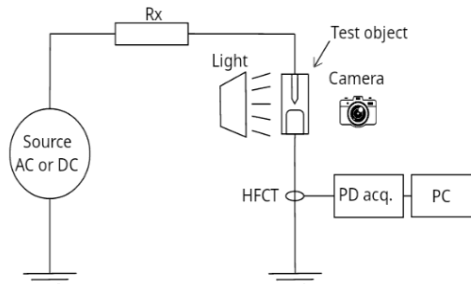


Fig. 2: Circuit for PD measurement and monitoring.

solid–solid interface. The parameters for the preconditioning phase are summarized in Table 1. Once the onset of tracking was visually confirmed, the applied voltage was held constant until dielectric breakdown occurred. The final voltage reached during the preconditioning is considered the test voltage for each interfacial tracking experiment. The step increase process itself is not analyzed in this study.

Table 1: Interfacial tracking initiation parameters

Sample	Preconditioning time (min)	Voltage step (kV)	Initial voltage (kV)	Final voltage (kV)
AC1	2	1	1	9
AC2	2	1	1	10
AC3	2	1	1	11
DC1	2	-1	-1	-19
DC2	5	-1	-10	-22
DC3	30	-1	-6	-25

2.2 Methods of analysis

Two complementary strategies were used to analyze the partial discharge data. The first consisted of a global analysis, in which all PD activity was considered from the moment the test voltage was established until dielectric breakdown occurred. This allowed for the extraction of overall parameters characterizing the discharge behavior throughout the test duration. The second strategy focused on comparing the initial and final (prior to breakdown) stages of each experiment. Two datasets were selected for each sample, consisting of 800 pulses recorded at the beginning and end of the testing period. This approach, similar to that employed in [11], aimed to assess the evolution of partial discharge activity and interfacial tracking growth under sustained high-voltage stress.

The PD parameters analyzed in this study were those established by IEC 60270 [12], including the pulse repetition rate n , accumulated apparent charge, maximum apparent charge Q , and the time-to-breakdown (TTB). For further detail on these parameters and their diagnostic significance, refer to [12], [13], [14].

Additionally, Pulse Sequence Analysis (PSA) plots were used to study the discharge dynamics. This technique evaluates the relationships between consecutive PD pulses by plotting either the differences in apparent charge or interarrival time, providing insight into memory effects and pulse-to-pulse behavior [15], [16]. These PSA patterns were analyzed at both the initial and final stages of each test to determine whether temporal or magnitude-based discharge dynamics changed as degradation progressed.

Finally, the evolution of the degradation artifact was assessed through optical imaging of the tracking structures. This allowed visual confirmation of the degradation mode and supported the interpretation of the quantitative PD data, contributing to a more comprehensive characterization of the solid–solid interface behavior.

3. Results and Analysis

3.1 General comparison between AC and DC

The global results of the experiments are summarized in Table 2. The applied voltage corresponds to the value at which interfacial tracking was initiated, following the preconditioning steps described in Section 2.1. In the AC tests, the voltage is reported as the RMS value of the sinusoidal waveform. The time-to-breakdown (TTB) is defined as the duration between the establishment of the testing voltage and the final dielectric failure. Partial discharge (PD) activity was quantified through the repetition rate n (pulses/s), the 95th percentile of apparent charge magnitude (Q_{95}), and the total accumulated apparent charge throughout the experiment, i.e., over the entire TTB.

Table 2: Summary of analyzed parameters of the entire AC and DC experiments.

Sample (Test kV)	TTB (s)	n (PD/s)	Q_{95} (nC)	Accumulated charge (μC)
AC1 (9)	595	823	8.2	1165
AC2 (10)	110	992	8.3	349
AC3 (11)	272	983	13.6	944
DC1(-19)	300	6	1.4	1
DC2(-22)	240	14	1.8	4
DC3(-25)	1080	14	1.3	6

A first evident observation is that the voltage required to initiate interfacial tracking in DC is approximately twice as high as in AC. This behavior is consistent with trends reported in literature [17], and is associated with the different nature of dielectric stress and electric field distribution under DC excitation. Despite this difference in voltage levels, the time-to-breakdown (TTB) shows no consistent trend between AC and DC. Notably, sample DC3 (-25 kV), which had a longer preconditioning time of 30 minutes (compared to 2 minutes for other tests), exhibited a significantly longer TTB. This observation suggests that the preconditioning duration may influence TTB under DC, a hypothesis that will be addressed in further detail in ongoing work.

