

UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Ingeniería Eléctrica

Evaluar el método de prueba acelerado de índice de tracking comparativo (+DC-CTI) para determinar la resistencia al tracking en silicona de aisladores para aplicaciones DC.

Nicolás Alejandro Rojas Araya

Requisito parcial para obtener el título de:

Ingeniero Civil Electricista

Profesor guía: Dr. Roger Schurch Brandt (UTFSM)

Septiembre, 2026

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: Evaluar el método de prueba acelerado de índice de tracking comparativo (+DC-CTI) para determinar la resistencia al tracking en silicona de aisladores para aplicaciones DC.

Nombre del candidato(a): Nicolás Alejandro Rojas Araya.

Carrera / Grado: Ingeniero Civil Electricista.

Campus: Valparaíso Casa Central. **Departamento:** Departamento de 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.

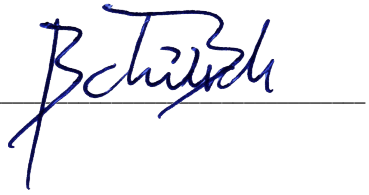
☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por **(marcar una opción)**:

☐ 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: 29/10/2026 **Firma:** 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 29/10/2026 **Firma:** 

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

Abstract

The energy transition in Chile has driven the development of the Kimal–Lo Aguirre high-voltage direct current (HVDC) transmission line, a critical infrastructure that will cross the severe environmental conditions of the Atacama Desert. Operation under direct current voltage imposes extreme stress on silicone rubber insulators, as the absence of zero-crossings prevents the natural extinction of electrical arcs, accelerating tracking and erosion damage. This phenomenon has traditionally been evaluated through the standardized inclined plane test (DC-IPT); however, this 6-hour test method exhibits serious reproducibility deficiencies and high statistical scatter. Under this scenario, the present research evaluates a novel accelerated test method (+DC-CTI), adapting the IEC 60112 standard to concentrate a stable electric field within a reduced gap (3 mm) for approximately 60 seconds.

The experimental campaign consisted of subjecting silicone rubber specimens to comparative tests under AC and +DC (2.5 kV), incorporating severe solid-layer artificial pollution (Class E5) and ultraviolet (UV) radiation aging. The results demonstrated that the application of positive polarity direct current generates significantly higher thermal stress than alternating current. Furthermore, it was verified that the porous matrix of the Class E5 pollution retains the liquid electrolyte and forces the thermal rooting of the arc, producing critical erosion depths of up to 3.611 [mm] in the classical DC-IPT test.

In contrast, the accelerated +DC-CTI method successfully replicated the thermodynamic failure mechanism without relying on erratic long-term volumetric wear. Oscillographic monitoring of the leakage current enabled diagnosing the inability of the material to extinguish the arc. It is concluded that the +DC-CTI method represents a promising and agile alternative for the preliminary evaluation of insulating materials under direct current, showing high potential to complement traditional quality control tests under severe environmental conditions.

Agradecimientos

Quiero dejar este espacio para agradecer a todas las personas que fueron parte de este largo camino:

- Quiero expresar mi más sincero agradecimiento en especial a mi familia, por su apoyo incondicional, paciencia y motivación constante a lo largo de toda mi etapa universitaria.
- Agradezco especialmente a mi profesor guía, Dr. Roger Schurch Brandt, por su disposición, confianza, orientación técnica y valiosos consejos durante el desarrollo de esta memoria de titulación.
- De igual manera, extiendo un especial agradecimiento a la profesora Dra. Valeria del Campo, del Departamento de Física de la Universidad Técnica Federico Santa María, por facilitarnos la cámara de envejecimiento UV para la realización de las pruebas experimentales, además por su gran amabilidad y constante disposición para resolver cada una de las dudas que surgieron en el proceso.
- Asimismo, agradezco al equipo de Pañol del DIE especialmente a Claudio Ramos y Cristian Andrade por el apoyo brindado y la disposición, no solo durante la etapa experimental de este trabajo, sino a lo largo de todos los Laboratorios durante la carrera.
- a la empresa Silpak S.A. por el suministro de las probetas de silicona entregadas por el Sr.Juan Pablo Montes.
- Finalmente, a mis amigos y compañeros de carrera, con quienes compartí largas jornadas de estudio y que hicieron de este camino una gran experiencia.

Quizás se me olvida mencionar algunos nombres, pero a todas las personas que formaron parte de esta etapa de mi vida, muchas gracias.

Índice General

1 Introducción **10**
1.1 Objetivos . . . 12
1.1.1 Objetivo General . . . 12
1.1.2 Objetivos Específicos . . . 12

2 Marco Teórico **13**
2.1 Sistema eléctrico chileno y transmisión HVDC . . . 13
2.1.1 Plan de Descarbonización y transición Energética . . . 13
2.1.2 Proyecto Kimal - Lo Aguirre . . . 13
2.2 Ensayos de tracking y erosión . . . 14
2.3 Norma IEC 60587 . . . 15
2.3.1 Dimensiones de las muestras de ensayo . . . 15
2.3.2 Circuito de ensayo . . . 15
2.3.3 Electrodos . . . 16
2.3.4 Papel filtro para goteo . . . 17
2.3.5 Montaje probeta . . . 17
2.3.6 Pasos del ensayo . . . 18
2.4 Norma IEEE Std 2652-2021 . . . 19
2.5 Método acelerado +DC-CTI . . . 20
2.5.1 Circuito de ensayo . . . 20
2.5.2 Electrodos . . . 21
2.5.3 Procedimiento . . . 23

3 Investigación internacional CIGRE Technical Brochure 998 (Agosto 2026) **24**
3.1 Norma IEC 60815-1 . . . 26
3.1.1 Tipos de contaminación . . . 26
3.1.2 Tipos de entornos . . . 27
3.1.3 Evaluación de gravedad de la contaminación del sitio (SPS) . 27
3.1.4 Clases de gravedad de la contaminación del sitio (SPS) . . . 29
3.1.5 Determinación del ESDD y el NSDD . . . 30
3.2 Norma PD IEC TS 61245:2015 . . . 32
3.2.1 Método de capa sólida . . . 32
3.3 Envejecimiento Acelerado por Radiación Ultravioleta (UV) . . . 33
3.3.1 Cámara de envejecimiento por rayos ultravioleta . . . 34
3.3.2 Plataforma Solar del Desierto de Atacama (PSDA) . . . 35
3.3.3 Dosis de irradiación del espectro de la lámpara frente al espectro solar. . . . 36

4 Metodología y Materiales **39**
4.1 Obtención de probetas de silicona . . . 39
4.2 Ensayo de Plano inclinado (IPT) en corriente continua y alterna . . . 40
4.3 Simulación de contaminación superficial (capa sólida tipo A - nivel E5) 42
4.3.1 Cálculo y validación de los niveles ESDD y NSDD . . . 43
4.4 Aplicación de la contaminación y secado de probetas . . . 45
4.4.1 Evaluación comparativa mediante contaminación dinámica . . 45
4.5 Diseño y Montaje del Circuito de Ensayo Acelerado (+DC-CTI) . . . 46

4.6 Envejecimiento UV Acelerado 47
4.6.1 Montaje de las Probetas 48
4.6.2 Ejecución y Equivalencia Temporal 49
4.7 Registro de Datos 49

5 Resultados y Análisis Comparativo 52
5.1 Determinación del nivel de tensión base 52
5.1.1 Ensayo IPT a 3,5 [kV] AC 52
5.2 Evaluación del Caso Base en probetas limpias a 2,5 [kV] 55
5.2.1 Ensayo de Plano Inclinado a 2,5 [kV] AC (caso base) 55
5.2.2 Ensayo de Plano Inclinado a 2,5 [kV] +DC (Caso base) 57
5.2.3 Ensayo Acelerado +DC-CTI a 2,5 [kV] (Caso Base) 59
5.2.4 Cuadro comparativo entre AC-IPT, +DC-IPT y +DC-CTI en 2,5 [kV] en condición base 61
5.3 Efecto de la contaminación superficial severa (Clase E5) a 2,5 [kV] . . 63
5.3.1 Comparación de los métodos de contaminación en +DC-IPT a 2,5 [kV] 63
5.3.2 Cuadro comparativo de los métodos de aplicación de contaminación E5 en +DC-IPT 66
5.3.3 Ensayo de Plano Inclinado a 2,5 [kV] AC con Capa Sólida E5 y comparación con caso base 67
5.3.4 Ensayo Acelerado +DC-CTI a 2,5 [kV] con Capa Sólida E5 . 70
5.3.5 comparación de métodos de ensayo bajo contaminación clase E5 72
5.4 Impacto del envejecimiento por radiación UV y su efecto combinado con contaminación E5 a 2,5 [kV] 73
5.4.1 Ensayo de Plano Inclinado a 2,5 [kV] +DC con Envejecimiento UV 73
5.4.2 Ensayo de Plano Inclinado a 2,5 [kV] +DC Combinado (Envejecimiento UV y Contaminación E5) 75
5.4.3 Ensayo Acelerado +DC-CTI a 2,5 [kV] con Envejecimiento UV y comparación general del método. 78
5.4.4 Contraste de la respuesta frente al envejecimiento UV entre ensayo +DC-CTI y +DC-IPT 81

6 Conclusiones 83

7 Trabajos Futuros 84

8 Referencias 85

Índice de tablas

1 Parámetros para utilizar el método de tensión constante. 18
2 Relaciones de mérito recomendadas para voltajes DC equivalentes en el ensayo de plano inclinado. 19
3 Ejemplos de entornos típicos según la norma IEC 60815-1. 28
4 Información comparativa de los espectros de la lámpara de laboratorio y la radiación solar en los rangos UV-B, UV-A y UV total. 37
5 Equivalencia de envejecimiento acelerado entre las horas de operación de la cámara y los años de exposición real en la PSDA. 38
6 Pruebas de composición del contaminante 42
7 Parámetros medidos en el proceso de calibración. 43
8 Resultados calculados de ESDD y NSDD para ambas iteraciones. . . 44
9 Plantilla de registro para los parámetros de configuración eléctrica e hidrodinámica del ensayo. 50
10 Plantilla de registro para la variación de masa y erosión física de las muestras ensayadas. 51
11 Parámetros y tiempos utilizados en el ensayo de plano inclinado a 3,5 [kV] AC. 52
12 Registro de variación de masa y erosión tras el ensayo de plano inclinado a 3,5 [kV] AC. 52
13 Parámetros y tiempos utilizados en el ensayo de plano inclinado a 2,5 [kV] AC. 55
14 Registro de variación de masa y erosión tras el ensayo de plano inclinado a 2,5 [kV] AC. 55
15 Parámetros y tiempos utilizados en el ensayo de plano inclinado a 2,5 [kV] +DC. 57
16 Registro de variación de masa y erosión tras el ensayo de plano inclinado a 2,5 [kV] +DC. 57
17 Parámetros utilizados en el ensayo +DC-CTI a 2,5 [kV]. 59
18 Registro de variación de masa y erosión tras el ensayo acelerado +DC-CTI a 2,5 [kV]. 60
19 Cuadro comparativo del Caso Base entre AC-IPT, +DC-IPT y +DC-CTI. 62
20 Parámetros y tiempos utilizados en el ensayo de plano inclinado a 2,5 [kV] +DC con contaminación sólida Clase E5. 63
21 Registro de variación de masa y erosión tras el ensayo de plano inclinado a 2,5 [kV] +DC con contaminación sólida E5. 63
22 Parámetros y tiempos utilizados en el ensayo de plano inclinado a 2,5 [kV] +DC con mezcla fluida de contaminación E5 y Triton X-100. . . 65
23 Registro de variación de masa y erosión tras el ensayo de plano inclinado a 2,5 [kV] +DC con mezcla fluida de contaminación E5 y Triton X-100. 65
24 Cuadro comparativo del método de aplicación de contaminación E5 en plano inclinado (+DC a 2,5 [kV]). 67
25 Parámetros y tiempos utilizados en el ensayo de plano inclinado a 2,5 [kV] AC con contaminación sólida Clase E5. 68

26 Registro de variación de masa y erosión tras el ensayo de plano inclinado a 2,5 [kV] AC con contaminación E5. 68
27 Comparación del comportamiento en Corriente Alterna (AC-IPT a 2,5 [kV]): Probetas limpias vs. Probetas con contaminación sólida E5. 70
28 Parámetros utilizados en el ensayo +DC-CTI a 2,5 [kV] con contaminación sólida Clase E5. 70
29 Registro de variación de masa y erosión tras el ensayo acelerado +DC-CTI a 2,5 [kV] con contaminación E5. 71
30 Cuadro comparativo del impacto de la contaminación sólida Clase E5 en AC-IPT, +DC-IPT y +DC-CTI a 2,5 [kV]. 72
31 Parámetros utilizados en el ensayo de plano inclinado a 2,5 [kV] +DC con probetas sometidas a envejecimiento UV. 73
32 Registro de variación de masa y erosión tras el ensayo de plano inclinado a 2,5 [kV] +DC en muestras con envejecimiento UV. 73
33 Parámetros utilizados en el ensayo de plano inclinado a 2,5 [kV] +DC con envejecimiento UV y contaminación sólida Clase E5. 75
34 Registro de variación de masa y erosión tras el ensayo de plano inclinado a 2,5 [kV] +DC en muestras con envejecimiento UV y contaminación E5. 75
35 Cuadro comparativo del desempeño en el ensayo de Plano Inclinado en Corriente Continua (+DC-IPT a 2,5 [kV]) bajo las cuatro condiciones de estudio. 78
36 Parámetros utilizados en el ensayo +DC-CTI a 2,5 [kV] con probetas sometidas a envejecimiento UV. 79
37 Registro de variación de masa y erosión tras el ensayo acelerado +DC-CTI a 2,5 [kV] en muestras con envejecimiento UV. 79
38 Cuadro comparativo del desempeño físico y eléctrico en el método acelerado (+DC-CTI a 2,5 [kV]) bajo las tres condiciones de estudio. 81
39 Contraste metodológico de la respuesta frente al envejecimiento UV entre el ensayo de Plano Inclinado (+DC-IPT) y el Método Acelerado (+DC-CTI) a 2,5 [kV]. 82

Índice de figuras

1 Proyecto Kimal-Lo Aguirre 10
2 Circuito utilizado para los ensayos 15
3 Dimensiones en milímetros, electrodo superior 16
4 Dimensiones en milímetros, electrodo inferior 16
5 Dimensiones en milímetros,papel filtro 17
6 Montaje de la probeta por normativa 17
7 Circuito para ensayo acelerado +DC-CTI 21
8 Dimensiones en milímetros de los electrodos 22
9 Montaje de electrodos 22
10 Rangos de los valores de ESDD/NSDD de cada clase de SPS para aisladores tipo varilla larga 29
11 Relación entre la SES y SPS para contaminación tipo B en tipo varilla larga y tipo “cap and pin”. 30
12 Espectro de irradiancia dada por el fabricante 34
13 Irradiancia espectral del Atacama AM1.08 y del AM1.5 de referencia estándar. 36
14 Montaje de probetas para el ensayo IPT. 40
15 Equipamiento para el ensayo de plano inclinado en Corriente Alterna (AC). 41
16 Rectificador de media onda. 42
17 Ubicación de las mediciones individuales (Prueba 2) en el gráfico de clasificación SPS de la norma IEC 60815-1. 44
18 Probetas con contaminación clase E5. 45
19 Soporte creado para ensayo +DC-CTI. 47
20 Lámpara de arco de Mercurio-Xenón. 48
21 Montaje de las probetas de silicona. 49
22 Muestras de probetas de silicona tras el ensayo de plano inclinado en AC a 3,5 [kV]. 53
23 Evolución temporal de la corriente de fuga durante el ensayo de plano inclinado en AC a 3,5 [kV]. 53
24 Muestras de probetas de silicona tras el ensayo de plano inclinado en AC a 2,5 [kV]. 56
25 Evolución temporal de la corriente de fuga durante el ensayo de plano inclinado en AC a 2,5 [kV]. 56
26 Muestras de probetas de silicona tras el ensayo de plano inclinado en +DC a 2,5 [kV]. 58
27 Evolución temporal de la corriente de fuga durante el ensayo de plano inclinado en +DC a 2,5 [kV]. 58
28 Muestras de probetas de silicona tras el ensayo +DC-CTI a 2,5 [kV]. . 60
29 Evolución temporal de la corriente de fuga durante el ensayo +DC-CTI a 2,5 [kV]. 60
30 Muestras de probetas de silicona tras el ensayo de plano inclinado en +DC a 2,5 [kV] más contaminación sólida Clase E5. 64
31 Evolución temporal de la corriente de fuga durante el ensayo de plano inclinado en +DC a 2,5 [kV] con contaminación sólida Clase E5. . . . 64

32 Muestras de probetas de silicona tras el ensayo de plano inclinado en +DC a 2,5 [kV] con mezcla fluida de contaminación E5 y Triton X-100. 65
33 Evolución temporal de la corriente de fuga durante el ensayo de plano inclinado en +DC a 2,5 [kV] con contaminación Clase E5 aplicada en el Triton X-100. 66
34 Muestras de probetas de silicona tras el ensayo de plano inclinado en AC a 2,5 [kV] con contaminación sólida Clase E5. 68
35 Evolución temporal de la corriente de fuga durante el ensayo de plano inclinado en AC a 2,5 [kV] con contaminación Clase E5. 69
36 Muestras de probetas de silicona tras el ensayo +DC-CTI a 2,5 [kV] con contaminación sólida Clase E5. 71
37 Evolución temporal de la corriente de fuga durante el ensayo +DC-CTI a 2,5 [kV] con contaminación sólida Clase E5. 71
38 Muestras de probetas de silicona tras el ensayo de plano inclinado en +DC a 2,5 [kV] con envejecimiento UV. 74
39 Evolución temporal de la corriente de fuga durante el ensayo de plano inclinado en +DC a 2,5 [kV] con envejecimiento UV. 74
40 Muestras de probetas de silicona tras el ensayo de plano inclinado en +DC a 2,5 [kV] con envejecimiento UV y contaminación sólida Clase E5. 76
41 Evolución temporal de la corriente de fuga durante el ensayo de plano inclinado en +DC a 2,5 [kV] con envejecimiento UV y contaminación Clase E5. 76
42 Muestras de probetas de silicona tras el ensayo +DC-CTI a 2,5 [kV] con envejecimiento UV. 79
43 Evolución temporal de la corriente de fuga durante el ensayo +DC-CTI a 2,5 [kV] con envejecimiento UV. 80

Resumen

La transición energética en Chile ha impulsado el desarrollo de la línea de transmisión en corriente continua de alta tensión (HVDC) Kimal-Lo Aguirre, infraestructura crítica que atravesará las severas condiciones ambientales del Desierto de Atacama. La operación bajo tensión continua impone un estrés extremo sobre los aisladores de goma de silicona, ya que la ausencia de cruces por cero impide la extinción natural de los arcos eléctricos, acelerando el daño por tracking y erosión. Este fenómeno se ha evaluado mediante el ensayo normativo de plano inclinado (DC-IPT); sin embargo, este método de 6 horas de duración presenta serias deficiencias de reproducibilidad y una alta dispersión estadística. Bajo este escenario, la presente investigación evalúa un nuevo método de prueba acelerado (+DC-CTI), adaptando la norma IEC 60112 para concentrar un campo eléctrico estable en un espacio reducido (3 mm) por aproximadamente 60 segundos

La campaña experimental consistió en someter probetas de silicona a ensayos comparativos en AC y +DC (2,5 kV), incorporando contaminación artificial de capa sólida severa (Clase E5) y envejecimiento por radiación ultravioleta (UV). Los resultados demostraron que la aplicación de corriente continua en polaridad positiva genera un estrés térmico significativamente mayor que la alterna. Asimismo, se comprobó que la matriz porosa de la contaminación E5 retiene el líquido y fuerza el anclaje térmico del arco, produciendo perforaciones críticas de hasta 3,611 [mm] en el ensayo clásico DC-IPT.

