



UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Ingeniería Eléctrica

Análisis de la resistencia al tracking de probetas de silicona bajo corriente continua y diferentes condiciones ambientales emuladas

Oswaldo Esteban Núñez Araya

Requisito parcial para obtener el título de:

Ingeniero Civil Electricista

Profesor guía: Dr. Roger Schurch Brandt (UTFSM)

Profesor Correferente: Dr. Jorge Ardila Rey (UTFSM)

OCTUBRE, 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: Análisis de la resistencia al tracking de probetas de silicona bajo corriente continua y diferentes condiciones ambientales emuladas

Nombre del candidato(a): Osvaldo Esteban Nuñez Araya

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Eléctrica

Campus: Casa Central

Departamento: Ingeniería Eléctrica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

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

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

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

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


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

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

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

4.- FIRMAS

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

Fecha: 15/10/2025 Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 15/10/2025 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.

Abstract

The consolidation of an HVDC project in Chile requires a deeper understanding of the performance of polymeric insulators under direct voltage in arid and saline environments. In this context, this thesis studies the resistance to *tracking* and erosion of an HTV silicone rubber when three factors act together: system polarity, different levels of surface contamination, and UV radiation ageing. The work is motivated by the lack of public data for local conditions and because current IEC standards are still largely based on AC tests.

The research is organized in three stages. First, a review of standards and technical literature is used to select procedures that can be applied and replicated by other laboratories and future work. Second, the inclined-plane method is adapted to a DC scheme of $\pm 3,5$ kV; a reproducible contaminant deposition protocol is implemented (classes E2, E3, and E5); and the ageing is accelerated with a controlled UV dose equivalent to several days of real exposure in northern Chile. Measurements include leakage current, mass loss, changes in hydrophobicity, and inspection of electrode integrity.

The results confirm that the severity of the phenomenon depends on the synergy among the three factors. Under positive polarity, leakage currents and erosion rates are clearly higher than under negative polarity; severe contamination produces large initial current peaks and accelerates hydrophobicity loss. UV ageing changes the surface properties and, combined with saline contamination, produces longer and deeper carbonized paths. Damage to the metallic electrodes is also observed, introducing an additional risk scenario that is often omitted when the evaluation focuses only on the polymer.

Finally, implications are discussed for the operation of HVDC lines that cross coastal and desert zones, highlighting the need for monitoring strategies that integrate leakage-current measurement, periodic inspection of the surface state, and statistical control of environmental pollution. The conclusions show that, although composite insulators have advantages over traditional ceramic solutions, their performance under DC is conditioned by environmental factors that require more extensive and specific studies. Knowledge gaps are identified—for example, the long-term interaction between impulsive discharges and DC stress—that can guide future theses in high voltage and dielectric materials.

Resumen

La consolidación de un proyecto HVDC en Chile obliga a comprender con mayor profundidad el desempeño de los aisladores poliméricos expuestos a tensión continua en entornos áridos y salinos. En este contexto, la presente memoria estudia la resistencia al tracking y a la erosión de un compuesto de silicona HTV cuando actúan, de forma combinada, la polaridad del sistema, distintos niveles de contaminación superficial y el envejecimiento por radiación ultravioleta. El trabajo se justifica por la ausencia de datos públicos para condiciones locales y porque las normas IEC vigentes siguen basadas, en gran medida, en ensayos bajo corriente alterna.

La investigación se estructura en tres etapas. Primero, se revisa la literatura técnica para identificar procesos normados que se puedan aplicar en línea con la investigación, para que todo lo realizado sea replicable en cualquier laboratorio y por todo el que lo requiera. En la segunda etapa se adapta el método de plano inclinado a un esquema DC de $\pm 3.5\text{kV}$, se implementa un protocolo reproducible de deposición contaminante (clases E2, E3 y E5) y se acelera el envejecimiento mediante una dosis controlada de radiación UV equivalente a varios días de exposición real en el norte de Chile. Se registran corrientes de fuga, pérdida de masa, cambios en la hidrofobicidad superficial y se inspecciona la integridad de los electrodos.

Los resultados confirman que la severidad del fenómeno depende de la sinergia entre los tres factores estudiados. Bajo polaridad positiva se observan corrientes de fuga y tasas de erosión notablemente superiores a las registradas en polaridad negativa, mientras que la contaminación severa provoca incrementos sustanciales en los picos iniciales de corriente y acelera la pérdida de hidrofobicidad. El envejecimiento UV modifica las propiedades superficiales de la silicona y, al combinarse con contaminación salina, genera trayectorias de carbonización más extensas y profundas. Se constata, además, daños en los electrodos metálicos, lo que introduce un nuevo escenario de riesgo que suele omitirse en las evaluaciones convencionales centradas sólo en el polímero.

Finalmente, se discuten las implicancias de estos hallazgos para la operación de líneas HVDC que atraviesan zonas costeras y desérticas, enfatizando la necesidad de estrategias de monitoreo que integren la medición de corrientes de fuga, la inspección periódica del estado superficial y el control estadístico de la contaminación ambiental. Las conclusiones evidencian que, aun cuando los aisladores compuestos ofrecen ventajas frente a soluciones cerámicas tradicionales, su desempeño en régimen de corriente continua se ve condicionado por factores ambientales que exigen estudios más extensos y específicos. El trabajo cierra identificando lagunas de conocimiento —por ejemplo, la interacción a largo plazo entre descargas impulsivas y tensión DC— y planteando preguntas que orientarán futuras tesis en el área de alta tensión y materiales dieléctricos.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Objetivos	4
1.1.1. Objetivo general	4
1.1.2. Objetivos específicos	4
2. Marco teórico	5
2.1. Ensayos de tracking y erosión.	5
2.1.1. Materiales necesarios	6
2.1.2. Pasos para realizar el ensayo	8
2.2. Norma IEC 60815	10
2.2.1. Tipos de contaminación	10
2.2.2. Tipos de Ambientes	11
2.2.3. Evaluación de la Severidad de la Contaminación del Sitio	12
2.2.4. Ejemplos de Ambientes Típicos	12
2.2.5. Clasificación Cualitativa de la Severidad de la Contaminación	14
2.2.6. Cálculo de ESDD y NSDD	15
2.3. Normativa IEC TS 61245-2015	17
2.3.1. Método de Niebla Salina y Características de la Contaminación	17
2.3.2. Aspectos Relevantes para la Aplicación de la Norma	17
2.4. Normativa IEC TS 62073	19
2.4.1. Métodos de medición de la hidrofobicidad	19
2.4.2. Evaluación de la clase de hidrofobicidad	19
2.5. Norma IEC 61215	22
2.5.1. Descripción del ensayo MQT 10 IEC 61215-1	22
2.5.2. Preacondicionamiento UV (MQT 10) IEC 61215-2	23
3. Procedimientos , Materiales y Fundamentos	25
3.1. Confección de Probetas de Silicona	26
3.2. Ensayos de Tracking y Erosión	27
3.2.1. Preparación de las probetas y montaje del soporte	27
3.2.2. Montaje del circuito de ensayo	27
3.2.3. Sistema de goteo controlado	28
3.2.4. Procedimiento de ensayo	29
3.2.5. Emulación de Ambientes Contaminados	30
3.3. Envejecimiento UV	32

3.3.1. Procedimiento experimental de envejecimiento de probetas en cabina UV . . .	32
3.3.2. Fundamentos para el cálculo de equivalencia en días de irradiación solar en el norte de Chile	33
3.4. Evaluación de Hidrofobicidad	34
3.5. Registro de Datos.	35
4. Resultados Experimentales	37
4.1. Ensayo a 3.5 kV AC	38
4.2. Ensayo a 3.5 kV -DC	40
4.3. Ensayo a 3.5 kV DC+	42
4.4. Validación del Protocolo de Contaminación	46
4.4.1. Validación de la contaminación simultánea de tres probetas	46
4.4.2. Repetibilidad con preparación de mezclas separadas	48
4.5. Respuesta de probetas contaminadas a 3.5 kV DC positiva	52
4.6. Respuesta de probetas contaminadas a 3.5 kV DC negativa	54
4.7. Resultados del envejecimiento UV de las probetas	55
4.7.1. Descripción del proceso de envejecimiento	55
4.7.2. Resultados posteriores al envejecimiento	56
4.8. Ensayo envejecimiento UV a 3.5 kV DC+	58
4.9. Ensayo de envejecimiento UV a 3.5 kV DC-	60
4.10. Resultados en probetas envejecidas UV y contaminadas	62
4.11. Evaluación de la Hidrofobicidad	64
4.11.1. Resultados por Probeta	64
4.11.2. Resumen de Resultados	68
5. Análisis de resultados	69
5.1. Comparación del efecto de la polaridad	70
5.2. Influencia de la contaminación superficial	71
5.2.1. Influencia de la contaminación superficial en polaridad positiva	71
5.2.2. Influencia de la contaminación superficial en polaridad negativa	73
5.3. Influencia del envejecimiento UV	74
5.3.1. Equivalencia entre el envejecimiento acelerado y la exposición natural	74
5.3.2. Influencia del envejecimiento UV en polaridad positiva	76
5.3.3. Influencia del envejecimiento UV en polaridad negativa	77
5.3.4. Envejecimiento UV combinado con contaminación superficial	79
6. Conclusiones y Recomendaciones	81
6.1. Recomendaciones de mantenimiento	82
6.2. Trabajos futuros	83

Índice de tablas

2.1. Datos para utilizar el método de tensión constante.	9
2.2. A.- Clasificación de ambientes típicos según la norma IEC 60815-1	12
2.3. B.- Clasificación de ambientes típicos según la norma IEC 60815-1	13
2.4. Correspondencia entre el nivel de contaminación SDD y la conductividad volumétrica de la mezcla contaminante de caolín y solución salina a 20°C.	18
2.5. Categorías de Hidrofobicidad (HC) y descripción visual esperada	20
2.6. Resumen de los niveles de prueba IEC 61215-1	22
3.1. Especificaciones técnicas del sistema de envejecimiento UV	32
3.2. Datos generales del ensayo	35
3.3. Datos por probeta	35
4.1. Datos generales del ensayo a 3.5 kV	38
4.2. Datos por probeta a 3.5 kV	38
4.3. Datos generales del ensayo a 3.5 kV DC Negativa	40
4.4. Datos por probeta a 3.5 kV DC Negativo	41
4.5. Datos generales del ensayo a 3.5 kV DC Positivo	43
4.6. Datos por probeta a 3.5 kV DC Positivo	43
4.7. Resultados de la primera prueba	46
4.8. Resultados de la segunda prueba	46
4.9. Resultados de la tercera prueba	47
4.10. Primer resultado de repetibilidad con preparación de mezclas separadas	49
4.11. Segundo resultado de repetibilidad con preparación de mezclas separadas	49
4.12. Tercer resultado de repetibilidad con preparación de mezclas separadas	49
4.13. Cuarto resultado de repetibilidad con preparación de mezclas separadas	49
4.14. Quinto resultado de repetibilidad con preparación de mezclas separadas	49
4.15. Peso de las probetas antes y después del proceso de envejecimiento UV.	57
4.16. Datos generales del ensayo en probetas envejecidas a 3.5 kV DC Positivo	58
4.17. Datos por probeta con envejecimiento UV a 3.5 kV DC Positivo	58
4.18. Datos generales del ensayo en probetas envejecidas a 3.5 kV DC Negativo	60
4.19. Datos por probeta con envejecimiento UV a 3.5 kV DC Negativo	60
4.20. Clasificación de hidrofobicidad de las probetas ensayadas	68
5.1. Indicadores de comparación entre polaridades.	70
5.2. Indicadores eléctricos y categoría HC para los distintos niveles de contaminación (3.5kV DC ⁺).	71

5.3. Indicadores eléctricos y categoría HC para la condición limpia (Base) y la contaminación E5 bajo -3.5 kV DC.	73
5.4. Indicadores de las pruebas bajo 3.5 kV DC ⁺ .	77
5.5. Indicadores de las pruebas bajo 3.5kV DC ⁻ .	78
5.6. Resultados ensayos de probetas con envejecimiento UV y contaminación a 3.5 DC ⁺ .	80

Índice de figuras

1.1. Trazado línea Kimal - Lo Aguirre Fuente: Fundación Terram	1
1.2. Aislador polimerico con contaminación biologica Fuente: https://www.inmr.com/	2
1.3. Tracking y erosion en silicona Fuente: https://www.gamma.com.co	3
2.1. Circuito utilizado para los ensayos (IEC 60587)	6
2.2. Dimensiones electrodo superior (IEC 60587)	6
2.3. Dimensiones electrodo inferior (IEC 60587)	7
2.4. Dimensiones papel filtro (IEC 60587)	7
2.5. Montaje solicitado por la normativa (IEC 60587)	8
2.6. Rangos de severidad de contaminación tipo A en función de la ESDD/NSDD para aisladores de suspensión.	14
2.7. Relación entre la salinidad equivalente del sitio (SES) y la clase de severidad de contaminación (SPS) para contaminación tipo B en aisladores de referencia.	15
2.8. Referencia visual de clases de hidrofobicidad (HC) de acuerdo a la distribución de gotas o película de agua (Fuente: IEC TS 62073:2016, Anexo D).	21
3.1. Equipo utilizado para la fabricación de probetas.	26
3.2. Circuito de ensayo.	28
3.3. Sistema de goteo.	29
3.4. Resultados y fotos de los elementos utilizados.	31
3.5. Sistema de envejecimiento UV empleado para las probetas, conforme a IEC 61215 - prueba MQT 10.	33
4.1. Corriente de fuga en el tiempo, AC 3.5 kV.	39
4.2. Probetas luego del ensayo a 3.5 kV AC. Probeta 1, Probeta 2, Probeta 3.	39
4.3. Corriente de la probeta 1 en el tiempo, DC- 3.5 kV.	41
4.4. Probetas luego del ensayo a 3.5 kV DC-. Probeta 1, Probeta 2, Probeta 3.	42
4.5. Corriente de la probeta3 en el tiempo, DC+ 3.5 kV.	44
4.6. Probetas luego del ensayo a 3.5 kV DC+. Probeta 1, Probeta 2, Probeta 3.	44
4.7. Comparación de electrodo de las diferentes pruebas.	45
4.8. Resultados de las tres pruebas en el diagrama de severidad de contaminación.	47
4.9. Comparación de los patrones de contaminación obtenidos mediante el método tradicional con cabina y el método propuesto con pulverizador casero.	48
4.10. Ubicación de los resultados de repetibilidad con preparación de mezclas separadas en el diagrama de severidad de contaminación.	50

4.11. Comparación de los patrones de contaminación observados en las probetas para los entornos E2, E3 y E5.	51
4.12. Fibras presentes en el proceso de contaminación.	51
4.13. Corriente de fuga registrada durante los ensayos de tracking en probetas contaminadas bajo corriente continua de 3.5 kV positiva para distintos niveles de contaminación.	52
4.14. Aspecto superficial de las probetas tras finalizar los ensayos de tracking bajo diferentes niveles de contaminación artificial para 3.5 kV DC+.	53
4.15. Patrones de carbonización observados en los ensayos bajo corriente continua de polaridad negativa para el caso base y el entorno de contaminación E5.	54
4.16. Evolución de la corriente de fuga durante los ensayos de tracking bajo corriente continua de polaridad negativa en el caso base y en el entorno de contaminación E5.	55
4.17. Proceso de envejecimiento artificial por radiación UV de las probetas en la cámara.	56
4.18. Cambio de color de las probetas: izquierda sin envejecer, derecha envejecida.	57
4.19. Corriente de fuga en probetas envejecidas con UV, bajo sollicitación de 3.5 kV DC+.	59
4.20. Estado de las probetas al término del ensayo de tracking y erosión post-envejecimiento UV.	59
4.21. Evolución temporal de la corriente de fuga en probetas envejecidas con UV bajo sollicitación de 3.5 kV DC-.	61
4.22. Patrón de carbonización en las probetas después de 6 horas de ensayo con tensión DC negativa.	61
4.23. Corriente de fuga en probetas envejecidas UV y contaminadas con ambientes E5 y E2 a 3.5 kV DC+.	62
4.24. Patrones de carbonización observados en los ensayos bajo corriente continua de polaridad positiva con envejecimiento UV y contaminación.	63
4.25. Distribución de gotas en superficie 1 (Silicona base).	64
4.26. Distribución de gotas en superficie 2 (Contaminación E2).	65
4.27. Distribución de gotas en superficie 3 (Contaminación E3).	65
4.28. Distribución de gotas en superficie 4 (Contaminación E5).	66
4.29. Distribución de gotas en superficie 5 (Envejecida UV).	66
4.30. Distribución de gotas en Probeta 6 (Envejecida + E2).	67
4.31. Distribución de gotas en Probeta 7 (Envejecida + E5).	67
5.1. Corrientes de fuga para polaridad positiva y negativa a 3,5 kV DC.	70
5.2. Corriente de fuga inicial (0.4-0.75 h) para cada nivel de contaminación. Se marcan los peaks máximos de corriente detectados en el intervalo, 3.5 kV DC+.	72
5.3. Corriente de fuga inicial para la probeta Base y la contaminada E5 en polaridad negativa.	73
5.4. Irradiancia normal directa promedio por hora y mes en Calama (fuente: solar.minenergia.cl).	75
5.5. Ciclo diario promedio de la irradiancia en Calama (radiación global en naranja, componente difusa en azul).	76
5.6. Corriente de fuga de la probeta base y la envejecida UV a 3.5kV DC+.	76
5.7. Corriente de fuga de la probeta base y la envejecida UV a 3.5 kV DC-.	78
5.8. Corriente de fuga inicial para la probeta envejecida UV y casos contaminados (E2 y E5) bajo 3.5kV DC+.	79

6.1. Corriente de fuga en función del nivel de contaminación. Se muestra la métrica de <i>corriente promedio</i> para los casos base (sin UV) y envejecidos (con UV).	82
---	----

Capítulo 1

Introducción

La transición hacia una matriz energética más limpia y eficiente es un desafío global que Chile está abordando con ambición, destacando especialmente en la implementación de grandes proyectos de transmisión de energía. Uno de los proyectos más importantes en este contexto es la línea de transmisión de corriente continua de alta tensión (HVDC) (Figura 1.1) Kimal-Lo Aguirre, que permitirá la transmisión eficiente de energía renovable desde el norte del país, donde se concentra la mayor generación solar y eólica, hasta el centro, que alberga los principales centros de consumo. Esta línea de transmisión no solo contribuirá a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también facilitará la integración de energías renovables en el sistema eléctrico nacional, ayudando a reducir los vertimientos de energía renovable no gestionada y asegurando un suministro más estable y sostenible (1).

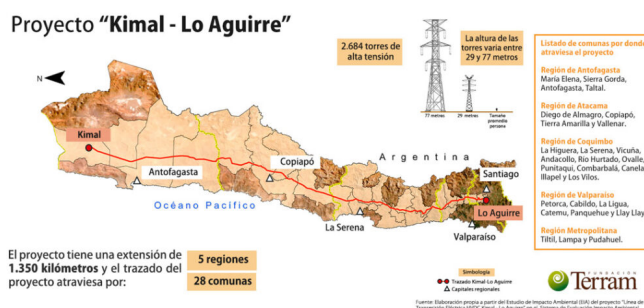


Figura 1.1: Trazado línea Kimal - Lo Aguirre
Fuente: Fundación Terram

En el contexto de la transmisión de energía, los aisladores desempeñan un papel crucial, ya que aseguran la separación eléctrica entre las partes conductoras y los elementos estructurales del sistema. Estos aisladores son esenciales para prevenir fallas eléctricas y asegurar la operación continua y confiable de la red. En sistemas de corriente alterna (AC), la experiencia acumulada en el diseño, selección y mantenimiento de aisladores ha permitido establecer estándares confiables para su operación (2). Sin embargo, en sistemas de corriente continua (DC), como la línea HVDC Kimal-Lo Aguirre, las tensiones aplicadas y las condiciones operativas presentan características muy diferentes a las de AC, lo que plantea nuevos desafíos técnicos.

La corriente continua impone una tensión constante y unidireccional sobre los aisladores, lo que

puede generar un estrés significativo en los materiales aislantes utilizados. Esta diferencia en la naturaleza de la corriente aplicada, comparada con la alterna, afecta directamente el rendimiento de los materiales aislantes, especialmente cuando están sometidos a condiciones ambientales adversas, como contaminación y radiación ultravioleta (UV). Un aspecto particularmente crítico en la operación de sistemas de DC es el fenómeno conocido como tracking, que es la formación de caminos conductores sobre la superficie del aislador debido a la degradación eléctrica causada por tensiones elevadas en combinación con contaminación y humedad. El tracking es un proceso acelerado en condiciones de corriente continua, debido a la naturaleza constante de la tensión aplicada, lo que genera una mayor probabilidad de formación de estos caminos conductores, incrementando así el riesgo de fallas eléctricas.

El proyecto Kimal-Lo Aguirre representa un reto particular debido a las condiciones ambientales a las que estará sometida la línea de transmisión, un ejemplo de esto es la mostrada en la figura 1.2 donde se observa contaminación orgánica sobre las polleras de los aisladores. La ruta de esta línea atravesará el desierto de Atacama, uno de los entornos más hostiles del planeta, con altos niveles de radiación UV y una atmósfera cargada de sal y polvo. Estas condiciones son especialmente desafiantes para los aisladores compuestos de silicona que se emplearán en la línea. A pesar de las excelentes propiedades teóricas de la silicona, como su alta resistencia a la intemperie y su capacidad hidrofóbica para repeler el agua, la exposición prolongada a radiación UV y contaminación puede degradar rápidamente sus propiedades, afectando su capacidad para aislar de manera efectiva el sistema de transmisión. Aún se conoce relativamente poco sobre el comportamiento de estos materiales bajo condiciones de DC, lo que destaca la necesidad de una evaluación empírica rigurosa (3) (4).



Figura 1.2: Aislador polimerico con contaminación biológica

Fuente: <https://www.inmr.com/>

La silicona es uno de los materiales más utilizados en aisladores compuestos debido a su combinación de propiedades mecánicas y eléctricas. Es flexible, resistente a las condiciones meteorológicas adversas, y tiene la capacidad de mantener sus propiedades aislantes incluso en ambientes contaminados. Sin embargo, los estudios sobre la resistencia de este material al tracking en sistemas de DC son limitados (5), lo que genera incertidumbres sobre su durabilidad a largo plazo en condiciones reales de operación. La naturaleza de la tensión continua aplicada en sistemas HVDC puede inducir fenómenos de degradación que no son comunes en sistemas de AC, como una acumulación más rápida de contaminantes en la superficie del aislador y un incremento en la intensidad de los campos eléctricos locales, lo que puede acelerar los procesos de tracking y erosión del material.

El tracking y la erosión son fenómenos clave que deben ser abordados para asegurar la fiabilidad de los aisladores en la línea Kimal-Lo Aguirre. El tracking se refiere a la formación de caminos conductores en la superficie del aislador, que eventualmente pueden conducir a una falla eléctrica catastrófica. Este fenómeno es impulsado por la acumulación de contaminación en la superficie del

aislador, combinada con la exposición a la tensión continua. La erosión, por otro lado, se refiere al desgaste físico del material aislante debido a la exposición prolongada a tensiones eléctricas y a condiciones ambientales agresivas, como la radiación UV (6). La radiación UV puede romper los enlaces químicos en la superficie del material, degradando sus propiedades mecánicas y eléctricas. En un entorno como el del desierto de Atacama, donde los niveles de radiación UV son extremadamente altos, la capacidad de los aisladores para resistir estos efectos es fundamental.

La necesidad de evaluar la resistencia de los aisladores compuestos de goma de silicona bajo condiciones de DC, contaminación y exposición a radiación UV es particularmente relevante en el contexto del proyecto Kimal-Lo Aguirre. Aunque existen estudios que han evaluado el comportamiento de la goma de silicona en sistemas de AC, además los efectos de este fenómeno en aisladores es conocido para tensiones en corriente alterna como se muestra en la figura 1.2, por otro lado las características de la tensión continua presentan un conjunto de desafíos únicos. Investigaciones anteriores han demostrado que la resistencia al tracking y la erosión de los materiales poliméricos puede verse significativamente afectada por la exposición a tensiones de DC, especialmente en entornos altamente contaminados. Estos estudios han señalado que la naturaleza unidireccional de la tensión en sistemas de DC genera un comportamiento diferente en comparación con los sistemas de AC, donde la polaridad de la tensión varía constantemente. En sistemas de DC, la tensión aplicada de manera continua puede favorecer la formación de puntos calientes en la superficie del aislador, lo que incrementa el riesgo de tracking.



Figura 1.3: Tracking y erosión en silicona

Fuente: <https://www.gamma.com.co>

Además del tracking y la erosión, otros factores como la polaridad de la corriente continua también juegan un papel importante en la degradación de los aisladores (7). La polaridad de la tensión aplicada puede influir en la distribución del campo eléctrico a lo largo de la superficie del aislador, lo que puede generar variaciones significativas en el rendimiento del material. La investigación sobre este tema ha mostrado que la polaridad positiva y negativa de la tensión continua puede tener efectos diferentes sobre el proceso de tracking, debido a las diferencias en la movilidad de los iones en la superficie del aislador y a la forma en que los contaminantes se distribuyen y acumulan.

Para abordar estas incertidumbres, el presente proyecto propone realizar una evaluación experimental de la resistencia al tracking y la erosión de los aisladores compuestos de silicona que se utilizarán en la línea HVDC Kimal-Lo Aguirre. La metodología del estudio estará basada en normativas internacionales, como la IEC 60587 (2), que establece procedimientos para evaluar la resistencia de los materiales aislantes al tracking y la erosión bajo condiciones de tensión alterna.

Además, se seguirá la guía IEEE Std 2652-2021 (8), que adapta las pruebas tradicionales de AC a las condiciones específicas de DC, permitiendo una evaluación más precisa del comportamiento de los materiales en sistemas de corriente continua.

El estudio incluirá la exposición de los aisladores a diferentes niveles de contaminación superficial en función de la conductividad del líquido contaminante utilizado en el ensayo, intentando replicar las condiciones ambientales extremas del desierto de Atacama, utilizando las directrices de la norma IEC 60815-1 (9), para clasificar la severidad de la contaminación y establecer las condiciones de prueba adecuadas. Asimismo, se evaluará el impacto del envejecimiento por radiación UV en la resistencia del material al tracking, siguiendo las técnicas estándar de simulación de exposición prolongada a radiación.

Este estudio sobre un material de silicona permitirá identificar las principales problemáticas que enfrentan los aisladores poliméricos en sistemas HVDC, entregando información clave para anticipar fallas y mejorar su desempeño en condiciones exigentes.

1.1. Objetivos

La investigación define un objetivo general y varios objetivos específicos para abordar los retos de operar aisladores de silicona en corriente continua bajo las condiciones extremas previstas para la línea HVDC Kimal–Lo Aguirre, orientando así el diseño experimental, el análisis y las recomendaciones.

1.1.1. Objetivo general

Analizar la resistencia al tracking de un material de silicona, bajo sollicitación de corriente continua (DC) con distintos niveles de contaminación y envejecimiento por radiación UV.

1.1.2. Objetivos específicos

1. Implementar un experimento bajo sollicitación de corriente continua (DC) que permita obtener la resistencia al tracking y la erosión para las diferentes probetas que se ensayarán.
2. Evaluar el impacto de diferentes niveles de contaminación y exposición a radiación UV en la resistencia al tracking de los aisladores de silicona.
3. Determinar el efecto de la polaridad de la corriente continua en la formación de tracking y erosión sobre los aisladores compuestos de silicona.
4. Realizar un análisis comparativo de los resultados obtenidos respecto a normativas vigentes y estudios previos para categorizar la resistencia al tracking del material aislante.
5. Formular recomendaciones sobre el uso de material de silicona en aislamientos externos del proyecto HVDC Kimal–Lo Aguirre.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Ensayos de tracking y erosión.

Los aisladores expuestos a la acumulación de contaminantes, humedad y campos eléctricos pueden experimentar descargas parciales en su superficie, dando lugar a la formación de lo que se conoce como bandas secas. Estas bandas secas, comúnmente observadas en materiales poliméricos, se manifiestan posteriormente como áreas de carbonización, lo que conlleva un deterioro progresivo del material aislante. Es fundamental evaluar el impacto de este fenómeno en los aisladores sometidos a condiciones de contaminación y degradación.

El término "tracking" se refiere al proceso mediante el cual se generan áreas parcialmente conductoras en las zonas deterioradas de la superficie del material aislante, como resultado de las descargas eléctricas. Aunque las pruebas de "tracking" no proporcionan una medición absoluta de este fenómeno ni de la resistencia a la erosión. Las normas reconocidas ASTM D2303 o IEC 60587 (2) indican el procedimiento requerido para realizar pruebas de tracking y erosión utilizando corriente alterna, basadas en ellas y en la experiencia de muchos investigadores (3) se propone la normativa IEEE Std 2652™-2021, la cual es una guía para realizar pruebas en DC. Esta última, conocida por su prueba de una placa en un plano inclinado de 45°, implica el deslizamiento de una sustancia electrolítica sobre la superficie del material para formar un camino de carbonización.

El objetivo es comprender cómo las bandas secas, formadas en presencia de humedad y contaminación, afectan este recubrimiento. Esta metodología permite clasificar los materiales principalmente según la máxima tensión aplicada entre los electrodos antes de la falla por sobrecorriente o según la longitud de carbonización en el material.