Regarding partial discharge activity, the repetition rate under DC was substantially lower compared to AC. On average, the recorded repetition rate for DC tests was approximately 1% of the values observed under AC excitation, confirming previously reported findings [8], [18]. Similarly, the magnitude of the discharges under DC was consistently lower. The average Q_{95} value under DC was approximately 85% lower than under AC. In terms of accumulated charge, the difference is even more pronounced: the total accumulated apparent charge under AC was three orders of magnitude higher than in DC tests. These results emphasize the fundamentally different nature of PD behavior under the two excitation regimes and reinforce the need for tailored diagnostic and aging models for DC insulation systems.

3.2 Artifact structure – Optical images

Fig. 3 presents optical images of samples AC1 (subfigures(a) and (b)) and DC3 (subfigures (c) and (d)), showing the surface

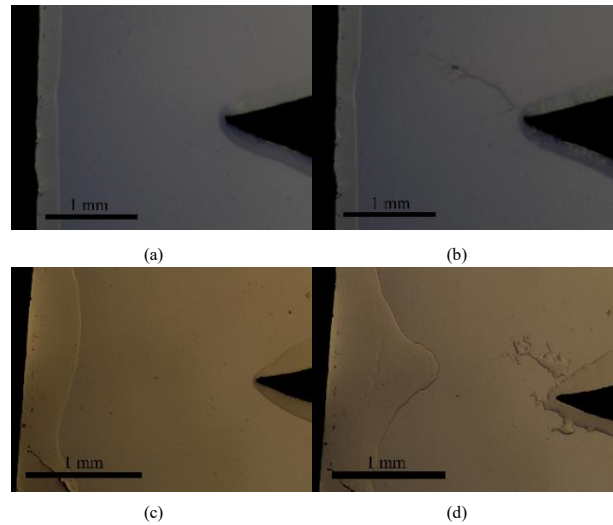


Fig. 3: Pictures of samples. AC1: initial (a) and final (b) stages. DC3: initial (a) and final (b) stages.

condition before voltage application (subfigures (a) and (c)), and immediately prior to breakdown (subfigures (b) and (d)). These images provide a qualitative comparison of the structural evolution of the degradation artifact under AC and DC excitation. In the case of AC, the observed development aligns with previous reports [11].

For the AC sample, the degradation pattern corresponds to the typical growth of interfacial tracking, characterized by a dominant surface tree-like structure that extends from the high-voltage electrode and begins to branch toward the grounded plane electrode. Evidence of carbonized tracking paths is observed, indicating irreversible surface degradation. This behavior is consistent with the mechanisms described for interfacial tracking under AC excitation, where sustained discharges progressively erode the insulation surface.

In contrast, the DC case (DC3) exhibits a fundamentally different artifact morphology. No well-defined carbonized tracking paths are present. Instead, the defect consists of expanding regenerative vacuoles, which grow in a pulsating manner and increase in size over time. These vacuoles do not form a continuous conductive path along the surface; rather, they appear intermittently and gradually weaken the interface. This behavior can be seen in Fig. 3d, where the vacuole expansion is evident prior to breakdown. The intermittent nature of their growth suggests a pulsating discharge mechanism that intermittently separates the interface, creating the conditions for failure. This phenomenon represents a different degradation mode compared to the AC case and may require distinct modeling approaches to understand the associated failure mechanisms under DC stress.

3.3 Initial and final stage comparison

3.3.1. Analysis of parameter evolution

Table 3 presents a comparison of the key PD parameters - repetition rate (n) and 95th percentile charge magnitude (Q_{95}) - between the initial (subindex 1) and final (subindex 2) stages of the experiments. These stages were selected to reflect the beginning of voltage application and the moments preceding breakdown, respectively.