En contraste, el método acelerado +DC-CTI, logró replicar el mecanismo de falla termodinámica sin depender del desgaste volumétrico errático a largo plazo. El monitoreo oscilográfico de la corriente de fuga permitió diagnosticar la incapacidad del material para extinguir el arco. Se concluye que el método +DC-CTI se presenta como una alternativa prometedora y ágil para la evaluación preliminar de materiales aislantes en corriente continua, mostrando un alto potencial para complementar los ensayos tradicionales de control de calidad frente a condiciones ambientales severas.

Capítulo 1

1. Introducción

Chile se encuentra en un proceso de transformación de su matriz energética con el objetivo de alcanzar la descarbonización hacia 2050. Un elemento fundamental en esta estrategia es la implementación de la línea de transmisión en corriente continua de alta tensión Kimal–Lo Aguirre, infraestructura crítica destinada a transportar grandes cantidades de energía renovable generada en el norte del país hacia los centros de consumo de la zona central [1].

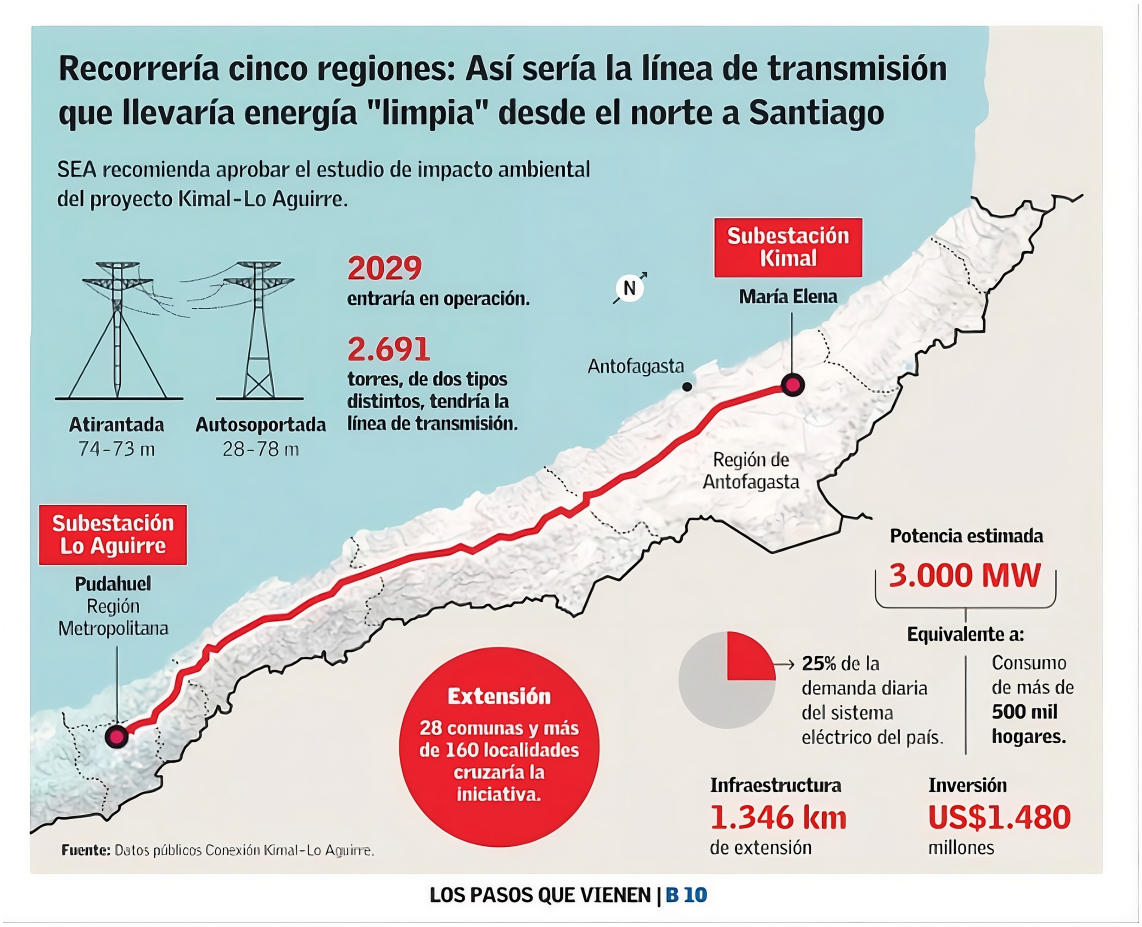


Figura 1: Proyecto Kimal-Lo Aguirre
Fuente: Datos públicos Conexión Kimal-Lo Aguirre

La fiabilidad operativa de esta línea depende, en gran medida, del desempeño de los aisladores compuestos de caucho de silicona, utilizados por sus propiedades hidrofóbicas, su buen comportamiento mecánico y su resistencia a ambientes contaminados [2]. Sin embargo, la operación bajo tensión continua impone condiciones más severas que las presentes en sistemas tradicionales de corriente alterna. En particular, el campo eléctrico continuo favorece la acumulación de contaminantes sobre la super-

ficie del aislador y genera arcos eléctricos que no se extinguen naturalmente debido a la ausencia de cruce por cero, lo que incrementa de manera significativa el daño térmico sobre el material [3, 4].
La ruta Kimal–Lo Aguirre atraviesa zonas de alta radiación ultravioleta y ambientes costeros con elevada salinidad, condiciones que aceleran el envejecimiento de la silicona y aumentan la probabilidad de fallas por tracking y erosión [2]. La combinación de contaminación, envejecimiento UV y arcos eléctricos persistentes constituye un escenario de alta severidad para el desempeño de los aisladores. Actualmente existe una brecha de conocimiento relevante, no se dispone de datos experimentales locales sobre el comportamiento del material utilizado en los aisladores de este proyecto bajo condiciones reales de tensión continua, contaminación y envejecimiento ambiental. A nivel internacional, también se reconoce la limitada experiencia respecto del desempeño de materiales poliméricos en corriente continua, especialmente en lo relativo a la resistencia al tracking [5].
El método estándar para evaluar estos fenómenos es el ensayo de plano inclinado, descrito en la norma IEC 60587 para ensayos en AC y adaptado en la norma IEEE 2652 para ensayos en DC. No obstante, este ensayo presenta limitaciones importantes, requiere largos tiempos de prueba (normalmente seis horas), por lo que la posición del arco puede variar aleatoriamente y la medición de la corriente superficial no permite distinguir entre corrientes de humectación y arcos de banda seca, siendo estas últimas las responsables del daño profundo al material [6, 7]. Investigaciones recientes han demostrado que la erosión significativa ocurre cuando el arco supera temperaturas del orden de 400 °C, lo que inicia la depolimerización de la silicona y puede llevar incluso a combustión localizada [7]. Esto refuerza la necesidad de contar con métodos complementarios que permitan evaluar el material de manera rápida, controlable y con menor incertidumbre experimental.
En este contexto, el método acelerado basado en el Índice de Tracking Comparativo modificado para tensión continua (+DC-CTI) surge como una alternativa prometedora. Este método permite generar arcos controlados de corta duración, es altamente repetible y define condiciones experimentales más estables, lo que puede transformarlo en una herramienta valiosa para el control de calidad y la caracterización comparativa de materiales aislantes [8].

Este estudio evalúa la aplicabilidad del método +DC-CTI acelerado para caracterizar la resistencia al tracking de probetas de silicona utilizadas en los aisladores de la línea Kimal–Lo Aguirre, comparándolo directamente con los resultados obtenidos mediante el ensayo estándar DC-IPT bajo distintas condiciones de contaminación y envejecimiento UV. Con ello se contribuye a la generación de conocimiento experimental local y se logra la validación de un método alternativo que permita reducir tiempos de ensayo y mejorar la confiabilidad de las mediciones.

1.1. Objetivos

A fin de enfrentar los desafíos técnicos que presenta la operación de aisladores de silicona bajo estrés de corriente continua sometidos a condiciones extremas de la línea HVDC Kimal-Lo Aguirre, la presente investigación establece un un objetivo general y un marco de objetivos específicos, los cuales articulan de manera sistemática el desarrollo del protocolo experimental, el tratamiento de los datos obtenidos y la posterior generación de criterios técnicos de selección.

1.1.1. Objetivo General

Evaluar el comportamiento frente al tracking de probetas de silicona utilizadas en aisladores para la línea HVDC Kimal-Lo Aguirre mediante ensayos de plano inclinado (DC-IPT) y un nuevo método acelerado DC-CTI (Comparative Tracking Index) bajo condiciones de contaminación y envejecimiento UV.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Ensayar probetas de silicona mediante métodos estándar AC y DC bajo diferentes niveles de contaminación y de envejecimiento por radiación UV, para determinar el caso base del comportamiento frente al tracking de esta silicona con los métodos estándar.
- Construir un montaje experimental para someter probetas de silicona a estrés eléctrico de corriente continua (DC) mediante un método de ensayo acelerado basado en el índice de tracking comparativo (CTI).
- Ensayar probetas de silicona mediante método DC-CTI bajo diferentes niveles de contaminación y de envejecimiento por radiación UV, para evaluar el desempeño frente al tracking.
- Validar la eficacia del método DC-CTI como herramienta de selección rápida para control de calidad, mediante la comparación de los resultados de resistencia al tracking con los obtenidos en ensayos estándar AC y DC de plano inclinado.

Capítulo 2

2. Marco Teórico

2.1. Sistema eléctrico chileno y transmisión HVDC

El Sistema Eléctrico Nacional se encuentra en un proceso de transformación profunda, impulsado por el compromiso de alcanzar la descarbonización hacia el año 2050 . Esta transición implica el retiro progresivo de las centrales a carbón y la integración masiva de fuentes de generación renovable, ubicadas principalmente en los extremos geográficos del país [1].

2.1.1. Plan de Descarbonización y transición Energética

El "Plan de Descarbonización"define una ruta estratégica para prescindir de la generación térmica convencional de manera eficiente, segura y resiliente, fortaleciendo la participación de energías limpias en la matriz energética [1]. Dado que el mayor potencial de recursos solares y eólicos se concentra en la zona norte del país, surge la necesidad crítica de transportar grandes cantidades de energía hacia los centros de mayor demanda que se sitúan en la zona central.
Debido a que existe una limitación en la capacidad de transporte de energía, se ha intensificado el fenómeno de vertimiento en centrales renovables de la zona norte. Esta pérdida forzada de excedentes constituye una ineficiencia crítica que ralentiza el proceso de retiro de centrales térmicas.

2.1.2. Proyecto Kimal - Lo Aguirre

Como respuesta a esta necesidad, Chile ha iniciado su primer proyecto de transmisión en corriente continua de alta tensión (HVDC), la línea Kimal-Lo Aguirre. Con una tensión de operación de $\pm$ 600 [kV], una capacidad de 3000 [MW] y una extensión aproximada de 1500 km que conecta la Subestación Kimal ubicada en la región de Antofagasta con la Subestación Lo Aguirre en la región Metropolitana. La implementación de tecnología HVDC para este proyecto se fundamenta en su superioridad técnica y económica sobre los sistemas AC para distancias superiores a los 800 [km], permitiendo un control preciso del flujo de potencia y una reducción significativa en el ancho de la franja de servidumbre .
Sin embargo, la ruta de la línea atraviesa zonas con condiciones ambientales extremas, tales como la radiación UV y niveles de contaminación salina y desértica severos. Estos factores imponen un desafío inédito para el aislamiento, ya que el estrés eléctrico en corriente continua altera la dinámica de acumulación de partículas y la formación de arcos eléctricos, demandando métodos de validación rigurosos y específicos.

2.2. Ensayos de tracking y erosión

En sistemas de transmisión de alta tensión, especialmente en corriente continua como el proyecto Kimal-Lo Aguirre, la integridad del aislamiento externo es un factor fundamental para la continuidad del servicio eléctrico. Los materiales poliméricos, como el caucho de silicona (SiR), ofrecen ventajas superiores frente al vidrio o la porcelana debido a su hidrofobicidad.

El proceso de degradación se inicia con la acumulación de contaminantes (sales, polvo, humedad) que forman una capa conductora sobre la superficie, sumado a esto, la presencia de campos eléctricos elevados provoca la aparición de corrientes de fuga que evaporan el agua contenida generado lo que se conoce como bandas secas donde posteriormente se producen descargas parciales o también conocidas como arcos de banda seca. Con el tiempo, este estrés térmico sostenido degrada la composición del polimérico dando lugar a áreas de carbonización o erosión profunda, lo que finalmente conlleva a un deterioro progresivo del material, lo que compromete la integridad dieléctrica y la estabilidad mecánica del aislamiento, incrementando el riesgo de una falla catastrófica en la línea.

El fenómeno del "tracking" representa uno de los desafíos más críticos para la ingeniería de alta tensión. Se define como un proceso de degradación irreversible en el cual se generan caminos conductores sobre la superficie del material aislante. Por lo que sigue siendo el parámetro principal para determinar la vida útil de un aislador sometido a estrés ambiental. La creación de las normas de ensayos surgió como una respuesta a la necesidad de predecir estas fallas en un entorno de laboratorio controlado y reproducible. Por ello organismos como la IEC y la ASTM desarrollaron protocolos como la IEC 60587 y la ASTM D2303 [5], las cuales permitieron clasificar los materiales principalmente según la máxima tensión aplicada en los electrodos antes de la falla, falla por sobrecorriente o según la longitud de carbonización en el material, estableciendo un lenguaje técnico común para fabricantes

No obstante, la transición hacia sistemas de transmisión en corriente continua de alta tensión reveló que las normas diseñadas para corriente alterna eran insuficientes. La ausencia de cruces por cero en el régimen DC provoca que el arco sea constante, intensificando el estrés térmico. Esta brecha técnica impulsó la creación de la norma IEEE Std 2652-2021 [6], la cual adapta los criterios de severidad al entorno DC.
Debido a los elevados tiempos de ejecución de los ensayos, en la actualidad la innovación hacia métodos acelerados representa el siguiente paso en la evolución normativa. Por lo que se creó la norma IEC 60112 [9] para ensayos acelerados en AC, de igual manera se modificó esta norma para ser utilizada en el entorno DC con el método acelerado +DC-CTI [8]. Bajo esta premisa, la presente investigación se centra en el estudio y validación del método +DC-CTI como una herramienta de diagnóstico y clasificación. El objetivo fundamental es demostrar que este ensayo acelerado, basado en la cinética de erosión de corto plazo y el análisis de corriente de fuga, constituye un indicador confiable y reproducible para predecir el desempeño de los aisladores de silicona en proyectos de transmisión HVDC de gran envergadura, como la línea Kimal-Lo Aguirre.

2.3. Norma IEC 60587

La Norma IEC 60587 [5] describe dos métodos de ensayo para el análisis de materiales aislantes eléctricos en AC destinados a utilizarse en condiciones ambientales severas, mediante la evaluación de tracking y erosión, utilizando un contaminante líquido y muestras en plano inclinado.

Los métodos son:

- Método 1: Ensayo a tensión constante.
- Método 2: Ensayo con aumento gradual de la tensión.

2.3.1. Dimensiones de las muestras de ensayo

Las probetas son planas con unas dimensiones de 50 [mm] de ancho por 120 [mm] de largo con un espesor de 6 [mm], las cuales se lavan con un disolvente adecuado antes del ensayo para eliminar los restos como los residuos grasos derivados de la manipulación.

2.3.2. Circuito de ensayo

En la Figura **2** se muestra la configuración del circuito de ensayo, el cual presenta una fuente de tensión alterna variable (Variac), un transformador, un resistor en serie, un voltímetro, el soporte de la probeta y por limitaciones técnicas no se contempla el uso de un protector de sobrecorriente. En su lugar, se mantendrá una supervisión constante durante todo el periodo de ensayo, el cual corresponde a un tiempo de 6 horas. Además se incorpora el uso de un amperímetro de manera de mantener la corriente controlada y poder detectar oportunamente cualquier anomalía.

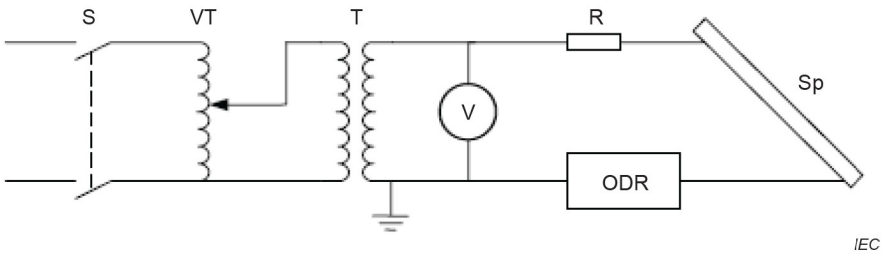


Figura 2: Circuito utilizado para los ensayos
Fuente: Norma IEC 60587 [5]

2.3.3. Electrodos

Los electrodos son piezas fabricadas de acero inoxidable con un espesor de 0,5 [mm].

- Electrodo superior:

  Las dimensiones del electrodo superior se detallan en la Figura **3**. La geometría de este electrodo se debe a que es el encargado de dirigir el flujo del líquido por el centro de la probeta.

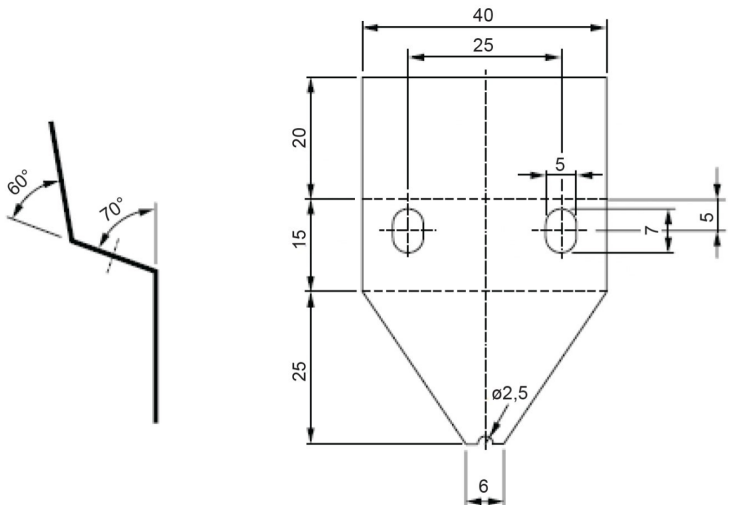


Figura 3: Dimensiones en milímetros, electrodo superior
Fuente: Norma IEC 60587 [5]

- Electrodo inferior:

  Se puede observar en la Figura **4** las dimensiones y características del electrodo inferior necesarias para garantizar un correcto contacto y poder filtrar el líquido utilizado.

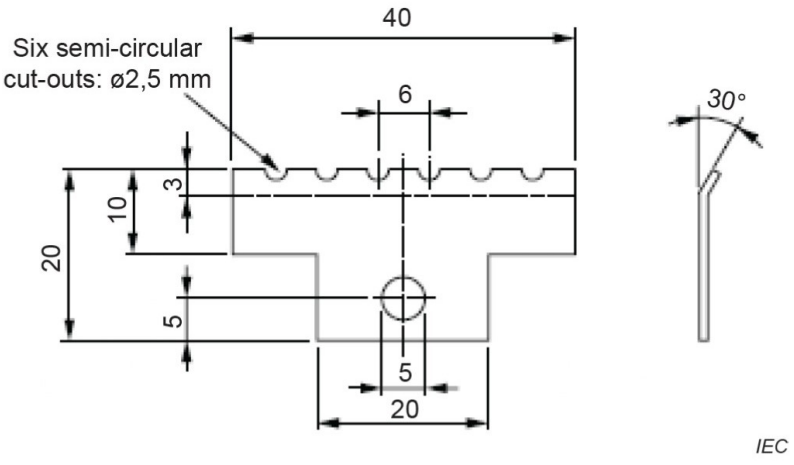


Figura 4: Dimensiones en milímetros, electrodo inferior
Fuente: Norma IEC 60587 [5]

2.3.4. Papel filtro para goteo

En el ensayo se utilizan ocho capas de papel filtro de un grosor de (0,2 ± 0.02) [mm] de las dimensiones indicadas en la Figura **5**. Estos se colocan entre el electrodo superior y la muestra para que actúen como depósito del contaminante.