La prueba se lleva a cabo utilizando placas planas de 50 [mm] x 120 [mm] y espesor recomendado de 6 [mm], con cinco muestras de cada material dispuestas en un plano inclinado de $45^\circ \pm 2^\circ\text{C}$ con respecto a la horizontal. Los electrodos, separados a una distancia de 50 [mm], se energizan según el método establecido previamente (se indica en la normativa). Luego, se permite que el líquido contaminante fluya con un caudal determinado a través de un papel filtro, el cual concentra el flujo en el centro de la placa y lo mantiene continuo entre los electrodos de acuerdo con las especificaciones de la norma correspondiente.

2.1.1. Materiales necesarios

Circuito del ensayo

Se utiliza el diagrama esquemático del circuito, que se muestra en la figura 2.1. Este diagrama ilustra la configuración del suministro de tensión variable, el transformador, el resistor en serie, el voltímetro, entre otros componentes. Es importante destacar que, por limitaciones técnicas, no se incorporará un protector de sobrecorriente en el montaje. En lugar de ello, se mantendrá una supervisión continua durante el periodo de 6 horas del ensayo, y se empleará un amperímetro que realiza mediciones de la corriente cada 1 segundo para asegurar la detección oportuna de cualquier anomalía.

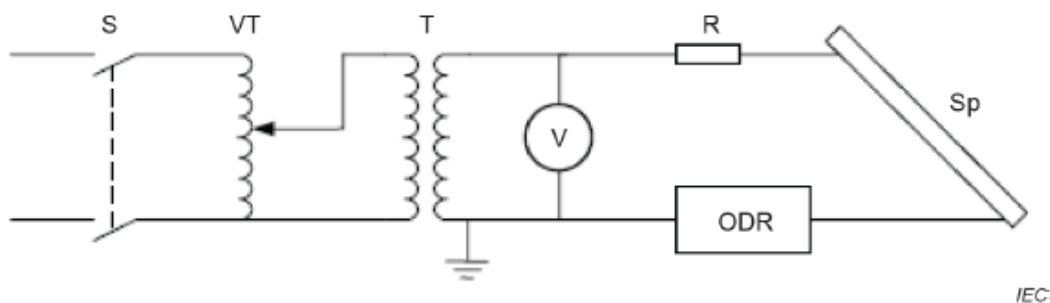


Figura 2.1: Circuito utilizado para los ensayos (IEC 60587)

Electrodo superior

Se incluirá la imagen correspondiente a la figura 2.2, donde se observa el electrodo superior fabricado en acero inoxidable con un grosor de 0,5 mm. Junto a la imagen se detallan las dimensiones que posee el electrodo encargado de dirigir el flujo de líquido por el centro de la probeta de pruebas.

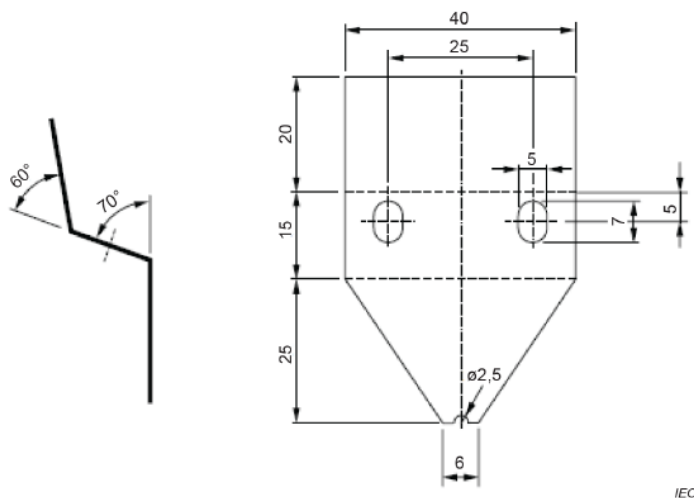


Figura 2.2: Dimensiones electrodo superior (IEC 60587)

Electrodo inferior

Se utilizará la figura 2.3, que muestra el electrodo inferior con características y dimensiones similares al electrodo superior, esenciales para garantizar un contacto adecuado y filtrar el líquido utilizado durante la prueba.

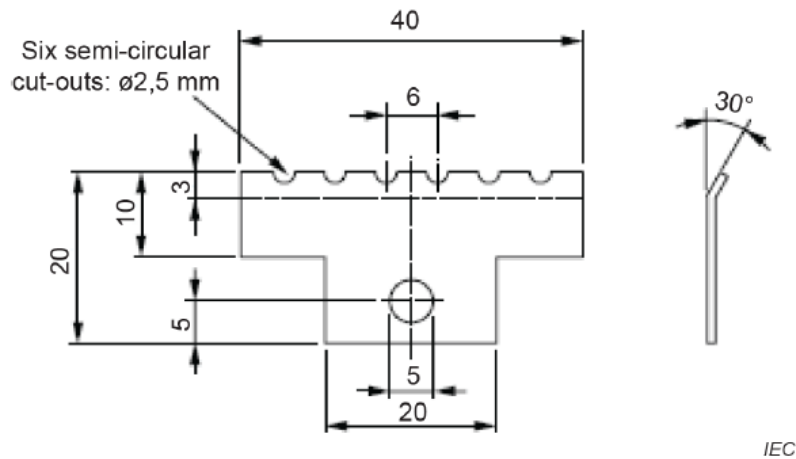


Figura 2.3: Dimensiones electrodo inferior (IEC 60587)

Papel de filtro para el goteo

La figura 2.4 presenta las dimensiones necesarias para los papeles filtro que se utilizaran en el conjunto de ocho capas de papel, con un grosor de $0,2 \pm 0,02$ mm cada una. Este componente actúa como reservorio del contaminante y ayudara a hacer fluir el líquido de manera continua y fluida.

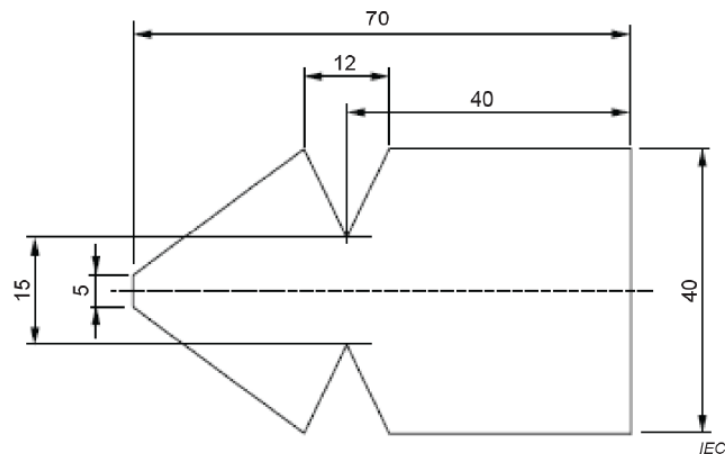


Figura 2.4: Dimensiones papel filtro (IEC 60587)

Montaje a 45 grados

La figura 2.5 ilustra la disposición completa del montaje, en el que la muestra se coloca a un ángulo de 45° respecto a la horizontal, incluyendo todo lo descrito anteriormente y englobando todo lo necesario para que las probetas sean probadas para su resistencia al tracking y erosión.

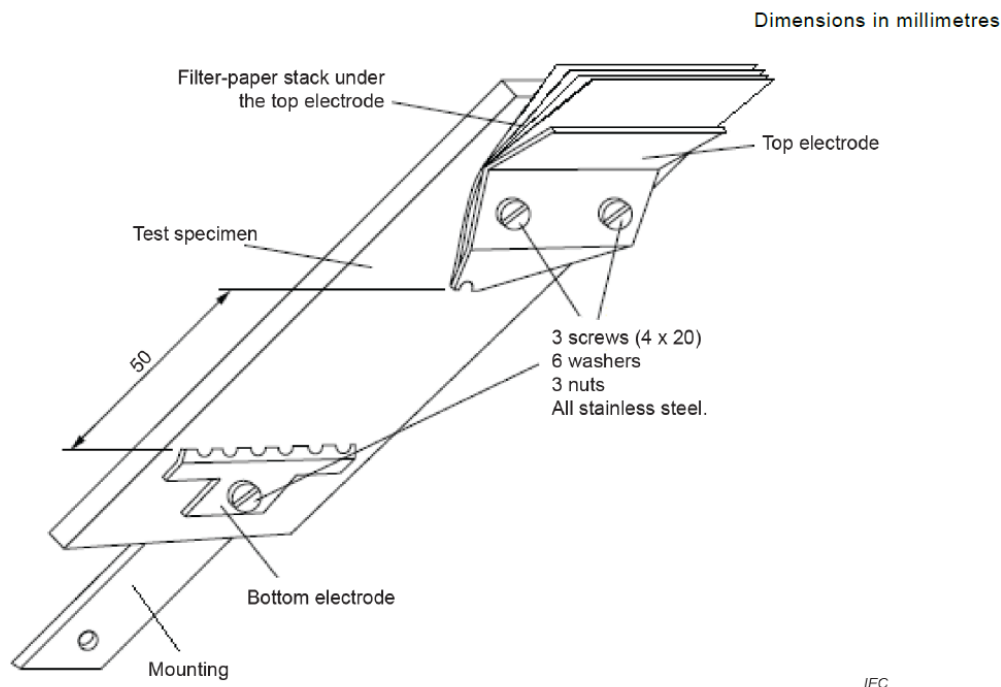


Figura 2.5: Montaje solicitado por la normativa (IEC 60587)

2.1.2. Pasos para realizar el ensayo

- Definir un criterio de fin para la prueba:
 - **Criterio A:** Se finaliza la prueba al superar los 60 [mA] en la muestra o al ver un agujero producto de la erosión durante o después de la prueba o ver fuego en la muestra.
 - **Criterio B:** Se finaliza la prueba al ver que la erosión llega hasta unas marcas realizadas en los costados de las placas a 25 [mm] del electrodo inferior o al ver un agujero producto de la erosión durante o después de la prueba o ver fuego en la muestra.
- Definir método de prueba:
 - **Tensión constante:** Se utilizan datos tabulados en la tabla 2.1 para determinar la tensión a utilizar y el caudal del líquido contaminante, la prueba tiene una duración de 6 horas y en caso de que una de las placas no pase la prueba, se debe repetir el ensayo con otras 5 muestras y se da por aprobado si y solo si 9 de 10 placas pasaron la prueba.

Voltaje de prueba kV	Voltaje de prueba preferido kV	Flujo de contaminante ml/min	Resistencia serie kΩ
1.0 a 1.75	–	0.075	1
2.0 a 2.75	2.5	0.15	10
3.0 a 3.75	3.5	0.30	22
4.0 a 4.75	4.5	0.60	33
5.0 a 5.75	–	0.90	33

Tabla 2.1: Datos para utilizar el método de tensión constante.

- **Tensión escalonada:** A 500 [V] menos que la prueba de tensión constante se energizan los electrodos de la configuración, posteriormente cada 1 hora se aumentara la tensión en pasos de 250 [V]. En el caso de que una de las placas no pase la prueba, se debe repetir el ensayo con otras 5 muestras y se da por aprobado si y solo si 9 de 10 placas pasaron la prueba.
- Limpiar con cuidado las placas utilizando agua destilada.
- En caso de que cumpla con los criterios se mide la profundidad máxima de la erosión de cada placa.
- Categorizar el material aislante:
 - **Clase 1A 4.5 o 1B 4.5:** Si se cumplen los criterios y métodos para cada una de las pruebas a 4.5 [kV]
 - **Clase 1A 3.5 o 1B 3.5:** Si se cumplen los criterios y métodos para cada una de las pruebas a 3.5 [kV]
 - **Clase 1A 2.5 o 1B 2.5:** Si se cumplen los criterios y métodos para cada una de las pruebas a 2.5 [kV]
 - **Clase 1A 0 o 1B 0:** Si más de una placa de un total de 10 falla a 2.5 kV en menos de 6[h].

2.2. Norma IEC 60815

La norma IEC 60815 '*Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in pollution conditions*' corresponde a especificaciones técnicas que entregan definiciones generales y métodos para evaluar la gravedad de la contaminación en sitios específicos (SPS - Site Pollution Severity). Asimismo, establece principios para realizar evaluaciones informadas del desempeño esperado de aisladores en distintos escenarios de contaminación.

La normativa se divide en cinco partes:

- **IEC 60815-1:** Definiciones, información general y principios básicos(9).
- **IEC 60815-2:** Aplicable a aisladores cerámicos y de vidrio en sistemas AC(10).
- **IEC 60815-3:** Aplicable a aisladores poliméricos en sistemas de AC(11).
- **IEC 60815-4:** Equivalente a IEC 60815-2, pero orientado a sistemas DC.
- **IEC 60815-5:** Equivalente a IEC 60815-3, orientado a sistemas en DC.

2.2.1. Tipos de contaminación

La norma IEC 60815 especifica dos tipos principales de contaminación en los aisladores, las cuales pueden provocar fenómenos de contorneo o *tracking*: contaminación Tipo A y contaminación Tipo B. También se pueden presentar situaciones donde ambos tipos ocurren simultáneamente.

- **Contaminación Tipo A:** Esta contaminación consiste en depósitos sólidos sobre la superficie del aislador y está conformada por dos componentes principales: contaminación soluble y contaminación no soluble. Al humedecerse, los componentes solubles crean una capa conductora, mientras que los no solubles proveen una superficie adherente.
 - *Contaminación soluble:* Se compone principalmente de sales altamente solubles que rápidamente se disuelven en presencia de humedad, así como sales de menor solubilidad que requieren más tiempo para su disolución. La cantidad y gravedad de esta contaminación se mide mediante la densidad equivalente de depósito de sal (ESDD), expresada en mg/cm^2 .
 - *Contaminación no soluble:* Constituye partículas tales como polvo, arena, arcilla y ciertos aceites adheridos al aislador, que no se disuelven en agua. La gravedad de esta contaminación se evalúa con la densidad de depósitos no solubles (NSDD), también en mg/cm^2 .

El tipo de contaminación A es típico en áreas desérticas o regiones industriales, donde estos depósitos pueden acumularse progresivamente y provocar una pérdida gradual de aislación al humedecerse con rocío, lluvia o niebla.

- **Contaminación Tipo B:** Se caracteriza principalmente por la presencia de líquidos electrolíticos con un contenido muy bajo o inexistente de sustancias insolubles depositadas en la superficie del aislador. La presencia de estos líquidos puede estar relacionada directamente con la conductancia superficial, la cual se puede medir a través del registro de corrientes de fuga, tanto en aisladores individuales como en cadenas de aisladores.

Alternativamente, la severidad de la contaminación tipo B puede determinarse mediante la medición de la salinidad equivalente del sitio (SES, por sus siglas en inglés), la cual se expresa en $[kg/m^3]$ y se determina siguiendo los métodos específicos de niebla salina descritos en la norma IEC 60507(12).

Este tipo de contaminación generalmente se asocia a zonas costeras, donde el agua salina y las nieblas conductoras se depositan directamente sobre las superficies aislantes. Además, otras fuentes frecuentes de contaminación Tipo B pueden incluir actividades agrícolas como fumigación aérea, presencia de nieblas con productos químicos derivados de procesos industriales y lluvia ácida proveniente de emisiones atmosféricas contaminantes.

2.2.2. Tipos de Ambientes

Para efectos prácticos, se definen cinco tipos principales de ambientes caracterizados según la contaminación predominante:

1. **Ambiente tipo desértico:** Este ambiente se caracteriza por suelos arenosos y largos períodos sin precipitaciones. Las capas contaminantes contienen sales de baja solubilidad combinadas con altos niveles de residuos insolubles (NSDD), siendo la limpieza natural escasa y limitada a eventos esporádicos como lluvias breves o tormentas de arena.
2. **Ambiente tipo costero:** Presente en áreas próximas al mar, pudiendo extenderse hasta 50 km tierra adentro dependiendo de la topografía. Aquí la contaminación se deposita rápidamente sobre los aisladores mediante rocío, viento y especialmente niebla conductora (tipo B), generando un ambiente altamente agresivo para la aislación.
3. **Ambiente tipo industrial:** Situado en áreas cercanas a fuentes industriales, este ambiente incluye depósitos conductivos como carbón, partículas metálicas o gases disueltos como óxidos de nitrógeno y azufre (tipo B). También pueden encontrarse contaminantes de baja solubilidad como cemento y yeso (tipo A).
4. **Ambiente tipo agrícola:** Zonas cercanas a actividades agrícolas donde la contaminación proviene principalmente de químicos utilizados en fumigaciones, excrementos de aves o sales presentes en los suelos. En este caso, la efectividad de la limpieza natural varía según la naturaleza específica del contaminante depositado.
5. **Ambiente tipo tierra de interior:** Este ambiente se caracteriza por tener niveles bajos de contaminación, sin fuentes claramente identificadas. Generalmente corresponde a zonas alejadas de actividades industriales y agrícolas significativas.

2.2.3. Evaluación de la Severidad de la Contaminación del Sitio

La severidad de la contaminación del sitio (SPS) corresponde usualmente a los valores máximos registrados de ESDD y NSDD, o SES, o DDGIS y DDGIN, obtenidos mediante procedimientos normativos durante periodos significativos, generalmente superiores a un año. Si durante el periodo de medición ocurren precipitaciones, estas mediciones deben repetirse en intervalos adecuados para evaluar el efecto del lavado natural, estableciendo finalmente como SPS el valor máximo obtenido durante estos análisis.

La evaluación de la contaminación puede llevarse a cabo a través de distintos métodos con grados decrecientes de exactitud:

- Mediciones directas *in situ*.
- Información histórica del desempeño de aisladores en líneas y subestaciones existentes cercanas al área evaluada.
- Simulaciones basadas en datos climáticos y parámetros ambientales del área.
- Evaluación cualitativa según indicaciones normativas y tablas de referencia.

2.2.4. Ejemplos de Ambientes Típicos

Las tablas 2.2 y 2.3 se basan en la normativa IEC 60815-1 con ejemplos específicos de ambientes típicos según el grado de contaminación:

Ejemplo	Descripción de ambientes típicos
E1	<p>A más de 50 km^a del mar, desierto o tierra seca abierta.</p> <p>A más de 10 km de fuentes de contaminación artificial^b.</p> <p>A menor distancia que lo anterior, pero:</p> <ul style="list-style-type: none"> • El viento predominante no proviene directamente de estas fuentes de contaminación. • Hay lavado regular por lluvia mensual.
E2	<p>A 10–50 km^a del mar, desierto o tierra seca abierta.</p> <p>A 5–10 km de fuentes de contaminación artificial^b.</p> <p>A menor distancia que E1, pero:</p> <ul style="list-style-type: none"> • El viento predominante no proviene directamente de estas fuentes de contaminación. • Hay lavado regular por lluvia mensual.

^a Durante una tormenta, el valor de ESDD a tal distancia del mar puede ser mucho mayor.

^b La presencia de una ciudad importante influye a mayor distancia, es decir, la distancia especificada para mar, desierto y tierra seca.

Tabla 2.2: A.- Clasificación de ambientes típicos según la norma IEC 60815-1

Ejemplo	Descripción de ambientes típicos
E3	<p>A 3–10 km^c del mar, desierto o tierra seca abierta.</p> <p>A 1–5 km de fuentes de contaminación artificial^b.</p> <p>A menor distancia que lo anterior, pero:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● El viento predominante no proviene directamente de estas fuentes de contaminación ● Hay lavado regular por lluvia mensual.
E4	<p>Más lejos de las fuentes de contaminación que en E3, pero:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Niebla densa (o llovizna) ocurre con frecuencia tras una larga temporada seca de acumulación de contaminación (semanas o meses) ● Ocurre lluvia con alta conductividad. ● Hay un nivel alto de NSDD, entre 5 y 10 veces el valor de ESDD.
E5	<p>A menos de 3 km del mar, desierto o tierra seca abierta.</p> <p>A menos de 1 km de fuentes de contaminación artificial^b.</p>
E6	<p>A mayor distancia de fuentes de contaminación que en E5, pero:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Niebla densa (o llovizna) ocurre tras una larga temporada seca de acumulación de contaminación (semanas o meses). ● Hay un nivel alto de NSDD, entre 5 y 10 veces el valor de ESDD.
E7	<p>Dentro de la misma distancia de fuentes de contaminación especificada para áreas 'severas' y:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Expuesto directamente a rocío marino o niebla salina densa. ● Expuesto a contaminantes con alta conductividad o polvo tipo cemento con alta densidad, y con frecuente humectación por niebla o llovizna. ● Areas desérticas con acumulación rápida de sal y arena, y condensación regular.

^a Durante una tormenta, el valor de ESDD a tal distancia del mar puede ser mucho mayor.

^b La presencia de una ciudad importante influye a mayor distancia, es decir, la distancia especificada para mar, desierto y tierra seca.

^c Dependiendo de la topografía de la zona costera y la intensidad del viento.

Tabla 2.3: B.- Clasificación de ambientes típicos según la norma IEC 60815-1

2.2.5. Clasificación Cualitativa de la Severidad de la Contaminación

Con fines de normalización y selección de aisladores en entornos contaminados, la severidad de la contaminación se clasifica cualitativamente en cinco niveles estándar:

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

En el caso específico de contaminación tipo A, esta clasificación puede asociarse a rangos cuantitativos de densidad equivalente de depósito salino (ESDD), según lo representado en la Figura 2.6, la cual aplica a aisladores de suspensión empleados como referencia.

Los valores indicados en dicha figura provienen de mediciones efectuadas directamente en terreno, información histórica del desempeño de los aisladores en servicio, así como resultados de ensayos normalizados bajo condiciones controladas de contaminación artificial.

Cabe destacar que estos índices de severidad corresponden al valor máximo observado en campañas de medición periódica, realizadas por lo general durante un periodo mínimo de un año. Además, deben aplicarse únicamente a aisladores de referencia, ya que estos presentan características geométricas y materiales representativas de su comportamiento frente a la acumulación de contaminantes.

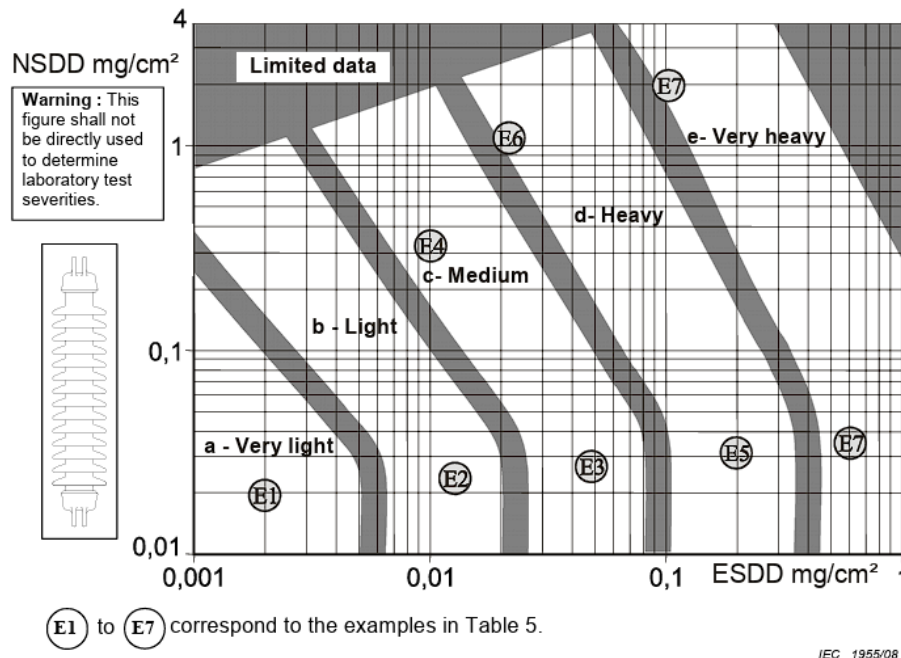


Figura 2.6: Rangos de severidad de contaminación tipo A en función de la ESDD/NSDD para aisladores de suspensión.

Para el caso de contaminación tipo B, la Figura 2.7 establece la correlación entre los valores medidos de salinidad equivalente del sitio (SES) y la clasificación de la severidad de contaminación del sitio (SPS), aplicable a ambos tipos de aisladores de referencia utilizados en las evaluaciones normativas.

Los valores presentados en dicha figura se fundamentan en la acumulación de contaminación natural registrada sobre los aisladores en condiciones reales de operación, y permiten estimar de forma cualitativa la severidad del entorno a partir de mediciones sistemáticas de salinidad.

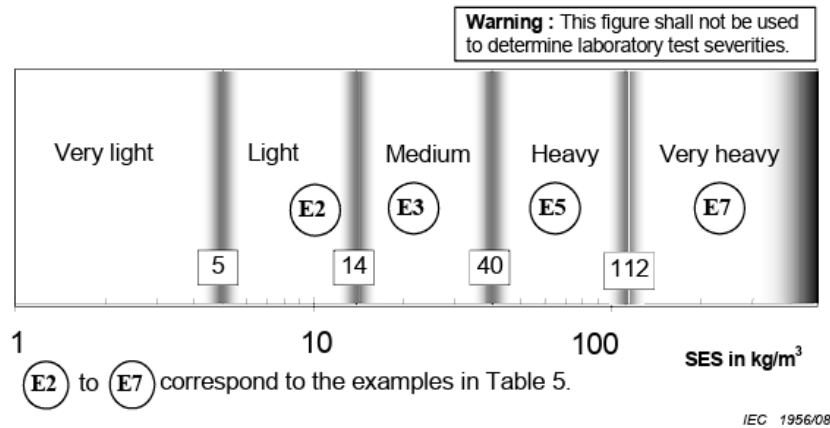


Figura 2.7: Relación entre la salinidad equivalente del sitio (SES) y la clase de severidad de contaminación (SPS) para contaminación tipo B en aisladores de referencia.

2.2.6. Cálculo de ESDD y NSDD

Cálculo de la Densidad Equivalente de Depósito Soluble (ESDD)

La densidad equivalente de depósito soluble, ESDD, se determina a partir de la cantidad de contaminantes solubles recolectados desde la superficie del aislador. Para ello se mide el volumen de agua desmineralizada utilizada para la limpieza, su conductividad corregida por temperatura y el área del aislador bajo análisis. La expresión utilizada es:

$$ESDD = S_a \cdot \left(\frac{V}{A} \right) \quad (2.1)$$

Donde:

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

La salinidad S_a se obtiene a partir de la conductividad corregida por temperatura mediante las siguientes expresiones:

$$S_a = (5.7 \sigma_{20})^{1.03} \quad (2.2)$$

$$\sigma_{20} = \sigma_{\theta} [1 - b(\theta - 20)] \quad (2.3)$$

$$b = -3.2 \cdot 10^{-8} \theta^3 + 1.032 \cdot 10^{-5} \theta^2 - 8.272 \cdot 10^{-4} \theta + 3.544 \cdot 10^{-2} \quad (2.4)$$

Donde:

- θ : Temperatura de la solución, en °C.
- σ_{θ} : Conductividad volumétrica a temperatura θ , en S/m.
- σ_{20} : Conductividad corregida a 20 °C, en S/m.
- b : Coeficiente dependiente de la temperatura.

Cálculo de la Densidad de Depósito No Soluble (NSDD)

Para calcular la densidad de depósito no soluble, NSDD, se utiliza el peso del contaminante residual recogido en papel filtro tras el lavado del aislador. Se emplea un filtro de tipo GF/A de 1.6 μm o similar. La expresión utilizada es:

$$NSDD = 1000 \cdot \left(\frac{W_f - W_i}{A} \right) \quad (2.5)$$

Donde:

- $NSDD$: Densidad de depósito no soluble, en mg/cm^2 .
- W_f : Peso del papel filtro con contaminantes secos, en g.
- W_i : Peso del papel filtro seco (antes de la filtración), en g.
- A : Área de la superficie del aislador, en cm^2 .

Aclaración

Si bien la IEC 60815-1 entrega directrices para diseño y dimensionamiento de aisladores en función del tipo de contaminación y del entorno de instalación, en esta memoria su uso se limita a fijar niveles de severidad representativos del caso de interés. Se estableció que las mezclas de contaminación contendrán material no soluble (NSDD); por ello, las condiciones ensayadas corresponden a contaminación tipo A.

Esta decisión responde a las condiciones ambientales previstas para el trazado HVDC (zonas áridas y costeras con aporte relevante de polvo mineral), buscando evaluar con mayor realismo el desempeño del compuesto de silicona bajo tensión continua. En consecuencia, las clases de severidad aplicadas (p. ej., E2, E3 y E5) se interpretan dentro del marco del tipo A.

2.3. Normativa IEC TS 61245-2015

La especificación técnica IEC TS 61245:2015 '*Artificial pollution tests on high-voltage ceramic and glass insulators to be used on d.c. systems*' (13) establece los procedimientos para la realización de ensayos de contaminación artificial en aisladores cerámicos y de vidrio destinados a sistemas eléctricos en corriente continua (DC) con tensiones superiores a ± 1 kV. Esta normativa no aplica a aisladores poliméricos ni a aquellos tratados con recubrimientos orgánicos o esmaltes semiconductores.

El objetivo principal de esta normativa es determinar las características de soporte de tensión de los aisladores sometidos a condiciones de contaminación artificial, empleando métodos de niebla salina o de capa sólida. De forma específica, para tensiones de hasta ± 600 kV, se recomienda preferentemente el uso del método de capa sólida debido a las limitaciones del método de niebla salina a estas tensiones.

2.3.1. Método de Niebla Salina y Características de la Contaminación

El método de niebla salina simula un ambiente de contaminación tipo B, caracterizado por la formación de una película líquida conductora sobre la superficie del aislador. En esta metodología, la superficie del aislador es expuesta a una niebla de agua salada atomizada, cuya salinidad está controlada y predeterminada.