Table 3: Summary table of analyzed parameters during the initial and final stages of AC and DC experiments.

Sample (Test kV)	n_1 (PD/s)	n_2 (PD/s)	$Q_{95\ 1}$ (nC)	$Q_{95\ 2}$ (nC)
AC1 (9)	606	700	2.8	10.0
AC2 (10)	1180	988	4.9	15.6
AC3 (11)	1177	888	3.6	23.8
DC1 (-19)	6	7	1.3	1.5
DC2 (-22)	25	25	1.5	1.3
DC3 (-25)	14	14	1.3	1.3

No significant changes in repetition rate (n) are observed between the initial and final stages for either AC or DC excitation. However, in the AC tests, a slight decrease in n is noted in two of the three cases, while the DC tests show virtually constant values throughout the duration of the experiment. In particular, the values of n_1 and n_2 for DC2 and DC3 remain unchanged, indicating a steady and low discharge activity under DC stress.

Regarding the discharge magnitude, characterized by Q_{95} , a clear contrast emerges between AC and DC. Under AC excitation, the final-stage Q_{95} is 3 to 6 times higher than in the initial stage, suggesting an increase in discharge energy as degradation progresses. This behavior is not observed under DC, where Q_{95} remains practically unchanged between stages for all three voltage levels.

In general, these simple parameters — repetition rate and Q_{95} — as recommended by international standards, were not sufficient to reveal a clear evolution of the dielectric interface degradation process in the DC case.

3.3.2. PSA patterns

The evolution of PSA patterns was analyzed using two governing variables: the partial discharge magnitude (Q) and the time of PDs (t). This analysis allows observation of discharge dynamics and memory effects throughout the experiment, particularly between the initial and final stages.

Fig. 4 presents the PSA plots for sample AC1. Subfigures (a) and (b) correspond to the charge-based analysis, and (c) and (d) to the time-based analysis. The initial stage is shown in (a) and (c), and the final stage in (b) and (d).

For the charge-based PSA, a clear evolution in the pattern can be

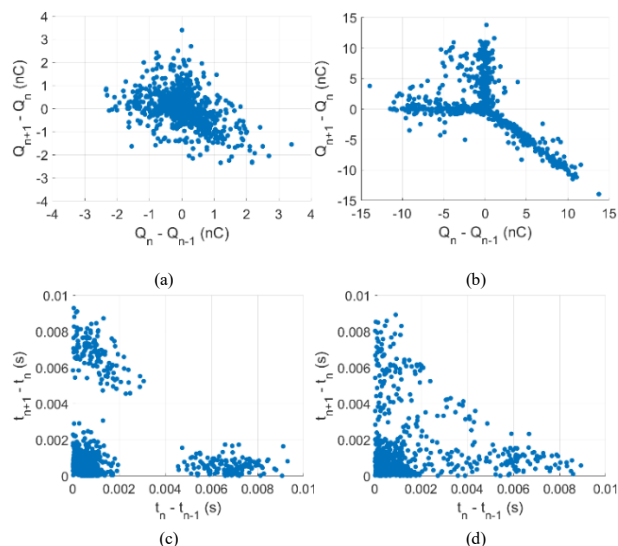


Fig. 4: PSA patterns of AC1. PD magnitude – apparent charge (Q): initial (a) and final (b) intervals. PD occurrence time: initial (c) and final (d) intervals.

observed. At the beginning of the test (Fig. 4a), the discharge sequence forms a tilted triangular shape, while toward the end (Fig. 4b), the pattern transforms into an inclined “Y” structure. This evolution is accompanied by a significant increase in discharge magnitude, as reflected in Table 3. The transformation in shape may reflect a more directional PD sequence, potentially associated with the development of conductive paths or surface degradation, as observed in electrical treeing mechanisms under AC excitation [19].