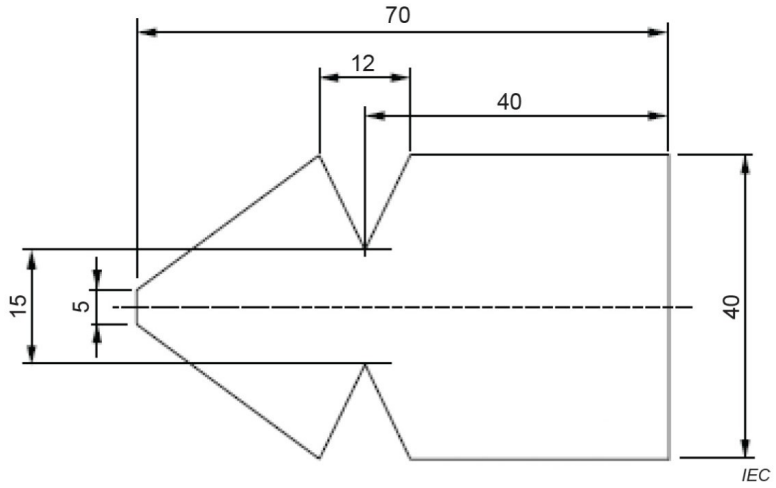


Figura 5: Dimensiones en milímetros,papel filtro
Fuente: Norma IEC 60587 [5]

2.3.5. Montaje probeta

Juntado todos los componentes anteriormente mencionados, se realiza el montaje mostrado en la Figura **6**, donde se puede identificar una separación de los electrodos de 50 [mm]. Además dicha probeta se instala a 45 grados con respecto la horizontal.

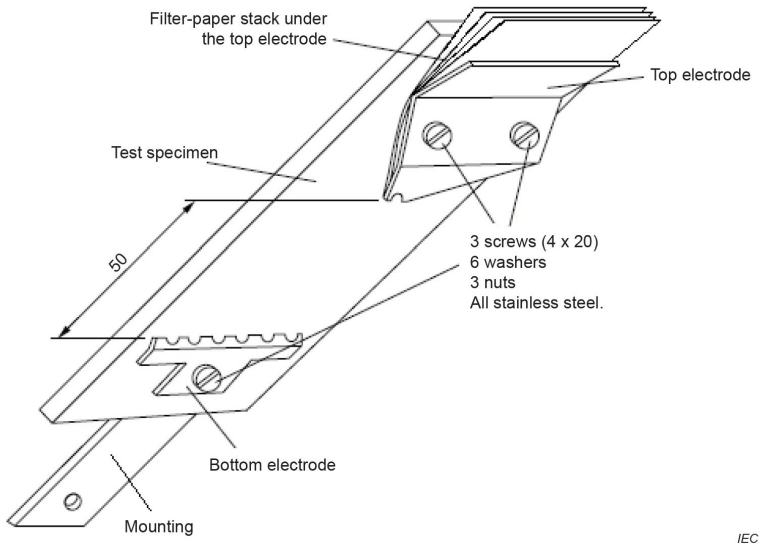


Figura 6: Montaje de la probeta por normativa
Fuente: Norma IEC 60587 [5]

2.3.6. Pasos del ensayo

1. **Definir un criterio de fin para la prueba.**

   - **Criterio A:** Se pone fin a la prueba cuando el valor de la corriente que atraviesa la muestra supera los 60 [mA], además se considera " no superada" si la muestra se inflama o si se presenta una perforación debido a la erosión, independientemente de si el orificio se hace visible durante el ensayo o tras la retirada del material erosionado.
   - **Criterio B:** Se pone fin a la prueba cuando la erosión llega a la marca situada en los costados de la probeta a 25 [mm] del electrodo inferior, además se considera " no superada" si la muestra se inflama o si se presenta una perforación debido a la erosión, independientemente de si el orificio se hace visible durante el ensayo o tras la retirada del material erosionado.

2. **Definir un método de prueba.**

   - **Método 1: Ensayo a tensión constante**
     De la tabla **1** se selecciona una tensión de ensayo y se mantiene estable durante 6 horas.

     Se requiere un total de 5 muestras iniciales, si ninguna de las muestras falla, el resultado es "aprobado", si una de las 5 muestras falla a una tensión de ensayo determinada, se somete a ensayo un conjunto adicional de 5 muestras, si solo falla una de las 10 muestras en total, el resultado es "aprobado"

Voltaje de ensayo (kV)	**Voltaje de prueba preferido (kV)**	**Flujo de contaminante (ml/min)**	**Resistencia de balasto (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 6,0	–	0,90	33

Tabla 1: Parámetros para utilizar el método de tensión constante.

   - **Método 2: Ensayo con aumento gradual de tensión**
     Se selecciona una tensión inicial múltiplo de 250 [V] la cual se mantiene durante 1 hora, luego se aumenta la tensión en incrementos de 250 [V] cada hora hasta que se registre la falla según el **criterio A**. A medida que se aumenta la tensión, el caudal del contaminante y el valor de la resistencia de balasto se incrementan según los valores de la tabla **1**.

Luego de realizar el ensayo se limpian las placas utilizando agua destilada y en caso de que cumpla con los criterios se mide la profundidad máxima de la erosión de cada placa.

3. **Clasificación del material**

   a) **Material sometido a ensayo según el método 1**

   - **Clase 1X 4,5 :** Si todas las muestras del conjunto inicial superan las 6 horas a 4,5 [kV] o si 9 de las 10 muestras del conjunto ampliado superan las 6 horas a 4,5 [kV].
   - **Clase 1X 3,5 :** Si todas las muestras del conjunto inicial superan las 6 horas a 3,5 [kV] o si 9 de las 10 muestras del conjunto ampliado superan las 6 horas a 3,5 [kV].
   - **Clase 1X 2,5 :** Si todas las muestras del conjunto inicial superan las 6 horas a 2,5 [kV] o si 9 de las 10 muestras del conjunto ampliado superan las 6 horas a 2,5 [kV].
   - **Clase 1X 0 :** Si más de una muestra de un total de 10 falla a 2,5 [kV] en menos de 6 horas.

   * La letra **X** corresponde a la letra del criterio de falla utilizado (**A** o **B**)

   b) **material sometido al ensayo según el método 2**

   - **2A x**

   * donde **x** es la tensión más alta que ha soportado el material sometido a ensayo.

2.4. Norma IEEE Std 2652-2021

La norma IEEE Std 2652-2021 [6] describe una aplicación adecuada de tensiones en DC en el ensayo de tracking y erosión en plano inclinado. Para este ensayo se utiliza el mismo montaje de la Norma IEC 60587 . Sin embargo, la fuente debe suministrar una tensión DC con ripple inferior al 3 % bajo carga.

Esta norma introduce el término "Relación de Mérito" estrictamente como un factor de multiplicación recomendado para calcular el voltaje de prueba equivalente en corriente continua (DC), tomando como referencia los niveles de voltaje del estándar en corriente alterna (AC), con el único objetivo de mantener la misma potencia de arco que el ensayo AC correspondiente. Dicho porcentaje se muestra en la tabla **2**.

Polaridad del voltaje	**Relación de mérito para voltajes DC equivalentes**	**Voltaje efectivo en el método de voltaje constante**
+DC	70 %	$0,7\times$ voltaje AC estándar
–DC	90 %	$0,9\times$ voltaje AC estándar

Tabla 2: Relaciones de mérito recomendadas para voltajes DC equivalentes en el ensayo de plano inclinado.

2.5. Método acelerado +DC-CTI

El método +DC-CTI consiste en un ensayo acelerado y modificado, basado en la norma IEC 60112 [9], diseñado para cuantificar la resistencia al tracking y erosión térmica de materiales aislantes poliméricos bajo estrés de corriente continua.

A diferencia del CTI (Comparative Tracking Index) convencional, este método no busca un "voltaje umbral" de falla, sino que utiliza una tensión fija elevada para generar un arco sostenido que permite medir el desgaste físico (pérdida de masa o profundidad de la erosión) del material en un tiempo reducido.

La medición de la corriente de fuga es el principal criterio de evaluación del material, ya que se obtiene su desempeño durante aproximadamente 60 segundos que dura el ensayo donde se clasifica en:

- **Material con alta resistencia:** El gráfico de corriente en función del tiempo muestra muchos momentos de corriente cercana a cero. Esto significa que el arco se apaga con facilidad. Los pulsos son cortos, lo que indica que el daño es superficial o no muy profundo.
- **Material de baja resistencia:** El gráfico muestra bloques de corriente casi constantes en el límite de los 40 [mA], lo que se significa que el arco se estabilizó, lo que se traduce en una pérdida de masa crítica en pocos segundos.

2.5.1. Circuito de ensayo

El circuito del método +DC-CTI se muestra en la Figura 7. Se puede observar una fuente de tensión de +3.5 [kV] DC, una resistencia de 22 [kΩ] para limitar la corriente a través de la muestra, una bomba que permite dosificar la gota de contaminante entre los electrodos, una resistencia calculada de 65,4 [kΩ] (loaded Fuse Resistor) para garantizar que la corriente de fuga máxima nunca supere los 40 [mA] y una resistencia Shunt de 100 [Ω] donde se mide la señal de voltaje baja, de manera de obtener la medición de la corriente de fuga.
Al igual que el método de plano inclinado tanto la tensión como la resistencia de balasto se deben ajustar a partir de la Tabla 1 dependiendo de la clase del material, por lo que se debe calcular nuevamente la resistencia de fusible de manera de limitar la corriente a 40 [mA].

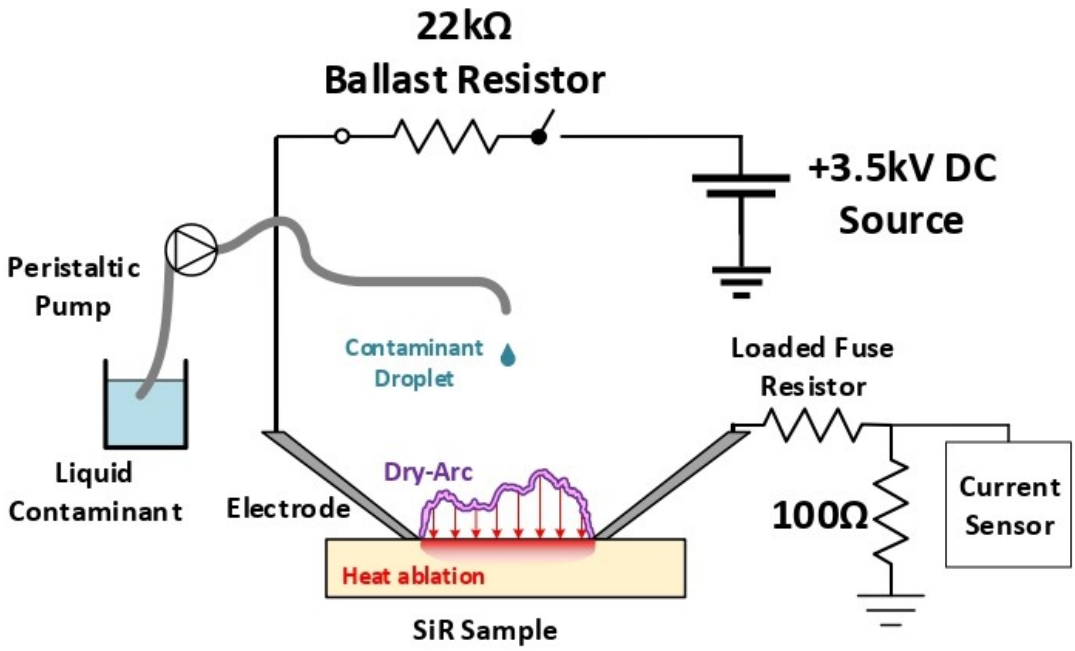


Figura 7: Circuito para ensayo acelerado +DC-CTI
Fuente: National Research Council Canada

2.5.2. Electrodos

La geometría de los electrodos para el ensayo +DC-CTI corresponde a la misma de la norma IEC 60112 [9], la que se muestra en la Figura 8. El material utilizado es el acero inoxidable y corresponden a barras rectangulares de sección transversal de 5 [mm] por 2 [mm] colocados en un ángulo de 60° entre ellos. Si bien la norma IEC 60112 los electrodos tiene una separación de 4 [mm], como en la Figura 9, para el ensayo +DC-CTI se utiliza una separación de 3 [mm].

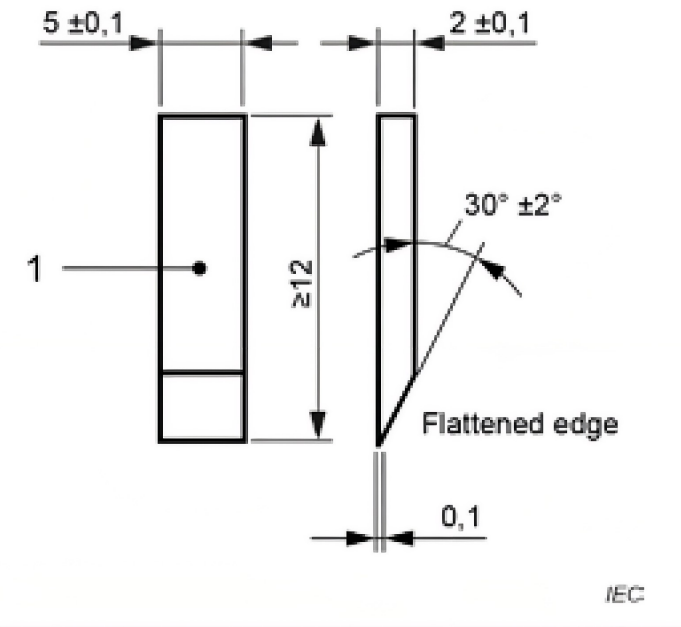


Figura 8: Dimensiones en milímetros de los electrodos
Fuente: Norma IEC 60112 [9]

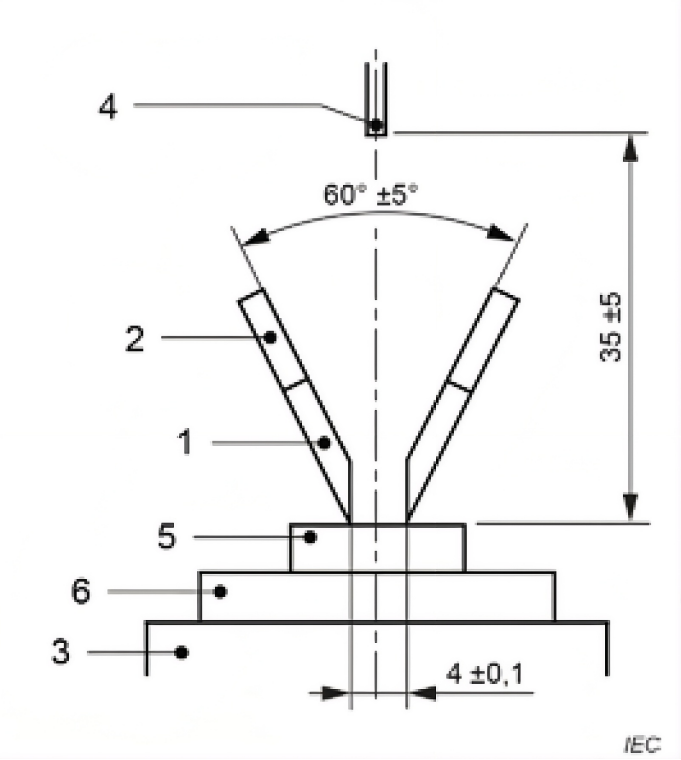


Figura 9: Montaje de electrodos
Fuente: Norma IEC 60112 [9]

2.5.3. Procedimiento

Se aplica la tensión +DC con un ripple menor a 3 %,luego se aplica una gota de contaminante líquido sobre la muestra entre los electrodos generando un arco estable durante aproximadamente 1 minuto. Se mide la tensión en la resistencia shunt y con la ley de ohm se obtiene la corriente de fuga la cual se debe muestrear a una alta frecuencia para capturar los pulsos de arco (20 kHz). Finalmente se calcula el promedio de la corriente cada 300 muestras.

Cabe mencionar que el tiempo de 60 segundos se considera una referencia aproximada y no un límite exacto, ya que la duración real de la prueba depende de cuánto tarda en evaporarse la gota de líquido y de la capacidad de la silicona para apagar el arco eléctrico por sí sola. En una probeta limpia, el calor de la corriente evapora rápidamente la gota y la superficie repele la humedad, logrando cortar el paso de la corriente y apagar el arco alrededor del primer minuto. Sin embargo, al evaluar muestras con envejecimiento por radiación UV o con contaminación, se considero adecuado mantener una ventana de tiempo mayor para poder registrar el comportamiento completo de la corriente de fuga de las probetas ya que se están sometiendo a condiciones que perjudican su rendimiento. De esta manera se logra obtener una conclusión clara del efecto que tiene en la silicona las distintas condiciones a las cuales fueron sometidas

3. Investigación internacional CIGRE Technical Brochure 998 (Agosto 2026)

La reciente publicación del reporte técnico *Technical Brochure 998* (TB 998), titulado "*Further Investigations on a DC Tracking & Erosion Test*", emitido por el Grupo de Trabajo D1.72 del CIGRE en agosto de 2026 [14] posteriormente a la realización de los ensayos experimentales del presente estudio, no obstante, su incorporación es de suma relevancia, ya que sus hallazgos validan el comportamiento observado en el laboratorio.

El propósito del grupo CIGRE WG D1.72 consistió en evaluar la viabilidad de estandarizar el ensayo de plano inclinado (IPT) bajo tensión continua constante (Método 1 de la norma IEC 60587), buscando mantener una actividad de descarga superficial continua, reducir la severidad de la prueba y disminuir la dispersión estadística de los resultados . Para ello, tras estudios preliminares en los que se redujo la conductividad volumétrica del contaminante líquido desde $2,5$ [mS/cm] hasta $1,2$ [mS/cm] con el fin de equiparar la potencia eléctrica disipada entre las descargas en corriente alterna y continua, se ejecutaron dos campañas internacionales de ensayos interlaboratorio (*Round Robin Tests*, RRT) con la participación de siete laboratorios de alta tensión de Alemania, Canadá, Suiza, Francia y China. En dichas pruebas se evaluaron lotes de 10 probetas de silicona de grado comercial (clasificadas como clase 1A 4,5 bajo norma AC) aplicando tensiones continuas en polaridad positiva de $+4,5$ [kV] y $+3,5$ [kV] durante periodos de 2, 4 y 6 horas .

A partir del análisis estadístico de repetibilidad mediante la prueba U de Mann-Whitney y de reproducibilidad interlaboratorio mediante el indicador z'-score de la norma ISO 13528 sobre poblaciones de 70 probetas por configuración, el reporte del CIGRE estableció tres hallazgos fundamentales :

- **Contraste de reproducibilidad entre AC y DC:** Mientras que el ensayo de referencia en corriente alterna (AC-IPT) demostró una alta repetibilidad y reproducibilidad en todos los laboratorios participantes, aprobando 68 de las 70 muestras ensayadas con profundidades de erosión menores a 1 [mm], ajustándose a una única distribución estadística normal, los ensayos en corriente continua (+DC-IPT) arrojaron niveles inaceptables de dispersión e inconsistencia entre laboratorios, con tasas de falla que variaron desde 0 % hasta 60 % para un mismo grupo de material.
- **Distribución bimodal y carácter no lineal de la erosión en DC:** El análisis probabilístico demostró que la profundidad de erosión bajo corriente continua no se ajusta a una distribución normal única, sino que exhibe una distribución estadística mixta (bimodal) compuesta por dos regímenes de degradación divergentes: muestras que finalizan con erosión superficial leve y muestras que sufren erosión intensa o perforación completa. El estudio comprobó que la formación de erosión severa en +DC es un proceso no lineal e impredecible que, una vez iniciado el anclaje térmico del arco, puede propagarse y perforar el espesor de la probeta en intervalos de 10 a 30 minutos dentro

de las primeras 4 horas de prueba.