El líquido utilizado, denominado mezcla contaminante, está compuesto únicamente por agua y sal de sodio (NaCl) de pureza comercial. Debido a esta composición, el porcentaje de contaminantes no solubles es muy bajo, por lo que la conductividad del líquido se atribuye prácticamente en su totalidad a la cantidad de sal disuelta. Esto permite establecer una relación directa entre la salinidad del líquido, su conductividad volumétrica y la severidad de la contaminación aplicada al aislador.

La concentración de sal se expresa como **salinidad** (kg/m^3), mientras que la conductividad volumétrica de la mezcla contaminante se mide en S/m y se corrige a una temperatura de referencia de 20 °C. La Tabla 2.4 muestra la correspondencia entre el valor de salinidad y la conductividad de la mezcla contaminante:

2.3.2. Aspectos Relevantes para la Aplicación de la Norma

- La **temperatura de referencia** para las mediciones de conductividad de la mezcla contaminante es de 20 °C, y si se trabaja a otra temperatura, se deben aplicar las correcciones establecidas en la norma.
- El **material inerte** recomendado es el caolín, cuya composición típica incluye un contenido de sílice (SiO_2) entre el 40 % y 50 % en peso.
- La **preparación de la mezcla contaminante** debe ajustarse cuidadosamente para lograr el nivel de SDD deseado en el aislador, verificándose mediante pruebas preliminares.
- La **capa de contaminación** debe ser continua y uniforme antes de iniciar los ensayos para asegurar resultados reproducibles.

Grados de contaminación de referencia para la composición del Caolín (o Tonoko)		Conductividad volumétrica de la mezcla contaminante σ_{20} S/m
Densidad de depósito de sal (SDD) mg/cm ²	Conductividad de la capa (K ₂₀) μ S	
0.012	-	0.5
0.018	-	0.7
0.025	3	1
0.035	4.2	1.4
0.050	5.5	2
0.070	8	2.8
0.100	11	4
0.140	14.5	5.6
0.200	20	8
0.280	27	11.2
0.400	37	16

Tabla 2.4: Correspondencia entre el nivel de contaminación SDD y la conductividad volumétrica de la mezcla contaminante de caolín y solución salina a 20°C.

Nota

Si bien la especificación técnica IEC TS 61245:2015 establece su aplicación para la realización de ensayos de contaminación artificial en aisladores cerámicos y de vidrio sometidos a corriente continua (DC), y recomienda preferentemente el uso del método de capa sólida para sistemas de alta tensión, en este proyecto dicha normativa será utilizada únicamente como referencia para la preparación y control de mezclas contaminantes en laboratorio.

El propósito de su implementación es simular ambientes de contaminación normalizados mediante el control de la conductividad de las mezclas líquidas aplicadas, permitiendo establecer condiciones reproducibles y comparables en ensayos posteriores. Estas mezclas contaminantes serán empleadas en pruebas de comportamiento de probetas de silicona, específicamente para ensayos de resistencia al tracking y a la erosión, los cuales serán realizados utilizando el método de plano inclinado bajo corriente continua.

Por tanto, la aplicación de esta normativa se restringe al ámbito de generación y caracterización de los medios de contaminación, sin extenderse a la evaluación de aisladores cerámicos ni a la validación completa de sus procedimientos de ensayo bajo DC.

2.4. Normativa IEC TS 62073

La norma IEC TS 62073:2016 '*Guidance on the measurement of hydrophobicity of insulator surfaces*' (14) 'Medición de Hidrofobicidad de Superficies de Aisladores' proporciona directrices para la medición de la hidrofobicidad de las superficies de aisladores. Esta característica es relevante para evaluar el estado de materiales poliméricos en servicio o durante ensayos de laboratorio, particularmente en aisladores que emplean materiales tipo *Hydrophobicity Transfer Material* (HTM).

2.4.1. Métodos de medición de la hidrofobicidad

La normativa contempla tres métodos principales para determinar la hidrofobicidad:

- **Método A - Ángulo de Contacto:** Consiste en medir el ángulo que forma una gota de agua sobre la superficie del aislador, determinando su ángulo de avance y retroceso. Es un método preciso, pero requiere equipamiento específico y superficies planas o adaptadas para la medición.
- **Método B - Tensión Superficial:** Utiliza mezclas de líquidos con tensiones superficiales conocidas para evaluar el punto en que una gota moja o no la superficie. Es útil para caracterizar cambios más generales en superficies contaminadas o envejecidas, aunque con limitaciones de precisión en superficies heterogéneas.
- **Método C - Método de Spray:** Consiste en pulverizar finas gotas de agua sobre la superficie del aislador y evaluar visualmente la formación de gotas o películas de agua, asignando una *clase de hidrofobicidad* (HC) de acuerdo con una escala estandarizada. Este método es rápido, puede ser aplicado en campo o laboratorio y es particularmente útil para materiales poliméricos envejecidos o contaminados.

2.4.2. Evaluación de la clase de hidrofobicidad

Para determinar la clase de hidrofobicidad (HC) mediante el método de spray se debe seguir lo establecido en la norma IEC TS 62073:2016. Esta metodología permite una evaluación rápida y efectiva de la condición superficial, especialmente en materiales poliméricos expuestos a envejecimiento y contaminación.

Procedimiento experimental del método de spray

El procedimiento de evaluación mediante spray consiste en seguir los siguientes pasos:

1. **Preparación:** Asegurar que la superficie del material esté a temperatura ambiente y libre de humedad visible previa a la aplicación.
2. **Aplicación de spray:** Pulverizar agua desionizada fina y homogéneamente sobre la superficie del aislador, utilizando un atomizador manual o automatizado. La pulverización debe producir una capa de microgotas sin arrastrar gotas grandes ni formar chorros de agua.
3. **Observación:** Evaluar visualmente el patrón de distribución de agua formado sobre la superficie inmediatamente después de la aplicación.

4. **Clasificación:** Comparar la apariencia observada con la escala de referencia del Anexo D de la norma, asignando la Clase de Hidrofobicidad (HC) que mejor corresponda.
5. **Registro:** Anotar el valor de HC asignado, indicando la zona de medición. Se recomienda realizar múltiples observaciones en distintas partes de la probeta para obtener un diagnóstico representativo.

Este método proporciona una forma práctica de evaluar la degradación de la hidrofobicidad asociada al envejecimiento por UV y contaminación.

Clasificación de la Hidrofobicidad

La clasificación en categorías de hidrofobicidad se realiza conforme a los patrones observados, según se resume en la tabla [2.5](#):

HC	Descripción visual de la superficie
HC1	Gotas esféricas bien definidas, de tamaño pequeño, dispersas de forma homogénea.
HC2	Gotas esféricas de mayor tamaño, algunas gotas comienzan a deformarse levemente.
HC3	Mezcla de gotas pequeñas y gotas aplanadas, inicio de coalescencia entre gotas.
HC4	Mayor coalescencia de gotas, formación parcial de película de agua con sectores aún hidrofóbicos.
HC5	Película de agua continua en grandes zonas, presencia aislada de algunas gotas visibles.
HC6	Película de agua casi completa, escasa o nula formación de gotas diferenciadas.
HC7	Película de agua uniforme en toda la superficie, completamente hidrofílica, sin formación de gotas.

Tabla 2.5: Categorías de Hidrofobicidad (HC) y descripción visual esperada

Referencia visual para la evaluación

Para facilitar la correcta asignación de la clase de hidrofobicidad, se utiliza como referencia la figura [2.8](#) oficial contenida en el Anexo D de la norma IEC TS 62073:2016, que ilustra visualmente cada categoría HC:

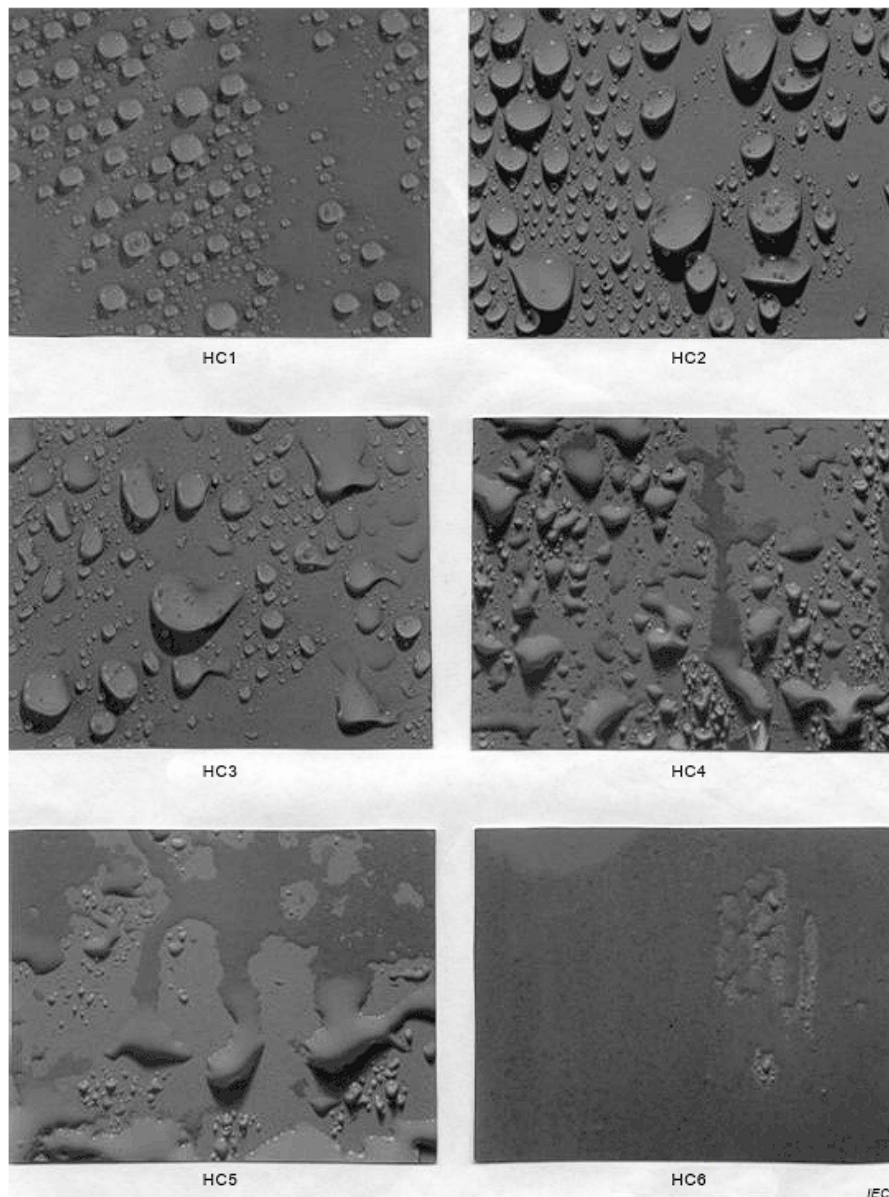


Figura 2.8: Referencia visual de clases de hidrofobicidad (HC) de acuerdo a la distribución de gotas o película de agua (**Fuente: IEC TS 62073:2016, Anexo D**).

Nota

En este estudio se registró la hidrofobicidad superficial del compuesto de silicona siguiendo la **IEC TS 62073**. El objetivo fue documentar, de forma simple y comparable, cómo evoluciona esta propiedad luego de aplicar las mezclas de contaminación utilizadas y también luego de exposición UV, así como el aspecto de la superficie antes de los ensayos. Este registro se tomará como base comparativa y queda como referencia para trabajos futuros que deseen profundizar en estas observaciones bajo tensión continua.

2.5. Norma IEC 61215

La normativa IEC 61215 'Terrestrial photovoltaic (PV) modules — Design qualification and type approval' tiene como objetivo principal definir los procedimientos de ensayo y requisitos técnicos necesarios para la calificación del diseño y aprobación de tipo de los módulos fotovoltaicos terrestres, asegurando su adecuado funcionamiento y durabilidad frente a diferentes condiciones climáticas y de operación. Esta normativa se divide principalmente en dos partes, las cuales se describen a continuación:

- **IEC 61215-1:** Define los requisitos generales y específicos que deben cumplir los módulos fotovoltaicos terrestres para su aprobación (I15).
- **IEC 61215-2:** Establece los procedimientos específicos de ensayo que deben seguirse para verificar la conformidad con los requisitos definidos en la IEC 61215-1 (I16).

En esta investigación se utilizará específicamente el ensayo denominado MQT 10 (UV preconditioning), descrito en la IEC 61215-2.

2.5.1. Descripción del ensayo MQT 10 IEC 61215-1

El ensayo MQT 10 tiene como finalidad preconditionar los módulos mediante radiación ultravioleta (UV) antes de someterlos a otras pruebas, como ciclos térmicos y pruebas de congelación y humedad. El objetivo es detectar la susceptibilidad de los materiales y las uniones adhesivas a la degradación causada por la radiación UV.

Se describirá el procedimiento detallado del ensayo MQT 10. Además, en la tabla 2.6 se resumirán los niveles de prueba especificados para esta prueba y por la normativa IEC 61215-1.

Prueba	Subsección en IEC 61215-2:2021	Título	Condiciones de Prueba
MQT 1	4.1	Inspección Visual	Consulte la lista de los principales defectos visuales en la cláusula 8
MQT 10	4.10	Preacondicionamiento UV	15 kWh/m ² de irradiación total UV en el rango de longitud de onda de 280 nm a 400 nm, con un 3% a 10% de irradiación UV en el rango de longitud de onda de 280 nm a 320 nm, a una temperatura del módulo de 60 °C. Para módulos bifaciales, la exposición se repite en el lado trasero.
MQT 15	4.15	Prueba de corriente de fuga húmeda	Aumento del voltaje de prueba a una velocidad que no exceda de 500 v/s a 500 V o el voltaje máximo del sistema para el módulo, lo que sea mayor. Mantenga el voltaje en este nivel durante 2 min. La temperatura de la solución es (22 ± 2) °C.

Tabla 2.6: Resumen de los niveles de prueba IEC 61215-1

Este ensayo es clave para verificar que los módulos solares fabricados sean capaces de resistir adecuadamente la exposición a la radiación UV, identificando potenciales fallos tempranos por deterioro de materiales y adhesivos.

2.5.2. Preacondicionamiento UV (MQT 10) IEC 61215-2

Propósito

Preacondicionar el módulo con radiación ultravioleta (UV) antes de los ensayos de ciclo térmico, humedad y congelamiento, con el objetivo de identificar materiales y uniones adhesivas susceptibles a la degradación por UV.

Nota

MQT 10 está destinado a detectar la susceptibilidad general a la degradación UV, ya que la dosis es pequeña comparada con las expectativas de vida útil de los módulos modernos y la distribución espectral de la fuente UV no está estrictamente especificada. Los documentos que apliquen MQT 10 con otros fines (como estudios comparativos de degradación) deberían considerar requisitos adicionales para lograr esos objetivos.

Aparatos

- Una cámara de ensayo controlada en temperatura con una ventana o dispositivos para una fuente de luz UV y el o los módulo(s) bajo prueba. La cámara debe ser capaz de mantener la temperatura del módulo en 60 ± 5 °C.
- Un sistema para monitorizar la temperatura del módulo con precisión de ± 2.0 °C y repetibilidad de ± 0.5 °C. Los sensores de temperatura deben fijarse a la parte frontal o posterior de la superficie del módulo, cerca del centro, sin obstruir la incidencia de luz UV sobre las celdas activas. Si se prueban varios módulos, basta con controlar la temperatura de uno de ellos.
- Instrumentación capaz de medir la irradiancia de la luz UV producida por la fuente, en el plano de ensayo del módulo, en el rango de 280 nm a 320 nm y de 320 nm a 400 nm, con incertidumbre de ± 15 % o mejor.
- Una fuente de luz UV que produzca radiación con uniformidad de irradiancia de ± 15 % sobre el plano de prueba, sin irradiancia apreciable por debajo de 280 nm y capaz de proporcionar la irradiancia total requerida en las distintas regiones espectrales según se define en el procedimiento.
- El módulo debe estar en cortocircuito o circuito abierto durante la exposición, según indicaciones del fabricante. La condición usada debe anotarse en el informe de ensayo.

Procedimiento

1. Medir la irradiancia en el plano de prueba y verificar que en el rango de 280 nm a 400 nm no supere 250 W/m^2 (aproximadamente cinco veces la radiación solar natural) y que la uniformidad sea de ± 15 % en todo el plano.

2. Según lo indicado anteriormente, colocar el módulo en cortocircuito o circuito abierto. Montarlo en la posición seleccionada, normal al haz UV. Asegurarse de que los sensores de temperatura indiquen 60 ± 5 °C. Para módulos flexibles, instalar según las instrucciones del fabricante respecto del sustrato y adhesivo o medios de fijación.
3. Irradiar la cara frontal del módulo hasta alcanzar al menos 15 kWh/m^2 en el rango de 280 nm a 400 nm, con al menos un 3% pero no más del 10% en la banda de 280 nm a 320 nm, manteniendo la temperatura dentro del rango especificado.

Para módulos bifaciales, repetir el procedimiento de irradiación UV en la cara posterior.

Mediciones finales

Repetir los ensayos de MQT 01 y MQT 15.

Requisitos

- No debe haber evidencia de defectos visuales mayores según IEC 61215-1:2021.
- La corriente de fuga en condiciones húmedas debe cumplir los mismos requisitos que en las mediciones iniciales.

Nota

La normativa de degradación para módulos fotovoltaicos no aplica directamente a aisladores poliméricos. En esta memoria se usó solo como referencia operativa para dosificar y programar la exposición UV, porque la cámara de envejecimiento disponible en el campus San Joaquín está parametrizada conforme a ese protocolo. Existen otras vías de envejecimiento (exposición natural prolongada, otras cámaras o arreglos de lámparas), pero la alternativa factible fue la cámara mencionada.

Todas las probetas se expusieron en el mismo entorno y con los mismos ajustes, con el fin de obtener resultados comparables y reproducibles por futuros investigadores. En particular, se mantuvo fijo: (i) el rango espectral UVA/UVB, (ii) la dosis acumulada registrada en kWh/m^2 , (iii) la distancia y orientación probeta-lámparas, (iv) el ciclo térmico interno y (v) el tiempo total de exposición. Los resultados se interpretan dentro de estas condiciones controladas, sin extrapolar tasas de degradación ni equivalencias con otros protocolos o con exposición natural.

Capítulo 3

Procedimientos , Materiales y Fundamentos

En esta sección se describen de manera general los procedimientos experimentales que serán implementados para el análisis de la resistencia al tracking y erosión en probetas de silicona, considerando condiciones de corriente continua (DC), envejecimiento UV y ambientes de contaminación emulados en laboratorio. Cada procedimiento se fundamenta en normativas internacionales vigentes y experiencias previas de trabajos realizados en esta área.

Se utilizarán como base normativa los documentos IEC 60587, IEEE Std 2652-2021, IEC 60815, IEC TS 61245, IEC TS 62073 y IEC 61215. Además, se considerarán criterios y adaptaciones prácticas basadas en experiencias previas de memoristas como Max Pérez, Marcos Illanes y Stefan Rojo, particularmente en la preparación de soluciones contaminantes y caracterización de ambientes tipo B.

En líneas generales, los procedimientos incluyen:

- Confección de las probetas de silicona mediante moldes adecuados, asegurando dimensiones normalizadas y propiedades representativas del material en estudio.
- Ensayos de tracking y erosión mediante el método de plano inclinado, adaptado para tensiones de corriente continua.
- Emulación de ambientes contaminados utilizando mezclas salinas ajustadas a normativas, complementadas con experiencias anteriores.
- Exposición de probetas a envejecimiento acelerado bajo radiación UV controlada.
- Evaluación de la hidrofobicidad superficial antes de los ensayos, mediante el método de spray normalizado.
- Registro de datos y análisis de resultados conforme a criterios de aceptación establecidos.

Los materiales utilizados, configuraciones de circuitos experimentales, condiciones de prueba y metodologías específicas serán descritos en detalle en las subsecciones siguientes, permitiendo asegurar la reproducibilidad y consistencia de los resultados obtenidos.

3.1. Confección de Probetas de Silicona

Para la realización de los ensayos de tracking y erosión, se confeccionaron probetas de silicona utilizando la silicona caucho RTV XL 8820T (translúcida), la cual es un elastómero de dos componentes que cura a temperatura ambiente. Esta silicona presenta buena fluidez, alta flexibilidad y una baja viscosidad, lo que permite una reproducción precisa de detalles y facilita el desmoldeo de las piezas.

El procedimiento de confección de las probetas se llevó a cabo siguiendo los siguientes pasos:

1. **Preparación de moldes:** Se utilizaron moldes de acrílico de dimensiones 120 mm x 50 mm x 10 mm, los cuales fueron limpiados cuidadosamente para evitar impurezas que pudieran afectar la calidad de las probetas.
2. **Pesaje de componentes:** Se pesaron 175 ml de la parte A (base) de la silicona en un matraz de 500 ml, utilizando una balanza de precisión. Posteriormente, se añadió el catalizador (parte B) en una proporción de 2% en peso respecto a la parte A, es decir, 3.5 gramos de catalizador por cada 175 gramos de base. Esta proporción puede ajustarse ligeramente según la temperatura ambiente, sin superar una relación de 100A:3B.
3. **Mezclado:** Los componentes A y B se mezclaron manualmente en el matraz hasta obtener una mezcla homogénea, asegurando la incorporación completa del catalizador.
4. **Desgasificado:** La mezcla se colocó en un horno de secado al vacío programable, para eliminar las burbujas de aire atrapadas durante el mezclado. Este proceso se realizó a temperatura ambiente y a una presión reducida adecuada, durante un tiempo suficiente para asegurar una mezcla libre de burbujas.
5. **Vertido en moldes:** La mezcla desgasificada se vertió cuidadosamente en los moldes de acrílico, evitando la formación de nuevas burbujas y asegurando un llenado uniforme.
6. **Curado:** Los moldes llenos se dejaron reposar a una temperatura controlada de 25 °C durante 24 horas para permitir el curado completo de la silicona.
7. **Desmoldeo:** Una vez transcurrido el tiempo de curado, las probetas se desmoldaron con cuidado, obteniendo piezas translúcidas y flexibles, adecuadas para los ensayos posteriores.

Este procedimiento y los materiales utilizados (3.1) permitieron la obtención de probetas con dimensiones y propiedades mecánicas consistentes, de manera que se mantenga la reproducibilidad y fiabilidad de los ensayos de tracking y erosión en condiciones controladas.



Figura 3.1: Equipo utilizado para la fabricación de probetas.

3.2. Ensayos de Tracking y Erosión

El procedimiento descrito a continuación tiene como objetivo evaluar la resistencia al tracking y la erosión de probetas de silicona mediante el método de plano inclinado, conforme a la norma IEC 60587. Se realizarán ensayos tanto en corriente alterna (AC) como en corriente continua (DC) con polaridades positiva y negativa, para analizar el comportamiento del material bajo diferentes condiciones eléctricas.

3.2.1. Preparación de las probetas y montaje del soporte

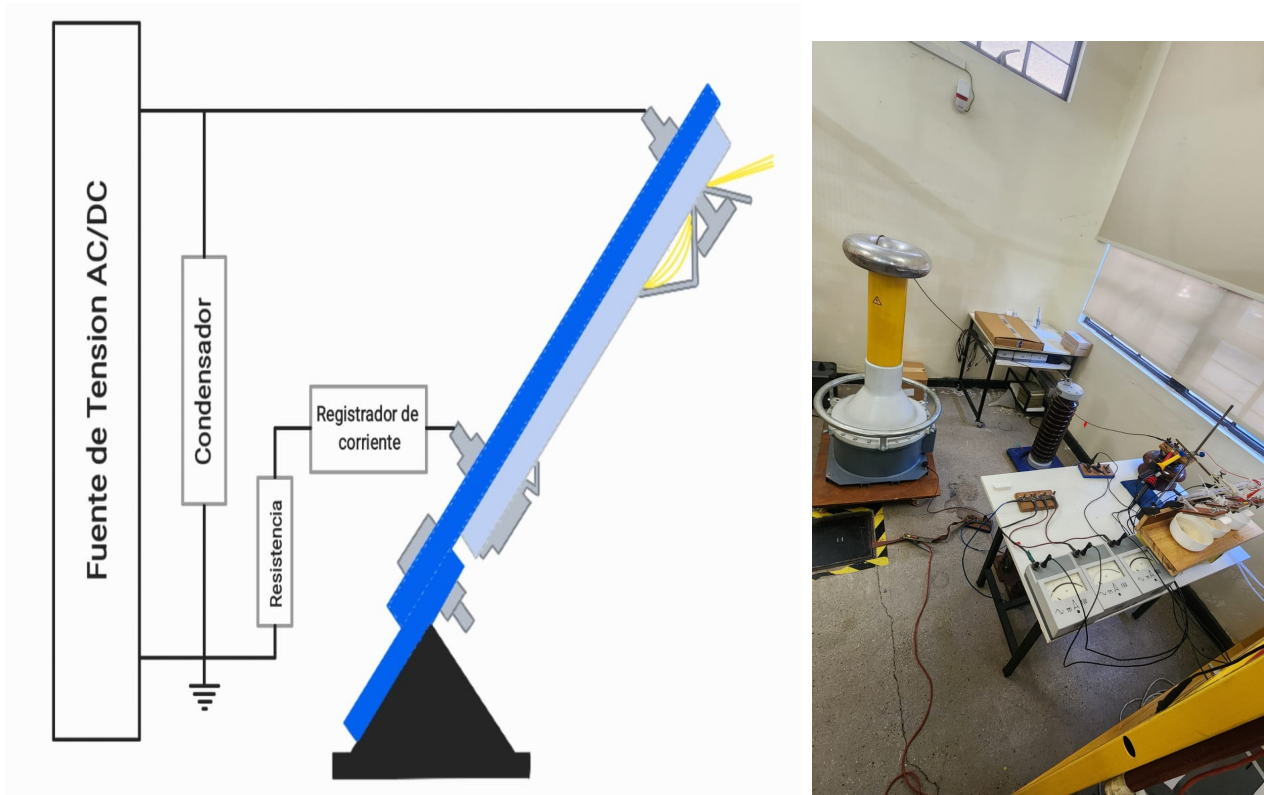
1. **Confección de probetas:** Las probetas de silicona se confeccionarán siguiendo el procedimiento descrito en la sección correspondiente, asegurando dimensiones de 120 mm x 50 mm x 10 mm.
2. **Montaje en soporte:** Las probetas se colocarán sobre un soporte de cerámica que permite mantener una inclinación de 45°, conforme a lo estipulado en la norma IEC 60587. Este soporte es resistente a las temperaturas alcanzadas durante el ensayo y proporciona estabilidad mecánica a las probetas, las cuales no son autosoportantes.
3. **Número de probetas:** Aunque el soporte permite ensayar hasta cinco probetas simultáneamente, se utilizarán tres probetas por ensayo, considerando que esta cantidad es representativa y se ajusta a la disponibilidad de materiales para esta investigación.

3.2.2. Montaje del circuito de ensayo

Para realizar los ensayos de tracking y erosión, se montará un circuito de ensayo que permitirá aplicar tensión alterna (AC) y continua (DC), conforme a los siguientes detalles técnicos:

1. **Fuente de tensión alterna (AC):** Para ensayos en AC se empleará un transformador en conjunto con un Variac, el cual permite ajustar y alcanzar tensiones de al menos 6 kV. La tensión aplicada será monitoreada en tiempo real mediante puntas de tensión conectadas simultáneamente a un osciloscopio y a un voltímetro digital, asegurando precisión y estabilidad durante todo el ensayo.
2. **Fuente de tensión continua (DC):** Para la generación de tensión DC se utilizará un equipo PGK configurado en un circuito rectificador de media onda. Este circuito estará complementado con un condensador conectado en paralelo, el cual permitirá reducir el rizado de tensión, obteniendo una corriente continua controlada para la ejecución de los ensayos.
3. **Condensador en paralelo:** Solo en configuración DC se dispuso un condensador en paralelo con la fuente de tensión para reducir el rizado y estabilizar el voltaje suministrado al circuito; en AC no se empleó, ya que la tensión se mantuvo estable durante las pruebas.
4. **Resistencia limitadora:** Se conectará una resistencia en serie para limitar la corriente durante el ensayo, ajustando su valor de acuerdo a la tensión aplicada, conforme a la norma IEC 60587.