In the time-based PSA, an evolution is also observed. Initially (Fig. 4c), three well-defined clusters are visible, indicating a repetitive and somewhat stable temporal behavior. Toward the final stage (Fig. 4d), the pattern becomes more dispersed, pointing to greater variability in discharge timing and the possible breakdown of earlier periodicity. A similar trend was observed in samples AC2 and AC3, confirming that PSA patterns evolve consistently across different voltage levels under AC excitation. These results suggest that PSA can effectively capture changes in discharge dynamics and may serve as a diagnostic tool to assess the aging state of solid–solid dielectric interfaces under AC stress.

To analyze the behavior under DC excitation, Fig. 5 presents the PSA plots for sample DC3. Subfigures (a) and (b) correspond to the charge-based analysis, and (c) and (d) to the time-based analysis. The initial stage is shown in (a) and (c), and the final stage in (b) and (d).

For the case of PSA patterns obtained from PD magnitude Q (Fig. 5a and 5b), the initial stage exhibits a relatively symmetric, compact, and star-like structure, with three defined branches extending from the origin. This behavior is consistent with patterns reported in [20]. The central cluster is denser in the initial stage, with most of the data concentrated around the zero crossings of both axes. This configuration could indicate a relatively stable and repetitive discharge regime. Toward the final stage, the pattern appears more dispersed and elongated, particularly along diagonal directions. The central cluster shows a slight widening, and the overall distribution

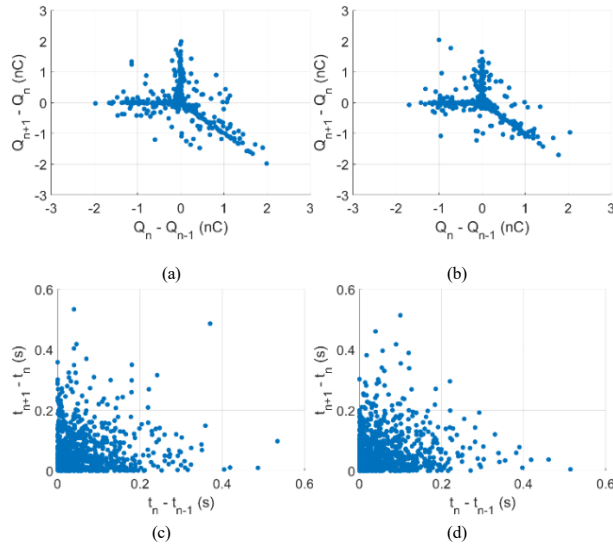


Fig. 5: PSA patterns of DC3. PD magnitude – apparent charge (Q): initial (a) and final (b) intervals. PD occurrence time: initial (c) and final (d) intervals.

is more scattered, which may reflect a decrease in discharge stability or changes at the interface as the experiment progressed. However, the differences between the initial and final patterns are not pronounced, making it more difficult to clearly assess the progression of the failure process from this analysis alone.

In the case of PSA patterns based on PD occurrence time t (Fig. 5c and 5d), the pattern in both stages shows a concentrated cloud of points near the origin, with the majority of events exhibiting time differences below 0.2 seconds on both axes. This suggests that PD pulses occur frequently and with relatively regular short intervals. The cluster density decays rapidly as the interarrival time increases, suggesting limited dispersion in pulse recurrence. While the general structure of the pattern remains similar between the initial and final stages, a slight increase in horizontal dispersion can be seen in the final stage. This may be associated with growing variability in discharge timing, suggesting that the system becomes marginally less temporally stable as degradation advances. Overall, for the DC case, PSA patterns, whether based on charge magnitude or timing, did not exhibit substantial changes between the initial and final stages, making it more difficult to use them as reliable indicators of degradation progression under these conditions.

4. Conclusions

Although partial discharge (PD) activity was significantly higher under AC excitation, the time-to-breakdown (TTB) was found to be similar in both AC and DC tests. This suggests that in the DC case, PD may not be the dominant mechanism leading to dielectric failure.