- **Pérdida de selectividad al reducir los parámetros de estrés:** En pruebas complementarias donde se disminuyó aún más la conductividad del contaminante (hasta $0,3$ [mS/cm]) o se redujo la tensión aplicada con el objetivo de evitar la aparición de erosión intensa, el ensayo perdió su capacidad de discriminación, provocando que compuestos poliméricos sin resistencia al *tracking* ni a la erosión presentaran profundidades de desgaste similares a las de elastómeros de alta resistencia.

En virtud de estos resultados, el grupo CIGRE WG D1.72 concluyó en agosto de 2026 que la aplicación de tensión continua constante (Método 1) en el ensayo de plano inclinado no constituye una metodología adecuada ni estandarizable para evaluar la resistencia al *tracking* y a la erosión en materiales para aplicaciones DC, debido a que sus deficiencias estructurales de repetibilidad y reproducibilidad no pueden corregirse mediante el simple ajuste de tensión o conductividad .

3.1. Norma IEC 60815-1

La norma IEC 60815-1 [10] es una especificación técnica que se aplica a la selección de aisladores y a la determinación de sus dimensiones pertinentes para su uso en sistemas de alta tensión bajo contaminación.

Los efectos de esta especificación se dividen según tipo de aislador en las siguientes categorías:

- **IEC 60815-2:** Aisladores de cerámica y vidrio para sistemas de CA.
- **IEC 60815-3:** Aisladores poliméricos para sistemas de CA.
- **IEC 60815-4:** Equivalente a la norma 60815-2 para sistemas de CC.
- **IEC 60815-5:** Equivalente a la norma 60815-3 para sistemas de CC.

Esta norma ofrece definiciones generales y métodos para la evaluación de la gravedad de contaminación en un sitio en específico (SPS, Site Pollution Severity), de manera de llegar a una conclusión del probable comportamiento de un aislador determinado en ciertos entornos de contaminación.

3.1.1. Tipos de contaminación

En la norma IEC 60815-1 se identifican dos tipos de contaminación básicos principales que son los causantes de provocar el efecto de tracking o contorneo.

- **Contaminación tipo A.**

  La contaminación tipo A se relaciona con zonas desérticas, zonas con contaminación industrial o también con zonas costeras en los casos en que se acumula una capa de sal seca que luego se humedece rápidamente por el rocío, la niebla o llovizna.
  Este tipo de contaminación tiene dos tipos de componente principales:

  - Contaminación soluble:
    Se subdivide en sales de alta solubilidad y sales de baja solubilidad. Y se mide en términos de densidad equivalente de depósito de sal (ESDD) en mg/cm^2.
  - Contaminación no soluble:
    Algunos ejemplos son el polvo, la arena, la arcilla los aceites, etc. Y se mide en términos de densidad de depósito no soluble (NSDD) en mg/cm^2

- **Contaminación tipo B**

  La contaminación tipo B se asocia con mayor frecuencia a las zonas costeras, donde el agua salada o la niebla conductora se depositan sobre la superficie del aislante. También se consideran de este tipo, la fumigación de cultivos, las nieblas químicas y la lluvia ácida.

Cabe mencionar que existe una contaminación que combina ambos tipos.

3.1.2. Tipos de entornos

Bajo esta normativa los entornos se clasifican en 5 tipos:

- **Entornos de tipo desértico:** Son zonas que se caracterizan por suelos arenosos con largos periodos de sequía. La capa de contaminación en estas zonas suele constituirse de sales que se disuelven lentamente, en combinación con una alta densidad de depósito no soluble (NSDD). Además la escasez de lluvias hace que la limpieza natural sea menos eficaz.
- **Entornos de tipo costero:** La contaminación se deposita a través del viento y la niebla y suele ser de rápida acumulación. La limpieza natural suele ser eficaz, ya que la contaminación consiste principalmente en sales de rápida disolución.
- **Entornos de tipo industrial:** Se trata de zonas situadas muy cerca de actividad industrial. La contaminación puede consistir en contaminantes por partículas conductoras como carbón, depósitos metálicos o gases disueltos, o contaminación que se disuelven lentamente, como cemento o yeso, con una densidad de depósito no soluble (NSDD) de medio a alto. La eficacia de la limpieza natural depende de la zona geográfica y el tipo de contaminación.
- **Entornos de tipo agrícola:** Se trata de zonas sometidas a labranza (trabajo de tierras) o a la fumigación de cultivos. La capa de contaminación está compuesta principalmente por sales de disolución rápida o lenta, como productos químicos, excrementos de aves o sales presentes en el suelo, con una densidad de depósito no soluble (NSDD) de medio a alto. La limpieza natural puede ser bastante eficaz dependiendo del tipo de sal depositada.
- **Entornos de tipo interior** Se refiere a zonas con un bajo nivel de contaminación, sin fuentes de contaminación claramente identificables.

3.1.3. Evaluación de gravedad de la contaminación del sitio (SPS)

La gravedad de la contaminación del sitio (SPS) es el valor o valores máximos de la densidad equivalente de depósito de sal (ESDD) y densidad de depósito no soluble (NSDD), o de la salinidad equivalente del sitio (SES), o también, del índice medidor de depósito de polvo soluble (DDGIS) y el índice medidor de depósito de polvo no soluble (DDGIN), los cuales son registrados durante un periodo de uno o más años. Además, si llueve durante este periodo, las mediciones deben repetirse a intervalos adecuados para determinar el efecto del lavado natural, en ese caso el SPS es el valor más alto registrado durante esta serie de mediciones.

La evaluación de la gravedad del sitio puede realizarse con un grado de fiabilidad decreciente:

1. A partir de mediciones in situ.

2. A partir de la información sobre el comportamiento de los aislantes de las líneas y subestaciones que ya se encuentran en servicio en el sitio o cerca de él.

3. A partir de simulaciones que calculan el nivel de contaminación a partir de parámetros meteorológicos y otros parámetros ambientales.

4. De manera cualitativa a partir de las indicaciones que figuran en la tabla 3

Ejemplo	**Descripción de entornos típicos**
E1	A más de 50 km[a] de cualquier mar, desierto o terreno seco abierto. A más de 10 km de fuentes de contaminación artificial[b]. A una distancia menor a las mencionadas anteriormente, pero con: • Viento predominante no proveniente directamente de estas fuentes. • Y/o con lavado regular por lluvias mensuales.
E2	Entre 10-50 km[a] del mar, un desierto o terreno seco abierto. Entre 5-10 km de fuentes de contaminación artificial[b]. A una distancia menor a E1 de las fuentes de contaminación, pero con las condiciones de viento o lluvia mencionadas en E1.
E3	Entre 3-10 km[c] del mar, un desierto o terreno seco abierto. 1-5 km de fuentes de contaminación artificial[b]. A una distancia menor a las mencionadas anteriormente, pero con las condiciones de viento o lluvia de E1.
E4	Más alejado de las fuentes de contaminación que lo mencionado en E3, pero: • Ocurre niebla densa (o llovizna) frecuentemente tras una larga temporada seca de acumulación de contaminantes. • Y/o ocurre lluvia intensa de alta conductividad. • Y/o existe un nivel alto de NSDD, entre 5 y 10 veces el ESDD.
E5	Menos de 3 km[c] del mar, un desierto o terreno seco abierto. Menos de 1 km de fuentes de contaminación artificial[b].
E6	A mayor distancia de las fuentes de contaminación que lo mencionado en E5, pero con las condiciones de niebla, lluvia o NSDD mencionadas en E4.
E7	A la misma distancia de las fuentes que lo especificado para áreas “pesadas” y: • Directamente sujeto a rocío marino o niebla salina densa. • O directamente sujeto a contaminantes de alta conductividad, o polvo tipo cemento con alta densidad, con humectación frecuente por niebla o llovizna. • Áreas desérticas con rápida acumulación de arena y sal, y condensación regular.
[a] Durante una tormenta, el nivel de ESDD a tal distancia del mar puede alcanzar niveles mucho más altos.	
[b] La presencia de una gran ciudad influirá sobre una distancia mayor, i.e. la distancia especificada para mar, desierto y terreno seco.	
[c] Dependiendo de la topografía de la zona costera y la intensidad del viento.	

Tabla 3: Ejemplos de entornos típicos según la norma IEC 60815-1.

3.1.4. Clases de gravedad de la contaminación del sitio (SPS)

Se definen cualitativamente cinco clases de contaminación que caracterizan la gravedad del sitio:

a) Muy leve.

b) Leve.

c) Media.

d) Grave.

e) Muy grave.

En el caso de la contaminación tipo A, la Figura 10 muestra los rangos de los valores de densidad equivalente de depósito de sal (ESDD)/densidad de depósito no soluble (NSDD) correspondientes a cada clase SPS para los aisladores tipo varilla larga. Estos valores se deducen a partir de mediciones de campo, información histórica del comportamiento de los aisladores en servicio y ensayos de contaminación normalizados.

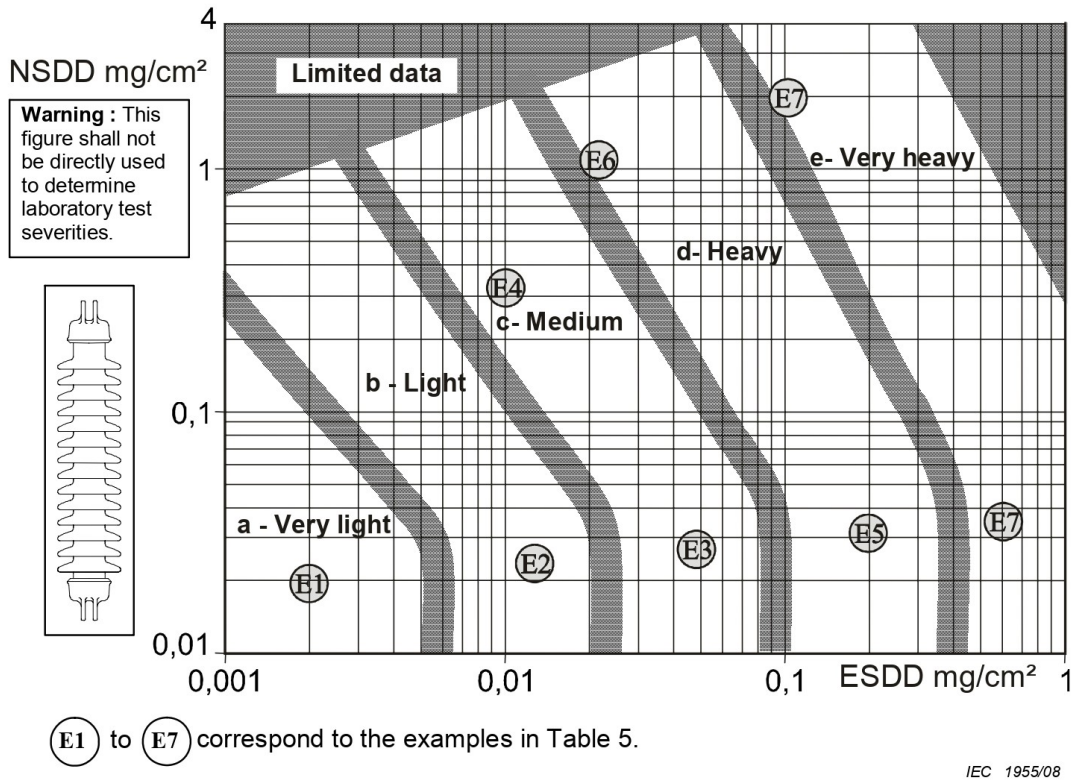


Figura 10: Rangos de los valores de ESDD/NSDD de cada clase de SPS para aisladores tipo varilla larga

Fuente: Norma IEC 60815-1 [10] .

En el caso de la contaminación de tipo B, la Figura 11 muestra la relación entre las mediciones de la salinidad equivalente del sitio (SES) y la clase de gravedad de la contaminación del sitio (SPS) para los aisladores tipo varilla larga y tipo "cap and pin".

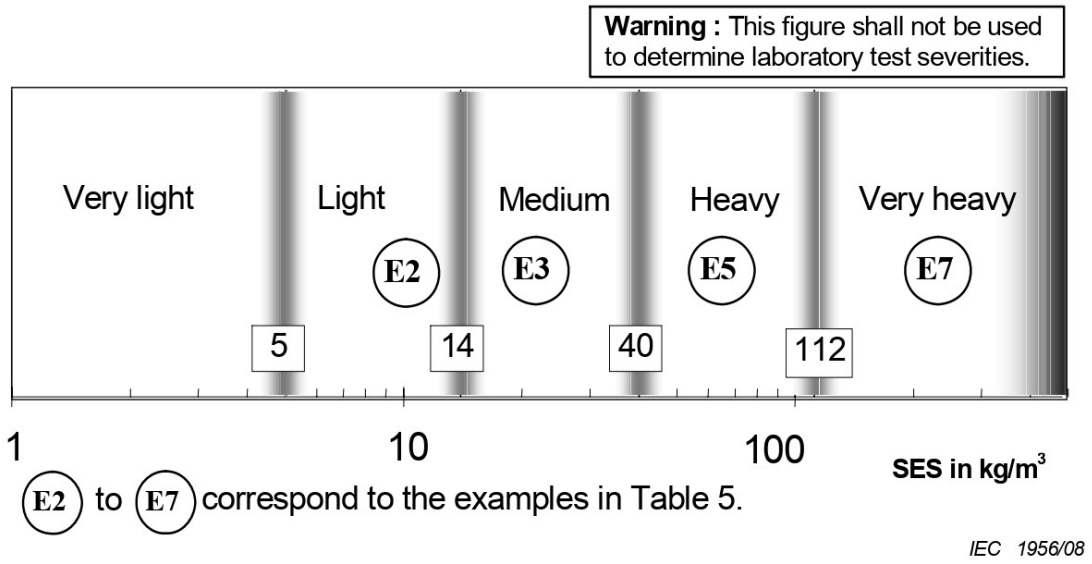


Figura 11: Relación entre la SES y SPS para contaminación tipo B en tipo varilla larga y tipo "cap and pin".
Fuente: Norma IEC 60815-1 [10].

3.1.5. Determinación del ESDD y el NSDD

La Norma IEC 60815-1 [10] Anexo C muestra como determinar los factores ESDD y NSDD tal como se muestra a continuación.

- **Cálculo de la densidad equivalente de depósito de sal (ESDD)**

  El parámetro ESDD cuantifica la masa de sal presente en la superficie del aislador. Para su determinación experimental, se debe lavar cuidadosamente la superficie contaminada con un volumen conocido de agua desmineralizada. Posteriormente, se recolecta el fluido resultante y, tras una agitación rigurosa para asegurar una mezcla homogénea, se mide su conductividad volumétrica y su temperatura.

  Dado que la conductividad eléctrica de una solución salina es altamente dependiente de la agitación térmica de los iones, el primer paso matemático consiste en normalizar la medición a una temperatura de referencia estándar de 20[°C]. Esto se logra mediante la siguiente ecuación:

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

  donde:

- θ es la temperatura de la solución al momento de la medición [°C].
- σ_θ es la conductividad volumétrica medida a la temperatura θ [S/m].
- σ_{20} es la conductividad volumétrica normalizada a 20°C [S/m].
- b es un factor empírico de corrección térmica, el cual se obtiene evaluando la temperatura en el siguiente polinomio:

$$b = -3,200 \times 10^{-8}\theta^3 + 1,032 \times 10^{-5}\theta^2 - 8,272 \times 10^{-4}\theta + 3,544 \times 10^{-2} \quad (2)$$

Una vez obtenida la conductividad normalizada σ_{20}, se procede a determinar la salinidad aparente de la solución (Sa), expresada en kg/m^3. La norma establece la siguiente relación empírica para esta conversión:

$$Sa = (5,7\sigma_{20})^{1,03} \quad (3)$$

Finalmente, vinculando la salinidad obtenida con las dimensiones físicas de la muestra y el volumen de fluido empleado, se calcula el valor del ESDD:

$$ESDD = \frac{Sa \cdot V}{A} \quad (4)$$

donde:

- $ESDD$ es la densidad de depósito de sal equivalente superficial [mg/cm^2].
- V es el volumen total de agua desmineralizada empleado en el lavado [cm^3].
- A es el área efectiva de la superficie de la probeta de donde se extrajo el contaminante [cm^2].

- **Cálculo de la densidad de depósito no soluble (NSDD)**

Mientras que el ESDD mide la capacidad de conducción eléctrica, el parámetro NSDD cuantifica el material inerte que actúa como un medio poroso capaz de retener humedad.

El procedimiento exige que toda el agua de lavado sea filtrada utilizando un embudo y un papel filtro de alta retención (grado GF/A de 1,6 μm). Tras el filtrado, el papel que contiene los residuos sólidos depositados se somete a un proceso de secado completo para evaporar cualquier resto de humedad. Posteriormente, se vuelve a registrar su masa. El NSDD se determina mediante la diferencia de peso, utilizando la siguiente ecuación:

$$NSDD = \frac{1000(W_f - W_i)}{A} \quad (5)$$

donde:

- $NSDD$ es la densidad de depósito de material inerte no soluble [mg/cm^2].

- W_f es el peso final del papel filtro conteniendo los contaminantes en estado completamente seco [g].
- W_i es el peso inicial de tara del papel filtro seco [g].
- A es el área de la superficie del aislador sometida a recolección [cm^2].

Es fundamental precisar que, si bien la norma IEC 60815-1 está orientada como una guía para la selección y el dimensionamiento de aisladores en condiciones de contaminación, en el presente estudio se utiliza con un propósito estrictamente experimental, de poder definir los parámetros de estrés para la comparación entre el caso base (aislador limpio) y el escenario de contaminación tipo A debido a que representa la acumulación de depósitos sólidos no solubles y sales características del desierto de Atacama.

Para este análisis, se ha seleccionado una severidad de sitio SPS clase E5 . La elección de este nivel se justifica por la necesidad de obtener un efecto diferencial nítido en la tasa de erosión del material. Investigaciones previas desarrolladas por Osvaldo N. [11] en este laboratorio han demostrado que niveles de severidad intermedios, como E2 o E3, presentan una diferenciación estadística insuficiente para caracterizar materiales con alta capacidad de recuperación de hidrofobicidad como la goma de silicona. Por tanto, el nivel E5 garantiza un régimen de arcos de banda seca persistentes que permite evaluar el desempeño de la aislación.

3.2. Norma PD IEC TS 61245:2015

La presente especificación técnica [12] tiene como objetivo prescribir los procedimientos para la realización de ensayos de contaminación artificial aplicables a aisladores de cerámica y vidrio destinados a su uso en exteriores, expuestos a atmósferas contaminadas en sistemas de corriente continua cuya tensión máxima sea superior a ± 1000 [V] . No obstante, estos ensayos no son aplicables a los aisladores poliméricos.

Si bien la especificación técnica determina que sus procedimientos de ensayo globales no son aplicables a aisladores poliméricos, en el marco de este estudio la norma se adopta netamente para la dosificación y preparación de la mezcla representativa de la contaminación tipo A (método de capa sólida).

3.2.1. Método de capa sólida

El método de capa sólida simula la contaminación de tipo A, en la que se acumula una capa sólida que contiene sales y materiales inertes sobre la superficie del aislador y cuando se humedece se vuelve conductora.

El grado de contaminación se define por la densidad de depósito de sal (SDD), que se expresa en mg de sal (NaCl) por cm^2 de la superficie especificada de la muestra. Además de la componente salina, el método de capa sólida requiere la presencia de

un material inerte que simule la acumulación de polvo y partículas no solubles, características de los entornos con contaminación tipo A. La cantidad de este material depositado se cuantifica mediante la densidad de depósito no soluble (NSDD), expresada en mg/cm^2. La interacción conjunta de ambos parámetros, SDD y NSDD, es lo que determina el nivel de severidad de la contaminación sobre la superficie del aislador.