5. **Medición de corriente de fuga:** La corriente de fuga será medida mediante un amperímetro digital conectado a un sistema de adquisición de datos enlazado a un computador portátil. Este sistema registrará las mediciones de corriente cada 1 segundo. Debido a que el equipo de adquisición tiene una capacidad máxima de almacenamiento de 10.000 puntos, será necesario almacenar y reiniciar la captura de datos aproximadamente a la mitad del ensayo (3 horas), con el fin de registrar la totalidad de los datos a lo largo de las 6 horas completas del ensayo.
6. **Análisis posterior:** Los datos adquiridos permitirán realizar gráficos detallados de corriente versus tiempo, facilitando la interpretación y el análisis posterior del comportamiento del material bajo estudio.
7. **Esquema del circuito de ensayo:** Se presenta en la figura 3.2 el esquema del circuito completo para ensayos en AC y DC:



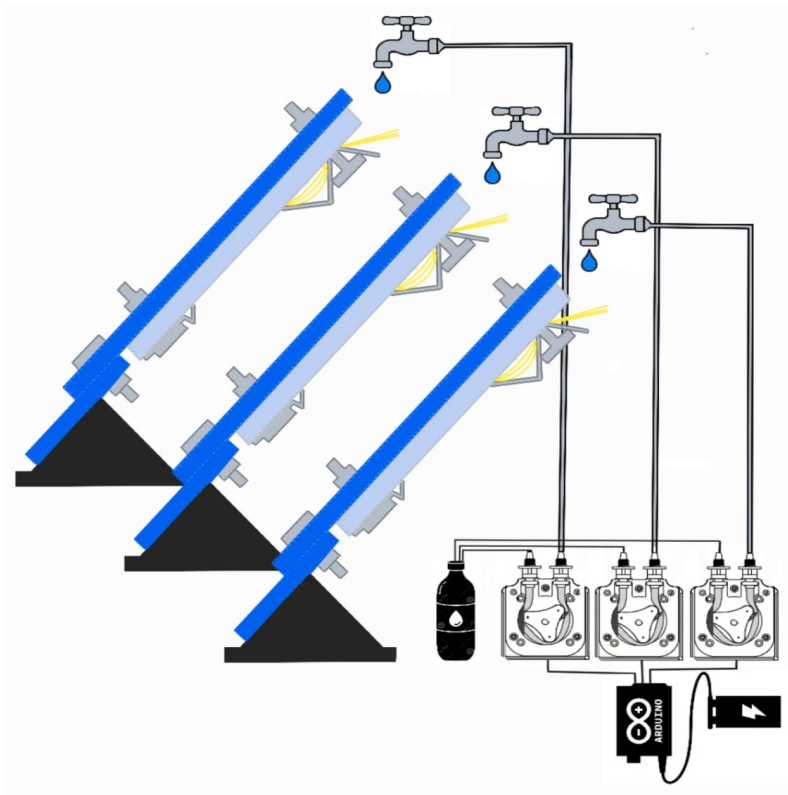
(a) Esquema del circuito de ensayo para pruebas de tracking y erosión. (b) Circuito real para corriente continua.

Figura 3.2: Circuito de ensayo.

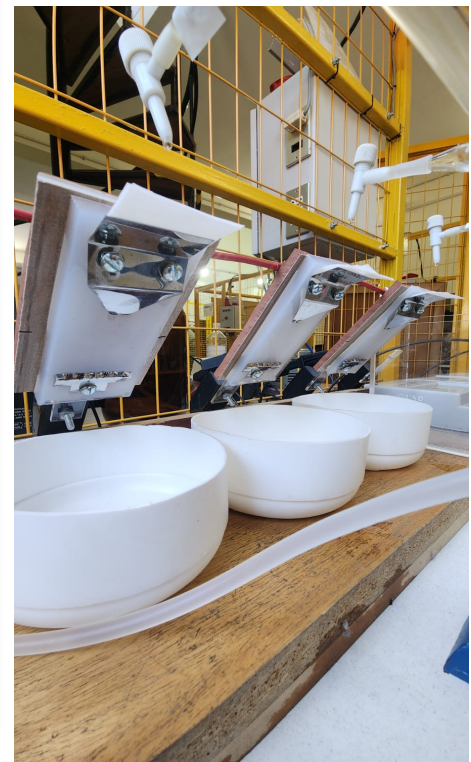
3.2.3. Sistema de goteo controlado

El sistema de goteo controlado implementado para los ensayos está diseñado para asegurar una distribución precisa y constante del líquido contaminante sobre las probetas, según las condiciones experimentales requeridas.

1. **Componentes del sistema:** El sistema consta de bombas peristálticas accionadas mediante motores paso a paso de 24 V. Estos motores están controlados por una placa Arduino UNO mediante drivers tipo A4988, permitiendo así un control preciso del movimiento del rotor mediante pulsos eléctricos.
2. **Control del caudal:** La placa Arduino UNO controla los motores paso a paso enviando una cantidad específica de pulsos que determinan el ángulo de rotación del motor. Cada motor utilizado tiene una resolución de 200 pasos por revolución completa. Tras una calibración previa con gotas, se determinó que 30 pasos del motor equivalen a un ángulo de giro de 54° , correspondiendo esto a un volumen de 0.1 ml por gota. Con estos parámetros establecidos, se ajusta el caudal del líquido contaminante requerido para cada nivel o escalón de tensión durante los ensayos.
3. **Esquema del sistema de goteo:** En la figura 3.3 se presenta el esquema detallado del sistema de goteo controlado:



(a) Sistema de goteo controlado mediante bombas peristálticas.



(b) Sistema real implementado.

Figura 3.3: Sistema de goteo.

3.2.4. Procedimiento de ensayo

1. **Ensayos en corriente alterna (AC):** Se realizarán pruebas en AC para diferentes niveles de tensión, con el propósito de categorizar el material bajo condiciones normalizadas

y ampliamente reconocidas, para contar con una base sólida y realizar comparaciones con tensiones continuas.

2. **Ensayos en corriente continua (DC):** Posteriormente, se efectuarán ensayos en DC aplicando polaridades positiva y negativa, con el fin de analizar las diferencias en el comportamiento del material bajo estas condiciones.
3. **Aplicación de la solución contaminante:** Durante los ensayos, se aplicará continuamente una solución contaminante sobre las probetas mediante el sistema de goteo controlado, conforme a los parámetros establecidos en la norma IEC 60587.
4. **Duración del ensayo:** Cada ensayo tendrá una duración máxima de seis horas, o se interrumpirá antes si se cumple alguno de los criterios de finalización establecidos.
5. **Criterios de finalización:** Se aplicará el criterio A de la norma IEC 60587, que indica que la prueba se interrumpe si la corriente de fuga supera los 60 mA en cualquier momento. Además, se considerarán otros factores de terminación, como la formación de agujeros en las probetas, la aparición de caminos conductivos entre los electrodos o la ignición de las muestras.

3.2.5. Emulación de Ambientes Contaminados

En esta sección se describe el procedimiento utilizado para la emulación de ambientes contaminados sobre probetas de silicona. Si bien se cuenta con una cabina de lluvia destinada a la contaminación artificial de aisladores mediante niebla salina, esta no fue utilizada en el presente estudio. La razón principal radica en las características hidrofóbicas de las probetas de silicona ensayadas. Debido a su alta hidrofobicidad superficial, el contaminante tiende a acumularse en forma de gotas discretas que no se adhieren de manera uniforme a la superficie. Este comportamiento se intensifica por el movimiento asociado al traslado de las muestras desde la cabina hasta el área de reposo, necesario para permitir el secado del contaminante aplicado. Este proceso de reposo se debe mantener por un mínimo de 8 horas para asegurar que la capa contaminante se establezca sobre la superficie del material, condición fundamental antes de proceder a su evaluación o exposición a estrés eléctrico. La formación de gotas y su movilidad sobre la superficie dificultan la formación de una película continua de contaminante, condición deseada para representar adecuadamente ambientes tipo A según la clasificación de la IEC 60815-1(9). Por lo tanto, se optó por aplicar procedimientos alternativos de contaminación controlada que permiten una mayor adherencia del contaminante y replicabilidad del ensayo.

1. **Limpieza de las probetas:** Cada probeta fue limpiada cuidadosamente utilizando alcohol isopropílico con el fin de remover residuos superficiales. Esta tarea se realizó usando guantes de látex para evitar contaminación por contacto directo.
2. **Preparación de la solución contaminante:** Se preparó una mezcla homogénea de agua, sal (NaCl) y caolín en las concentraciones deseadas, de acuerdo con el tipo de ambiente a emular (e.g., tipo A según IEC 60815-1).
3. **Disposición de las probetas:** Tres probetas fueron posicionadas en el centro de una superficie limpia y nivelada, asegurando su correcta orientación y estabilidad durante la aplicación.

4. **Purgado del pulverizador:** Con el fin de eliminar residuos previos en el conducto del pulverizador, se aplicó una lluvia inicial durante 10 segundos en un recipiente externo, garantizando que el líquido utilizado en el proceso de contaminación correspondiera exclusivamente a la mezcla preparada.
5. **Montaje del sistema de aplicación:** Se instaló un soporte a una altura de 8 cm respecto a la base, con una inclinación de 45° , ubicado a 50 cm del centro de las probetas. Este soporte permitió posicionar el pulverizador de forma fija durante la aplicación.
6. **Aplicación del contaminante:** Utilizando el pulverizador posado sobre el soporte, se aplicó una lluvia controlada y constante durante 30 segundos por cada lado del soporte, asegurando que se mantuviera una distancia de 50 cm entre el difusor del pulverizador y el centro de las probetas. Este procedimiento busca obtener una distribución uniforme del contaminante sobre todas las caras expuestas.
7. **Secado y estabilización:** Finalmente, las probetas fueron dejadas en reposo por un mínimo de 8 horas, permitiendo la evaporación del agua y la adherencia de los contaminantes sólidos a la superficie de las muestras.

Una vez finalizado este proceso, las probetas fueron caracterizadas mediante los procedimientos descritos en la normativa IEC 60815-1, utilizando los métodos definidos para la cuantificación de ESDD (Equivalent Salt Deposit Density) y NSDD (Non-Soluble Deposit Density), con el objetivo de verificar la consistencia y representatividad del nivel de contaminación alcanzado.



Figura 3.4: Resultados y fotos de los elementos utilizados.

3.3. Envejecimiento UV

3.3.1. Procedimiento experimental de envejecimiento de probetas en cabina UV

Este procedimiento se llevó a cabo en una cabina de irradiación UV ubicada en el campus San Joaquín, de la Universidad Técnica Federico Santa María. Dicha cabina está destinada principalmente al envejecimiento de módulos fotovoltaicos, siguiendo estrictamente la normativa IEC 61215 y específicamente la prueba MQT 10. Las probetas de silicona fueron incluidas en este procedimiento mediante soportes especialmente diseñados, permitiendo la exposición directa de una cara, previamente marcada y pesada, para evaluar los cambios posteriores al proceso de envejecimiento.

Las características específicas del sistema empleado se resumen en la tabla [3.1](#).

Intensidad UV	91,6 W m ⁻² (280 nm–400 nm)
Distribución espectral	UV-A (320 nm–400 nm): 95 % UV-B (280 nm–320 nm): 5 %
Uniformidad de irradiancia	± 15 %
Estabilidad de irradiancia	± 5 %
Tipo de lámpara	Tubos fluorescentes
Vida útil lámparas	1000 h (mínimo)
Número de lámparas	25 tubos fluorescentes
Tiempo hasta máxima intensidad	10 min
Consumo eléctrico	4 kVA
Conexión eléctrica	380 V–400 V, 50–60 Hz, trifásico + N + PE, 16 A CEE-form
Dimensiones superficie prueba	1500 mm × 2000 mm (Ancho × Alto)
Área iluminada	1800 mm × 2300 mm (Ancho × Alto)
Dimensiones de instalación	2250 mm × 800 mm × 2450 mm (Ancho × Profundidad × Alto)
Peso del sistema	160 kg
Condiciones ambientales	Bajo nivel de polvo

Tabla 3.1: Especificaciones técnicas del sistema de envejecimiento UV

La Figura [3.5](#) muestra visualmente el sistema utilizado para el procedimiento experimental de envejecimiento UV.



Figura 3.5: Sistema de envejecimiento UV empleado para las probetas, conforme a IEC 61215 - prueba MQT 10.

Nota

Debido a contratiempos y dificultades de fuerza mayor, no fue posible completar el ciclo de irradiación total planeado de 15 kWh/m^2 . En consecuencia, las probetas recibieron únicamente una irradiación parcial acumulada de aproximadamente 5 kWh/m^2 .

Se deja constancia de que la interrupción del proceso no fue de responsabilidad del autor: la cámara de envejecimiento presentó fallas durante su funcionamiento y, posteriormente, ocurrieron contingencias de fuerza mayor que afectaron al personal responsable. Los resultados se interpretan dentro de este alcance.

3.3.2. Fundamentos para el cálculo de equivalencia en días de irradiación solar en el norte de Chile

Para determinar un equivalente en días de irradiación solar natural en el norte de Chile a partir de la irradiancia total aplicada durante el procedimiento de envejecimiento de las probetas, se emplearán las siguientes bases conceptuales:

Se considera, según diversos estudios, que del total de radiación solar incidente en la superficie terrestre, aproximadamente entre un 5 % y un 7 % corresponde a radiación ultravioleta (UV), mientras que el resto del espectro está compuesto de forma natural por luz visible e infrarroja (17) (18) (19). Esta distribución espectral permite establecer relaciones y equivalencias entre la dosis de irradiación artificial administrada en laboratorio y la irradiancia solar natural.

Específicamente, a partir del valor de la irradiación global horizontal diaria reportada en estaciones meteorológicas del norte de Chile (20), se determinará la fracción correspondiente a la radiación UV, utilizando el rango porcentual mencionado anteriormente. De esta manera, se podrá realizar una conversión directa entre la dosis UV aplicada experimentalmente en laboratorio (expresada en kWh/m^2) y la cantidad equivalente de días naturales de exposición solar en las condiciones específicas del norte chileno.

3.4. Evaluación de Hidrofobicidad

La evaluación de la hidrofobicidad superficial de las probetas de silicona será realizada mediante el método de spray, basado en la normativa IEC TS 62073. Este procedimiento será aplicado antes y después de los ensayos de tracking y erosión, con el objetivo de observar los efectos de la contaminación superficial y el tracking en las propiedades hidrofóbicas del material ensayado.

El método del spray es especialmente adecuado por ser simple, rápido y proporcionar resultados visuales directos, permitiendo identificar claramente cambios en la superficie del aislador debido a la exposición a condiciones experimentales.

El procedimiento específico a seguir es el siguiente:

1. **Preparación previa de la probeta:** Antes de comenzar la medición, cada probeta debe estar seca y a temperatura ambiente, asegurándose que no existan residuos visibles en la superficie.
2. **Aplicación del spray:** Se pulverizará agua desionizada mediante un atomizador manual a una distancia aproximada de 20 a 30 cm de la superficie, cuidando que se consiga una distribución uniforme y fina del líquido sobre la superficie evaluada. El spray se aplicará durante 2 a 3 segundos de forma constante.
3. **Observación visual inmediata:** Tras la aplicación, se realizará una evaluación visual inmediata del patrón formado por el agua en la superficie. La observación se comparará con la escala estándar provista por la norma IEC TS 62073 (Anexo D), la cual permite clasificar el nivel de hidrofobicidad (HC) en una escala desde HC1 (altamente hidrofóbico) hasta HC7 (completamente hidrofílico).
4. **Registro fotográfico:** Se tomarán fotografías de la superficie de cada probeta evaluada, permitiendo documentar y comparar objetivamente el estado hidrofóbico antes y después de cada ensayo. Estas imágenes serán posteriormente utilizadas para sustentar visualmente los resultados obtenidos.
5. **Clasificación y registro de resultados:** La clasificación obtenida mediante la comparación visual con la escala normalizada será registrada para cada probeta, indicando claramente el nivel HC asignado y las condiciones bajo las cuales se realizó la evaluación (antes o después del ensayo).

La tabla [2.5](#) presenta una descripción resumida de cada clase de hidrofobicidad definida por la norma.

Este procedimiento permitirá evaluar los cambios producidos por las condiciones de contaminación y tracking, proporcionando resultados prácticos para determinar cómo afecta cada ensayo las propiedades superficiales de hidrofobicidad del material estudiado.

3.5. Registro de Datos.

En esta sección se describe el procedimiento para el registro sistemático de datos durante la ejecución de cada ensayo, así como la metodología empleada para su análisis posterior. El registro detallado de variables relevantes permitirá evaluar de manera consistente el desempeño de las probetas de silicona bajo distintas condiciones de prueba.

Para estructurar el levantamiento de información, se propone la utilización de 2 tablas (3.3 y 4.20) de registro que recopile de forma ordenada todos los parámetros relevantes para el análisis.

Datos generales del ensayo

Estos valores se medirán una sola vez para cada ensayo y serán aplicables al conjunto completo de probetas:

Parámetro	Valor registrado
Tipo de tensión aplicada (AC / DC)	
Valor de tensión aplicada [kV]	
Resistencia limitadora utilizada [$k\Omega$]	
Conductividad del líquido contaminante [S/m]	
Temperatura del líquido contaminante [$^{\circ}\text{C}$]	
Temperatura ambiente promedio [$^{\circ}\text{C}$]	
Presión atmosférica promedio [hPa]	
Humedad relativa promedio [%]	

Tabla 3.2: Datos generales del ensayo

Resultados individuales por probeta

Para cada probeta ensayada se deberá registrar la siguiente información de forma individual:

Probeta N°	Tiempo [h]		Peso [g]			Profundidad [mm]
	Iniciacion	Termino	Inicial	Final	Diferencia	
1						
2						
3						

Tabla 3.3: Datos por probeta

Durante el ensayo se deberán registrar los siguientes parámetros principales:

- **Condiciones ambientales promedio:** Temperatura, presión y humedad relativa medidas antes y después del ensayo, promediadas para representar adecuadamente las condiciones de la prueba.
- **Conductividad del líquido contaminante:** Valor medido junto a la temperatura del líquido en el momento de la medición, para corroborar la correspondencia con las condiciones normativas.

- **Tiempo de iniciación del tracking:** Hora, minuto y segundo en que se observe la aparición inicial del tracking en cada probeta.
- **Profundidad de erosión:** Medida final sobre cada probeta. En casos donde la erosión sea demasiado superficial para medir con instrumentos, se utilizará la diferencia entre el peso inicial y el peso final como indicador complementario.
- **Peso inicial y final de las probetas:** Registrado para todas las probetas antes y después de los ensayos.
- **Tensión aplicada y tipo de tensión:** Valor aplicado expresado en kV, indicando si corresponde a corriente alterna (AC) o corriente continua (DC), además de la polaridad en el caso de tensiones continuas.
- **Resistencia limitadora utilizada:** Valor de resistencia serie conectada al circuito, medida y registrada antes del inicio de cada prueba.

Datos gráficos asociados

Además del registro en tablas, para cada ensayo se deberá adjuntar:

- Gráfico de corriente de fuga en función del tiempo, registrado a lo largo de toda la duración del ensayo.
- Registro fotográfico de las probetas antes y después de los ensayos.
- Notificación de cualquier fenómeno inusual observado, acompañado de una descripción breve y una posible causa preliminar.

Fenómenos no previstos o comportamientos inusuales que sean detectados deberán ser informados y discutidos en el análisis de resultados, señalando su posible relación con los parámetros operativos o condiciones ambientales.

Capítulo 4

Resultados Experimentales

En esta sección se presentan y analizan los resultados obtenidos a partir de las distintas actividades experimentales realizadas en laboratorio. Los ensayos fueron diseñados para evaluar el comportamiento de probetas de silicona bajo condiciones controladas de corriente continua, exposición a contaminantes y envejecimiento por radiación UV, siguiendo los procedimientos y normativas previamente descritos.

El capítulo se estructura considerando las principales etapas experimentales abordadas, abarcando los ensayos de tracking y erosión mediante el método de plano inclinado, la generación de entornos de contaminación artificial y la medición del nivel de hidrofobicidad de las superficies. Para cada etapa se presentan los datos obtenidos, los cuales fueron registrados de acuerdo a los formatos propuestos en la metodología.

En particular, se analizan los resultados de:

- Los ensayos de tracking y erosión realizados bajo tensiones de corriente alterna, corriente continua negativa y corriente continua positiva, registrando parámetros relevantes como el tiempo de iniciación del tracking, la evolución de la corriente de fuga, la profundidad de la erosión, y la pérdida de masa de las probetas.
- La preparación y caracterización de las soluciones contaminantes, evaluando su conductividad volumétrica y condiciones ambientales.
- La medición de la hidrofobicidad superficial de las probetas antes de los procesos de envejecimiento y ensayos eléctricos, utilizando el método de spray basado en la norma IEC TS 62073.

Asimismo, se incluirán los gráficos de corriente en función del tiempo para cada ensayo, con el fin de visualizar de manera integral el comportamiento dinámico de las probetas durante las seis horas de prueba o hasta su falla prematura si corresponde.

Se registrarán y comentarán, además, todos los fenómenos inusuales observados durante los ensayos, estos eventos se documentan con el fin de enriquecer la comprensión de los mecanismos de degradación observados y ofrecer antecedentes útiles para futuros estudios.

El análisis de los resultados buscará identificar tendencias, correlaciones y patrones relevantes entre las condiciones experimentales y el desempeño de las probetas, evaluando la influencia del envejecimiento UV, la severidad del entorno contaminante y el tipo de tensión aplicada en la degradación superficial y pérdida de propiedades aislantes del material.

4.1. Ensayo a 3.5 kV AC

Con el objetivo de establecer una base de referencia para la caracterización del material, se realizaron ensayos iniciales de tracking y erosión aplicando tensiones en corriente alterna (AC). Estos ensayos permiten categorizar el comportamiento del material frente a tensiones normalizadas.

Para esta etapa experimental, se realizaron ensayos en tres niveles de tensión: 2.5 kV, 3.5 kV y 4.5 kV. Se siguieron los procedimientos de ensayo definidos previamente, respetando los criterios de aceptación establecidos por la normativa.

Los resultados obtenidos indicaron lo siguiente:

- A 2.5 kV y 3.5 kV, las probetas ensayadas soportaron adecuadamente el ensayo de 6 horas sin presentar fallas según el criterio A (corriente de fuga inferior a 60 mA y sin perforaciones ni ignición).
- A 4.5 kV, las probetas no lograron superar los criterios de aceptación, observándose fallas prematuras asociadas a tracking superficial y aumento sostenido de la corriente de fuga.

En consecuencia, se considera que la tensión de 3.5 kV representa el nivel máximo de tensión soportada bajo condiciones de ensayo AC, siendo el valor que categoriza el material de acuerdo a las clases definidas en la IEC 60587.

A continuación, se presentan en forma tabulada en las tablas [4.1](#) y [4.2](#) los principales resultados obtenidos para el ensayo a 3.5 kV AC:

Parámetro	Valor registrado
Tipo de tensión aplicada (AC / DC)	AC
Valor de tensión aplicada [kV]	3.5
Resistencia limitadora utilizada [$k\Omega$]	22
Conductividad del líquido contaminante [S/m]	0.256
Temperatura del líquido contaminante [$^{\circ}\text{C}$]	22
Temperatura ambiente promedio [$^{\circ}\text{C}$]	19.5
Presión atmosférica promedio [hPa]	1013
Humedad relativa promedio [%]	58

Tabla 4.1: Datos generales del ensayo a 3.5 kV

Probeta N°	Tiempo [h]		Peso [g]			Profundidad [mm]
	Iniciacion	Termino	Inicial	Final	Diferencia	
1	00:43:02	06:00:00	54.35	53.958	0.392	2.84
2	04:31:56	06:00:00	54.57	54.54	0.03	0
3	03:57:40	06:00:00	56.5	56.46	0.04	0

Tabla 4.2: Datos por probeta a 3.5 kV

Adicionalmente, se incluirá el gráfico de corriente de fuga en función del tiempo para el ensayo a 3.5 kV, el cual permitirá visualizar la evolución del fenómeno de tracking durante el transcurso de las seis horas de prueba.

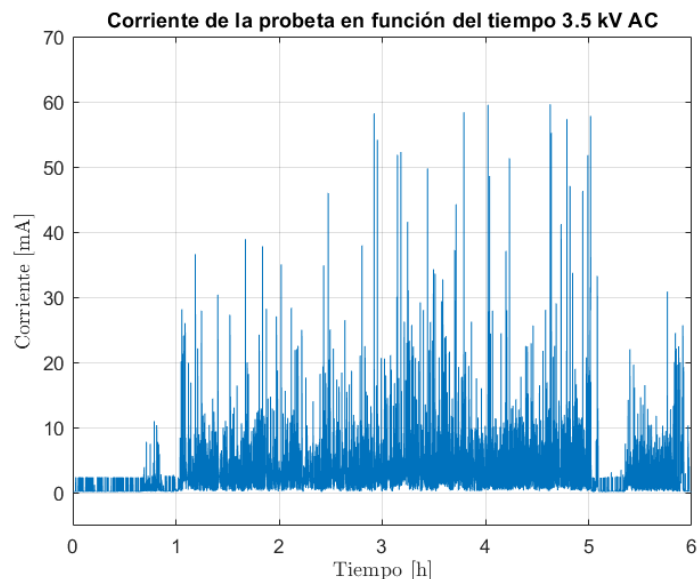
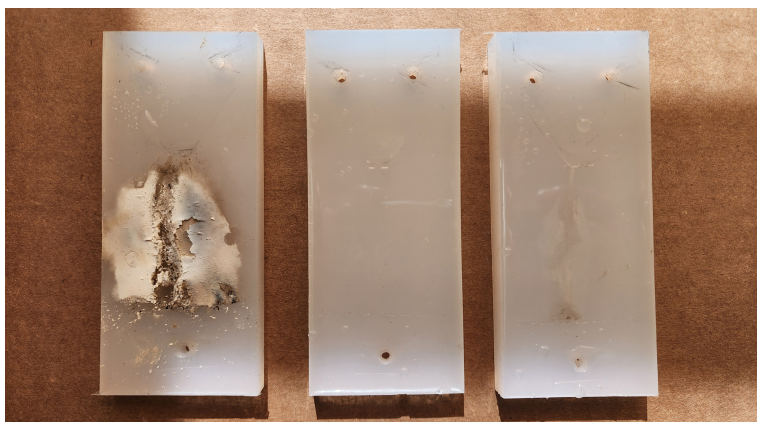


Figura 4.1: Corriente de fuga en el tiempo, AC 3.5 kV.

La Figura 4.1 muestra el comportamiento de la corriente de fuga durante el ensayo a 3.5 kV AC. Se observa que, a medida que transcurre el tiempo, la corriente presenta una tendencia general al alza, con múltiples picos que alcanzan valores cercanos a los 60 mA. Este comportamiento puede explicarse por la formación progresiva de una capa húmeda sobre la superficie de las probetas debido a la evaporación parcial del líquido contaminante, lo que favorece la formación de caminos conductivos (tracking).

A medida que se establece un camino carbonizado, el centelleo eléctrico (arcing) se vuelve persistente, lo que provoca un aumento sostenido de la corriente y una degradación acelerada del material aislante. Este fenómeno se refleja en la gráfica y refuerza la importancia de mantener superficies limpias en los aisladores, especialmente bajo condiciones húmedas o contaminadas, ya que la presencia de residuos conductivos o humedad superficial puede facilitar la formación de tracking.



(a) Probetas luego del ensayo.



(b) Zoom a la probeta 1.

Figura 4.2: Probetas luego del ensayo a 3.5 kV AC. Probeta 1, Probeta 2, Probeta 3.

En la Figura 4.2 se presentan las tres probetas sometidas al ensayo. Se puede observar visualmente el daño ocasionado por el tracking y la erosión. La Probeta 1 presentó el daño más severo, con un camino carbonizado bien definido y una profundidad máxima de 2,84 mm, medida con reloj comparador. En las Probetas 2 y 3 no fue posible realizar mediciones de profundidad debido a que la erosión fue superficial; sin embargo, se detectó una disminución de masa atribuible al material desprendido, lo cual sugiere un daño leve pero presente. La variabilidad entre probetas (daños no equivalentes) se asocia a la naturaleza altamente variable de la iniciación del tracking: una vez iniciado un camino, su crecimiento puede auto-reforzarse y volverse más agresivo, mientras que en otras ocasiones permanece superficial. Además, aunque se aplicó un proceso de fabricación uniforme, existen tolerancias y pequeñas diferencias inevitables que pueden influir en la severidad del *tracking*.

En base a los resultados obtenidos y según los criterios de la norma IEC 60587, se concluye que el material bajo estudio se categoriza como **Clase 1A 3.5 – 2.84 mm**, ya que fue capaz de soportar exitosamente el nivel de tensión de 3.5 kV sin falla, mientras que falló a 4.5 kV. Esta clasificación será utilizada como referencia comparativa para los ensayos realizados posteriormente en corriente continua positiva y negativa.

4.2. Ensayo a 3.5 kV -DC

Con el objetivo de evaluar el comportamiento del material frente a tensiones de corriente continua de polaridad negativa, se realizaron ensayos de tracking y erosión aplicando una tensión de 3.5 kV DC-. esto permitirá comparar los efectos de la polaridad sobre el desarrollo de caminos conductivos en la superficie del material aislante, bajo condiciones de contaminación controladas.

Durante esta etapa, también se llevó a cabo una prueba preliminar a 2.5 kV DC-, cuyos resultados fueron similares, con corrientes de fuga bajas, poco estables y formación de caminos de carbonización delgados. Debido a esto, se decidió utilizar el valor de 3.5 kV como representativo para categorizar el material en corriente continua negativa.