The degradation artifact observed under AC excitation corresponded to surface interfacial tracking. The mechanism involved progressive erosion of the interface, forming irreversible damage such as carbonized paths. In contrast, the degradation observed under DC excitation was fundamentally different. Regenerative vacuoles emerged intermittently, expanding and collapsing in a pulsating manner. This behavior gave the impression

of temporary self-recovery at the interface. However, despite the absence of clearly visible permanent damage, dielectric breakdown still occurred, with less warning or predictability than in the AC case.

In AC tests, an increase in both the repetition rate (n) and apparent charge magnitude (Q_{95}) was observed from the initial to final stages of the experiment. In contrast, these parameters remained practically unchanged under DC excitation. This suggests that conventional PD parameters may not adequately reflect the progression of degradation under DC conditions.

For AC excitation, PSA patterns showed a clear evolution between the initial and final stages of degradation. These changes could be linked to structural alterations at the interface and may provide a potential basis for diagnostic tools. The combined use of conventional PD parameters and PSA at distinct degradation stages proved effective for characterizing interfacial tracking under AC stress. However, for the DC case, PSA patterns showed little variation throughout the experiment, limiting their usefulness as indicators of failure progression under DC stress.

Preliminary observations also suggest that preconditioning time may influence time-to-breakdown under DC excitation, as seen in the longer TTB recorded for the sample with the longest preconditioning period. This effect should be explored further in future investigations.

The study confirms that characterizing interfacial tracking under DC is inherently more complex. PDs are fewer and more erratic, and PD-derived quantities remain stable throughout the experiment. This makes diagnosis and failure prediction significantly more difficult under DC conditions.

Acknowledgments

This work was supported by the Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo through the Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico, ANID-FONDECYT Regular project No. 1242037.

References

- [1] A. Alassi, S. Bañales, O. Ellabban, G. Adam, and C. MacIver, "HVDC Transmission: Technology Review, Market Trends and Future Outlook," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 112, pp. 530–554, Sep. 2019, doi: 10.1016/J.RSER.2019.04.062.
- [2] J. Peralta, "'HVDC PROJECT KIMAL - LO AGUIRRE' Enabler for a Sustainable Decarbonization Process," Nov. 10, 2020. Accessed: Mar. 05, 2025. [Online]. Available: https://energia.gov.cl/sites/default/files/minisitorio/02_coordinador_jaime_peralta.pdf
- [3] S. M. Rowland, O. de la Cerda, and N. R. Haigh, "Implementation of a solution to the problem of dry-band arcing on ADSS cables," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 1, pp. 703–709, Jan. 2007, doi: 10.1109/TPWRD.2006.881600.
- [4] T. Wong, I. Timoshkin, S. Macgregor, M. Wilson, and M. Given, "Dielectric Interfaces in High-Voltage Technology: Overview and Theoretical Approaches to the Modeling of Functional and Breakdown Behavior," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 39, no. 4, pp. 34–49, Jul. 2023, doi: 10.1109/MEI.2023.10151812.
- [5] R. Bartnikas, "Partial discharges. Their mechanism, detection and