- **Composición del contaminante:**
  La formulación base establecida es la siguiente:

  - 40 [g] de material inerte, recomendándose preferentemente el uso de Caolín (Kaolin) o Tonoko.
  - 1000 [g] de agua potable. No obstante, si la conductividad del agua supera los $0,1$ [S/m], la normativa exige estrictamente el uso de agua desmineralizada.
  - Una cantidad variable de sal (NaCl) de pureza comercial.

  El diseño de esta dosificación estandarizada radica en que la concentración de 40 [g] de Caolín por cada litro de agua proporciona, de manera aproximada, una NSDD de $0,1$ [mg/cm^2] al ser aplicada sobre la superficie de la muestra. Por su parte, la masa de sal (NaCl) no constituye un valor estático en la formulación. Esta debe incorporarse y ajustarse de manera progresiva hasta que la mezcla líquida alcance una conductividad volumétrica específica (σ_{20}). Dicha conductividad actúa como el parámetro de control principal en la preparación, ya que se encuentra directamente correlacionada con el nivel de severidad salina (SDD) que se desea depositar en la probeta para la evaluación del tracking y la erosión.

3.3. Envejecimiento Acelerado por Radiación Ultravioleta (UV)

El diseño y validación del aislamiento exterior para sistemas de transmisión, como el proyecto Kimal-Lo Aguirre, exige una comprensión profunda del entorno geográfico donde operará. El Desierto de Atacama, ubicado en el norte de Chile, es catalogado internacionalmente como uno de los entornos con la mayor irradiancia solar superficial del planeta. Esta severidad climática es el resultado directo de condiciones atmosféricas excepcionales, con una elevada altitud topográfica, niveles críticamente bajos de precipitaciones, baja nubosidad y una capa de ozono inusualmente delgada.

Para reproducir físicamente la severidad del Desierto de Atacama, el presente estudio implementa la metodología de envejecimiento fotoquímico validada por el Departamento de Física de la Universidad Técnica Federico Santa María [13]. Dado que dicho estudio logró replicar el espectro solar y la alta incidencia de radiación UV-B propia de la zona norte de Chile.

3.3.1. Cámara de envejecimiento por rayos ultravioleta

El envejecimiento acelerado, con el fin de estudiar la degradación debida a la exposición a los rayos ultravioleta (UV), se llevó a cabo en el interior de una cámara UV, ubicada en el Departamento de Física de la USM. Esta cámara cuenta con una lámpara de arco de Hg (Xe) de 1000 [W] con iluminación policromática y alta radiación UV. La Figura 12 muestra el espectro de la lámpara facilitado por el fabricante, medido a 50 cm de distancia de la fuente de luz.

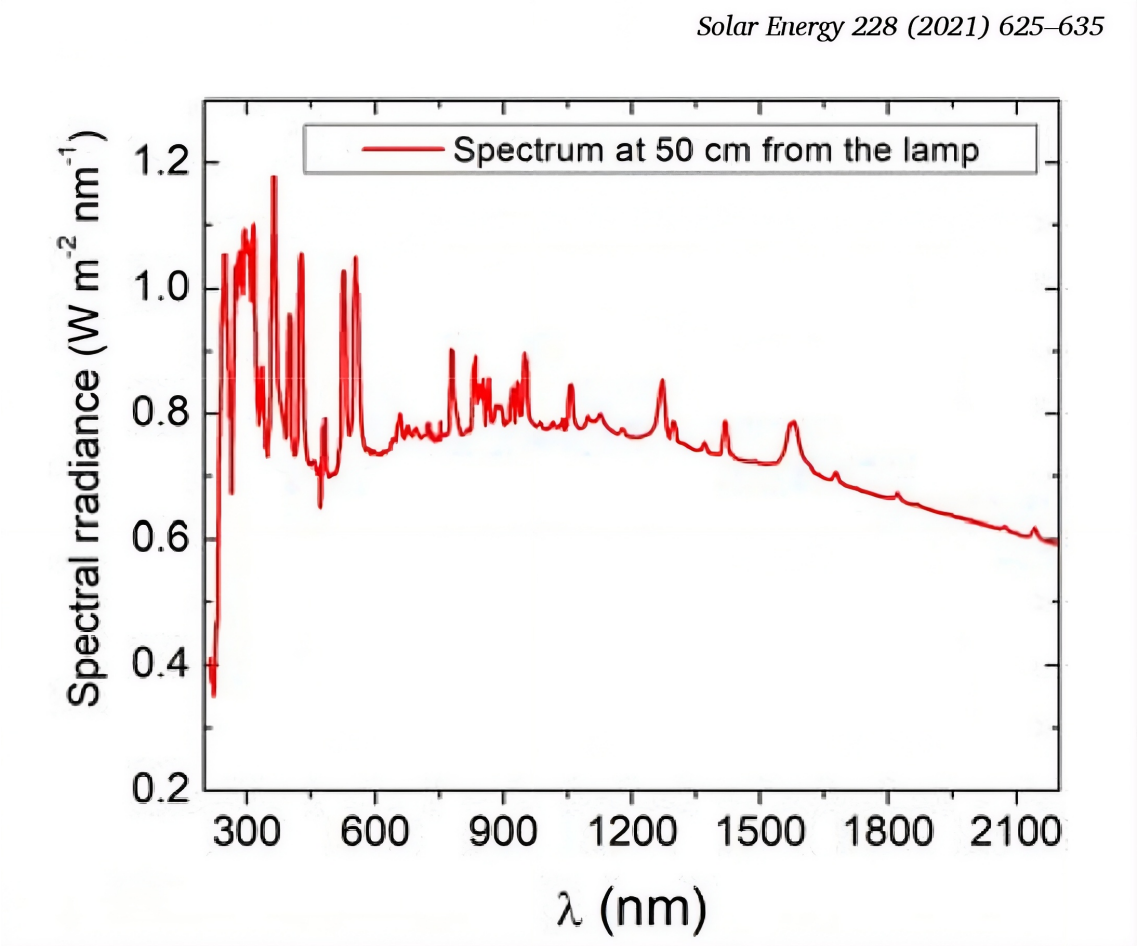


Figura 12: Espectro de irradiancia dada por el fabricante
Fuente: Solar Energy 228 [13]

Las muestras utilizadas en el estudio [13] se iluminaron al mismo tiempo y se situaron a 20 cm de la fuente de luz. Para garantizar la homogeneidad del campo luminoso a esta distancia de la fuente de luz, se montaron en un soporte curvo. Entre las diferentes posiciones de las muestras en el soporte, la variación de la irradiancia fue inferior al 1 %. La irradiancia UV de la lámpara a 20 cm se midió a lo largo de todo el experimento, utilizando un radiómetro RM-22 con el sensor UV de banda ancha (rango 230-400 nm).

3.3.2. Plataforma Solar del Desierto de Atacama (PSDA)

Para relacionar la dosis que reciben las muestras de la lámpara con la dosis que pueden llegar a recibir en del desierto de Atacama, se utilizaron sensores de banda ancha para los rayos UV-A y UV-B instalados en la Plataforma Solar del Desierto de Atacama (PSDA). La PSDA cuenta con una estación meteorológica para tecnologías solares en funcionamiento. La estación se centra en la medición de parámetros meteorológicos como la velocidad, la dirección del viento, la temperatura ambiente , la presión atmosférica y la humedad relativa, así como los componentes de la irradiancia solar de banda ancha, como la irradiancia global horizontal (GHI), la irradiancia difusa horizontal (DHI), la irradiancia directa normal (DNI) y la irradiancia global horizontal en los rangos espectrales UV-A y UV-B mediante un sensor UVS-AB-T de Kipp & Zonen. La información registrada se envía diariamente, de forma automática, a un servidor, lo que permite el acceso remoto a través de Internet.

Para generar una irradiancia espectral solar media para el desierto de Atacama, se analizaron y promediaron 10 años de estos datos obtenidos de bases de datos de satélites y de recuperación de modelos sobre la zona del desierto de Atacama. Estos valores medios se utilizaron como datos de entrada para obtener una irradiancia espectral media denominada Atacama AM1.08.

En la Figura 13 se muestra la irradiancia espectral representativa del desierto de Atacama y la referencia estándar AM1.5 de la ASTM las cuales son la base de los cálculos de este estudio.

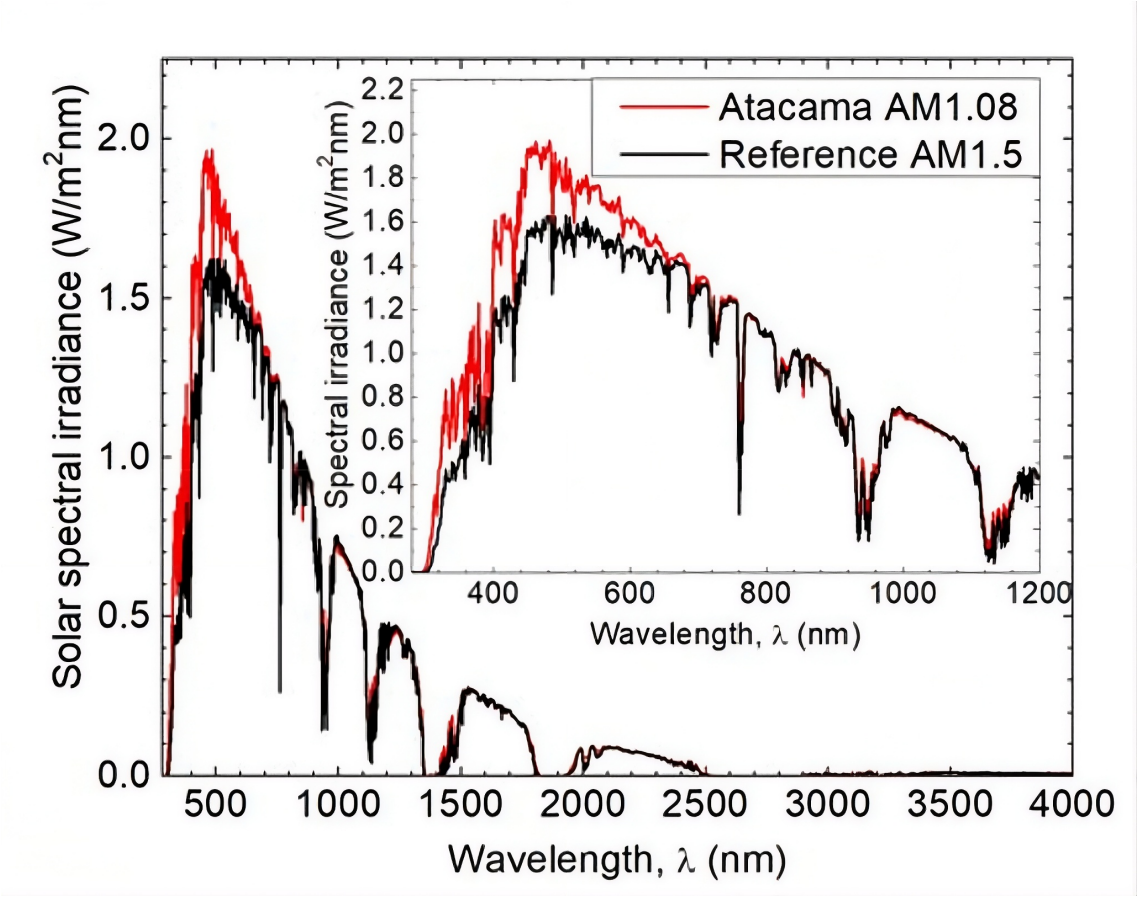


Figura 13: Irradiancia espectral del Atacama AM1.08 y del AM1.5 de referencia estándar.

Fuente: PSDA [13]

3.3.3. Dosis de irradiación del espectro de la lámpara frente al espectro solar.

El análisis de la dosis de irradiación tiene como propósito fundamental determinar la equivalencia temporal entre los ensayos acelerados en el laboratorio y el tiempo de exposición real a la intemperie. Para ello, se relacionó la irradiancia aplicada por la cámara UV a 20 [cm] de distancia con los niveles de radiación registrados en la Plataforma Solar del Desierto de Atacama (PSDA).

Para justificar la agresividad del ensayo, se evaluó la irradiancia de la lámpara contrastándola con dos espectros solares de referencia, el estándar internacional AM1.5 y el espectro representativo de Atacama (AM1.08). Como se detalla en la tabla 4, aunque la radiación ultravioleta representa únicamente el 7,8 % de la potencia total emitida por la lámpara, su concentración a corta distancia resulta extraordinariamente alta. Además, los datos evidencian que el entorno natural de Atacama (AM1.08) supera drásticamente al estándar AM1.5, siendo particularmente crítico en la franja UV-B, donde la radiación en la PSDA es 3,6 veces más intensa que la norma global.

Rango Espectral	**Lámpara** $f(E_{\Delta\lambda})$ **(%)**	**Irradiancia a 20 cm (W/m^2)**	**Atacama AM1.08 (W/m^2)**	**Estándar AM1.5 (W/m^2)**	**Irradiación Anual Acumulada PSDA (kWh/m^2 · año)**
UV-B	2,6	67,2	1,98	0,55	4,6
UV-A	5,2	135,8	66,7	44,8	171,2
UV	7,8	202,9	70,3	46,4	175,8

Tabla 4: Información comparativa de los espectros de la lámpara de laboratorio y la radiación solar en los rangos UV-B, UV-A y UV total.
Fuente: Solar Energy 228 [13]

Para determinar la equivalencia entre el tiempo de exposición dentro de la cámara de envejecimiento (t) y el tiempo de operación a la intemperie en el Desierto de Atacama (t'), se relaciono la dosis de energía suministrada por la lampara en el laboratorio (D_{in}) con la dosis de exposición anual medida en terreno (D_{out}). Conforme al modelo validado por el estudio realizado por el departamento de Física de la USM [13], la dosis acumulada en el interior de la cámara tras un tiempo (t) queda definida como el producto entre la irradiancia efectiva de la lampara a 20 [cm] de distancia ($E_{\Delta\lambda}$) y el tiempo de ensayo (t), como se muestra en la Ecuación 6.

$$D_{in} = E_{\Delta\lambda} \cdot t \tag{6}$$

Por su parte la dosis natural exterior se establece en la Ecuación 7.

$$D_{out} = C \cdot T \tag{7}$$

Donde C corresponde a la irradiación anual acumulada registrada en la Plataforma Solar del Desierto de Atacama (PSDA) y T equivalente a 1 año.

A partir de estos parámetros, el factor de aceleración (AF) para la radiación ultravioleta permite obtener la equivalencia temporal mediante la Ecuación 9.

$$t' = t \cdot AF = t \left(\frac{D_{\text{in}}}{D_{\text{out}}} \right)^{p} \tag{8}$$

En esta expresión, el exponente p representa el factor de reciprocidad, el cual modela la no linealidad en la respuesta fotoquímica del material frente a la intensidad lumínica. Dado el alto grado de coincidencia espectral entre las lámparas de arco de Mercurio-Xenón y la radiación solar natural en las bandas UV-A y UV-B , el cálculo basado en el balance energético directo resulta físicamente representativo para matrices poliméricas, adoptándose un comportamiento de reciprocidad lineal ($p \approx 1$).

Al sustituir en la Ecuación 9 los valores de la Tabla 4, se logra obtener la equivalencia de los tiempos de exposición de las muestras en el interior de la cámara, y la equivalencia en años de exposición solar en el Desierto de Atacama como se muestra en la tabla 5.

Tiempo de exposición en cámara, t (h)	**1694**
Tiempo equivalente en exterior UV-B, $t'_{\text{UV-B}}$ (años)	24,73
Tiempo equivalente en exterior UV-A, $t'_{\text{UV-A}}$ (años)	1,34
Tiempo equivalente en exterior UV, t'_{UV} (años)	1,96

Tabla 5: Equivalencia de envejecimiento acelerado entre las horas de operación de la cámara y los años de exposición real en la PSDA.
Fuente: Solar Energy 228 [13]

Para determinar de manera cuantitativa este factor de aceleración (AF), se toma como referencia la franja general de irradiación (UV Total) obtenido tras 1 694 h de ensayo, lo cual equivale a $1,96$ años de exposición en la Plataforma Solar del Desierto de Atacama (PSDA).

$$AF = \frac{1{,}96 \text{ años}}{1694 \text{ h}} \tag{9}$$

Para establecer una relación en horas equivalentes:

$$AF_h = \frac{1{,}96 \text{ años} \times 365 \text{ días/año} \times 24 \text{ h/día}}{1694 \text{ h}} = \mathbf{10{,}11} \ \frac{\text{h}_{\text{desierto}}}{\text{h}_{\text{cámara}}} \tag{10}$$

La ecuación 10 establece que por cada 1 hora de operación ininterrumpida de la cámara UV de laboratorio, el material polimérico recibe una irradiancia equivalente a 10,11 horas de exposición real en las condiciones ambientales extremas del Desierto de Atacama.

Si bien el cálculo de irradiancia permite establecer una equivalencia matemática respecto a los tiempos de exposición en el Desierto de Atacama, es crucial precisar que no garantiza un desgaste idéntico en las muestras de silicona.

Capítulo 3

4. Metodología y Materiales

Este capítulo detalla la metodología, el equipamiento y el diseño experimental llevados a cabo para evaluar la resistencia al tracking y a la erosión en probetas de silicona, sometidas a estrés bajo corriente continua y alterna . El diseño de esta investigación surge de la necesidad de representar las severas condiciones operativas y ambientales que enfrentarán los sistemas de transmisión en el norte de Chile, específicamente en el contexto del proyecto Kimal-Lo Aguirre.

A continuación, se enumeran los pasos contemplados en el desarrollo del estudio:

1. Obtención de probetas de silicona.
2. Ensayo de Plano Inclinado (IPT) en corriente continua y alterna .
3. Simulación de contaminación superficial (capa sólida tipo A - nivel E5).
4. Aplicación de contaminación en probetas de silicona
5. Diseño y montaje del circuito de ensayo acelerado +DC-CTI.
6. Envejecimiento UV Acelerado.
7. Registro de datos.

4.1. Obtención de probetas de silicona

La fabricación y el suministro de las muestras de silicona estuvieron a cargo de **Silpak**, empresa referente en el sector industrial dedicada a la preparación, fabricación y moldeado de polímeros de silicona de alta calidad.

La trayectoria de Silpak en el desarrollo de elastómeros ha tenido un impacto directo en la industria eléctrica nacional, facilitando la transición desde materiales tradicionales (vidrio y cerámica) hacia soluciones poliméricas avanzadas.

Contar con el respaldo de una fabricación industrial estandarizada por parte de Silpak garantizó una matriz polimérica homogénea y el cumplimiento riguroso de las tolerancias geométricas (espesor, ancho y longitud) exigidas por la norma IEC 60587 [5] para el ensayo de plano inclinado.

4.2. Ensayo de Plano inclinado (IPT) en corriente continua y alterna

Se implementó el montaje físico de plano inclinado (IPT), ajustando la topología del circuito como la tensión, la resistencia y el caudal del contaminante líquido bajo los lineamientos de las normativas correspondientes (IEC 60587 para alterna e IEEE 2652 para continua)[5, 6].

Tanto en AC como en DC el montaje consistió en fijar las probetas a un soporte aislante con una inclinación de 45° respecto a la horizontal. Sobre la superficie de la muestra se instalaron electrodos de acero inoxidable con una separación estandarizada, asegurando un contacto firme con el polímero, tal como se ilustra en la Figura 14.