En las tablas 4.3 y 4.4 se presentan los parámetros generales y específicos medidos para el ensayo a 3.5 kV DC-:

Parámetro	Valor registrado
Tipo de tensión aplicada (AC / DC)	DC Negativa
Valor de tensión aplicada [kV]	3.5
Resistencia limitadora utilizada [$k\Omega$]	21.58
Conductividad del líquido contaminante [S/m]	0.256
Temperatura del líquido contaminante [$^{\circ}\text{C}$]	23
Temperatura ambiente promedio [$^{\circ}\text{C}$]	19.9
Presión atmosférica promedio [hPa]	1013
Humedad relativa promedio [%]	63

Tabla 4.3: Datos generales del ensayo a 3.5 kV DC Negativa

Probeta N°	Tiempo [h]		Peso [g]			Profundidad [mm]
	Iniciacion	Termino	Inicial	Final	Diferencia	
1	00:39:52'	06:00:00'	55.57	55.56	0.01	0
2	00:34:41'	06:00:00'	47.96	47.94	0.02	0
3	00:21:27'	06:00:00'	50.53	50.49	0.04	0

Tabla 4.4: Datos por probeta a 3.5 kV DC Negativo

Adicionalmente, se incluirá el gráfico de corriente de fuga en función del tiempo para el ensayo a 3,5 kV DC-, el cual permitirá visualizar el comportamiento del fenómeno de tracking durante el transcurso del ensayo:

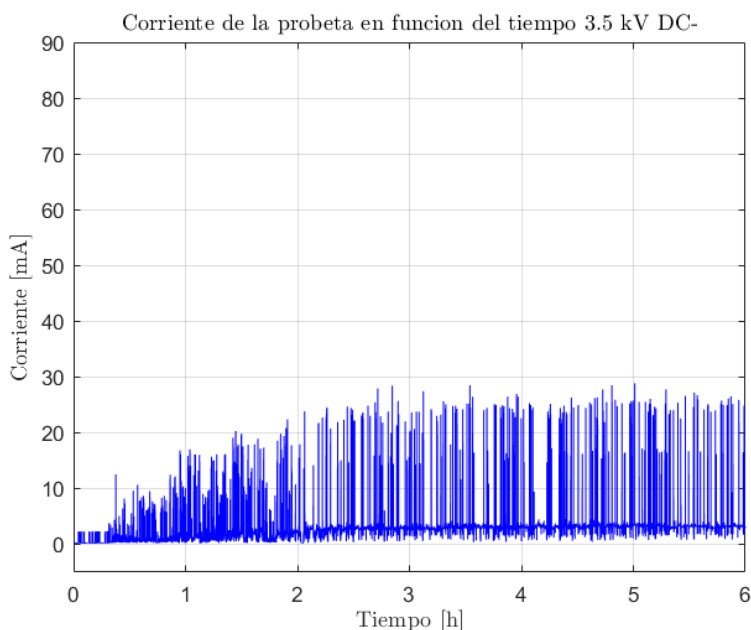


Figura 4.3: Corriente de la probeta 1 en el tiempo, DC- 3.5 kV.

En la figura [4.3](#) se observa que durante la prueba con corriente continua negativa la corriente presenta un aumento gradual en el tiempo, alcanzando picos que se estabilizan alrededor de 25 a 29 mA a partir de las 2 horas y 30 minutos hasta el término de la prueba a las 6 horas.

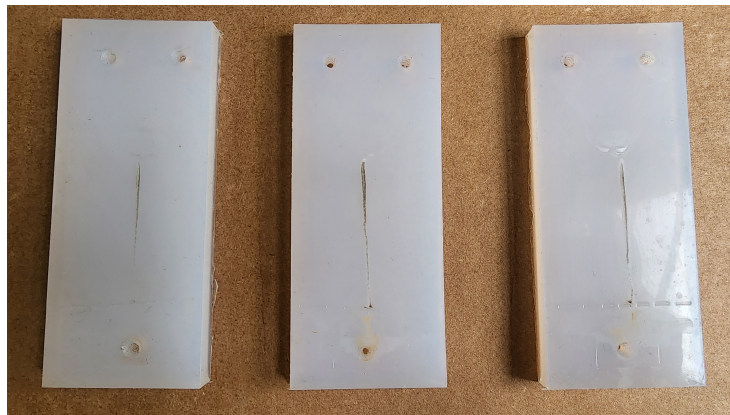


Figura 4.4: Probetas luego del ensayo a 3.5 kV DC-. Probeta 1, Probeta 2, Probeta 3.

Durante el ensayo en DC negativa se observó la formación casi inmediata de un camino delgado de carbonización entre los electrodos, el cual fue intensificándose de manera lenta y sin ramificaciones hacia los laterales. A pesar de que se produjo centelleo superficial constante, este no generó perforación del material ni caminos profundos. La disminución de masa fue mínima, y en ningún caso se pudo medir profundidad con el reloj comparador. Sin embargo, al limpiar las superficies, se evidenciaron pequeñas muescas en las zonas donde se concentró el centelleo.

La Figura 4.4 muestra las tres probetas ensayadas, en las que se aprecia el patrón típico del tracking en corriente continua negativa: un camino estrecho, centrado y sin ramificaciones. Este resultado es coherente con lo observado en otras investigaciones, donde se ha demostrado que la polaridad negativa en DC tiende a generar menor estrés superficial. Esto puede explicarse por la migración diferencial de cargas: bajo polaridad negativa, los aniones del contaminante no tienden a moverse con la misma facilidad hacia el cátodo, y los procesos de ionización superficial son menos agresivos. Además, la menor probabilidad de arcos sostenidos reduce el daño térmico y la formación de caminos profundos de erosión.

Con base en estos resultados, se concluye que el material supera sin fallas el ensayo a 3.5 kV en corriente continua de polaridad negativa, observándose un daño superficial mínimo. Estos resultados servirán como base comparativa con los ensayos en corriente continua positiva, donde se espera una mayor severidad en los efectos de tracking y erosión superficial.

4.3. Ensayo a 3.5 kV DC+

Con el objetivo de evaluar el comportamiento del material frente a tensiones de corriente continua de polaridad positiva, se realizaron ensayos de tracking y erosión aplicando una tensión de 3.5 kV DC+.

Durante la prueba, se observó un comportamiento mixto con respecto a los resultados previos de AC y DC-. Similar a lo ocurrido en DC-, se formó rápidamente un camino de carbonización directo entre los electrodos. Sin embargo, a diferencia del ensayo en DC negativo, este camino se fue expandiendo lateralmente con el tiempo, generando una mancha de carbonización más amplia y severa, comparable a la observada en los ensayos de corriente alterna.

En las tablas 4.5 y 4.6 se presentan los parámetros generales y específicos medidos en el ensayo a 3.5 kV DC+:

Parámetro	Valor registrado
Tipo de tensión aplicada (AC / DC)	DC Positivo
Valor de tensión aplicada [kV]	3.5
Resistencia limitadora utilizada [$k\Omega$]	22.1
Conductividad del líquido contaminante [S/m]	0.256
Temperatura del líquido contaminante [$^{\circ}\text{C}$]	22
Temperatura ambiente promedio [$^{\circ}\text{C}$]	18.5
Presión atmosférica promedio [hPa]	1013
Humedad relativa promedio [%]	65

Tabla 4.5: Datos generales del ensayo a 3.5 kV DC Positivo

Probeta N°	Tiempo [h]		Peso [g]			Profundidad [mm]
	Iniciacion	Termino	Inicial	Final	Diferencia	
1	02:27:07'	06:00:00'	55.66	55.6	0.06	0
2	02:51:24'	06:00:00'	47.99	47.94	0.05	0
3	00:35:48'	06:00:00'	50.43	50.37	0.06	0

Tabla 4.6: Datos por probeta a 3.5 kV DC Positivo

La Figura 4.5 muestra el comportamiento de la corriente de fuga durante el ensayo. Se aprecia una tendencia creciente, con periodos prolongados en los que la corriente alcanza valores cercanos a 10 mA y picos cercanos a los 60 mA. Este patrón sugiere que los caminos de contaminación en la superficie se vuelven completamente conductivos por largos intervalos de tiempo, algo que no se observó ni en AC ni en DC negativa. La corriente presenta además un comportamiento continuo y al alza, lo que indica una degradación sostenida del material.

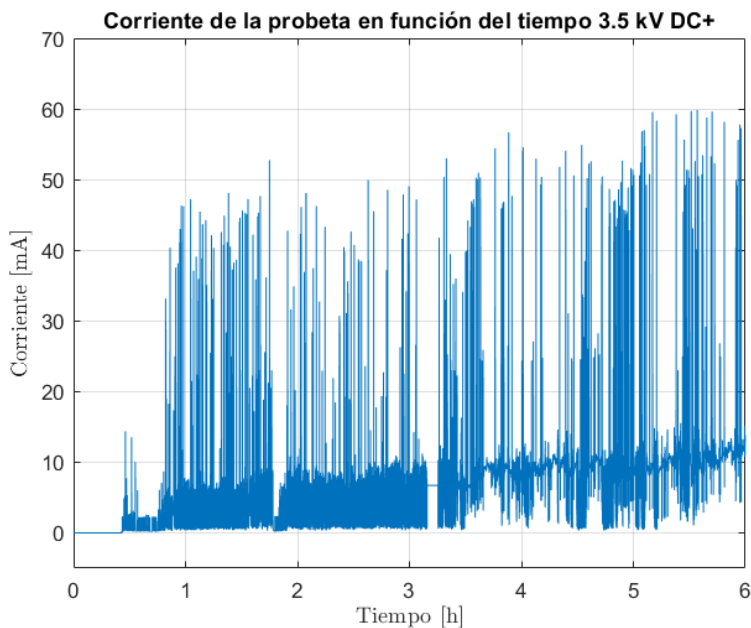


Figura 4.5: Corriente de la probeta3 en el tiempo, DC+ 3.5 kV.

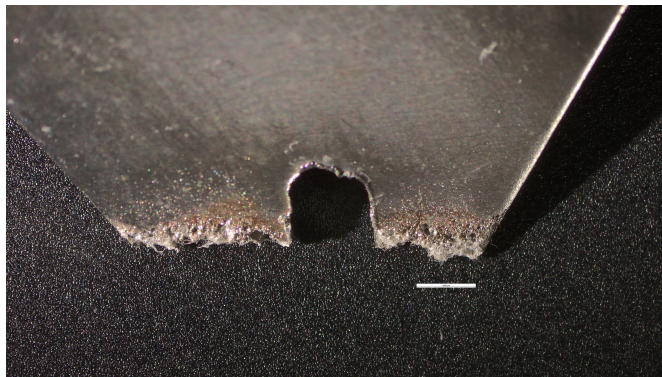
La Figura 4.6 evidencia la severidad del daño ocasionado. Las probetas presentan una expansión significativa de la mancha de carbonización hacia los costados, junto con acumulación de residuos. Tras la limpieza, se observaron múltiples muescas superficiales en toda el área contaminada, indicando un daño distribuido. Estas muescas son muy parecidas a las que se observan en la realidad en aisladores que presentan daño por conceptos de tracking.

Un fenómeno adicional relevante fue la erosión visible en los electrodos superiores. Tal como se muestra en la Figura 4.7, la exposición prolongada a arcos eléctricos provocó una pérdida de material significativa y la aparición de porosidad en el borde del electrodo. Este daño fue consistente en ambos ensayos realizados en polaridad positiva (2.5 kV y 3.5 kV), lo que indica que el estrés térmico y electroquímico en esta configuración es considerablemente mayor que en los otros casos.

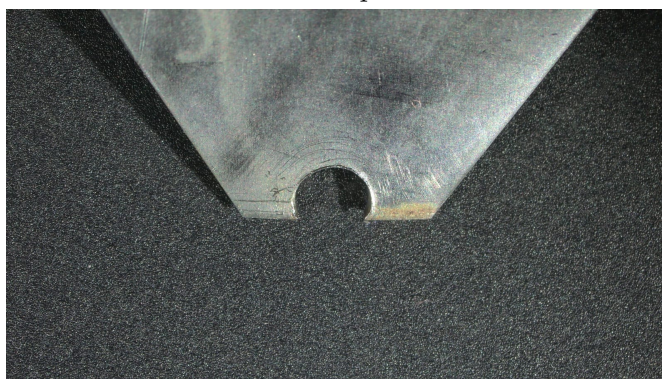


Figura 4.6: Probetas luego del ensayo a 3.5 kV DC+. Probeta 1, Probeta 2, Probeta 3.

Respecto a las pruebas a 2.5 kV DC+, los resultados fueron similares: aunque los valores pico de corriente fueron menores, se mantuvo la tendencia creciente y la formación de caminos carbonizados. También se observó una alta acumulación de residuos en la superficie, lo cual sugiere que el fenómeno es característico de la polaridad positiva más que de la magnitud de la tensión.



(a) Electrodo superior dañado luego del ensayo a 3.5 kV DC+. Se observa pérdida de material y formación de porosidad.



(b) Electrodo superior luego del ensayo a 3.5 kv DC-, esta intacto salvo de una oxidación en el lado derecho.

Figura 4.7: Comparación de electrodo de las diferentes pruebas.

Una posible explicación del daño más severo en corriente continua positiva es la dirección de migración iónica en la capa superficial contaminada. Bajo polaridad positiva, los aniones de la solución (como Cl^-) migran hacia el electrodo superior (ánodo), donde ocurren procesos de oxidación superficial. Esto genera una mayor liberación de energía, descomposición del contaminante y carbonización rápida. La superficie se vuelve más conductiva, facilitando arcos persistentes que contribuyen tanto al daño del material como a la degradación del electrodo. Este mecanismo ha sido documentado en estudios previos sobre tracking en DC [\(21\)](#) [\(22\)](#) y coincide con los resultados experimentales observados en este trabajo.

4.4. Validación del Protocolo de Contaminación

Con el objetivo de asegurar la consistencia y confiabilidad del protocolo de contaminación superficial propuesto, se implementó una etapa preliminar de validación experimental. Esta etapa consideró dos aspectos principales:

- Evaluar si es posible contaminar de manera simultánea tres probetas y obtener una deposición uniforme y consistente.
- Verificar la repetibilidad del procedimiento cuando la mezcla contaminante es preparada en recipientes separados, utilizando las mismas concentraciones de sal y caolín.

4.4.1. Validación de la contaminación simultánea de tres probetas

Con el objetivo de asegurar la consistencia y confiabilidad del protocolo de contaminación superficial propuesto, se implementó una etapa preliminar basada en la ejecución de tres pruebas controladas utilizando una misma solución contaminante. Para ello, se prepararon 2 litros de mezcla con una concentración de 20 g/L de sal y 2 g/L de caolín, alcanzando una conductividad de 29.6 mS/cm a una temperatura ambiente de 15.6 °C. Esta solución se utilizó para contaminar simultáneamente tres probetas por prueba, siguiendo el procedimiento descrito previamente.

El propósito de esta fase fue evaluar si el método es capaz de garantizar una deposición uniforme sobre las probetas y, en consecuencia, si los valores obtenidos para ESDD (Equivalent Salt Deposit Density) y NSDD (Non-Soluble Deposit Density) se encuentran en un entorno coherente y repetible, tal como establece la norma IEC 60815-1.

Los resultados obtenidos para cada una de las tres pruebas se resumen en las siguientes tablas:

Probeta	Parámetros previos				Parámetros calculados	
	Conductividad corregida a 20°C [S/m]	Salinidad [kg/m ³]	Peso papel antes [g]	Peso papel después [g]	ESDD [mg/cm ²]	NSDD [mg/cm ²]
1	0.084	0.467	0.135	0.138	0.778	0.050
2	0.084	0.468	0.140	0.143	0.780	0.050
3	0.085	0.475	0.141	0.143	0.792	0.033

Tabla 4.7: Resultados de la primera prueba

Probeta	Parámetros previos				Parámetros calculados	
	Conductividad corregida a 20°C [S/m]	Salinidad [kg/m ³]	Peso papel antes [g]	Peso papel después [g]	ESDD [mg/cm ²]	NSDD [mg/cm ²]
1	0.074	0.413	0.135	0.137	0.688	0.033
2	0.075	0.417	0.140	0.143	0.695	0.050
3	0.077	0.427	0.145	0.147	0.712	0.033

Tabla 4.8: Resultados de la segunda prueba

Probeta	Parámetros previos				Parámetros calculados	
	Conductividad corregida a 20°C [S/m]	Salinidad [kg/m ²]	Peso papel antes [g]	Peso papel después [g]	ESDD [mg/cm ²]	NSDD [mg/cm ²]
1	0.075	0.415	0.136	0.139	0.692	0.050
2	0.076	0.423	0.134	0.136	0.705	0.033
3	0.078	0.432	0.135	0.137	0.720	0.033

Tabla 4.9: Resultados de la tercera prueba

Los resultados anteriores se visualizan en la figura 4.8, donde se muestran los nueve puntos obtenidos (tres por cada prueba) en el diagrama ESDD–NSDD para la clasificación del nivel de severidad de contaminación. Se observa que todos los puntos se agrupan de forma consistente dentro de la zona E7, correspondiente a condiciones de contaminación muy severas. Además, la dispersión entre los datos es baja, lo que indica una buena homogeneidad en la deposición de contaminantes.

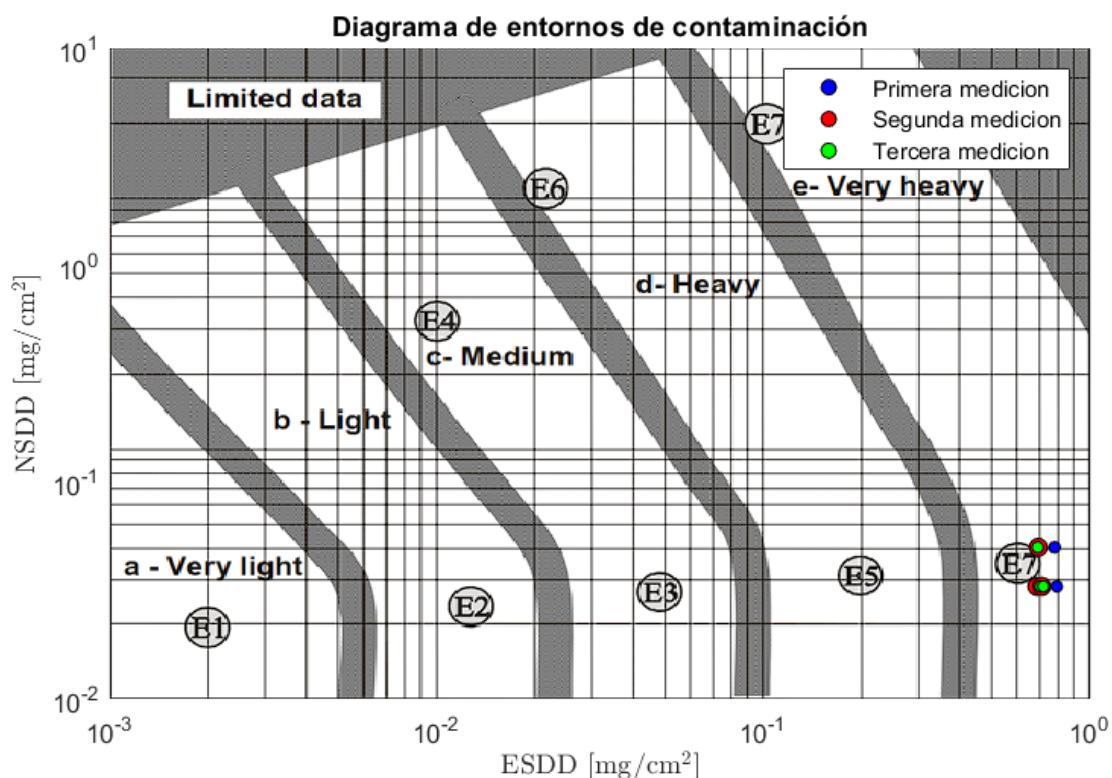
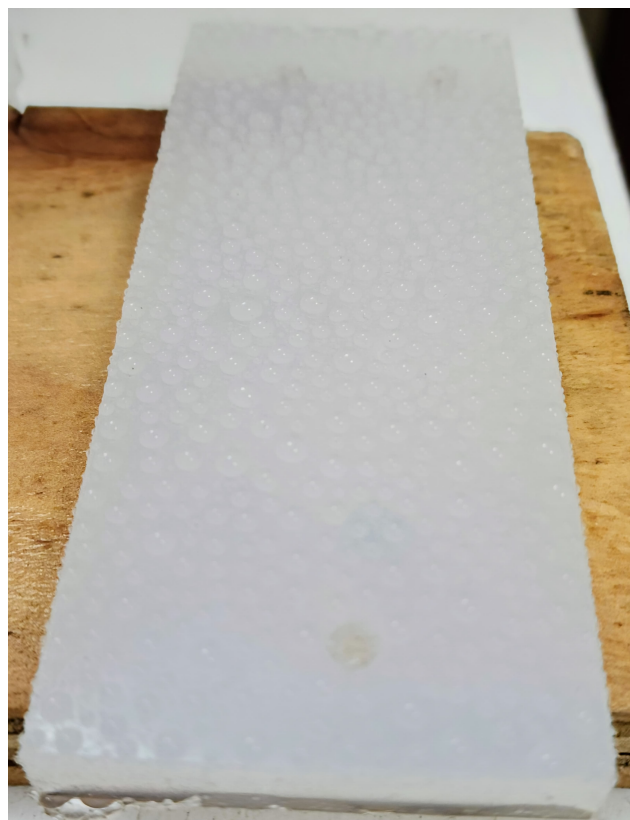


Figura 4.8: Resultados de las tres pruebas en el diagrama de severidad de contaminación.

Cabe destacar que, dado el bajo contenido de caolín en la mezcla, los puntos se sitúan en el sector central de E7, lo cual es coherente con ambientes caracterizados por alta densidad salina y baja proporción de materiales insolubles. Esta observación, sumada a la reproducibilidad entre pruebas, permite concluir que el protocolo aplicado es efectivo para generar una capa contaminante representativa, estable y homogénea.



(a) Patrón de contaminación mediante cabina tradicional.



(b) Patrón de contaminación con pulverizador casero propuesto.

Figura 4.9: Comparación de los patrones de contaminación obtenidos mediante el método tradicional con cabina y el método propuesto con pulverizador casero.

4.4.2. Repetibilidad con preparación de mezclas separadas

Para validar la repetibilidad del protocolo, se realizaron cinco ensayos en los cuales el líquido contaminante fue preparado en dos recipientes separados e independientes para cada ensayo, respetando las mismas concentraciones nominales en cada caso, dependiendo del entorno de contaminación que se buscaba alcanzar.

En esta etapa, el objetivo fue evaluar la consistencia del proceso de preparación y aplicación cuando las mezclas se elaboran en recipientes distintos, permitiendo comprobar que el procedimiento es robusto y confiable frente a esta variabilidad. Además, en este conjunto de ensayos se buscó obtener niveles de contaminación específicos, correspondientes a los entornos E2 (ligero), E3 (medio) y E5 (alto), todos con baja concentración de elementos no solubles.

Se observó adicionalmente que, a medida que la concentración de sal aumentaba, el patrón de contaminación tendía a presentar gotas de mayor tamaño sobre la superficie de las probetas tras el secado del líquido.

Los resultados obtenidos se resumen en las siguientes tablas:

Sal [g/L]	Caolín [g/L]	Conductividad del líquido aplicado [mS/cm]	Parametros obtenidos				Parametros calculados	
			Conductividad corregida a 20°C [S/m]	Salinidad [kg/m ³]	Peso papel antes [g]	Peso papel después [g]	ESDD [mg/cm ²]	NSDD [mg/cm ²]
10	2	15.5 (17.9 °C)	0.053	0.294	0.100	0.102	0.490	0.033
		16.08 (17.9 °C)	0.048	0.266	0.098	0.100	0.443	0.033

Tabla 4.10: Primer resultado de repetibilidad con preparación de mezclas separadas

Sal [g/L]	Caolín [g/L]	Conductividad del líquido aplicado [mS/cm]	Parametros obtenidos				Parametros calculados	
			Conductividad corregida a 20°C [S/m]	Salinidad [kg/m ³]	Peso papel antes [g]	Peso papel después [g]	ESDD [mg/cm ²]	NSDD [mg/cm ²]
5	2	8.7 (18.1 °C)	0.020	0.105	0.101	0.103	0.174	0.033
		8.5 (18.3 °C)	0.023	0.124	0.099	0.101	0.207	0.033

Tabla 4.11: Segundo resultado de repetibilidad con preparación de mezclas separadas

Sal [g/L]	Caolín [g/L]	Conductividad del líquido aplicado [mS/cm]	Parametros obtenidos				Parametros calculados	
			Conductividad corregida a 20°C [S/m]	Salinidad [kg/m ³]	Peso papel antes [g]	Peso papel después [g]	ESDD [mg/cm ²]	NSDD [mg/cm ²]
2	2	4.05 (18.4 °C)	0.006	0.032	0.098	0.100	0.053	0.033
		3.95 (18.0 °C)	0.005	0.026	0.098	0.100	0.043	0.033

Tabla 4.12: Tercer resultado de repetibilidad con preparación de mezclas separadas

Sal [g/L]	Caolín [g/L]	Conductividad del líquido aplicado [mS/cm]	Parametros obtenidos				Parametros calculados	
			Conductividad corregida a 20°C [S/m]	Salinidad [kg/m ³]	Peso papel antes [g]	Peso papel después [g]	ESDD [mg/cm ²]	NSDD [mg/cm ²]
1	2	2.31 (18.3 °C)	0.003	0.017	0.099	0.101	0.029	0.033
		3.36 (18.0 °C)	0.003	0.015	0.099	0.101	0.025	0.033

Tabla 4.13: Cuarto resultado de repetibilidad con preparación de mezclas separadas

Sal [g/L]	Caolín [g/L]	Conductividad del líquido aplicado [mS/cm]	Parametros obtenidos				Parametros calculados	
			Conductividad corregida a 20°C [S/m]	Salinidad [kg/m ³]	Peso papel antes [g]	Peso papel después [g]	ESDD [mg/cm ²]	NSDD [mg/cm ²]
0.5	1	1.3 (18.1 °C)	0.002	0.009	0.099	0.100	0.015	0.017
		1.4 (18.2 °C)	0.002	0.011	0.099	0.100	0.018	0.017

Tabla 4.14: Quinto resultado de repetibilidad con preparación de mezclas separadas

Los resultados de este ensayo se representan en la figura 4.10, que muestra la ubicación de los puntos correspondientes a cada una de las mezclas preparadas. Se observa que la segunda mezcla se posiciona en el entorno E5, la tercera en el entorno E3 y la quinta en el entorno E2. Estas mezclas serán empleadas posteriormente para la contaminación superficial de las probetas, con el fin de estudiar su efecto sobre la resistencia al tracking en la silicona comercial estudiada; se destaca que el cuarto resultado solo fue un intento fallido de obtener un ambiente representativo y no será utilizado.

Los puntos obtenidos presentan una dispersión mínima dentro de los rangos característicos de cada entorno, lo que evidencia que el ajuste de la concentración de sal y caolín permite generar condiciones de contaminación superficial acordes con los niveles deseados. La baja variabilidad observada respalda la confiabilidad del protocolo empleado, tanto en la preparación como en la aplicación de las mezclas.

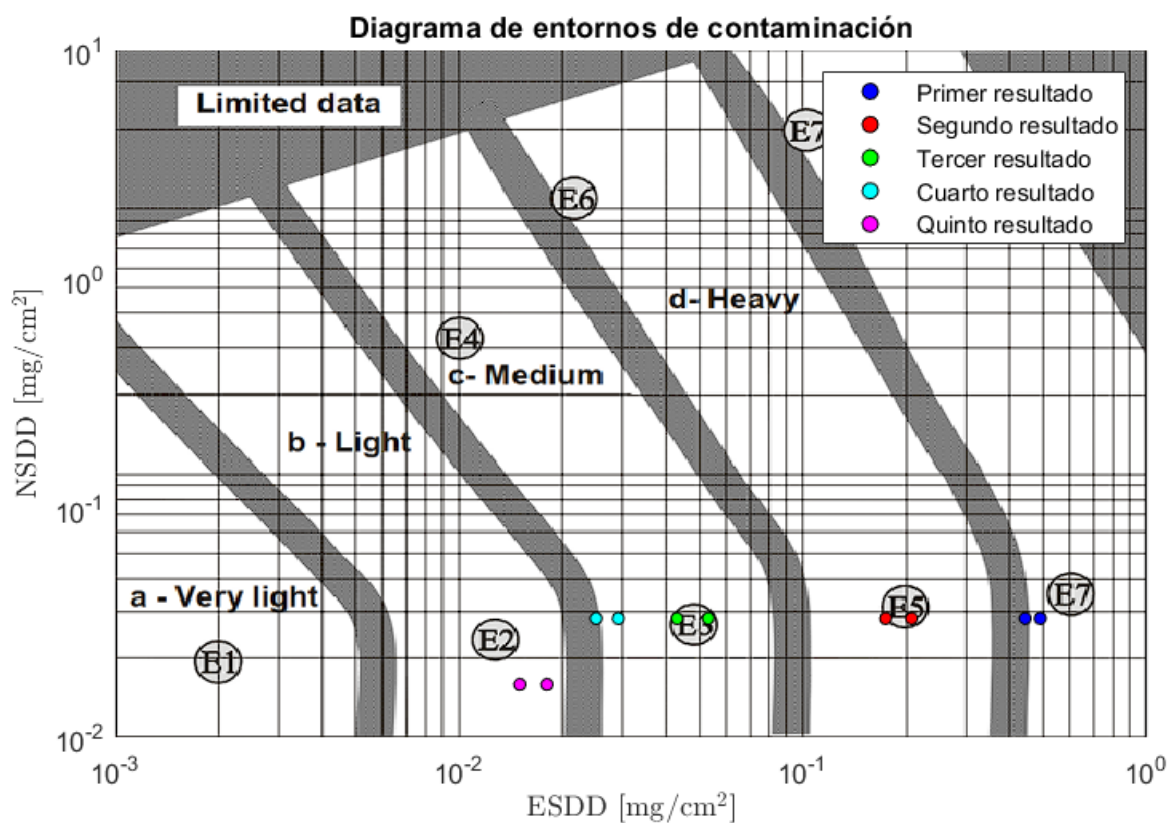


Figura 4.10: Ubicación de los resultados de repetibilidad con preparación de mezclas separadas en el diagrama de severidad de contaminación.