- measurement," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 9, no. 5, pp. 763–808, Oct. 2002, doi: 10.1109/TDEI.2002.1038663.
- [6] H. Q. Niu, A. Cavallini, and G. C. Montanari, "Identification of partial discharge phenomena IN HVDC apparatus," *Conference Record of IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, pp. 373–376, 2008, doi: 10.1109/ELINSL.2008.4570352.
- [7] P. H. F. Morshuis and J. J. Smit, "Partial discharges at dc voltage: Their mechanism, detection and analysis," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 12, no. 2, pp. 328–340, Apr. 2005, doi: 10.1109/TDEI.2005.1430401.
- [8] P. Schröder, Y. Neubauer, T. Schoenemann, and S. Arumugam, "Quasi-phase resolved partial discharge pattern analysis of surface discharges arising on the tar polluted porcelain bushing of an electrostatic precipitator unit under high voltage DC," *Engineering Reports*, vol. 3, no. 9, p. e12379, Sep. 2021, doi: 10.1002/ENG2.12379.
- [9] 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, May 2022, doi: 10.17775/CSEEJPES.2021.04740.
- [10] S. A. Madhar, M. Brunner, A. R. Mor, and P. Mraz, "Measurement of key dielectric properties for surface PD model under HVDC," *Proceedings of the 2020 IEEE 3rd International Conference on Dielectrics, ICD 2020*, pp. 886–889, Jul. 2020, doi: 10.1109/ICD46958.2020.9341953.
- [11] P. Donoso-Daille, V. Peesapati, C. Smith, and K. Tavernier, "Characterisation of Interfacial Tracking in Solid Insulation Interfaces Using Partial Discharge Measurements," *2024 IEEE Electrical Insulation Conference, EIC 2024*, pp. 283–286, 2024, doi: 10.1109/EIC58847.2024.10579380.
- [12] IEC-60270:2000, "High-voltage test techniques - Partial discharge measurements".
- [13] R. Schurch, L. Orellana, P. Donoso, J. Ardila-rey, and J. Montana, "Pulse Waveform, Phase-Resolved and Pulse Sequence Analysis of Partial Discharges During Electrical Tree Growth in Epoxy Resin," in *Int'l. Symp. High Voltage Eng. (ISH)*, 2017.
- [14] N. C. Sahoo, M. M. A. Salama, and R. Bartnikas, "Trends in partial discharge pattern classification: a survey," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 12, no. 2, pp. 248–264, 2005.
- [15] R. Patsch and F. Berton, "Pulse Sequence Analysis - a diagnostic tool based on the physics behind partial discharges," *J Phys D Appl Phys*, vol. 35, no. 1, p. 25, 2002, [Online]. Available: <http://stacks.iop.org/0022-3727/35/i=1/a=306>
- [16] P. Donoso, R. Schurch, J. Ardila, and L. Orellana, "Analysis of Partial Discharges in Electrical Tree Growth Under Very Low Frequency (VLF) Excitation Through Pulse Sequence and Nonlinear Time Series Analysis," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 163673–163684, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3022292.
- [17] Y. Wang, S. Zhang, P. Ren, X. Yang, and C. Liu, "Study of the Interfacial Electrical Tree Growth Characteristics under AC and DC Voltages," *Proceedings of 2022 IEEE 5th International Electrical and Energy Conference, CIEEC 2022*, pp. 4045–4049, 2022, doi: 10.1109/CIEEC54735.2022.9845962.
- [18] J. Guo, Z. Zheng, and A. Caprara, "Partial Discharge Tests in DC Applications: A Review," *2020 IEEE Electrical Insulation Conference, EIC 2020*, pp. 225–229, Jun. 2020, doi: 10.1109/EIC47619.2020.9158747.
- [19] N. M. Chalashkanov, S. J. Dodd, L. A. Dissado, and J. C. Fothergill, "Pulse sequence analysis on PD data from electrical trees in flexible epoxy resins," in *IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenom. (CEIDP)*, 2011, pp. 776–779, doi: 10.1109/ceidp.2011.6232771.
- [20] D. H. Oh, H. S. Kim, and B. W. Lee, "Novel diagnostic method of dc void discharge in high temperature superconducting cable based on pulse sequence analysis," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 30, no. 4, Jun. 2020, doi: 10.1109/TASC.2020.2974437.