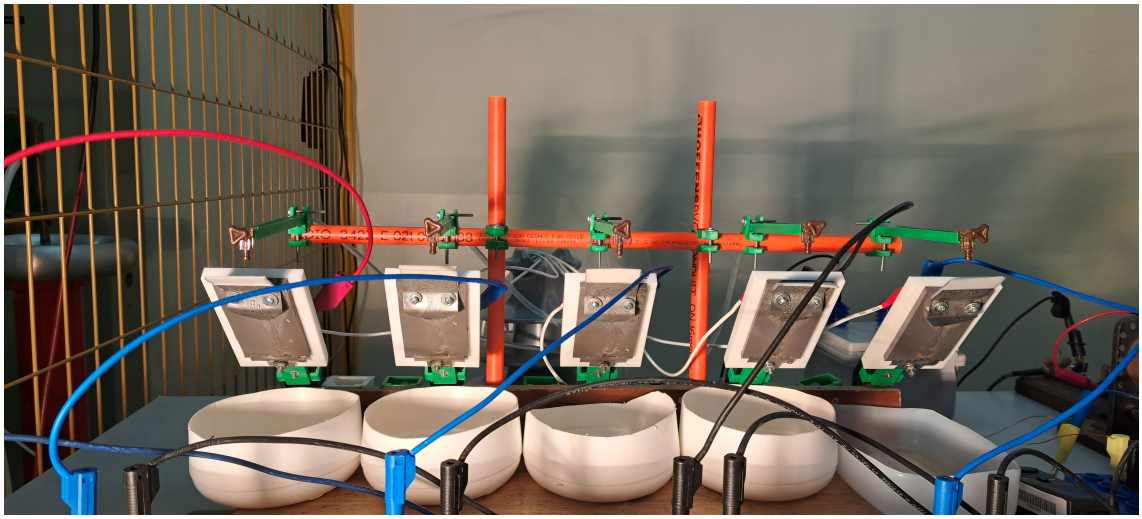
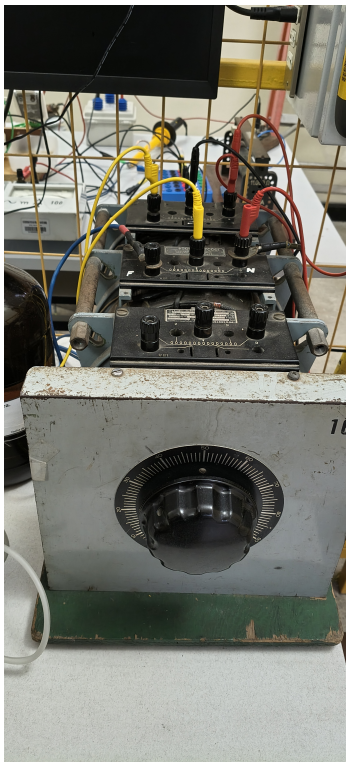


Figura 14: Montaje de probetas para el ensayo IPT.
Fuente: Elaboración propia

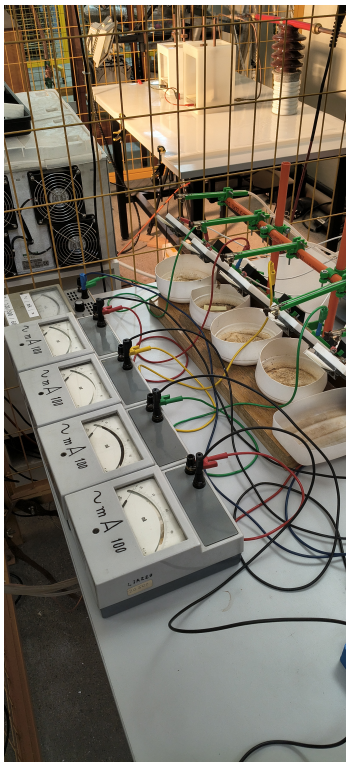
Para las pruebas en corriente alterna, el circuito se energizó utilizando una fuente AC,que consiste en un Variac más un transformador. Se conectó una resistencia en serie en el lado de baja Tensión (LV), con el fin de limitar la corriente de cortocircuito durante las descargas superficiales. El contaminante líquido estándar (solución de NH_4Cl y Triton X-100) se inyectó desde el electrodo superior mediante una bomba peristáltica, calibrada a una tasa de flujo constante acorde al nivel de tensión normativo. Los equipos utilizados se presentan en la Figura 15.



(a) Variac.



(b) Transformador.



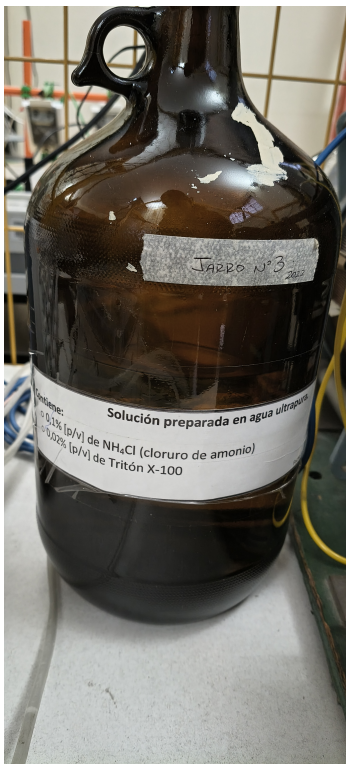
(c) Arreglo de amperimetros.



(d) Bomba peristáltica.



(e) Resistencia en Serie.



(f) solución de NH4Cl y Triton X-100).

Figura 15: Equipamiento para el ensayo de plano inclinado en Corriente Alterna (AC).

Fuente: Elaboración propia

En el caso de las pruebas en corriente continua (+DC), se utilizó la misma fuente de alimentación AC principal, a la cual se le incorporó una etapa de rectificación de media onda (Figura 16) junto con un capacitor de acoplamiento para filtrar el rizado y obtener el nivel de tensión continua en polaridad positiva requerido, manteniéndose el resto de la estructura sin alteraciones .

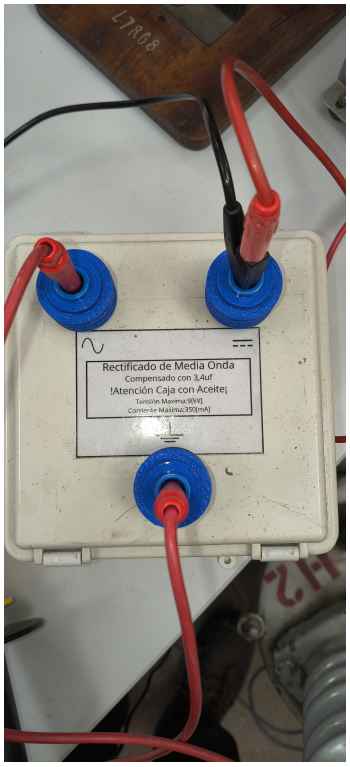


Figura 16: Rectificador de media onda.
Fuente: Elaboración propia

4.3. Simulación de contaminación superficial (capa sólida tipo A - nivel E5)

Para emular las severas condiciones de acumulación de contaminación del Desierto de Atacama, se implementó el método de contaminación por capa sólida tipo A dictado por la especificación técnica IEC TS 61245 [12]. Dado que el objetivo experimental fue alcanzar la clase de severidad E5 , se desarrolló un proceso de calibración sobre probetas piloto para determinar la dosificación exacta.

Para ello, se formularon dos mezclas variando las proporciones de material inerte (caolín), sal (NaCl) y agua destilada, cuyas cantidades se detallan en la Tabla 6.

Prueba	**Caolín (g)**	**NaCl (g)**	**Agua Destilada (ml)**
Prueba 1	5,0	15,0	400
Prueba 2	3,5	8,0	500

Tabla 6: Pruebas de composición del contaminante .

Una vez aplicada a través de un pulverizador y secada la contaminación sobre las probetas piloto, se procedió al lavado del área activa de 50 [cm^2] (correspondiente a la superficie de las probetas), y utilizando un volumen estandarizado de 40 [ml] de agua destilada. El líquido recolectado fue sometido a mediciones de conductividad volumétrica (σ_θ), temperatura (θ) y filtrado para aislar la masa del material no soluble. Los datos medidos para tres muestras independientes en cada prueba se presentan en la Tabla 7.

Parámetro Medido	**Prueba 1**			**Prueba 2**		
	M1	**M2**	**M3**	**M1**	**M2**	**M3**
Conductividad (μS/cm)	642	610	589	380	316	318
Temperatura (°C)	18,0	17,0	17,1	18,5	18,2	17,8
Volumen de lavado (ml)	40	40	40	40	40	40
Masa papel filtro seco (g)	0,529	0,523	0,519	0,578	0,638	0,678
Masa papel + residuo (g)	0,538	0,531	0,530	0,585	0,646	0,687

Tabla 7: Parámetros medidos en el proceso de calibración.

4.3.1. Cálculo y validación de los niveles ESDD y NSDD

A continuación se detalla el cálculo normativo [12] aplicado de a la **Muestra 1 de la Prueba 2**:

1. Cálculo de ESDD: Se lleva la conductividad a la referencia térmica de 20°C (σ_{20}). Con la temperatura medida de $\theta = 18,5$°C, se calcula el factor de corrección b:

$$b = -3,200{\cdot}10^{-8}(18,5)^3 + 1,032{\cdot}10^{-5}(18,5)^2 - 8,272{\cdot}10^{-4}(18,5) + 3,544{\cdot}10^{-2} \approx 0,0235 \tag{11}$$

Aplicando el factor a la conductividad inicial de 380 μS/cm (0,0380 S/m):

$$\sigma_{20} = 0,0380 \cdot [1 - 0,0235 \cdot (18,5 - 20)] \approx 0,0393 \text{ S/m} \tag{12}$$

La salinidad volumétrica (S_a) resultante se calcula según la norma IEC 60507:

$$S_a = (5,7 \cdot 0,0393)^{1,03} \approx 0,213 \text{ kg/m}^3 \text{ (o mg/cm}^3\text{)} \tag{13}$$

Por lo tanto, la Densidad de Depósito de Sal Equivalente es:

$$\text{ESDD} = \frac{S_a \cdot V}{A} = \frac{0,213 \cdot 40}{50} = \mathbf{0,171} \text{ mg/cm}^\mathbf{2} \tag{14}$$

2. Cálculo de NSDD: Utilizando los pesos del papel filtro en estado seco ($m_{f1} = 0,578$ g) y con residuo ($m_{f2} = 0,585$ g), se obtiene una Densidad de Deposito No Soluble de:

$$\text{NSDD} = \frac{(0,585 - 0,578) \cdot 1000}{50} = \mathbf{0,140} \text{ mg/cm}^\mathbf{2} \tag{15}$$

Al replicar este procedimiento sobre todas las muestras ensayadas, se obtuvo la caracterización final de las mezclas, cuyos resultados se exponen en la Tabla 8.

Parámetro de Severidad	**Prueba 1**			**Prueba 2**		
	M1	**M2**	**M3**	**M1**	**M2**	**M3**
ESDD (mg/cm^2)	0,296	0,287	0,277	0,171	0,142	0,144
NSDD (mg/cm^2)	0,180	0,160	0,220	0,140	0,160	0,180

Tabla 8: Resultados calculados de ESDD y NSDD para ambas iteraciones.

A partir del análisis de los resultados, la Prueba 2 logró estabilizar los niveles de depósito sal y caolín. Para validar de manera rigurosa la clase de severidad, se procedió a graficar de forma independiente las coordenadas de cada muestra ensayada sobre el gráfico de severidad de contaminación del sitio (SPS) estipulado en la norma IEC 60815-1 [10].

Como se observa en la Figura 17, los tres puntos experimentales se agrupan de manera consistente y con baja dispersión dentro de la clase E5. Esto no solo confirma el cumplimiento de severidad buscada, sino que demuestra la repetibilidad del método, consolidando a la Prueba 2 como la receta estandarizada para la contaminación de las probetas a ensayar.

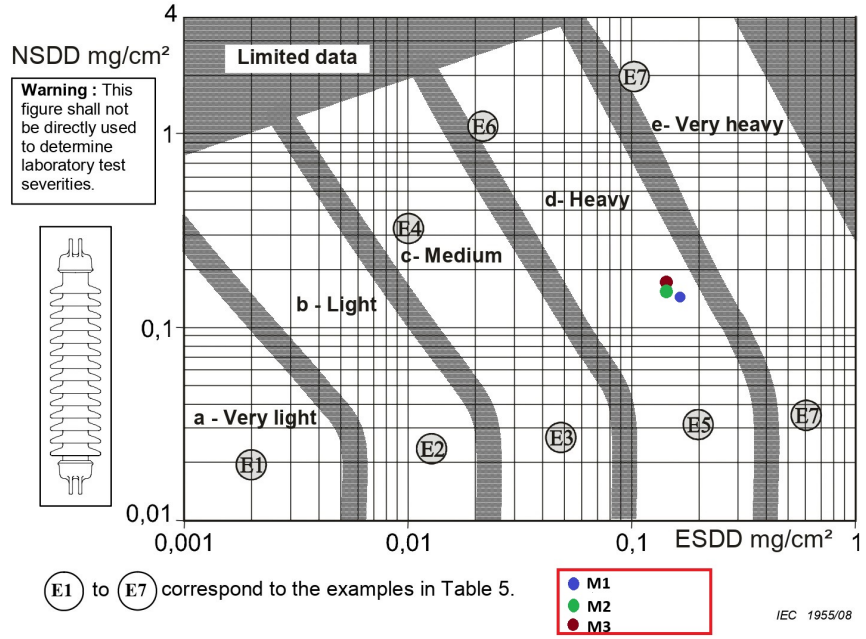


Figura 17: Ubicación de las mediciones individuales (Prueba 2) en el gráfico de clasificación SPS de la norma IEC 60815-1.
Fuente: Elaboración propia

4.4. Aplicación de la contaminación y secado de probetas

Previo a la aplicación de la mezcla contaminante definitiva, fue indispensable realizar un preacondicionamiento físico sobre la superficie de las probetas de silicona. Dado que el elastómero conserva un grado importante de hidrofobicidad que impide la fijación uniforme de líquidos, se estipuló la supresión temporal de esta propiedad. Para ello, se frotó delicadamente el área de cada probeta utilizando una esponja suave impregnada en un barro de caolín puro con agua destilada. Este proceso permitió reducir la repelencia al agua sin generar daños o rayaduras en el material. Tras la aplicación del barro, las muestras fueron enjuagadas con abundante agua destilada para eliminar cualquier exceso de caolín y se dejaron secar por completo a temperatura ambiente.

Una vez con la superficie seca , se procedió a la aplicación de la formulación del contaminante previamente validada . Para garantizar un depósito homogéneo y reproducible, se seleccionó el método de aspersión fina utilizando un pulverizador manual. Esta técnica permite atomizar la mezcla en microgotas, evitando la aglomeración irregular de sólidos que suele ocurrir con métodos de contacto directo, como la aplicación mediante brocha. Se roció la cara de cada muestra hasta alcanzar una película continua, evitando la saturación por escurrimiento.

Posterior a la aspersión, la fijación del contaminante se realizó mediante un proceso de secado natural. Las probetas fueron posicionadas horizontalmente y expuestas a temperatura ambiente durante un periodo ininterrumpido de mínimo 6 horas. Este secado prolongado, libre de corrientes de aire forzadas o choque térmico inducido por hornos, aseguró la evaporación gradual del solvente. Con esto se logró que el caolín y la sal depositada se adhirieran firmemente a la superficie, consolidando una costra sólida y uniforme tal como se muestra en la Figura 18, representativa de las condiciones del entorno E5 .



Figura 18: Probetas con contaminación clase E5.
Fuente: Elaboración propia

4.4.1. Evaluación comparativa mediante contaminación dinámica

Se diseñó una configuración experimental paralela de carácter comparativo. El objetivo de esta variante fue evaluar la respuesta de la silicona cuando la alta carga salina

e inerte, característica de un entorno E5, se introduce de manera fluida y continua sobre la muestra, en lugar de depositarse como una costra estática pre-secada.

Para la ejecución de este ensayo, no se formuló un nuevo contaminante, sino que se reutilizó la misma contaminación E5 creada anteriormente. La diferencia radicó exclusivamente en el método de aplicación, en lugar de recubrir las probetas, ésta se combinó directamente con la solución estandarizada de ensayo (compuesta por agua destilada, $0,1\,\%$ de NH_4Cl y $0,02\,\%$ del agente tensoactivo Triton X-100). La dosificación se realizó implementando una proporción volumétrica estricta de 1:4 de manera de no afectar las bombas con el material no soluble del contaminante.

En esta configuración comparativa, las probetas de silicona se instalaron en el soporte de plano inclinado en su estado completamente limpio. Luego a mezcla combinada fue inyectada de manera continua mediante la bomba peristáltica, respetando las tasas de flujo normativas estipuladas para los distintos niveles de tensión.

4.5. Diseño y Montaje del Circuito de Ensayo Acelerado (+DC-CTI)

Se implementó el montaje del método acelerado +DC-CTI. Dado que los fundamentos teóricos del circuito han sido descritos previamente, esta etapa detalla la configuración de los componentes dentro del laboratorio.

El circuito fue energizado mediante una fuente de tensión continua en polaridad positiva (+DC), la misma utilizada en el ensayo de plano inclinado en corriente continua . La tensión de prueba se ajustó para coincidir con el nivel de $2,5$ kV evaluado en los ensayos de plano inclinado, permitiendo una comparativa directa del desempeño del material bajo el mismo nivel de estrés eléctrico.

Para determinar el valor exacto de la resistencia limitadora de seguridad (*Loaded Fuse Resistor*) empleada en los ensayos a $2,5$ kV, se aplicó la Ley de Ohm con la restricción fundamental de que la corriente máxima de cortocircuito (I_{max}) no superara el umbral térmico de 40 mA.

En primer lugar, se calculó la resistencia total requerida por el circuito (R_{total}) mediante la Ecuación 16:

$$R_{total} = \frac{V_{fuente}}{I_{max}} = \frac{2{,}500\ \text{V}}{0,040\ \text{A}} = 62{,}500\ \Omega \tag{16}$$

La componente resistiva total del circuito está compuesto por la resistencia de balasto normativa ($R_{balasto}$), la resistencia *shunt* para medir la tensión (R_{shunt}) y la resistencia de seguridad a calcular (R_{fuse}). Despejando R_{fuse}, se obtiene la Ecuación 17:

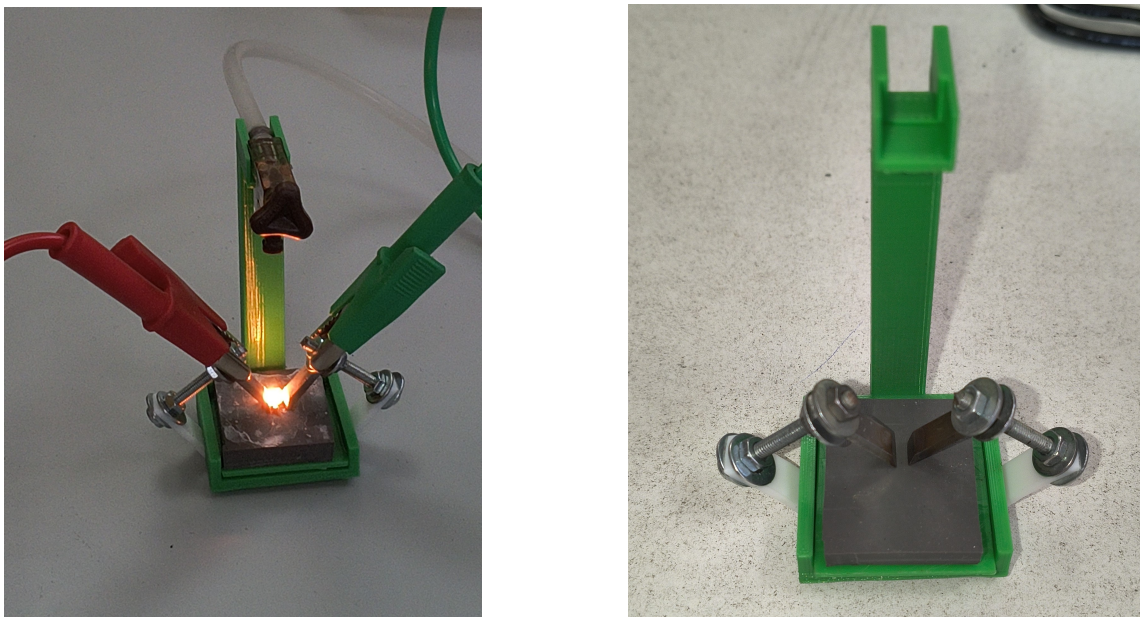
$$R_{fuse} = R_{total} - R_{balasto} - R_{sensor} \tag{17}$$

Sustituyendo los valores correspondientes al nivel de tensión de $2,5$[kV], donde la norma exige un $R_{balasto}$ de 10,000 [Ω] y considerando el sensor R_{sensor} de 100 [Ω]:

$$R_{fuse} = 62{,}500\ \Omega - 10{,}000\ \Omega - 100\ \Omega = 52{,}400\ \Omega \tag{18}$$

Por lo tanto, se determinó y configuró un *Loaded Fuse Resistor* de $52,4$[kΩ] para limitar de forma estricta la corriente y proteger el sistema durante los ensayos a $2,5$[kV].