Por último, la figura 4.11 presenta fotografías representativas de los patrones de gotas observados en las probetas inmediatamente después de finalizar el procedimiento de contaminación. Se aprecia que el tamaño de las gotas varía con la concentración de sal en la mezcla: en las soluciones con menor concentración, las gotas son más pequeñas y se distribuyen de manera más fina sobre la superficie, mientras que en las mezclas con mayor concentración de sal tienden a formarse gotas de mayor tamaño.

Cabe mencionar que, para cada ensayo, se controló la cantidad de líquido aplicado mediante el pesaje del pulverizador antes y después del proceso. La variación registrada en la cantidad de mezcla utilizada fue del orden del 2% respecto al peso total utilizado, lo que indica una aplicación consistente y homogénea entre los distintos ensayos.



(a) Patrón de contaminación entorno E2.



(b) Patrón de contaminación entorno E3.



(c) Patrón de contaminación entorno E5.

Figura 4.11: Comparación de los patrones de contaminación observados en las probetas para los entornos E2, E3 y E5.

Se debe señalar que, durante el proceso de contaminación y al ampliar la imagen con la cámara (Figura 4.12), se observaron pequeñas fibras residuales que no fue posible mitigar por completo. No obstante, el procedimiento se controló aplicando resguardos pertinentes: se cubrieron las muestras y se mantuvieron en áreas sin tránsito de personas.



Figura 4.12: Fibras presentes en el proceso de contaminación.

4.5. Respuesta de probetas contaminadas a 3.5 kV DC positiva

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia al tracking en probetas contaminadas, sometidas a corriente continua de 3.5 kV con polaridad positiva. Se estudiaron tres niveles de contaminación artificial, correspondientes a los entornos E2, E3 y E5, con el fin de evaluar el comportamiento de las probetas frente a distintos niveles de severidad ambiental.

Para esta serie de pruebas, se implementó un procedimiento de adquisición de datos que comenzó desde el instante en que la primera gota de solución contaminante impactó el papel filtro. Es importante destacar que existe un periodo inicial de saturación del papel, durante el cual no se produce goteo directo sobre las probetas. Esta metodología busca registrar de manera íntegra el efecto inicial del tracking sobre la superficie de la probeta, evitando la pérdida prematura de contaminación superficial que podría producirse por el goteo continuo del líquido, el cual genera un efecto de limpieza sobre dicha superficie.

La Figura 4.13 muestra los resultados experimentales de corriente de fuga registrados durante el ensayo para el caso base (sin contaminación artificial) y para los tres niveles de contaminación. En cada gráfico se representa la evolución temporal de la corriente de fuga en las probetas.

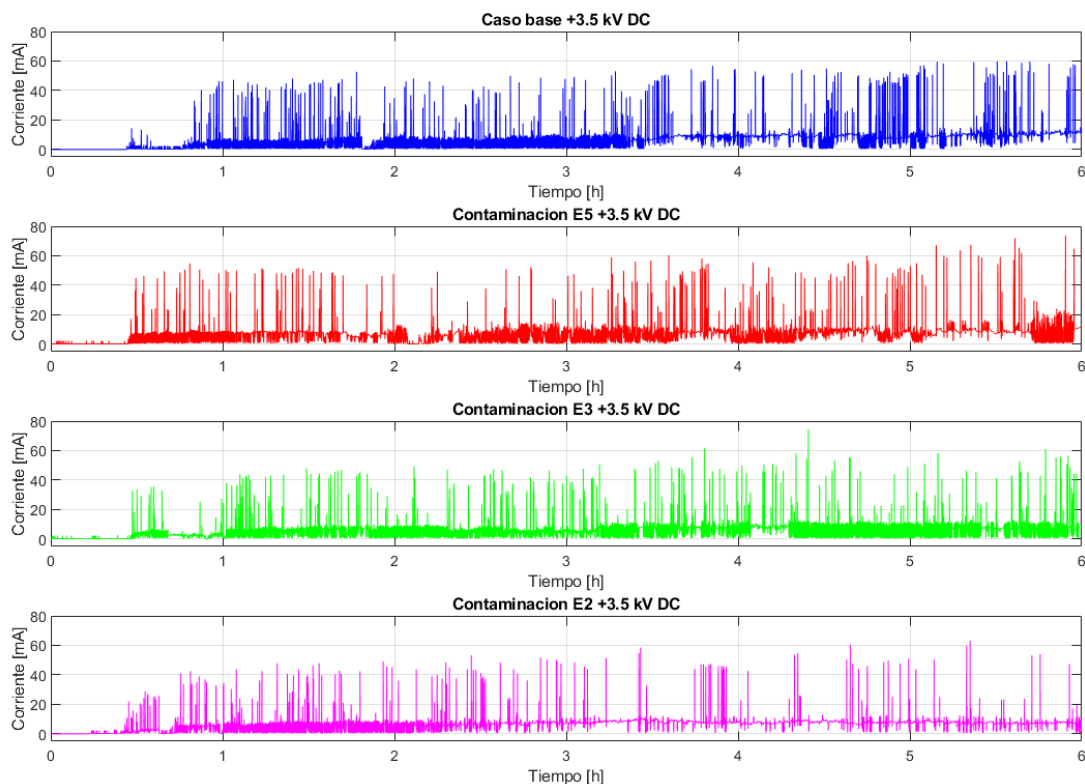


Figura 4.13: Corriente de fuga registrada durante los ensayos de tracking en probetas contaminadas bajo corriente continua de 3.5 kV positiva para distintos niveles de contaminación.

Como se aprecia en la figura [4.13](#), en los ensayos con contaminación artificial se aprecia un incremento agresivo de la corriente de fuga durante los primeros minutos del ensayo de tracking, alcanzándose valores cercanos a los 60 mA de manera significativamente más rápida que en el caso base. Este comportamiento evidencia que la presencia de contaminantes facilita la formación de trayectorias conductoras desde las etapas iniciales del proceso. La evolución posterior de la corriente y otros fenómenos asociados serán analizados en mayor detalle en la siguiente sección.

Para complementar el análisis de los resultados obtenidos en los ensayos de tracking, se presentan a continuación imágenes representativas de las probetas al finalizar el ensayo para cada uno de los entornos de contaminación artificial emulados (E2, E3 y E5). Estas imágenes permiten visualizar de forma cualitativa la evolución del daño superficial producido durante el proceso.

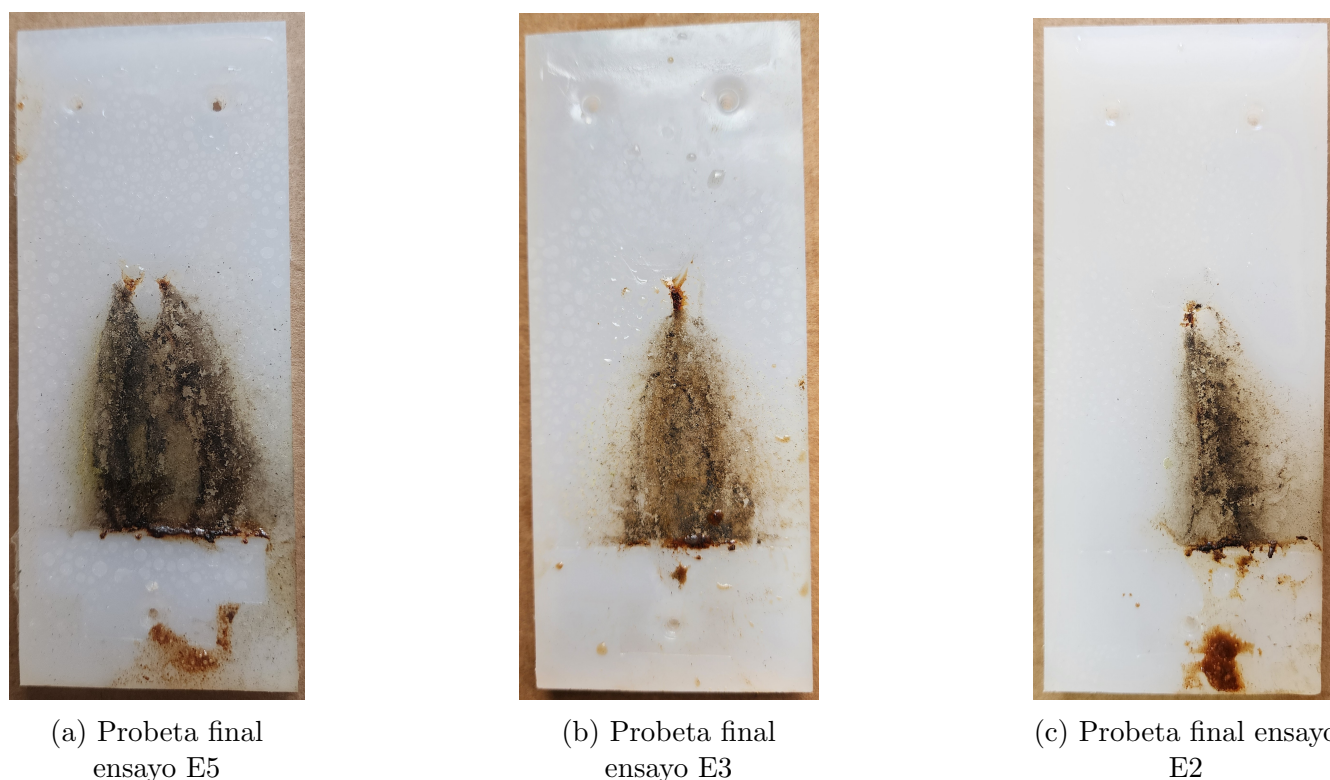


Figura 4.14: Aspecto superficial de las probetas tras finalizar los ensayos de tracking bajo diferentes niveles de contaminación artificial para 3.5 kV DC+.

En la figura [4.14](#) se aprecia claramente que el ensayo con contaminación E5 genera un daño superficial considerablemente mayor que los demás niveles de contaminación. En este caso, se observa una zona carbonizada más extensa y de color notablemente más saturado, lo cual es indicativo de un proceso de tracking más agresivo, caracterizado por arcos de banda seca intensas y sostenidas a lo largo del ensayo.

El análisis visual complementa de manera cualitativa los resultados cuantitativos de corriente de fuga, reforzando la conclusión de que la severidad de la contaminación superficial tiene un impacto directo en la intensidad y agresividad del proceso de tracking.

4.6. Respuesta de probetas contaminadas a 3.5 kV DC negativa

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia al tracking bajo sollicitación de corriente continua con polaridad negativa de 3.5 kV. A partir del análisis de los resultados previos con polaridad positiva, se seleccionó el entorno de contaminación E5 para este estudio, dado que fue el que produjo el mayor nivel de daño superficial y mostró las corrientes de fuga más elevadas.

La contaminación E5, caracterizada por su alta concentración de sales, permite evaluar el comportamiento más crítico del sistema aislante bajo sollicitación DC negativa. Para efectos comparativos, también se incluyó en el ensayo un caso base sin contaminación superficial.

En la Figura [4.15](#) se muestran imágenes de las probetas tras finalizar los ensayos, donde se observa el patrón de carbonización alcanzado en ambos casos.

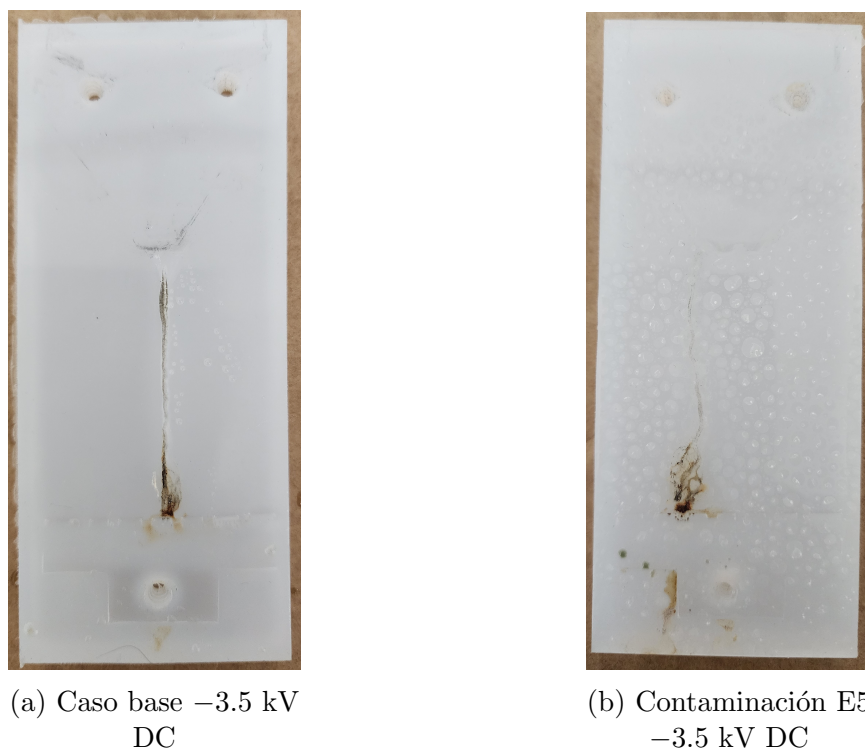


Figura 4.15: Patrones de carbonización observados en los ensayos bajo corriente continua de polaridad negativa para el caso base y el entorno de contaminación E5.

En el caso de alimentación con polaridad negativa, el patrón de carbonización observado en las probetas contaminadas presenta características particulares. Como se aprecia en la figura [4.24b](#), la zona carbonizada es muy compacta y localizada, concentrándose entre la punta del electrodo superior y el electrodo inferior. A diferencia de los patrones observados en polaridad positiva, en este caso la carbonización se vuelve progresivamente más densa y oscura en la misma trayectoria, producto de la repetida formación de arcos eléctricos en esa región concreta.

Este comportamiento sugiere que bajo polaridad negativa los mecanismos de inicio y propagación del tracking tienden a estabilizarse en un canal de descarga bien definido, con menor dispersión

superficial en comparación con los ensayos de polaridad positiva.

Es importante destacar que durante la realización de estos ensayos se observó que las pequeñas fibras presentes en la superficie de las probetas juegan un rol importante en la iniciación de los procesos de tracking. Dichas fibras actúan como puntos preferenciales para la formación de microarcs, facilitando así el inicio de trayectorias conductoras que posteriormente se consolidan en la superficie.

A continuación, en la figura 4.16, se presenta la evolución temporal de la corriente de fuga registrada durante los ensayos de tracking bajo corriente continua de polaridad negativa. Se muestran los resultados tanto para el caso base (sin contaminación) como para el entorno de contaminación E5.

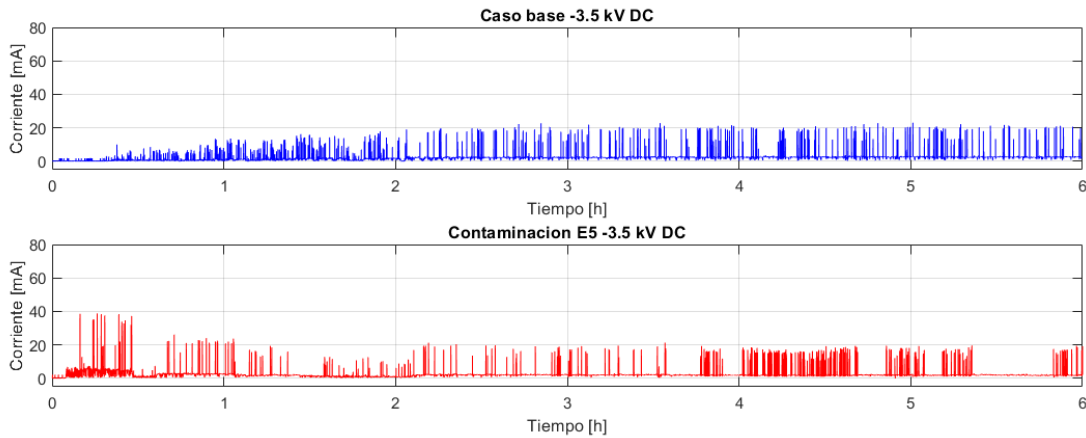


Figura 4.16: Evolución de la corriente de fuga durante los ensayos de tracking bajo corriente continua de polaridad negativa en el caso base y en el entorno de contaminación E5.

Tal como se aprecia en la figura 4.16, se repite el mismo comportamiento observado en los ensayos con polaridad positiva: las probetas contaminadas presentan corrientes de fuga elevadas al inicio del ensayo, con pulsos que superan ampliamente las corrientes observadas en el caso base. Posteriormente, la corriente de fuga tiende a disminuir gradualmente, estabilizándose en niveles similares a los del caso base conforme avanza el ensayo.

Este fenómeno refleja nuevamente la dinámica de lavado y evaporación de la contaminación superficial, que reduce la conductividad a lo largo del tiempo.

4.7. Resultados del envejecimiento UV de las probetas

A continuación se presentan los resultados obtenidos del proceso de envejecimiento artificial por exposición a radiación ultravioleta (UV) de las probetas de ensayo utilizadas en esta investigación.

4.7.1. Descripción del proceso de envejecimiento

El envejecimiento artificial de las probetas se llevó a cabo empleando una cámara específica para estos fines, ubicada en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Técnica Federico

Santa María, sede San Joaquín. La cámara es sellada y cuenta con paredes internas reflectantes que permiten una distribución uniforme de la radiación sobre las superficies expuestas.

Durante el procedimiento de envejecimiento, las probetas estuvieron sometidas a una radiación acumulada de 5 kWh/m^2 . Las especificaciones técnicas de la cámara utilizada se muestran en la tabla [3.1](#)

En la figura [4.17](#) se muestra una fotografía representativa del proceso de envejecimiento de las probetas dentro de la cámara.



Figura 4.17: Proceso de envejecimiento artificial por radiación UV de las probetas en la cámara.

4.7.2. Resultados posteriores al envejecimiento

Posterior al proceso de envejecimiento, se realizó un análisis visual y cuantitativo sobre las probetas. A simple vista se evidenció un cambio de color significativo, con una tonalidad más opaca y ligeramente verdosa en las probetas envejecidas en comparación con las probetas sin envejecer. No obstante, no se observó daño visible o deterioro estructural en las superficies.

Adicionalmente, para evaluar posibles efectos sobre las propiedades físicas del material, se llevó a cabo un registro del peso de cada una de las doce probetas antes y después del proceso de envejecimiento. La comparación de estos pesos se presenta en la tabla [4.15](#).

N° Probeta	Peso antes g	Peso despues g	Diferencia g	Porcentaje %
1	57.290	57.043	0.247	0.43
2	52.500	52.273	0.227	0.43
3	51.900	51.710	0.190	0.37
4	56.430	56.150	0.280	0.50
5	56.210	55.944	0.266	0.47
6	52.470	52.223	0.247	0.47
7	54.980	54.728	0.252	0.46
8	51.580	51.358	0.222	0.43
9	55.010	54.768	0.242	0.44
10	47.410	47.202	0.208	0.44
11	58.570	58.345	0.225	0.38
12	52.580	52.370	0.210	0.40

Tabla 4.15: Peso de las probetas antes y después del proceso de envejecimiento UV.

El proceso de envejecimiento UV provocó una pérdida de masa muy homogénea en las doce probetas. La pérdida media fue de aproximadamente 0.235 g lo que es el 0.44% con respecto al peso promedio.

Finalmente, en la figura [4.18](#) se muestra una imagen comparativa del cambio visual registrado entre las probetas envejecidas y las probetas sin envejecer.



Figura 4.18: Cambio de color de las probetas: izquierda sin envejecer, derecha envejecida.

En las secciones posteriores se evaluará si esta degradación fue lo suficientemente relevante como para modificar las propiedades del material.

4.8. Ensayo envejecimiento UV a 3.5 kV DC+

En esta sección se presentan los resultados obtenidos durante el ensayo de tracking y erosión en probetas previamente envejecidas mediante exposición a radiación ultravioleta. Este ensayo tuvo como objetivo evaluar el impacto del envejecimiento UV en la resistencia al tracking bajo sollicitación en corriente continua.

Durante la prueba se observó que los centelleos o arcos de banda seca se manifestaron de manera considerablemente más intensa que en el caso de las probetas no envejecidas. Este incremento en la severidad se evidenció tanto por la mayor extensión superficial del fenómeno como por la frecuencia con que los arcos aparecían sobre la capa contaminante. Además, se constató que el color de los centelleos tendía a variar progresivamente conforme avanzaba el ensayo, fenómeno que se relaciona estrechamente con la magnitud de la corriente de fuga instantánea circulante durante cada episodio de arco.

En la tabla [4.16](#) se muestran las condiciones generales a las que se realizó el ensayo.

Parámetro	Valor registrado
Tipo de tensión aplicada (AC / DC)	DC Positivo
Valor de tensión aplicada [kV]	3.5
Resistencia limitadora utilizada [$k\Omega$]	22.3
Conductividad del líquido contaminante [S/m]	0.256
Temperatura del líquido contaminante [$^{\circ}\text{C}$]	19.5
Temperatura ambiente promedio [$^{\circ}\text{C}$]	18.9
Presión atmosférica promedio [hPa]	1013
Humedad relativa promedio [%]	50.5

Tabla 4.16: Datos generales del ensayo en probetas envejecidas a 3.5 kV DC Positivo

En la tabla [4.17](#) se presentan los resultados específicos obtenidos para cada probeta ensayada.

Probeta N°	Tiempo [h]		Peso [g]			Profundidad [mm]
	Iniciación	Termino	Inicial	Final	Diferencia	
1	00:51:37'	06:00:00'	56.838	56.782	0.056	0
2	00:47:12'	06:00:00'	52.082	52.049	0.063	0
3	00:23:29'	06:00:00'	51.521	51.432	0.089	0.069

Tabla 4.17: Datos por probeta con envejecimiento UV a 3.5 kV DC Positivo

A continuación, en la figura [4.19](#), se muestra el registro de la corriente de fuga en función del tiempo durante todo el ensayo. Se aprecia que la corriente aumentó de forma gradual durante las primeras 90 minutos, alcanzando valores cercanos a 40 mA. Posteriormente, estabilizándose en niveles intermedios que se mantuvieron durante aproximadamente 3.5 horas hasta la finalización de la prueba.

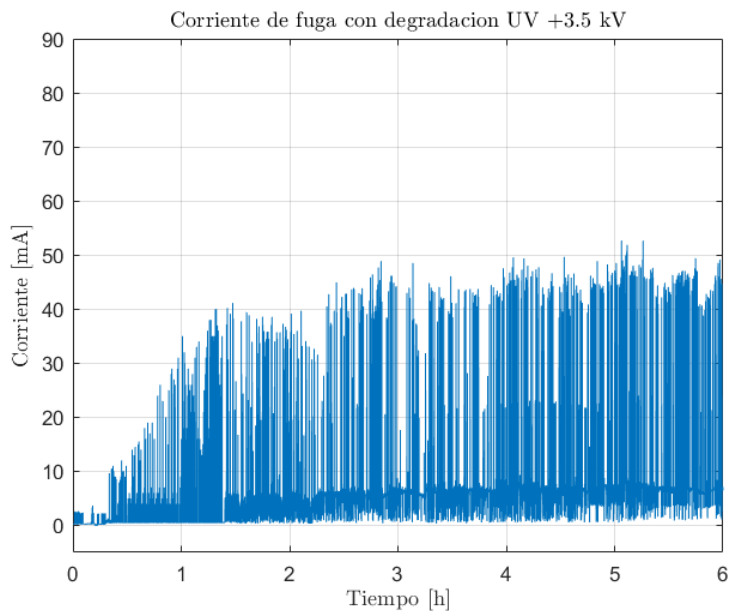


Figura 4.19: Corriente de fuga en probetas envejecidas con UV, bajo sollicitación de 3.5 kV DC+.

Por último, la figura [4.20](#) muestra el estado final de las probetas tras la finalización del ensayo. Es relevante destacar que, aunque la profundidad del camino de erosión se mantuvo relativamente baja, fue posible cuantificarla mediante un reloj comparador, evidenciando la capacidad del material para conservar cierta resistencia mecánica a pesar de la degradación acumulada.

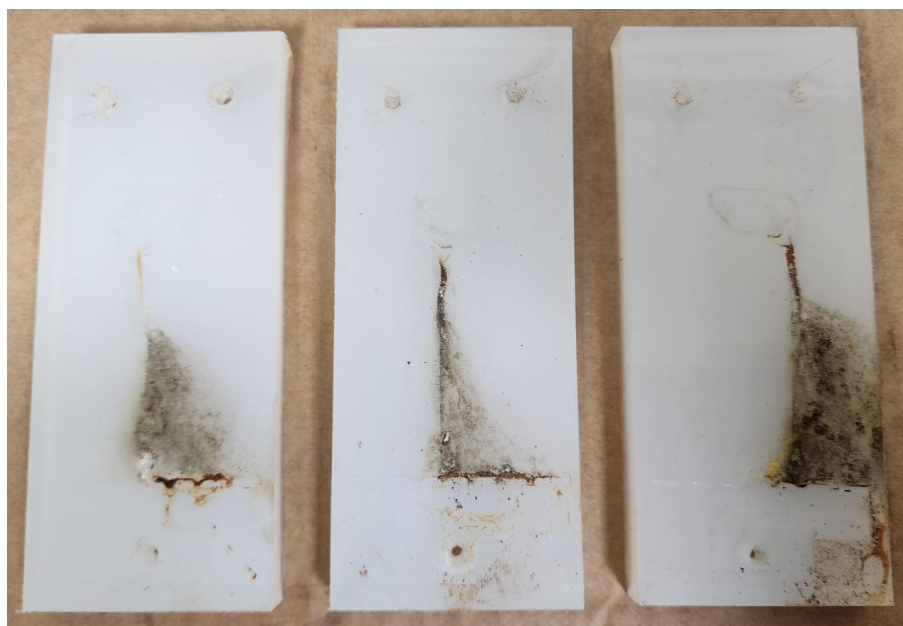


Figura 4.20: Estado de las probetas al término del ensayo de tracking y erosión post-envejecimiento UV.

4.9. Ensayo de envejecimiento UV a 3.5 kV DC-

En esta sección se presentan los resultados obtenidos durante el ensayo de tracking y erosión en probetas previamente sometidas a envejecimiento por radiación ultravioleta, bajo sollicitación de corriente continua de polaridad negativa. El objetivo principal fue determinar el efecto del envejecimiento UV en el comportamiento de las muestras.

En la tabla [4.18](#) se muestran las condiciones generales a las que se realizó el ensayo.

Parámetro	Valor registrado
Tipo de tensión aplicada (AC / DC)	DC Negativo
Valor de tensión aplicada [kV]	3.5
Resistencia limitadora utilizada [$k\Omega$]	22.3
Conductividad del líquido contaminante [S/m]	0.256
Temperatura del líquido contaminante [$^{\circ}\text{C}$]	19.5
Temperatura ambiente promedio [$^{\circ}\text{C}$]	22.1
Presión atmosférica promedio [hPa]	1013
Humedad relativa promedio [%]	47

Tabla 4.18: Datos generales del ensayo en probetas envejecidas a 3.5 kV DC Negativo

En la Tabla [4.19](#) se muestran los resultados particulares de cada probeta ensayada.

Probeta N°	Tiempo [h]		Peso [g]			Profundidad [mm]
	Iniciación	Termino	Inicial	Final	Diferencia	
1	00:51:31'	06:00:00'	55.948	55.897	0.051	0
2	01:13:25'	06:00:00'	55.709	55.675	0.034	0
3	00:08:46'	06:00:00'	51.521	51.427	0.094	0.011

Tabla 4.19: Datos por probeta con envejecimiento UV a 3.5 kV DC Negativo

Al igual que en el caso con probetas sin envejecer, la pérdida de material fue mínima en términos de masa total, aunque en esta ocasión fue posible medir la profundidad del camino de erosión en una de las probetas debido a que la degradación fue mayor en esa muestra.

En la figura [4.21](#) se observa la evolución temporal de la corriente de fuga durante las seis horas de ensayo. El gráfico muestra un aumento rápido de la corriente en los primeros minutos, seguido de un incremento progresivo hasta alcanzar valores superiores a 45 mA pico hacia el final de la prueba.

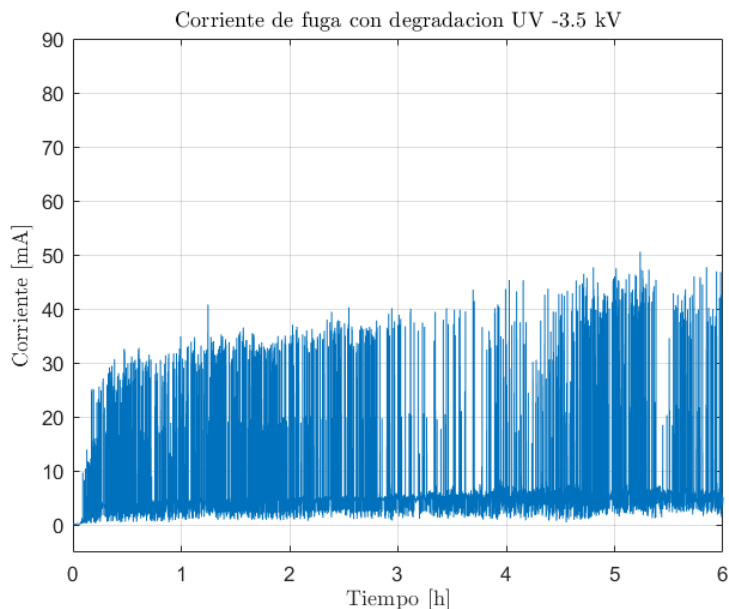


Figura 4.21: Evolución temporal de la corriente de fuga en probetas envejecidas con UV bajo sollicitación de 3.5 kV DC-.