Referencias

- [1] “High Voltage Engineering Fundamentals — ScienceDirect.” [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/book/9780750636346/high-voltage-engineering-fundamentals>
- [2] T. Wong, I. Timoshkin, S. MacGregor, M. Wilson, and M. Given, “Dielectric Interfaces in High-Voltage Technology: Overview and Theoretical Approaches to the Modeling of Functional and Breakdown Behavior,” *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 39, no. 4, pp. 34–49, 7 2023. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10151812/>
- [3] H. Karner and M. Ieda, “Technical aspects of interfacial phenomena in solid insulating systems,” in *[1991] Proceedings of the 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*. IEEE, 1992, pp. 592–597. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/172128/>
- [4] C. Pan, K. Wu, G. Chen, Y. Gao, M. Florkowski, Z. Lv, and J. Tang, “Understanding Partial Discharge Behavior from the Memory Effect Induced by Residual Charges: A Review,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 27, no. 6, pp. 1951–1965, 12 2020.
- [5] T. Erwin, “Introduction to Partial Discharge (Causes, Effects, and Detection),” 5 2020.
- [6] M. Hoof and R. Patsch, “Voltage - difference analysis, a tool for partial discharge source identification,” *Conference Record of IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, vol. 1, pp. 401–406, 1996.
- [7] N. R. Watson and J. D. Watson, “An Overview of HVDC Technology,” *Energies 2020, Vol. 13, Page 4342*, vol. 13, no. 17, p. 4342, 8 2020. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/17/4342/htmhttps://www.mdpi.com/1996-1073/13/17/4342>
- [8] “Vertimiento de energía de centrales eólicas y solares fotovoltaicas del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) en Chile durante 2022.” [Online]. Available: <https://www.fraunhofer.cl/es/publicaciones/white-papers/vertimiento-energia-centrales-eolicas-y-solares-fotovoltaicas-del-sistema-electrico-nacional-2022.html>
- [9] C. Zhang, J.-P. Kucera, and R. Kaluzny, “The Electrical Behaviors of the Interface in Solid-Insulated Distribution Equipments,” in *2008 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. IEEE, 10 2008, pp. 690–693. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4772778/>
- [10] IEC-60270:2000, “High-voltage test techniques - Partial discharge measurements.”
- [11] D. D. Kurniawan, A. Cavallini, Suwarno, L. Cirioni, and R. Candela, “A Novel Setup To Investigate Partial Discharges In Interfaces Subjected To HVDC Voltages,” in *2019 2nd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS)*. IEEE, 10 2019, pp. 008–011. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9011097/>

-
- [12] R. Arora and W. Mosch, "High Voltage and Electrical Insulation Engineering," *High Voltage and Electrical Insulation Engineering*, 10 2011. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470947906>
- [13] Z. Shi, S. Zhang, T. Jin, Q. Huang, L. Zhang, and C. Liu, "Research on the Operating Characteristics of Composite Insulators in Extreme Climate Areas," in *2024 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*. IEEE, 5 2024, pp. 1–5. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10556031/>
- [14] M. I. Illanes Jorquera, "Análisis del desempeño de aisladores en condiciones de contaminación bajo excitación continua mediante medición de descargas parciales," 10 2024. [Online]. Available: <https://repositorio.usm.cl/handle/123456789/73924>
- [15] "Impacts & Mitigation - Insulator Flashover." [Online]. Available: https://volcanoes.usgs.gov/volcanic_ash/insulator_flashover.html
- [16] M. T. Nazir, A. Khalid, S. Akram, P. Mishra, I. I. Kabir, G. H. Yeoh, B. T. Phung, and K. L. Wong, "Electrical tracking, erosion and flammability resistance of high voltage outdoor composite insulation: Research, innovation and future outlook," *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 156, p. 100757, 12 2023. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927796X23000438>
- [17] E. Kantar, F. Mauseth, E. Ildstad, and S. Hvidsten, "Longitudinal AC breakdown voltage of XLPE-XLPE interfaces considering surface roughness and pressure," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 24, no. 5, pp. 3047–3054, 10 2017.
- [18] E. Kantar, E. Ildstad, and S. Hvidsten, "Effect of elastic modulus on the tangential AC breakdown strength of polymer interfaces," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 26, no. 1, pp. 211–219, 2 2019.
- [19] E. Kantar, D. Panagiotopoulos, and E. Ildstad, "Factors influencing the tangential AC breakdown strength of solid-solid interfaces," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 23, no. 3, pp. 1778–1788, 6 2016.
- [20] 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, 5 2022.
- [21] T. Venge and C. Nyamupangedengu, "A review of test voltages used in partial discharge measurements," *IEEE AFRICON Conference*, vol. 2021-September, 9 2021.
- [22] R. Bartnikas, "Partial discharges their mechanism, detection and measurement," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 9, no. 5, pp. 763–808, 10 2002.
- [23] Y. Wang, S. Zhang, P. Ren, X. Yang, and C. Liu, "Study of the Interfacial Electrical Tree Growth Characteristics under AC and DC Voltages," *Proceedings of 2022 IEEE 5th International Electrical and Energy Conference, CIEEC 2022*, pp. 4045–4049, 2022.