Se diseñó y fabricó un soporte a medida mediante tecnología de impresión 3D (Figura 19). Esta base permitió anclar firmemente los electrodos y fijar correctamente la distancia entre ellos de 3 [mm]



(a) (b)

Figura 19: Soporte creado para ensayo +DC-CTI.
Fuente: Elaboración propia

A través de la medición de tensión en la resistencia shunt con una sonda conectada a un osciloscopio se logró registrar el comportamiento de la corriente de fuga tras convertir la señal a corriente aplicando la ley de Ohm.

4.6. Envejecimiento UV Acelerado

Con el objetivo de replicar el desgaste severo que experimentarán los aisladores de la línea HVDC Kimal-Lo Aguirre en el Desierto de Atacama , se sometió un grupo de probetas a un proceso de envejecimiento acelerado. Se utilizó la cámara de irradiación del Departamento de Física de la UTFSM, equipada con una lámpara de arco de Mercurio-Xenón que se observa en la Figura 20.



Figura 20: Lámpara de arco de Mercurio-Xenón.
Fuente: Elaboración propia

4.6.1. Montaje de las Probetas

Las muestras de silicona fueron fijadas en un soporte metálico al interior de la cámara, tal como se muestra en la Figura 21, garantizando que la cara de cada probeta quedara expuesta de manera perpendicular a la fuente lumínica. La distancia se calibró rigurosamente a 20 [cm] para asegurar que toda el área de ensayo recibiera una distribución uniforme de la radiación.

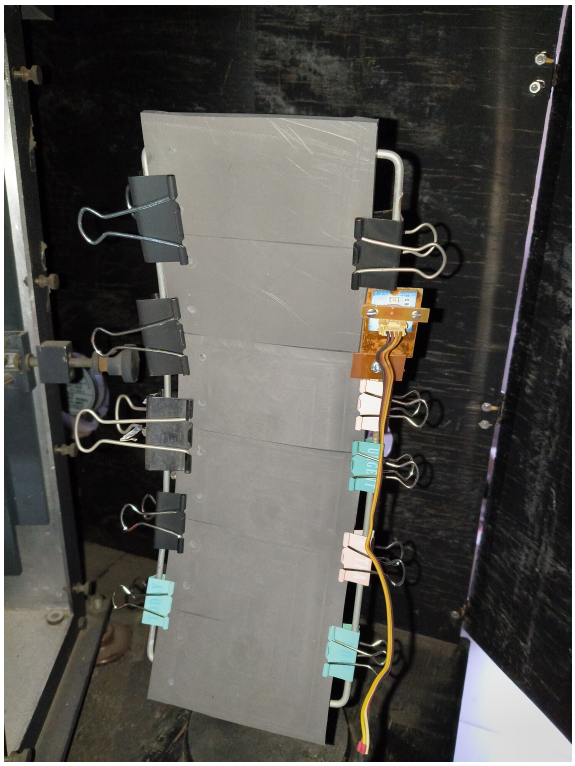


Figura 21: Montaje de las probetas de silicona.
Fuente: Elaboración propia

4.6.2. Ejecución y Equivalencia Temporal

El proceso de envejecimiento se aplicó por un periodo total de 59 días. Por protocolo de seguridad no fue posible realizar el envejecimiento de manera ininterrumpida, por lo que la cámara UV se utilizó por un promedio de 9 horas diarias. Esto resultó en un tiempo total de exposición en laboratorio (t_{lab}) de 531 horas efectivas de radiación.

A partir del factor de aceleración de la Ecuación 9 , se procedió a calcular la equivalencia de este ensayo respecto a las condiciones naturales de operación. El tiempo equivalente en años se obtienen mediante la Ecuación 19:

$$t'_{UV} = t_{lab} \times AF = 531 \text{ h} \times \frac{1{,}96 \text{ años}}{1694 \text{ h}} = 0,614 \text{ años} \tag{19}$$

Por lo que una exposición de radiación UV dentro de la cámara, 9 horas diarias por 59 días equivalen a 0,614 años en el Desierto de Atacama.

4.7. Registro de Datos

La recolección de datos se estructuró mediante un registro tabular. La información se dividió en dos categorías principales, los parámetros operativos de cada configuración y los resultados físicos individuales de cada muestra ensayada.

La cuantificación de la resistencia a la erosión térmica se basó en dos indicadores principales, obtenidos mediante los siguientes instrumentos de medición:

- **Pérdida de Masa:** Cuantificada mediante una balanza analítica de precisión. Se registró el peso de cada probeta antes y después del ensayo para determinar la pérdida global de material por degradación térmica.
- **Profundidad Máxima de Erosión:** Evaluada utilizando un reloj comparador (instrumento medidor de profundidad). Tras limpiar cuidadosamente las probetas para remover cenizas y restos de aislamiento descompuesto sin dañar el polímero intacto, la aguja del instrumento exploró el cráter principal para registrar la máxima penetración vertical del arco eléctrico en milímetros.
- **Corriente de Fuga (Ensayo +DC-CTI):** Se capturó la forma de onda de la corriente de fuga (oscilograma) durante la totalidad del ensayo acelerado. Los datos exportados fueron posteriormente procesados mediante un entorno de cálculo computacional (MATLAB), aplicando un filtro de media móvil para derivar la línea de tendencia promedio de la corriente y evaluar la estabilidad del arco de banda seca.

A continuación, se presentan las estructuras tabulares diseñadas para la estandarización de la recolección de datos durante la campaña experimental. La Tabla 9 consolida las condiciones de prueba, mientras que la Tabla 10 documenta el impacto físico en cada probeta.

Tipo de Tensión	
Nivel de Tensión (kV)	
resistencia de balasto (kΩ)	
Flujo de Líquido / Contaminante	
Hora de Inicio	
Hora de Término	

Tabla 9: Plantilla de registro para los parámetros de configuración eléctrica e hidrodinámica del ensayo.

Probeta N°	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Pérdida de Masa (g)	Profundidad Erosión (mm)
1				
2				
3				
4				
5				

Tabla 10: Plantilla de registro para la variación de masa y erosión física de las muestras ensayadas.

Capítulo 4

5. Resultados y Análisis Comparativo

En este capítulo se presentan y analizan de manera integrada los datos físicos y eléctricos recopilados durante los ensayos experimentales.

5.1. Determinación del nivel de tensión base

5.1.1. Ensayo IPT a 3,5 [kV] AC

Como punto de partida para establecer una línea base de comparación, se ejecutó el ensayo de plano inclinado en corriente alterna a una tensión de 3,5 [kV] sobre probetas limpias.

Tipo de Tensión	AC
Nivel de Tensión (kV)	3,5
Resistencia de balasto (kΩ)	22
Flujo del Líquido (ml/-min)	0,30
Hora de Inicio	10:40
Hora de Término	16:40

Tabla 11: Parámetros y tiempos utilizados en el ensayo de plano inclinado a 3,5 [kV] AC.

Probeta N°	**Peso Inicial (g)**	**Peso Final (g)**	**Pérdida de Masa (g)**	**Profundidad Erosión (mm)**
1	37,870	37,850	0,020	1,008
2	37,950	37,710	0,240	3,270
3	38,200	37,820	0,380	4,360
4	37,770	37,760	0,010	0,602
5	37,870	37,860	0,010	0,008

Tabla 12: Registro de variación de masa y erosión tras el ensayo de plano inclinado a 3,5 [kV] AC.



Figura 22: Muestras de probetas de silicona tras el ensayo de plano inclinado en AC a 3,5 [kV].

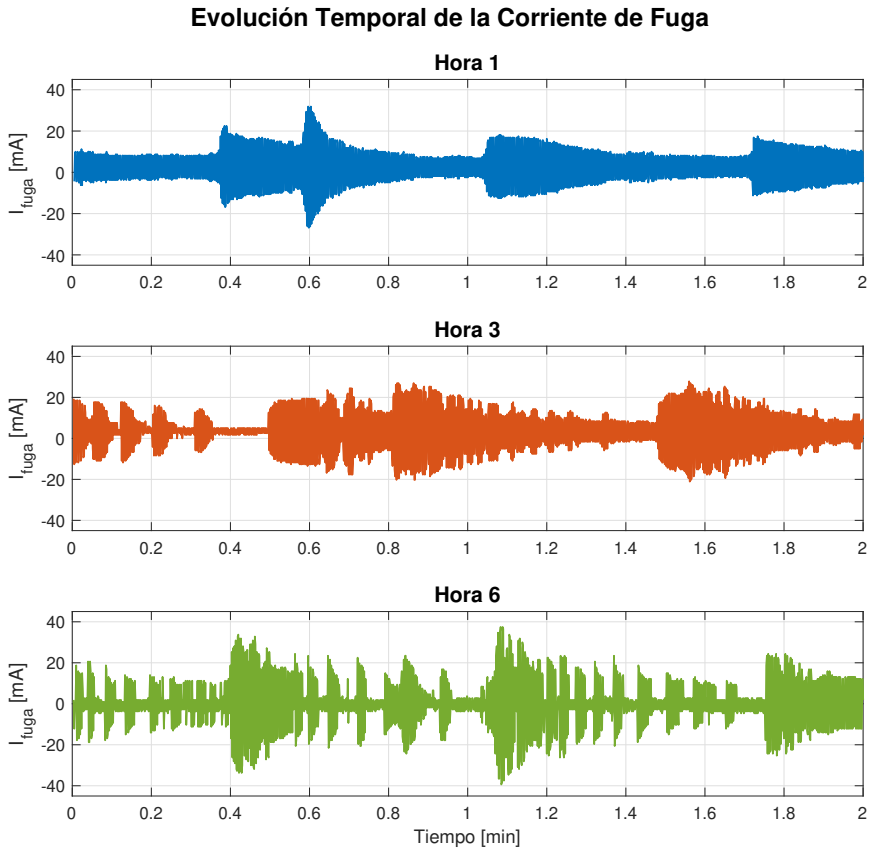


Figura 23: Evolución temporal de la corriente de fuga durante el ensayo de plano inclinado en AC a 3,5 [kV].

Fuente: Elaboración propia

Al evaluar los registros físicos presentados en la Tabla 12, se obtuvo una degradación altamente variable en el grupo de muestras. La pérdida de masa fluctuó desde un valor mínimo de 0,010 [g] (Probetas 4 y 5) hasta un máximo de 0,380 [g] en la

Probeta 3. Asimismo, mientras la Probeta 5 presentó una erosión casi imperceptible de 0,008 [mm], la Probeta 3 registró una profundidad crítica de erosión de 4,360 [mm]. Visualmente, la Figura 22 evidencia este severo desgaste y áreas superficiales blanquecinas a lo largo del canal del caudal.

Respecto a la dinámica eléctrica, la Figura 23 ilustra que los pulsos de corriente de fuga inician con menor amplitud en la primera hora, pero incrementan progresivamente su densidad y magnitud hacia la sexta hora. Aunque la corriente no superó el límite normativo de 60 [mA], el nivel de excavación de 4,360 [mm] representa una erosión critica debido a la casi perforación completa del polímero. Dado que en corriente alterna a 3,5 [kV] el material estuvo muy cerca de fallar por perforación debido a la erosión , someterlo a 3,5 [kV] en corriente continua (+DC) habría provocado la perforación prematura de las muestras, impidiendo evaluar de forma comparativa el efecto de la contaminación y la radiación UV. A raíz de este resultado, se determinó reducir la tensión de prueba a 2,5 [kV] para establecer una línea base viable en todos los ensayos posteriores.

5.2. Evaluación del Caso Base en probetas limpias a 2,5 [kV]

Comparacion entre AC-IPT, +DC-IPT y +DC-CTI

Definida la tensión de 2,5 [kV], se evaluaron probetas limpias para contrastar directamente el efecto del tipo de corriente en plano inclinado (AC frente a +DC) y comparar dichos resultados con el método acelerado (+DC-CTI).

5.2.1. Ensayo de Plano Inclinado a 2,5 [kV] AC (caso base)

Tipo de Tensión	AC
Nivel de Tensión (kV)	2,5
Resistencia de balasto (kΩ)	10
Flujo del Líquido (ml/-min)	0,15
Hora de Inicio	10:00
Hora de Término	16:00

Tabla 13: Parámetros y tiempos utilizados en el ensayo de plano inclinado a 2,5 [kV] AC.

Probeta N°	**Peso Inicial (g)**	**Peso Final (g)**	**Pérdida de Masa (g)**	**Profundidad Erosión (mm)**
1	38,780	38,750	0,030	0,000
2	37,810	37,780	0,030	0,083
3	38,710	38,680	0,030	0,000
4	38,190	38,170	0,020	0,000
5	38,750	38,720	0,030	0,000

Tabla 14: Registro de variación de masa y erosión tras el ensayo de plano inclinado a 2,5 [kV] AC.



Figura 24: Muestras de probetas de silicona tras el ensayo de plano inclinado en AC a 2,5 [kV].

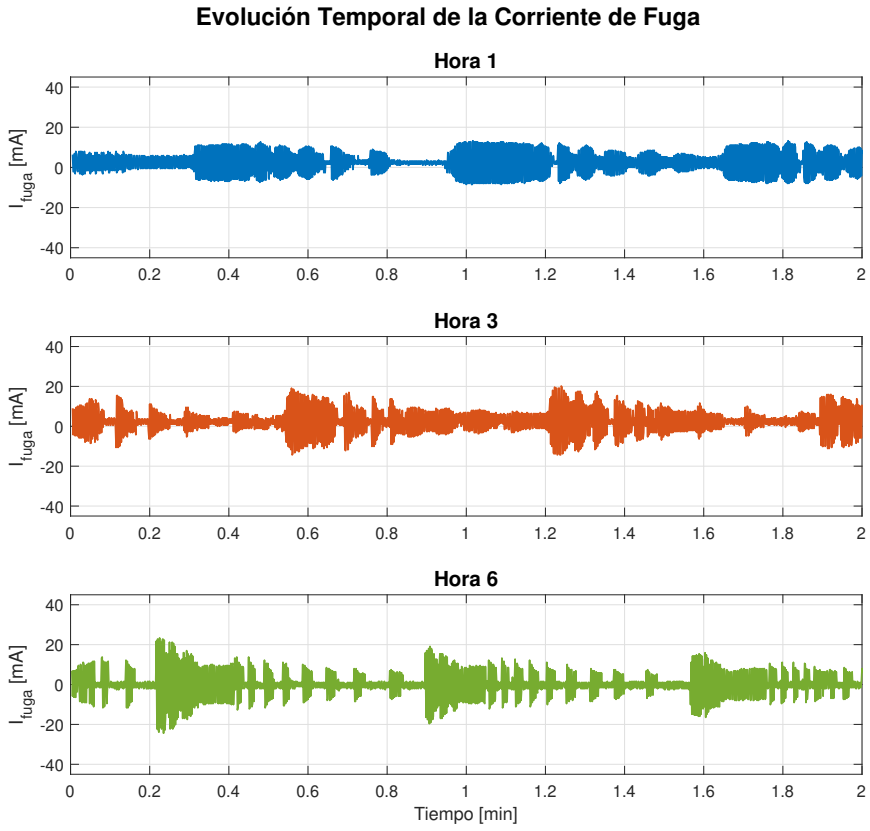


Figura 25: Evolución temporal de la corriente de fuga durante el ensayo de plano inclinado en AC a 2,5 [kV].

Fuente: Elaboración propia

Tras reducir la tensión a 2,5 [kV] en corriente alterna (Tabla 14), se evidenció una drástica disminución en la degradación del material. La pérdida de masa se mantuvo en un rango mínimo y uniforme, variando únicamente entre 0,020 [g] y 0,030 [g]. En cuanto a la penetración del daño, la profundidad de erosión fue de 0,000 [mm] en

cuatro de las cinco probetas, registrándose un valor máximo de apenas 0,083 [mm] en la Probeta 2. En concordancia, la Figura 24 muestra probetas sin surcos profundos, apreciándose solo decoloraciones superficiales, mientras que la Figura 25 muestra pulsos intermitentes que operan en rangos de corriente bajos (menores a 20 [mA]) .

5.2.2. Ensayo de Plano Inclinado a 2,5 [kV] +DC (Caso base)

Tipo de Tensión	+DC
Nivel de Tensión (kV)	2,5
Resistencia de balasto (kΩ)	10
Flujo del Líquido (ml/-min)	0,15
Hora de Inicio	08:55
Hora de Término	14:55

Tabla 15: Parámetros y tiempos utilizados en el ensayo de plano inclinado a 2,5 [kV] +DC.

Probeta N°	**Peso Inicial (g)**	**Peso Final (g)**	**Pérdida de Masa (g)**	**Profundidad Erosión (mm)**
1	38,320	38,220	0,100	1,459
2	38,150	38,110	0,040	0,297
3	38,680	38,610	0,070	0,947
4	38,560	38,510	0,050	0,606
5	38,480	38,190	0,290	2,754

Tabla 16: Registro de variación de masa y erosión tras el ensayo de plano inclinado a 2,5 [kV] +DC.



Figura 26: Muestras de probetas de silicona tras el ensayo de plano inclinado en +DC a 2,5 [kV].

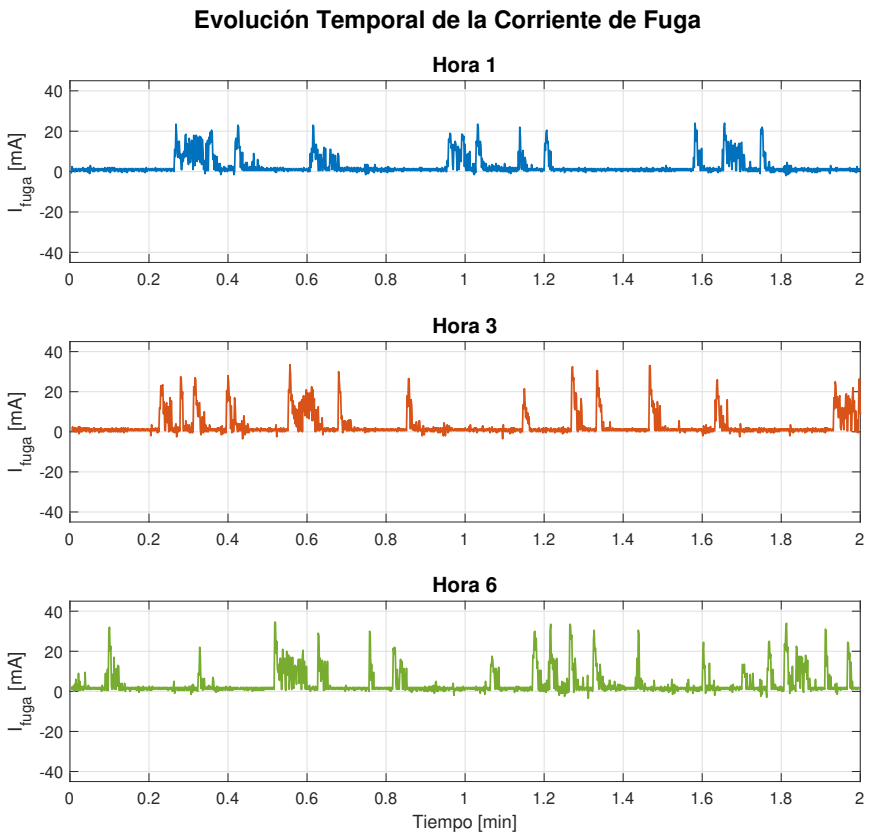


Figura 27: Evolución temporal de la corriente de fuga durante el ensayo de plano inclinado en +DC a 2,5 [kV].