Por último, en la figura [4.22](#) se muestra el patrón de carbonización presente en las probetas tras las seis horas de ensayo. Puede apreciarse que en dos de las muestras el camino de carbonización fue muy superficial, presentando una apariencia similar a la observada en los ensayos con tensión negativa sin envejecimiento UV. Sin embargo, la tercera probeta exhibió un patrón más agresivo, aunque con un área afectada menor en comparación con los casos de polaridad positiva.



Figura 4.22: Patrón de carbonización en las probetas después de 6 horas de ensayo con tensión DC negativa.

4.10. Resultados en probetas envejecidas UV y contaminadas

En esta sección se presentan los resultados obtenidos al someter probetas previamente envejecidas mediante radiación ultravioleta a un ensayo de tracking bajo corriente continua positiva de 3.5 kV, combinando además la aplicación de contaminantes preparados según el método descrito en las secciones anteriores, con las concentraciones correspondientes a los ambientes E5 y E2.

El propósito fue evaluar el efecto combinado del envejecimiento UV y la contaminación superficial sobre el comportamiento eléctrico de las muestras y la formación de caminos de carbonización.

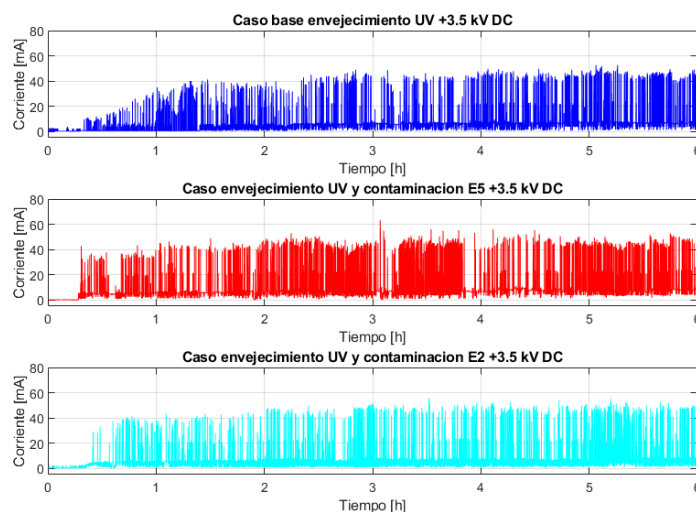


Figura 4.23: Corriente de fuga en probetas envejecidas UV y contaminadas con ambientes E5 y E2 a 3.5 kV DC+.

De manera preliminar, en la figura [4.23](#) se observa un claro efecto de la contaminación, ya que la corriente de fuga registrada es notablemente mayor en los primeros momentos en comparación con los casos sin contaminación, y presenta picos de corriente que ocurren de manera muy frecuente a lo largo del ensayo. Además, se repite el fenómeno previamente identificado en pruebas anteriores: un primer incremento brusco de la corriente asociado a los primeros arcos, seguido de un efecto de lavado o limpieza parcial de la superficie contaminada por la acción del propio líquido utilizado en la prueba, para posteriormente incrementarse progresivamente la corriente durante las seis horas de prueba.

La figura [4.24](#) presenta las imágenes de las probetas más dañadas en cada caso de ensayo. Puede observarse que la probeta correspondiente al ambiente E5 quedó visiblemente más carbonizada, con un color negro intenso en comparación con la probeta ensayada en el ambiente E2, que muestra un patrón de erosión con un tono menos oscuro.



(a) Contaminación E5
+3.5 kV DC



(b) Contaminación E2
+3.5 kV DC

Figura 4.24: Patrones de carbonización observados en los ensayos bajo corriente continua de polaridad positiva con envejecimiento UV y contaminación.

La comparación directa entre estas probetas evidencia que la severidad del daño por tracking aumenta de manera significativa cuando se combinan altos niveles de contaminación con envejecimiento UV previo, siendo más notorio este efecto en el caso del ambiente E5.

4.11. Evaluación de la Hidrofobicidad

En esta sección se presenta la categorización del nivel de hidrofobicidad de la superficie de las probetas ensayadas. Se evaluaron siete superficies diferentes:

- **superficie 1:** Silicona base, sin recubrimientos ni envejecimiento.
- **Superficie 2:** Contaminación superficial E2.
- **Superficie 3:** Contaminación superficial E3.
- **Superficie 4:** Contaminación superficial E5.
- **Superficie 5:** Envejecida con radiación UV.
- **Superficie 6:** Envejecida + contaminación E2.
- **Superficie 7:** Envejecida + contaminación E5.

La hidrofobicidad fue evaluada mediante el método de la clase de hidrofobicidad (Hydrophobicity Class, HC), según la clasificación propuesta en la especificación IEC/TS 62073. En cada caso se incluye una imagen representativa de la distribución de gotas sobre la superficie y una breve descripción justificando la categoría asignada.

4.11.1. Resultados por Probeta

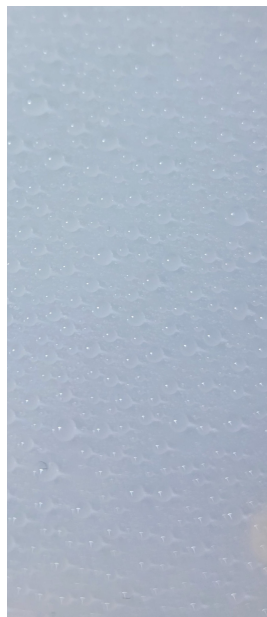


Figura 4.25: Distribución de gotas en superficie 1 (Silicona base).

En la figura [4.25](#) se observa un comportamiento marcadamente hidrofóbico, con gotas esféricas y bien definidas. Se clasifica como **HC1**.

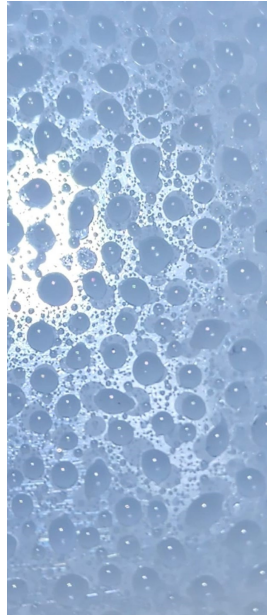


Figura 4.26: Distribución de gotas en superficie 2 (Contaminación E2).

La presencia de contaminación reduce parcialmente la tensión superficial, generando gotas deformadas levemente como se muestra en la figura [4.26](#). Clasificación: **HC2**.

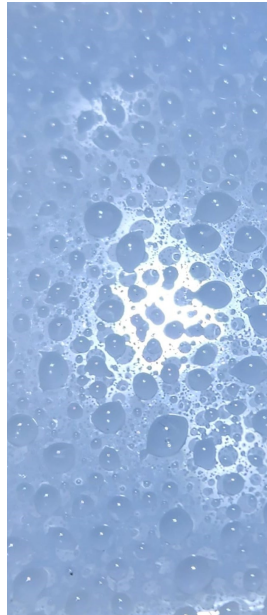


Figura 4.27: Distribución de gotas en superficie 3 (Contaminación E3).

En la figura [4.27](#) se aprecia una disminución adicional de la hidrofobicidad respecto a E2, con gotas más coalescentes. Clasificación: **HC3**.

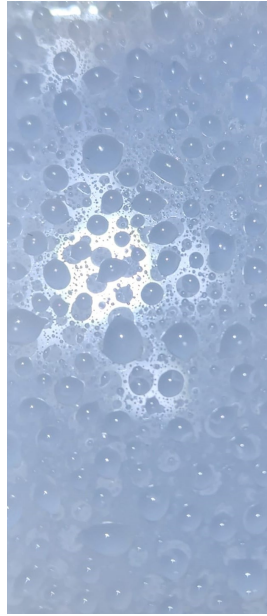


Figura 4.28: Distribución de gotas en superficie 4 (Contaminación E5).

En la figura [4.28](#) se observa una distribución con presencia de gotas pequeñas y gotas aplanadas producto del contacto con la contaminación. Clasificación: **HC3**.

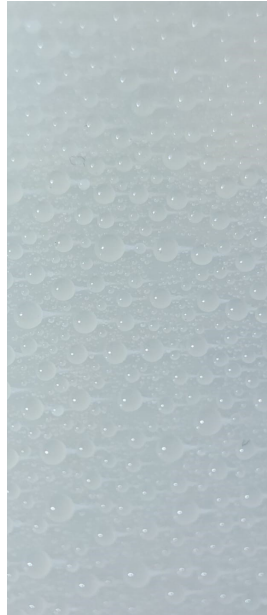


Figura 4.29: Distribución de gotas en superficie 5 (Envejecida UV).

El envejecimiento UV forma un patrón de gotas más grandes y desiguales que para el caso base, pero las gotas siguen siendo esféricas y bien definidas, tal y como se muestra en la figura [4.29](#). Clasificación: **HC1**.

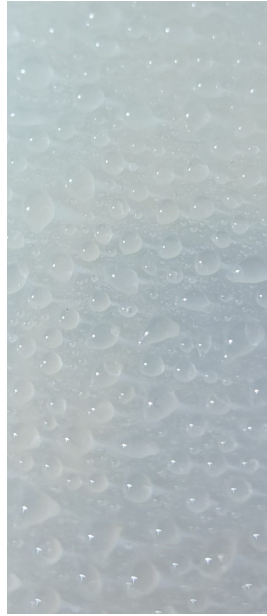


Figura 4.30: Distribución de gotas en Probeta 6 (Envejecida + E2).

La presencia de contaminación reduce parcialmente la tensión superficial, generando gotas deformadas levemente, como se muestra en la figura [4.30](#). Clasificación: **HC2**.



Figura 4.31: Distribución de gotas en Probeta 7 (Envejecida + E5).

En la figura [4.31](#) se observa una distribución con presencia de gotas pequeñas y gotas aplanadas producto del contacto con la contaminación. Clasificación: **HC3**.

4.11.2. Resumen de Resultados

Se presenta la tabla [4.20](#), que contiene un resumen de las mediciones realizadas, indicando la categoría de hidrofobicidad asignada a cada una de las superficies evaluadas.

Probeta	Descripción	Clase de Hidrofobicidad (HC)
1	Silicona base sin envejecimiento	HC1
2	Contaminación superficial E2	HC2
3	Contaminación superficial E3	HC3
4	Contaminación superficial E5	HC3
5	Envejecida UV	HC1
6	Envejecida + E2	HC3
7	Envejecida + E5	HC3

Tabla 4.20: Clasificación de hidrofobicidad de las probetas ensayadas

Se observa que, si bien el envejecimiento mediante radiación UV no produjo un cambio significativo en la clasificación de hidrofobicidad en términos de la categoría numérica (HC), se identificaron alteraciones negativas dentro de la misma clase. Estas modificaciones se manifiestan como un patrón menos uniforme y una ligera tendencia a la deformación de las gotas en comparación con la silicona base, lo que sugiere una progresiva pérdida de hidrofobicidad superficial. Este efecto puede estar asociado a la baja intensidad y duración de la exposición a la radiación UV aplicada en este estudio; sin embargo, es previsible que con una mayor severidad de envejecimiento esta característica se vea deteriorada con mayor notoriedad, comprometiendo la capacidad de recuperación hidrofóbica del material. Por otro lado, la presencia de contaminación superficial generó una disminución más evidente de la hidrofobicidad, observable tanto en la reducción de la esfericidad de las gotas como en la tendencia a la coalescencia y formación de películas parciales. Este efecto fue más pronunciado en las probetas contaminadas con el ambiente E5, confirmando que la acumulación de contaminantes es un factor determinante en la pérdida de las propiedades hidrofóbicas de la superficie.

Capítulo 5

Análisis de resultados

En este capítulo se presentan y discuten en detalle los resultados obtenidos en los diferentes ensayos realizados sobre las probetas de silicona, sometidas a solicitaciones en corriente continua positiva y negativa, en combinación con procesos de envejecimiento superficial y distintos niveles de contaminación normalizada. El objetivo principal es examinar de forma comparativa el comportamiento frente a fenómenos de tracking y erosión, identificando tendencias y correlaciones que permitan comprender en mayor profundidad el desempeño del material bajo condiciones que simulan entornos operacionales exigentes.

La estructura del análisis se organiza en cinco ejes temáticos relevantes:

1. La comparación de la respuesta de las probetas frente a las dos polaridades de tensión continua.
2. La evaluación del efecto de la contaminación superficial sobre los valores de corriente y la propagación de caminos de carbonización, considerando tanto el nivel de conductividad de los depósitos como su interacción con la hidrofobicidad del material.
3. El estudio del impacto del envejecimiento acelerado mediante exposición a radiación ultravioleta, identificando variaciones en las corrientes de fuga y en las características visibles del material.
4. El análisis del efecto combinado de envejecimiento UV y contaminación superficial, que permite aproximarse a escenarios operativos donde confluyen factores ambientales de manera simultánea.

En conjunto, este análisis busca entregar una visión general del desempeño de las probetas ensayadas, estableciendo relaciones entre los distintos factores estudiados y generando antecedentes que puedan servir como base para futuros trabajos y aplicaciones en el campo de los sistemas de aislamiento en alta tensión.

5.1. Comparación del efecto de la polaridad

La figura 5.1 superpone las corrientes de fuga registradas bajo 3.5kV DC en polaridad positiva y negativa. Se aprecia que la polaridad positiva contiene peaks de corriente más altos y una fluctuación globalmente mayor a lo largo de todo el ensayo.

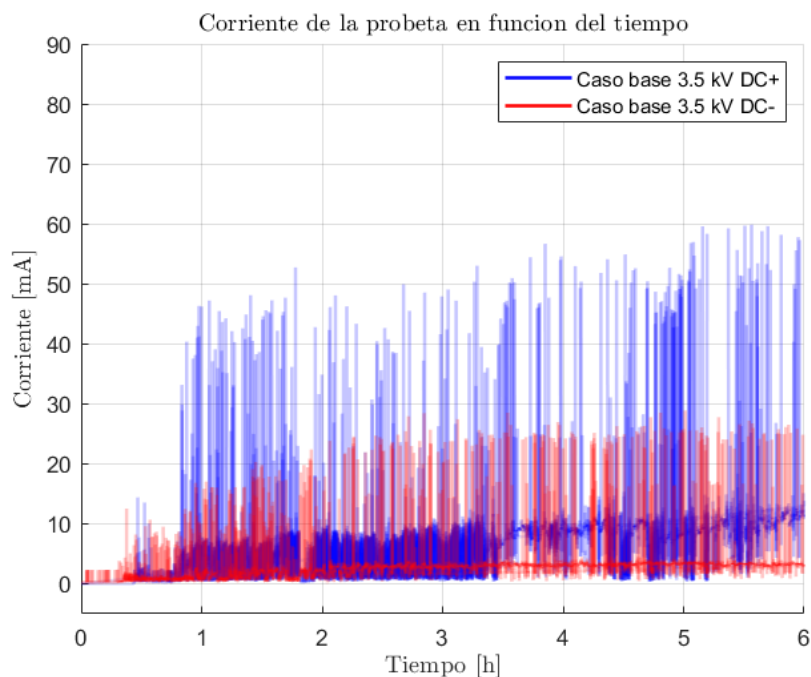


Figura 5.1: Corrientes de fuga para polaridad positiva y negativa a 3,5 kV DC.

Indicador	Positiva	Negativa
Corriente máxima [mA]	59.86	28.87
↑ vs. Neg	+107 %	—
Corriente promedio [mA]	5.76	2.69
↑ vs. Neg	+114 %	—
Número de <i>peaks</i>	3818	3565
↑ vs. Neg	+7.1 %	—
Pérdida de masa [g]	0.060	0.040
↑ vs. Neg	+50 %	—

Tabla 5.1: Indicadores de comparación entre polaridades.

Discusión de resultados

- Intensidad de los arcos.** El peak máximo en polaridad positiva supera en 107 % al registrado en polaridad negativa, mientras que la corriente promedio es 114 % más alta. Esto indica una mayor intensidad y duración de los arcos de banda seca cuando la tensión es positiva.

- **Frecuencia de descargas.** El número de peaks aumenta 7 % en polaridad positiva, reflejando una actividad de descarga ligeramente más frecuente que contribuye a la degradación acumulativa.
- **Daño material.** La pérdida de masa en la probeta sometida a polaridad positiva es 0.060 g, un 50 % superior a la registrada en polaridad negativa (0.040 g), corroborando que la erosión es más severa bajo polaridad positiva.
- **Trayectoria de carbonización.** La inspección visual muestra un trazo largo y ramificado en polaridad positiva, frente a un camino recto y menos extenso en polaridad negativa, lo que confirma la mayor agresividad del tracking positivo.

En síntesis, aunque la iniciación del centelleo ocurre ligeramente más temprano en polaridad negativa, la combinación de mayor corriente, mayor frecuencia de arcos y mayor pérdida de masa evidencia que la polaridad positiva impone una condición considerablemente más severa para la silicona, acelerando la formación de trayectorias carbonizadas y la degradación del aislamiento.

5.2. Influencia de la contaminación superficial

5.2.1. Influencia de la contaminación superficial en polaridad positiva

En esta sección se analizan los ensayos de 3.5kV en corriente continua positiva realizados sobre probetas de silicona con distintos niveles de contaminación superficial.¹ La figura 5.2 superpone las corrientes de fuga registradas durante los primeros minutos de prueba ($t=0.4-0.75$ h), etapa en la que la película contaminante todavía no ha sido arrastrada por el goteo del electrolito (efecto lavado). Se observa que la corriente inicial crece de manera de la mano con el grado de contaminación superficial, lo que se traduce en una iniciación del tracking más intensa cuanto mayor es la concentración salina.

Indicador	Base	E2	E3	E5
Corriente máxima (0.4–0.75 h) [mA]	14.39	28.79	35.64	49.45
↑ vs. Base	–	+100 %	+148 %	+244 %
Corriente máxima (total) [mA]	59.86	63.20	74.49	73.68
↑ vs. Base	–	+5.6 %	+24.4 %	+23.1 %
Corriente promedio [mA]	5.76	5.93	6.03	6.31
↑ vs. Base	–	+2.9 %	+4.7 %	+9.6 %
Número de <i>peaks</i>	3818	4329	4039	4482
↑ vs. Base	–	+13.4 %	+5.8 %	+17.4 %
Categoría HC	HC1	HC2	HC3	HC3

Tabla 5.2: Indicadores eléctricos y categoría HC para los distintos niveles de contaminación (3.5kV DC⁺).

¹El caso base corresponde a la probeta limpia, sin contaminación añadida.

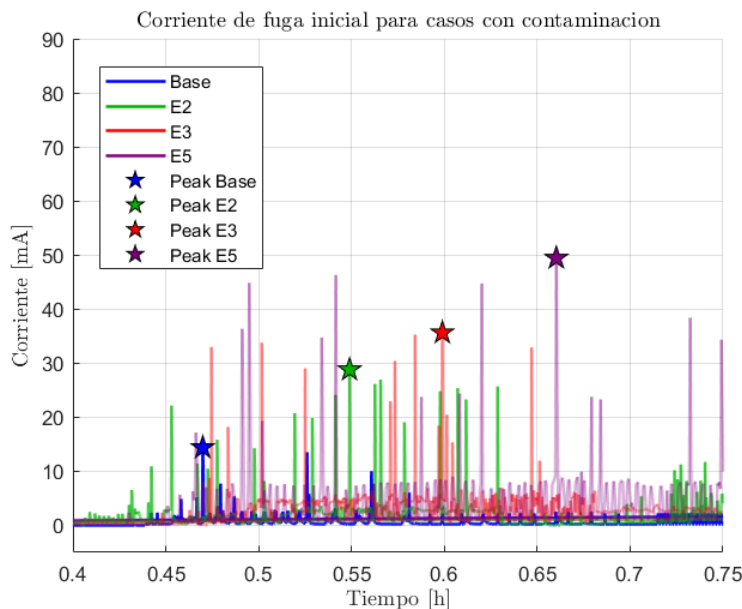


Figura 5.2: Corriente de fuga inicial (0.4–0.75 h) para cada nivel de contaminación. Se marcan los peaks máximos de corriente detectados en el intervalo, 3.5 kV DC+.

Los resultados integrados del ensayo completo (0 h–6 h) se resumen en la tabla [5.2](#). Además de las magnitudes eléctricas, se incluye la categoría HC.

Discusión de resultados

- Etapa inicial (0.4–0.75 h).** El crecimiento de la corriente de fuga es claramente dependiente del nivel de contaminación: el peak de E2 duplica al del caso base, En E3 es 2.48 veces mayor y En E5 multiplica por 3,44 el peak registrado en la probeta limpia. Esta fase de pre-lavado condiciona la severidad posterior del fenómeno de tracking.
- Efecto de lavado.** Tras los primeros minutos el goteo del electrolito reduce parcialmente la conductividad superficial; sin embargo, la activación inicial favorece trayectorias de carbonización más largas y ramificadas cuanto mayor es la contaminación.
- Severidad global.** Comparando con la probeta base, la corriente máxima total aumenta hasta un 24 % (caso E3). El número de peaks asociados a arcos de banda seca crece entre 6 % y 17 %. Estos arcos son más intensos en las probetas con mayor contaminación, acelerando la degradación del material.
- Hidrofobicidad residual.** La categoría HC evoluciona de HC1 (superficie hidrófoba) a HC3 (superficie más hidrófila) cuando la contaminación alcanza los niveles E3 y E5, indicando la pérdida progresiva de capacidad de auto-repeler la humedad a medida que aumenta la contaminación.

En conjunto, los indicadores eléctricos y la clasificación HC confirman que un aumento de la contaminación superficial disminuye la resistencia al tracking, intensifica los arcos de banda seca y potencia la formación de caminos de carbonización más agresivos y extensos.

5.2.2. Influencia de la contaminación superficial en polaridad negativa

Se analizan los ensayos a 3.5kV en DC negativa sobre probetas de silicón.² La figura 5.3 superpone las corrientes de fuga registradas durante los primeros minutos de prueba ($t=0.1-0.75$ h). En este intervalo, la película contaminante aún no es arrastrada por el electrolito (efecto lavado), por lo que la corriente refleja exclusivamente la influencia de la contaminación superficial.

Indicador	Base	E5
Corriente máxima (0.4–0.75 h) [mA]	12.53	38.80
↑ vs. Base	–	+210 %
Corriente máxima (total) [mA]	28.87	38.80
↑ vs. Base	–	+34 %
Corriente promedio [mA]	2.69	2.32
↓ vs. Base	–	–14 %
Número de <i>peaks</i>	3565	3221
↓ vs. Base	–	–10 %
Categoría HC	HC1	HC3

Tabla 5.3: Indicadores eléctricos y categoría HC para la condición limpia (Base) y la contaminación E5 bajo -3.5 kV DC.

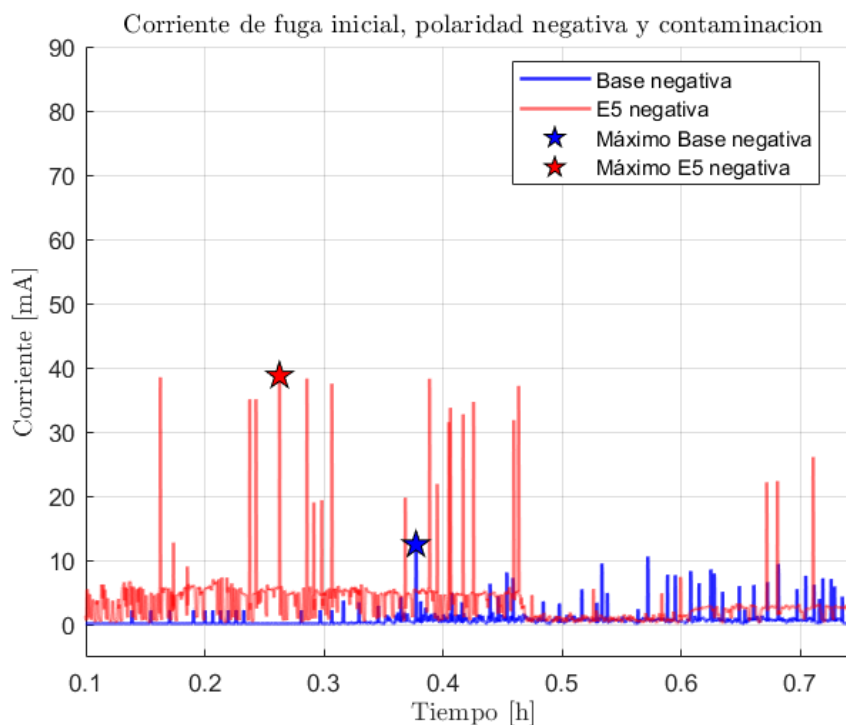


Figura 5.3: Corriente de fuga inicial para la probeta Base y la contaminada E5 en polaridad negativa.

²El caso *Base* corresponde a la probeta limpia, sin contaminación añadida.

Discusión de resultados

- **Etapas inicial (0.1–0.75 h).** La contaminación E5 multiplica por 3.1 el pico de corriente registrado en la probeta limpia (+210 %) (tabla 5.3). Esta iniciación agresiva sugiere que el material entra rápidamente en régimen de tracking.
- **Efecto de lavado posterior.** Transcurridos los primeros minutos, el goteo del electrolito reduce la conductividad superficial: la corriente promedio global es 14 % menor que en el caso Base, e incluso los peaks totales descienden 10 %. No existe aún explicación concluyente, pero se observó que la presencia de contaminación superficial en polaridad negativa dificultó la formación de caminos de carbonización.
- **Severidad global y clasificación HC.** Aunque la corriente promedio disminuye, el incremento del máximo total (+34 %) Por tanto, la contaminación sigue siendo un factor de severidad, especialmente en la fase inicial de servicio.
- **Severidad global y clasificación HC.** A pesar de la reducción en la corriente promedio, la corriente máxima total aumenta un 34 % en presencia de contaminación E5, lo que indica que el sistema aún experimenta eventos de alta severidad. Este comportamiento, junto con el cambio de categoría desde HC1 (hidrofóbica) a HC3 (más hidrofílica), refleja una pérdida significativa en la capacidad del material para repeler humedad. Por tanto, la contaminación superficial sigue representando una condición operativa con implicancias relevantes para la degradación del aislamiento, no solo por su efecto inicial, sino también por su impacto acumulativo en la degradación del material aislante.

En conjunto, los resultados muestran que la contaminación superficial intensifica la corriente de fuga y el riesgo de tracking en los primeros minutos de operación bajo polaridad negativa, aun cuando el efecto lavado posterior reduzca la actividad global. Entender esta dinámica resulta clave para predecir la vida útil de aisladores poliméricos en sistemas HVDC y diseñar estrategias de inspección que se centren en la fase inicial.

5.3. Influencia del envejecimiento UV

5.3.1. Equivalencia entre el envejecimiento acelerado y la exposición natural

Antes de analizar los resultados de las probetas sometidas a radiación ultravioleta (UV), es necesario ponderar qué tan representativos son los 5 kWh/m² aplicados en el laboratorio. Debido a problemas logísticos, las muestras sólo alcanzaron dicho umbral tras un mes de irradiación artificial; a continuación se estima cuántos días de exposición real serían necesarios para acumular la misma dosis en el tramo más severo de la futura línea HVDC Kimal–Lo Aguirre.

Dato de partida. De acuerdo con la plataforma del Ministerio de Energía solar.minenergia.cl, la irradiancia normal directa en Calama³ alcanza en promedio 1096.90W/m² a las 12:00 h del mes

³Coordenadas aproximadas: 22,45° S, 68,93° W; altitud ~2260 m s.n.m.

de noviembre el cual es el mes de mayor irradiancia (figura 5.4). Diversos estudios sitúan el contenido espectral UV de la radiación global entre el 3 % y el 7 %; se adopta el valor conservador del 7 % para un escenario extremo.

$$I_{UV, \text{m}á\text{x}} = 0.07 \times 1096.90 = 76.78 W/m^2 \tag{5.1}$$

Irradiación UV diaria. Los registros horarios de Calama muestran un perfil casi simétrico alrededor del mediodía con más de diez horas de cielo despejado. Integrando el contenido UV⁴ se obtiene:

$$\begin{aligned} E_{UV, \text{día}} &\approx 6 \text{ h} \times 0.9 \times 76.78 + 4 \text{ h} \times 0.4 \times 76.78 \\ &\approx 0.54 kWh/m^2/día \end{aligned} \tag{5.2}$$

Días equivalentes. La dosis acelerada aplicada a las probetas fue ($E_{lab} = 5 kWh/m^2/día$). Por consiguiente, el número de días despejados en Calama necesarios para acumular dicha energía UV es:

$$N_{\text{días}} = \frac{E_{lab}}{E_{UV, \text{día}}} \approx \frac{5}{0.54} \approx 9.26 \text{ días} \tag{5.3}$$

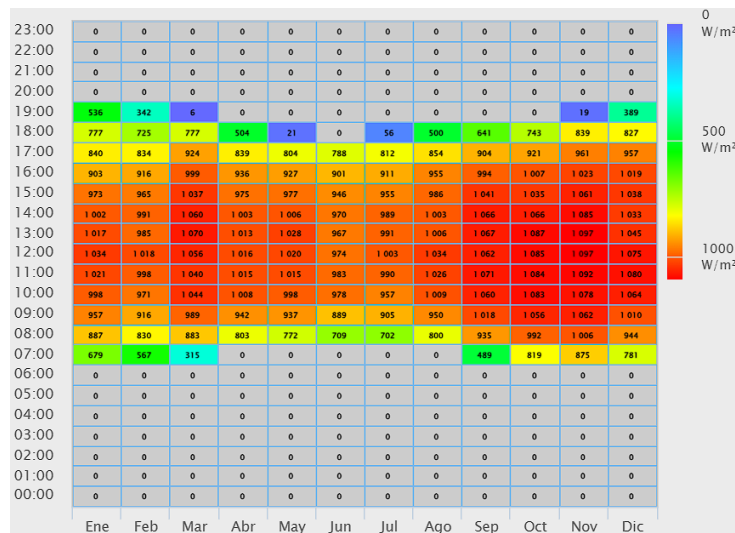


Figura 5.4: Irradiancia normal directa promedio por hora y mes en Calama (fuente: solar.minenergia.cl).