-
- [24] P. Schröder, Y. Neubauer, T. Schoenemann, and S. Arumugam, “Quasi-phase resolved partial discharge pattern analysis of surface discharges arising on the tar polluted porcelain bushing of an electrostatic precipitator unit under high voltage DC,” *Engineering Reports*, vol. 3, no. 9, p. e12379, 9 2021. [Online]. Available: [/doi/pdf/10.1002/eng2.12379https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/eng2.12379https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/eng2.12379](https://doi/pdf/10.1002/eng2.12379https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/eng2.12379https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/eng2.12379)
- [25] S. A. Madhar, M. Brunner, A. R. Mor, and P. Mraz, “Measurement of key dielectric properties for surface PD model under HVDC,” *Proceedings of the 2020 IEEE 3rd International Conference on Dielectrics, ICD 2020*, pp. 886–889, 7 2020.
- [26] C. Hudon and M. Bélec, “Partial discharge signal interpretation for generator diagnostics,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 12, no. 2, pp. 297–319, 4 2005.
- [27] T. Shahsavarian, Y. Pan, Z. Zhang, C. Pan, H. Naderiallaf, J. Guo, C. Li, and Y. Cao, “A Review of Knowledge-Based Defect Identification via PRPD Patterns in High Voltage Apparatus,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 77 705–77 728, 2021.
- [28] “Pulse-sequence-analysis, a way to get a better insight into the physics of discharges — IET Conference Publication — IEEE Xplore.” [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/341439>
- [29] D.-H. Oh, H.-S. Kim, and B.-W. Lee, “Novel Diagnostic Method of DC Void Discharge in High Temperature Superconducting Cable Based on Pulse Sequence Analysis,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 30, no. 4, pp. 1–5, 6 2020. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9000547/>
- [30] G. C. Stone, A. Cavallini, G. Behrmann, and C. A. Serafino, “Practical Partial Discharge Measurement on Electrical Equipment,” *Practical Partial Discharge Measurement on Electrical Equipment*, pp. 1–546, 1 2023.
- [31] W. Bao, Y. Liu, Y. Gao, S. Li, X. Liang, and W. Jiafu, “Study on the interface partial discharge between silicone rubber and fiber reinforced plastic in composite insulators,” *Annual Report - Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP*, vol. 2015-December, pp. 762–765, 12 2015.
- [32] P. D. Bastidas and S. M. Rowland, “Interfacial aging in composite insulators as a result of partial discharge activity,” *2017 IEEE Electrical Insulation Conference, EIC 2017*, pp. 13–16, 8 2017.
- [33] Z. Zhang, L. Yang, Q. Li, P. Song, Y. Yu, H. Liang, X. Kong, and B. Du, “Interfacial Insulation Degradation Characteristics between Epoxy Resin and Silicone Rubber under Different Interface Pressures,” *Proceedings of the 2024 IEEE 5th International Conference on Dielectrics, ICD 2024*, 2024.
- [34] P. Donoso-Daille, V. Peesapati, C. Smith, and K. Tavernier, “Characterisation of Interfacial Tracking in Solid Insulation Interfaces Using Partial Discharge Measurements,” *2024 IEEE Electrical Insulation Conference, EIC 2024*, pp. 283–286, 2024.

-
- [35] X. Li, H. Hu, K. Song, Z. Wang, and Z. Jia, "Voltage Endurance Characteristics of Cross-linked Polyethylene-Silicone Rubber Interface Subjected to DC and AC Voltages," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2024.
- [36] R. A. Santelices Aravena, "Comparación de técnicas de diagnóstico dieléctrico utilizadas en la industria mediante análisis de descargas parciales en máquinas rotatorias," 2024. [Online]. Available: <https://repositorio.usm.cl/handle/123456789/73904>