Los cálculos anteriores avalan el uso de $5 kWh/m^2$ como dosis acelerada: equivale a poco más de diez días de exposición en el entorno más agresivo del trazado, capturando los efectos clave de la degradación UV sin sobre-estimar la severidad real que experimentarán los aisladores durante su vida útil.

⁴Se aproxima un tramo de 6 horas (10:00–15:00 h) con irradiancia por encima del 90 % de $I_{UV, \text{m}á\text{x}}$ y cuatro horas con el 40 % de dicho valor (figura 5.5).

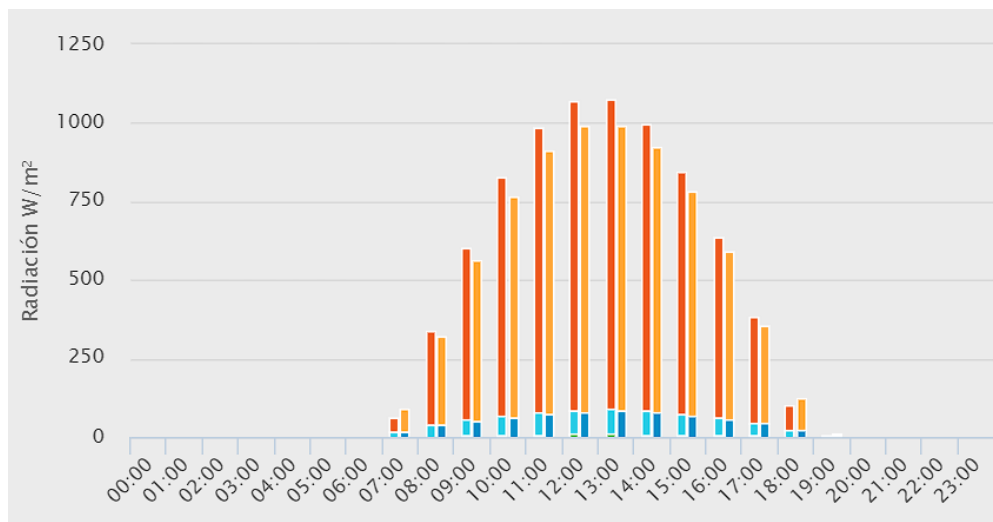


Figura 5.5: Ciclo diario promedio de la irradiancia en Calama (radiación global en naranja, componente difusa en azul).

5.3.2. Influencia del envejecimiento UV en polaridad positiva

Para observar si el envejecimiento por radiación ultravioleta (UV) puede modificar la capacidad para resistir el tracking y la erosión, en esta sección se compara el desempeño eléctrico de la probeta base (sin envejecimiento) con el de la probeta sometida a $5\text{kWh}/\text{m}^2$ de UV bajo sollicitación de 3.5 kV DC^+ . La figura 5.6 muestra la evolución de la corriente de fuga durante las seis horas de ensayo y la tabla 5.4 resume los indicadores cuantitativos correspondientes.

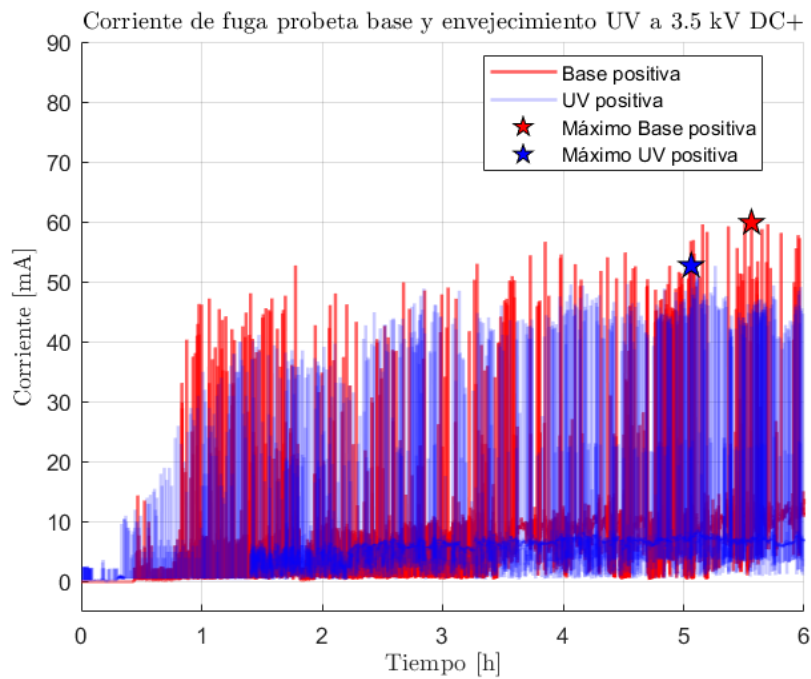


Figura 5.6: Corriente de fuga de la probeta base y la envejecida UV a 3.5kV DC^+ .

Indicador	Base	UV
Corriente máxima (total) [mA] ↓ vs. Base	59.86 –	52.69 –11.9 %
Corriente promedio [mA] ↓ vs. Base	5.76 –	5.34 –7.3 %
Número de <i>peaks</i> ↑ vs. Base	3818 –	4129 +8.1 %
Categoría HC	HC1	HC1
Pérdida de masa [g] ↑ vs. Base	0.060 –	0.089 +48.3 %
Profundidad máx. de erosión [mm]	–	0.069

Tabla 5.4: Indicadores de las pruebas bajo 3.5 kV DC⁺.

Discusión de resultados

- **Etapa inicial (0–0.75 h).** La corriente de fuga de la probeta UV es visiblemente mayor que la de la probeta base, se cree que refleja la pérdida de hidrofobicidad superficial causada por la radiación. Esta diferencia inicial facilitaría la formación temprana de caminos conductores y la activación del tracking.
- **Evolución durante el ensayo completo.** Aunque la corriente máxima total de la probeta UV es 12 % inferior a la de la probeta base, el número de peaks aumenta 8 %, lo que indica una mayor frecuencia de arcos de banda seca, los cuales son los responsables de la degradación del material.
- **Pérdida de masa y erosión.** El envejecimiento UV incrementa la pérdida de masa en un 48 % (0.089 g vs. 0.060 g) y permite medir la única profundidad de erosión detectada en los ensayos (0.069). Esto confirma que la degradación superficial promovida por la radiación se traduce en una mayor remoción de material y en la aparición de cavidades durante el ensayo.
- **Severidad global.** La menor corriente promedio (–7 %) sugiere que, una vez estabilizado el proceso, la conductividad global es ligeramente menor; sin embargo, la mayor cantidad de peaks y la masa removida evidencian que el tracking es más agresivo y localizado en la probeta envejecida. Así, el envejecimiento UV actúa como un factor que acelera la degradación puntual del aislante, aun cuando la demanda de corriente sea similar en promedio.

En síntesis, el envejecimiento UV modifica el comportamiento del material de silicona bajo polaridad positiva: acelera la iniciación del tracking, incrementa la frecuencia de descargas superficiales y potencia la remoción de masa, factores que pueden comprometer la vida útil del aislamiento en servicio HVDC.

5.3.3. Influencia del envejecimiento UV en polaridad negativa

Para evaluar el efecto del envejecimiento UV bajo sollicitación de 3.5kV DC[–], se comparó la probeta base con la misma silicona expuesta a 5 kWh/m² de radiación UV. La figura 5.7 muestra la evolución temporal de la corriente de fuga y la tabla 5.5 resume los indicadores cuantitativos.

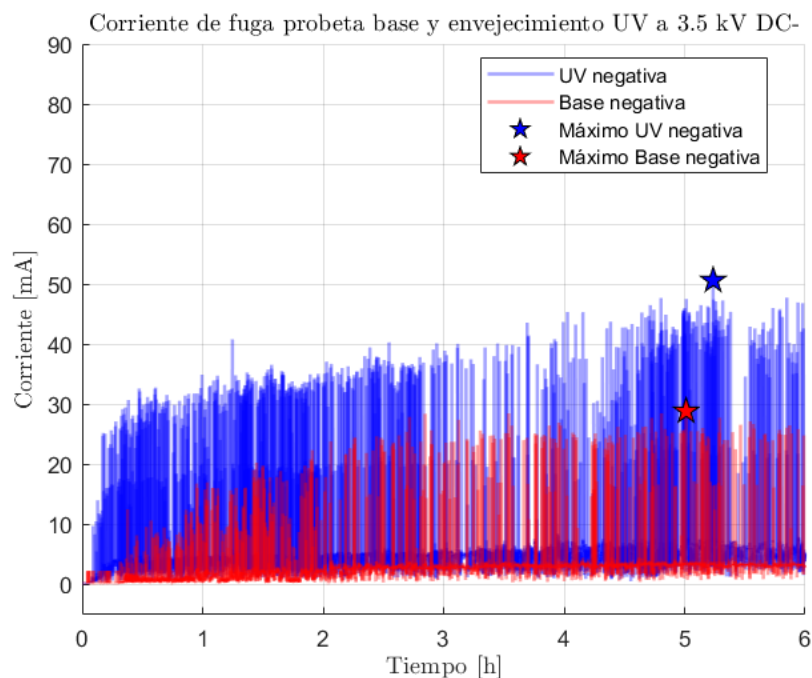


Figura 5.7: Corriente de fuga de la probeta base y la envejecida UV a 3.5 kV DC⁻.

Indicador	Base	UV
Corriente máxima (total) [mA] ↑ vs. Base	28.87 -	50.63 +75 %
Corriente promedio [mA] ↑ vs. Base	2.69 -	5.94 +121 %
Número de <i>peaks</i> ↑ vs. Base	3565 -	4424 +24 %
Categoría HC	HC1	HC1
Pérdida de masa [g] ↑ vs. Base	0.040 -	0.094 +135 %
Profundidad máx. de erosión [mm]	-	0.011

Tabla 5.5: Indicadores de las pruebas bajo 3.5kV DC⁻.

Análisis de resultados

- **Aumento general de la severidad.** El envejecimiento UV eleva la corriente máxima total en 75% y presenta más del doble de la corriente promedio (+121%). Esto indica una conductividad superficial significativamente mayor durante todo el ensayo.
- **Mayor actividad de arcos de banda seca.** El número de peaks crece 24%, señalando una mayor frecuencia de descargas locales que aceleran la creación de rutas carbonizadas.
- **Daño material acentuado.** La pérdida de masa es más del doble que el caso base en polaridad negativa (+135%) y se detecta una profundidad de erosión de 0,011 mm sólo en la probeta UV, evidencia clara de un tracking más agresivo.

- **Hidrofobicidad aparente estable.** La categoría HC permanece en HC1 para ambos casos, sin embargo, la mayor corriente y el daño físico sugieren que la degradación inducida por UV afecta principalmente la resistencia eléctrica más que la apariencia hidrofóbica inicial.

Aunque, en términos generales, la polaridad negativa suele mostrar corrientes de fuga más bajas y por ello no ha sido el foco principal de este estudio, los resultados aquí presentados revelan efectos de degradación relevantes. Por lo tanto, este caso merece un análisis posterior más detallado a fin de comprender plenamente los mecanismos de tracking bajo polaridad negativa tras envejecimiento UV.

En conjunto, el envejecimiento UV bajo polaridad negativa intensifica el tracking al incrementar de forma sostenida la corriente de fuga y la actividad de arcos de banda seca, resultando en una pérdida de material y una erosión a considerar. Estos hallazgos refuerzan la necesidad de considerar la degradación por UV como un factor clave en la vida útil de los aisladores poliméricos operados en sistemas HVDC.

5.3.4. Envejecimiento UV combinado con contaminación superficial

La figura 5.8 superpone la corriente de fuga registrada en los primeros segundos de ensayo ($t = 0.25-0.65$ h) para tres condiciones:

- **UV:** probeta envejecida por radiación UV, sin contaminación adicional.
- **UV+E2:** Probeta envejecida UV, con contaminación E2.
- **UV+E5:** Probeta envejecida UV, con contaminación E5.

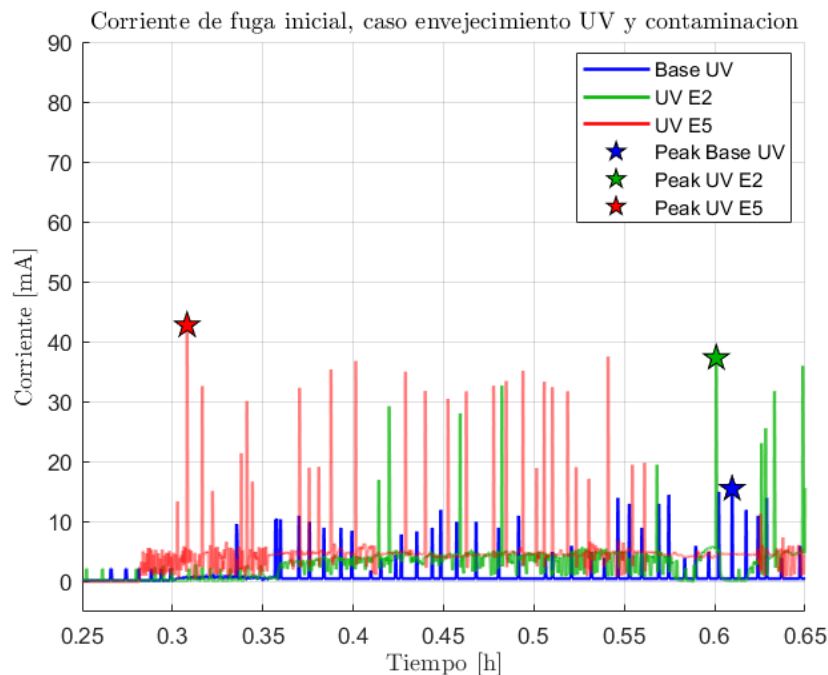


Figura 5.8: Corriente de fuga inicial para la probeta envejecida UV y casos contaminados (E2 y E5) bajo 3.5kV DC⁺.

Indicador	UV	UV+E2	UV+E5
Corriente máx. (0.4–0.75 h) [mA] ↑ vs. UV	15.5 –	37.31 +141 %	42.77 +176 %
Corriente máx. (total) [mA] ↑ vs. UV	52.69 –	55.69 +5.7 %	63.24 +10.5 %
Corriente promedio [mA] ↑ vs. UV	5.34 –	6.27 +17.4 %	7.67 +43.6 %
Número de peaks ↑ vs. UV	4129 –	4673 +13.2 %	5455 +32.1 %
Categoría HC	HC1	HC2	HC3
Pérdida de masa [g] ↑ vs. UV	0.089 –	0.105 +18 %	0.107 +20 %
Profundidad máx. de erosión [mm] ↑ vs. UV	0.069 –	0.087 +26 %	0.098 +42 %

Tabla 5.6: Resultados ensayos de probetas con envejecimiento UV y contaminación a 3.5 DC⁺.

Discusión de resultados

- **Iniciación del tracking.** La contaminación superficial incrementa la corriente máxima inicial en más de 140 % (E2) y 175 % (E5) respecto a la probeta sólo envejecida UV, evidenciando un arranque de tracking mucho más severo.
- **Severidad eléctrica global.** El valor máximo total se eleva hasta un 10.5 % (E5) y la corriente promedio crece 44 %, confirmando que la presencia combinada de UV y sal incrementa la conductividad superficial a lo largo de todo el ensayo.
- **Actividad de arcos de banda seca.** El número de peaks aumenta 32 % en UV+E5, lo que sugiere una mayor frecuencia de descargas localizadas y un tracking más dinámico.
- **Erosión.** La pérdida de masa sube casi 20 % con E5, y la profundidad de erosión alcanza 0.098 (+42 % respecto a UV).
- **Evolución de la hidrofobicidad.** La HC inicial pasa de HC1 a HC3 cuando se añade contaminación E5, reduciendo la capacidad de la superficie para repeler humedad y favoreciendo la formación de películas conductoras.

En conjunto, la combinación de envejecimiento UV y contaminación superficial potencia significativamente la severidad del tracking en corriente continua positiva. El aumento de corriente, de descargas y del daño físico indica que el material sufre una degradación acelerada cuando ambas condiciones convergen, lo que subraya la importancia de incluir tratamientos anti-UV y estrategias de mantenimiento para aisladores en entornos costeros o desérticos con alta radiación solar.

Capítulo 6

Conclusiones y Recomendaciones

La presente investigación demuestra que la resistencia al tracking de los materiales de silicona sometidos a tensión continua está fuertemente condicionada por la polaridad, el grado de contaminación superficial y el envejecimiento por radiación ultravioleta. En particular, los ensayos con polaridad positiva fueron claramente más severos que aquellos con polaridad negativa: se registraron corrientes máximas hasta un 107 % mayores, corrientes promedio un 114 % superiores y pérdidas de masa que aumentaron alrededor de un 50 %. Estos resultados confirman la necesidad de prestar especial atención a la operación de aisladores en la línea bipolar HVDC, en especial la línea de polaridad positiva.

La contaminación superficial incrementó la agresividad del fenómeno principalmente durante los primeros minutos de servicio, etapa en la cual los picos de corriente aumentaron antes de que el propio goteo de la solución produjese un efecto de “auto-lavado”. El nivel E5 —representativo de ambientes de alta contaminación y concentración de sal— elevó la corriente inicial hasta en un 244 % respecto del caso base limpio, provocando trayectorias de carbonización más anchas y pérdidas de masa significativamente mayores. Se observó, además, que basta con perder la hidrofobicidad en un porcentaje relativamente pequeño de la superficie activa para que el daño aumente, lo que rebela la importancia de preservar la hidrofobicidad inherente a la silicona.

El envejecimiento acelerado mediante una dosis de 5 kWh/m^2 de radiación UV, equivalente a unos nueve días de exposición natural en la zona más severa del norte de Chile, produjo un deterioro adicional tanto en la profundidad de erosión como en la pérdida de masa, aun cuando la clasificación de hidrofobicidad se mantuvo dentro de la misma categoría. Bajo polaridad positiva, la combinación de envejecimiento UV y contaminación severa incrementó los picos de corriente iniciales hasta en un 176 %, pese a que la corriente de fuga promedio fue menor en el caso base y además profundizó la erosión superficial en más de un 40 % con respecto al caso sometido sólo a radiación UV. Si bien la polaridad negativa no fue el foco principal, se detectaron picos máximos un 75 % más altos después del envejecimiento UV, lo que hace imprescindible analizar con mayor detalle este régimen en estudios futuros.

Para sintetizar estas comparaciones, en la figura [6.1](#) se presenta un gráfico de corriente de fuga promedio en función del nivel de contaminación, comparando casos base (sin UV) y con degradación UV.

Como se mencionó anteriormente en esta memoria no profundizó en la caracterización del tracking en DC - para los casos base y contaminados sin envejecimiento, pues en el rango ensayado las diferencias fueron acotadas; en cambio, tras el envejecimiento UV se observó un aumento relevante que

no pudo estudiarse con mayor detalle por la disponibilidad limitada de probetas envejecidas. Los vacíos en la figura (puntos/barras ausentes) reflejan condiciones no medidas bajo estas restricciones y no implican valores nulos.

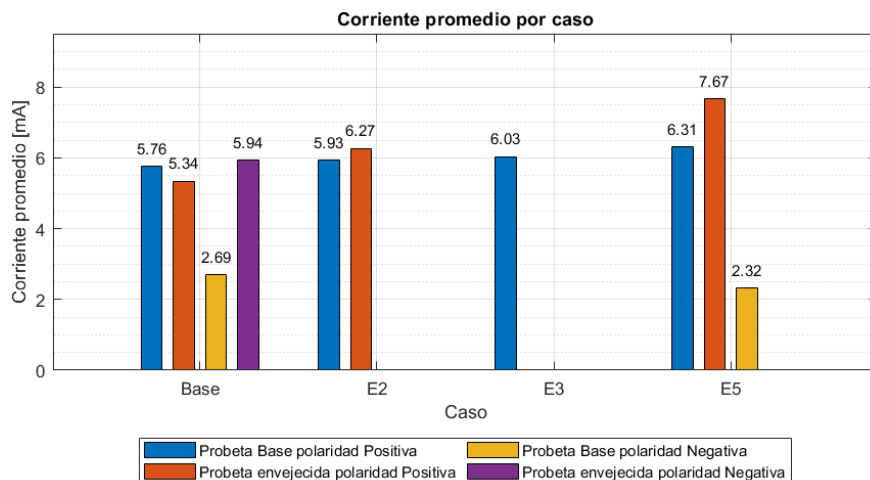


Figura 6.1: Corriente de fuga en función del nivel de contaminación. Se muestra la métrica de *corriente promedio* para los casos base (sin UV) y envejecidos (con UV).

Los resultados también revelaron un deterioro apreciable en los electrodos superiores, especialmente bajo polaridad positiva, lo que podría desencadenar puntos calientes metálicos y agravar la distribución del campo eléctrico en servicio. Esta observación pone de relieve la necesidad de considerar el desgaste de los terminales metálicos como parte integral de cualquier plan de mantenimiento predictivo.

Existen, sin embargo, limitaciones que deben abordarse. La dosis UV empleada cubre sólo una fracción del envejecimiento real esperado a lo largo de la vida útil del aislador; procesos foto-oxidativos profundos requerirán exposiciones mayores a 40 kWh/m^2 . Asimismo, la composición del contaminante se simplificó a una mezcla NaCl-caolín; en condiciones reales intervienen sulfatos y nitratos, provenientes de caca de pájaro y otras contaminaciones que modifican la conductividad y la rugosidad de la superficie.

6.1. Recomendaciones de mantenimiento

Los resultados experimentales mostraron que la severidad del tracking en aisladores poliméricos está gobernada, por un conjunto de factores, como lo son la polaridad, la contaminación salina y el envejecimiento UV. En consecuencia, el plan de mantenimiento de las futuras líneas HVDC debe partir de una gestión diferenciada del riesgo según la exposición real de cada tramo.

En los sectores clasificados como E5, donde se combinan depósitos salinos superiores a 0.1 mg/cm^2 y niveles de irradiancia UV diarios mayores a 900 W/m^2 , se recomienda efectuar inspecciones visuales y limpiezas con agua desmineralizada de forma continua, para evitar focos de pérdida de energía y peligros para el sistema de transmisión, esto basado en los resultados obtenidos sobre el aumento en la corriente promedio para el caso E5 y contaminación UV.

La experiencia de laboratorio reveló que la pérdida de propiedades hidrofóbicas precede a la erosión mecánica visible. Por ello se aconseja incorporar ensayos rápidos de clasificación HC (surface water classification) durante las visitas de terreno. Una transición de HC1 a HC3 constituye señal de alerta y se debe anotar como posible riesgo. El deterioro observado en los electrodos superiores bajo polaridad positiva –pérdida de material y porosidad– obliga a prever un inventario de repuestos y a programar inspecciones mediante cámara de alta definición. De detectarse corrosión por arco o puntas calientes, se debe sustituir el electrodo a la brevedad para evitar la intensificación local del campo eléctrico.

6.2. Trabajos futuros

En función de las conclusiones alcanzadas, se proponen las siguientes líneas de investigación para los próximos memoristas del departamento y los grupos que continuarán profundizando en la problemática del tracking en tensión continua:

- **Profundizar en el envejecimiento bajo polaridad negativa.** Ampliar los ensayos UV hasta dosis ≥ 40 kWh/m² e incorporar ciclos térmicos y humedad, con el fin de identificar umbrales de corriente de fuga y mecanismos de carbonización específicos de DC–.
- **Analizar la influencia del diseño geométrico.** Investigar cómo la distancia de fuga, la presencia de defectos y el ángulo de falda alteran la distribución de campo eléctrico y el inicio del tracking en DC. Modelar y validar mediante maquetas 3D impresas.
- **Caracterizar la degradación de electrodos y herrajes.** Estudiar la corrosión por arco y la interacción acero bajo descargas repetitivas, determinando tasas de pérdida de masa y su impacto en la vida útil del conjunto.
- **Programar ensayos multifactoriales acelerados.** Combinar niebla salina, polvo desértico, radiación UV y tensión DC para reproducir el ambiente Norte Grande.
- **Implementar instrumentación IoT en la línea Kimal–Lo Aguirre.** Instalar sensores de corriente de fuga, temperatura y humedad en aisladores piloto y validar en campo las correlaciones descubiertas en laboratorio.
- **Investigar la superposición de impulsos atmosféricos sobre tensión DC.** Determinar si los frentes de onda tipo rayo propician la formación de carbonización y la formación de arcos de banda seca en aisladores contaminados.

Bibliografía

- [1] “Plan de descarbonización: Borrador para consulta pública,” informe, Ministerio de Energía de Chile, Santiago, Chile, 2024.
- [2] “Electrical insulating materials used under severe ambient conditions — test methods for evaluating resistance to tracking and erosion,” Standard BS EN IEC 60587:2022, British Standards Institution (BSI), 2022.
- [3] “Feasibility study for a dc tracking erosion test,” working group report (wg d1.27), CIGRÉ, Paris, France, 2015.
- [4] E. A. Cherney *et al.*, “Dc inclined-plane tracking and erosion test of insulating materials,” in *Proc. IEEE Conf. on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, 2015.
- [5] G. P. Bruce, S. M. Rowland, and A. Krivda, “Performance of silicone rubber in dc inclined plane tracking tests,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 17, no. 2, pp. 521–532, 2010.
- [6] M. Ridhwan, L. S. Lumba, and Suwarno, “Effects of uv radiation and contaminant on the properties of polymeric insulator,” in *2021 3rd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS)*, pp. 85–90, IEEE, 2021.
- [7] R. A. Ghunem, “Using the inclined-plane test to evaluate the resistance of outdoor polymer insulating materials to electrical tracking and erosion,” *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 31, no. 5, pp. 16–22, 2021.
- [8] “Ieee guide for dc inclined-plane tracking and erosion test for outdoor insulation applications,” Standard IEEE Std 2652-2021, IEEE, New York, NY, USA, 2021.
- [9] “Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions — part 1: Definitions, information and general principles,” Standard IEC 60815-1, International Electrotechnical Commission (IEC), Geneva, Switzerland, 2008. Edition 1.0.
- [10] “Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions — part 2: Ceramic and glass insulators for ac systems,” Standard IEC 60815-2, International Electrotechnical Commission (IEC), Geneva, Switzerland, 2008. Edition 1.0.
- [11] “Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions — part 3: Polymer insulators for ac systems,” Standard IEC 60815-3, International Electrotechnical Commission (IEC), Geneva, Switzerland, 2008. Edition 1.0.

- [12] “Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on ac systems,” Standard IEC 60507, International Electrotechnical Commission (IEC), Geneva, Switzerland, 2013. Edition 3.0.
- [13] “Artificial pollution tests on high-voltage ceramic and glass insulators to be used on dc systems,” Technical Specification IEC TS 61245, International Electrotechnical Commission (IEC), Geneva, Switzerland, 2015.
- [14] “Guidance on the measurement of hydrophobicity of insulator surfaces,” Technical Specification IEC TS 62073, International Electrotechnical Commission (IEC), Geneva, Switzerland, 2016. Edition 2.0.
- [15] “Terrestrial photovoltaic (pv) modules — design qualification and type approval — part 1: Test requirements,” Standard IEC 61215-1, International Electrotechnical Commission (IEC), Geneva, Switzerland, 2021. Edition 2.0.
- [16] “Terrestrial photovoltaic (pv) modules — design qualification and type approval — part 2: Test procedures,” Standard IEC 61215-2, International Electrotechnical Commission (IEC), Geneva, Switzerland, 2021. Edition 2.0.
- [17] E. Austin, A. N. Geisler, J. Nguyen, I. Kohli, I. Hamzavi, H. W. Lim, and J. Jagdeo, “Visible light part i: Properties and cutaneous effects of visible light,” *Journal of the American Academy of Dermatology*, pp. 1–24, 2021.
- [18] I. A. for Research on Cancer, *Radiation: IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Volume 100D: Solar and Ultraviolet Radiation*. Lyon, France: International Agency for Research on Cancer (IARC), 2012.
- [19] F. Stengel, “Homeostasis in topical photoprotection: Getting the spectral balance right,” *American Journal of Clinical Dermatology*, vol. 19, no. Suppl 1, pp. S40–S44, 2018.
- [20] “Explorador solar.” <https://solar.minenergia.cl/exploracion>, 2025. Accedido: 2025-09-28.
- [21] H. Mei, “Resolving insulator corrosion on hvdc lines in china,” *INMR*, 2014. Accedido: 2025-09-28.
- [22] G. P. Bruce, S. M. Rowland, and A. Krivda, “Performance of silicone rubber in dc inclined plane tracking tests,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 17, no. 2, pp. 521–532, 2010.