Fuente: Elaboración propia

Al contrastar las Tablas 14 y 16 bajo la misma tensión de 2,5 [kV], se evidencia un contraste drástico en la severidad del daño. Mientras en AC la pérdida de masa máxima fue de apenas 0,030 [g] y la erosión máxima alcanzó solo 0,083 [mm], al

aplicar corriente continua (+DC) la pérdida de masa se elevó a un rango de entre 0,040 [g] (Probeta 2) y un máximo de 0,290 [g] (Probeta 5). Del mismo modo, la profundidad de erosión en +DC osciló entre un mínimo de 0,297 [mm] y un máximo crítico de 2,754 [mm] en la Probeta 5.

Estos resultados obedece a la naturaleza termodinámica de las descargas. En AC, la onda de tensión presenta cruces por cero, facilitando la extinción intermitente del arco y otorgando pequeños periodos de relajación térmica que evitan que el polímero alcance temperaturas críticas. En contraparte, la ausencia de cruces por cero en +DC impide la extinción autónoma de los arcos, generando ráfagas intensas de hasta 30 [mA] (Figura 27) que inyectan un calor ininterrumpido acelerando la erosión. Además, se ve reflejado en la Figura 26 un camino conductor mucho más ancho y oscurecido que el observado en corriente alterna (Figura 24), debido al aumento del estrés térmico acumulado y a la permanencia de los arcos de banda seca. Las descargas no se extinguen naturalmente y disipan una mayor cantidad de calor, degradando térmicamente un área superficial más extensa antes de concentrar la erosión profunda en la parte inferior inferior de las probetas.

Asimismo, al analizar la dispersión de los datos entre ambos casos a 2,5 [kV], se observa un contraste fundamental, en AC el comportamiento fue sumamente constante en las cinco muestras (erosión entre 0,000 y 0,083 [mm]), mientras que en +DC el daño varió de forma errática entre 0,297 [mm] y 2,754 [mm] bajo idénticas condiciones. Esta inestabilidad se alinea exactamente con los recientes hallazgos del grupo de trabajo D1.72 del CIGRE (TB 998) [14], donde se demostró que el ensayo de plano inclinado a voltaje constante en DC presenta serias deficiencias de reproducibilidad debido al movimiento aleatorio del arco, limitando su utilidad como herramienta de caracterización confiable.

5.2.3. Ensayo Acelerado +DC-CTI a 2,5 [kV] (Caso Base)

A continuación, se presentan en las Tablas 17 y 18 los resultados obtenidos al evaluar las probetas en estado base mediante el método acelerado +DC-CTI a 2,5 [kV].

Tipo de Tensión	+DC
Nivel de Tensión (kV)	2,5
Resistencia de balasto (kΩ)	10
Resistencia Fuse (kΩ)	52,4
Contaminante	1 gota

Tabla 17: Parámetros utilizados en el ensayo +DC-CTI a 2,5 [kV].

Probeta N°	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Pérdida de Masa (g)	Profundidad Erosión (mm)
1	5,674	5,674	0,000	0,000
2	5,871	5,869	0,002	0,184
3	5,686	5,680	0,006	0,415
4	5,880	5,877	0,003	0,154
5	5,944	5,941	0,003	0,234

Tabla 18: Registro de variación de masa y erosión tras el ensayo acelerado +DC-CTI a 2,5 [kV].



(a) N° 1 (b) N° 2 (c) N° 3 (d) N° 4 (e) N° 5

Figura 28: Muestras de probetas de silicona tras el ensayo +DC-CTI a 2,5 [kV].

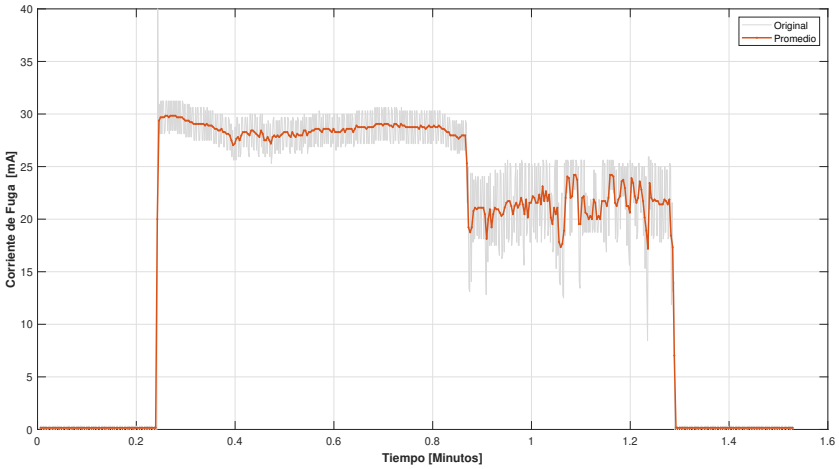


Figura 29: Evolución temporal de la corriente de fuga durante el ensayo +DC-CTI a 2,5 [kV].

Fuente: Elaboración propia

Al comparar el método +DC-CTI con los ensayos de plano inclinado en +DC (Tabla 19), se deben tener presentes sus diferencias geométricas y temporales. Mientras en

el plano inclinado (IPT) la tensión de 2,5 [kV] se aplica sobre 50 [mm] durante 6 horas, en el +DC-CTI la separación se reduce a 3 [mm], durante aproximadamente 60 segundos.

Debido a su corta duración y al daño altamente puntual entre los electrodos (Figura 28), la pérdida de masa en el +DC-CTI fue ínfima (entre 0,000 [g] y un máximo de 0,006 [g] en la Probeta 3), mientras que la profundidad de erosión varió entre 0,000 [mm] y un máximo de 0,415 [mm]. La validación del método +DC-CTI radica en el análisis de la corriente de fuga (Figura 29):

- **Primera fase (Conducción líquida):** Ascenso abrupto cercano a los 30 [mA] al aplicar la gota contaminante, manteniendo un bloque estable mientras el líquido se calienta.
- **Segunda fase (Arco de banda seca):** Tras evaporarse la gota, la corriente disminuye y oscila en valores entre los 20 a 25 [mA], evidenciando una lucha del material por extinguir el arco.
- **Tercera fase (Extinción del arco):** Tras aproximadamente un minuto de actividad continua, la corriente cae abruptamente a 0 [mA] de forma definitiva, demostrando una rápida recuperación dieléctrica de la silicona limpia que apaga el arco y evita una degradación mayor.

5.2.4. Cuadro comparativo entre AC-IPT, +DC-IPT y +DC-CTI en 2,5 [kV] en condición base

A continuación en la Tabla 19 se muestra la síntesis y comparación del desempeño obtenido de las muestras de silicona en los tres ensayos realizados en probetas en condición base.

(Caso Base 2,5 kV)	AC-IPT	+DC-IPT	+DC-CTI
Duración / Separación gap	6 horas / 50 mm	6 horas / 50 mm	∼1 minuto / 3 mm
Pérdida de masa Mín. (g)	0,020	0,040	0,000
Pérdida de masa Máx. (g)	0,030	**0,290**	0,006
Prof. de erosión Mín. (mm)	0,000	0,297	0,000
Prof. de erosión Máx. (mm)	0,083	**2,754**	0,415
Comportamiento eléctrico y físico	Cruces por cero apagan el arco, daño casi nulo y alta uniformidad entre los resultados.	Sin cruce por cero, arcos anclados generan erosión profunda y alta dispersión entre las muestras.	Arco estable que se extingue a 0 [mA] en ∼1 min, daño puntual controlado.

Tabla 19: Cuadro comparativo del Caso Base entre AC-IPT, +DC-IPT y +DC-CTI.

5.3. Efecto de la contaminación superficial severa (Clase E5) a 2,5 [kV]

En esta sección se analiza el impacto de la contaminación Clase E5 representativa del Desierto de Atacama. En primer lugar, utilizando el ensayo en corriente continua (+DC-IPT), se comparan los dos métodos de aplicación del contaminante (capa sólida pre-secada y la mezcla dinámica en el líquido Triton X-100). Posteriormente, se evalúa el efecto de la capa sólida en corriente alterna y en el método acelerado +DC-CTI.

5.3.1. Comparación de los métodos de contaminación en +DC-IPT a 2,5 [kV]

Capa Sólida Pre-secada vs Mezcla Dinámica en Triton X-100

En las Tablas 20 y 21 se presentan los resultados del ensayo +DC-IPT con la contaminación E5 adherida como capa sólida, mientras que en las Tablas 22 y 23 se muestran los registros cuando la contaminación E5 fue aplicada de forma fluida junto al Triton X-100 sobre probetas limpias.

Tipo de Tensión	+DC
Nivel de Tensión (kV)	2,5
Resistencia de balasto (kΩ)	10
Flujo del Líquido (ml/-min)	0,15
Hora de Inicio	09:00
Hora de Término	15:00

Tabla 20: Parámetros y tiempos utilizados en el ensayo de plano inclinado a 2,5 [kV] +DC con contaminación sólida Clase E5.

Probeta N°	**Peso Inicial (g)**	**Peso Final (g)**	**Pérdida de Masa (g)**	**Profundidad Erosión (mm)**
1	36,810	36,660	0,150	1,293
2	37,710	37,370	0,340	3,163
3	38,110	37,990	0,120	0,453
4	37,000	36,670	0,330	3,611
5	38,420	38,110	0,310	2,453

Tabla 21: Registro de variación de masa y erosión tras el ensayo de plano inclinado a 2,5 [kV] +DC con contaminación sólida E5.



Figura 30: Muestras de probetas de silicona tras el ensayo de plano inclinado en +DC a 2,5 [kV] más contaminación sólida Clase E5.

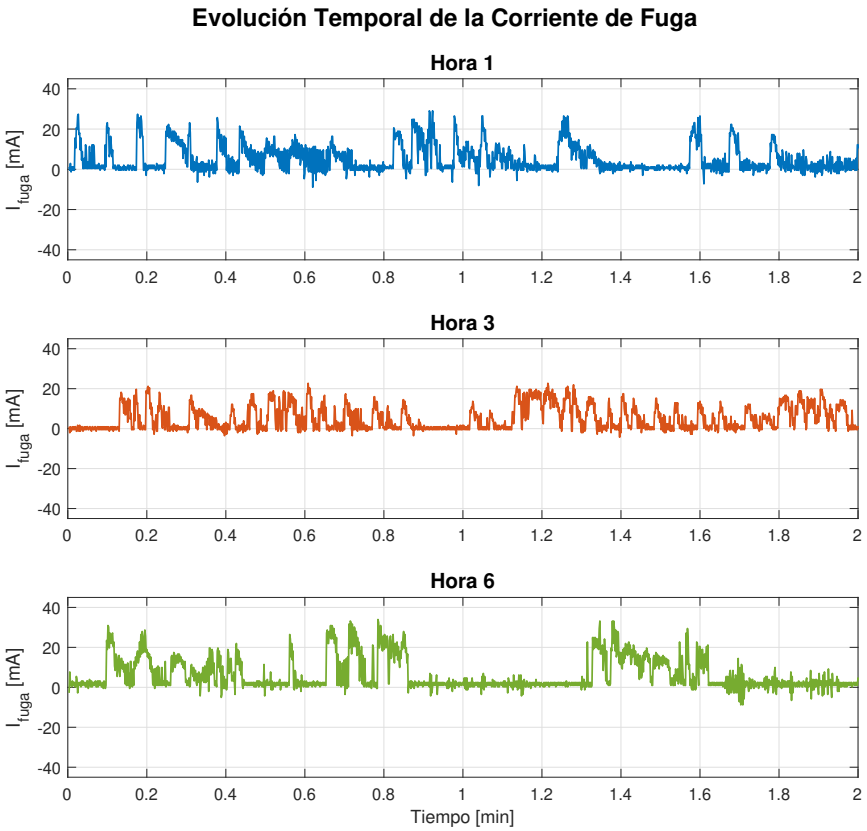


Figura 31: Evolución temporal de la corriente de fuga durante el ensayo de plano inclinado en +DC a 2,5 [kV] con contaminación sólida Clase E5.

Tipo de Tensión	+DC
Nivel de Tensión (kV)	2,5
Resistencia de balasto (kΩ)	10
Flujo del Líquido (ml/-min)	0,15
Hora de Inicio	08:50
Hora de Término	14:50

Tabla 22: Parámetros y tiempos utilizados en el ensayo de plano inclinado a 2,5 [kV] +DC con mezcla fluida de contaminación E5 y Triton X-100.

Probeta N°	**Peso Inicial (g)**	**Peso Final (g)**	**Pérdida de Masa (g)**	**Profundidad Erosión (mm)**
1	37,670	37,660	0,010	0,198
2	38,400	38,380	0,020	0,182
3	37,510	37,490	0,020	0,194
4	37,910	37,900	0,010	0,109
5	37,150	37,140	0,010	0,182

Tabla 23: Registro de variación de masa y erosión tras el ensayo de plano inclinado a 2,5 [kV] +DC con mezcla fluida de contaminación E5 y Triton X-100.



Figura 32: Muestras de probetas de silicona tras el ensayo de plano inclinado en +DC a 2,5 [kV] con mezcla fluida de contaminación E5 y Triton X-100.

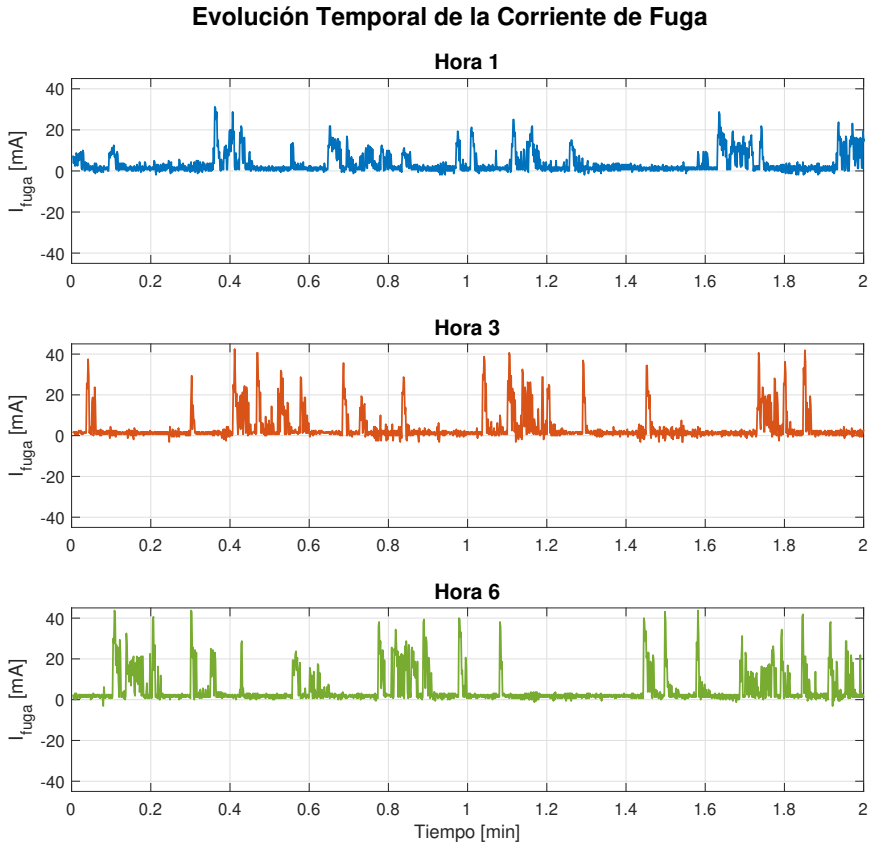


Figura 33: Evolución temporal de la corriente de fuga durante el ensayo de plano inclinado en +DC a 2,5 [kV] con contaminación Clase E5 aplicada en el Triton X-100.

Fuente: Elaboración propia

5.3.2. Cuadro comparativo de los métodos de aplicación de contaminación E5 en +DC-IPT

En la Tabla 24 se contrastan ambas modalidades frente al caso limpio en +DC. Cuando la contaminación E5 se aplica como capa sólida pre-secada (Tabla 21), la degradación alcanza niveles extremos, la pérdida de masa se elevó a un rango de entre 0,120 [g] y un máximo de 0,340 [g] (Probeta 2), mientras que la profundidad de erosión varió entre 0,453 [mm] y una perforación crítica de 3,611 [mm] en la Probeta 4 (Figura 30). Esto se explica porque la costra de caolín actúa como una esponja porosa que retiene la humedad, impidiendo que los arcos se extingan y forzando un anclaje térmico continuo con bloques densos de corriente de 30 a 40 [mA] desde la primera hora (Figura 31).

Por el contrario, cuando la misma contaminación E5 se introduce de forma dinámica disuelta en el Triton X-100 sobre probetas limpias (Tabla 23), el daño cae drásticamente, la pérdida de masa fluctuó solo entre 0,010 [g] y 0,020 [g], y la profundidad de erosión se mantuvo entre 0,109 [mm] y un máximo de apenas 0,198 [mm] (Figura 32). Aunque el líquido más salino genera picos de corriente cercanos a los 40 [mA]

(Figura 33), el flujo continuo arrastra los contaminantes sobre la superficie hidrofóbica sin formar una costra estática que ancle el arco. Comprobado que el verdadero riesgo de falla reside en la acumulación estática pre-secada, se determinó utilizar exclusivamente la contaminación de capa sólida E5 para el resto de los ensayos.

(+DC-IPT 2,5 kV)	**+DC(Base)**	**+DC con E5 Dinámica (en Triton X-100)**	**+DC con E5 Capa Sólida Pre-secada**
Pérdida de masa Mín. (g)	0,040	0,010	0,120
Pérdida de masa Máx. (g)	0,290	0,020	**0,340**
Prof. de erosión Mín. (mm)	0,297	0,109	0,453
Prof. de erosión Máx. (mm)	2,754	0,198	**3,611**
Comportamiento observado	Anclaje moderado del arco. La corriente llega a valores entre los 30 a 40 [mA] en la hora 3 .	El flujo lava y arrastra las partículas, no hay anclaje del arco. La corriente llega a valores cercanos a 40 [mA] debido a la sal de la E5 pero no afecta a la superficie del polímero.	La costra de caolín retiene humedad y ancla el arco de corriente en valores entre 30 a 40 [mA] desde el inicio del ensayo.

Tabla 24: Cuadro comparativo del método de aplicación de contaminación E5 en plano inclinado (+DC a 2,5 [kV]).

5.3.3. Ensayo de Plano Inclinado a 2,5 [kV] AC con Capa Sólida E5 y comparación con caso base

En las Tablas 25 y 26 se detallan los registros al someter probetas con capa sólida Clase E5 a corriente alterna (AC) a 2,5 [kV].

Tipo de Tensión	AC
Nivel de Tensión (kV)	2,5
Resistencia de balasto (kΩ)	10
Flujo del Líquido (ml/-min)	0,15
Hora de Inicio	09:10
Hora de Término	15:10

Tabla 25: Parámetros y tiempos utilizados en el ensayo de plano inclinado a 2,5 [kV] AC con contaminación sólida Clase E5.

Probeta N°	**Peso Inicial (g)**	**Peso Final (g)**	**Pérdida de Masa (g)**	**Profundidad Erosión (mm)**
1	38,090	38,050	0,040	0,127
2	37,960	37,930	0,030	0,305
3	38,300	38,260	0,040	0,013
4	37,850	37,820	0,030	0,001
5	37,950	37,910	0,040	0,273

Tabla 26: Registro de variación de masa y erosión tras el ensayo de plano inclinado a 2,5 [kV] AC con contaminación E5.



Figura 34: Muestras de probetas de silicona tras el ensayo de plano inclinado en AC a 2,5 [kV] con contaminación sólida Clase E5.

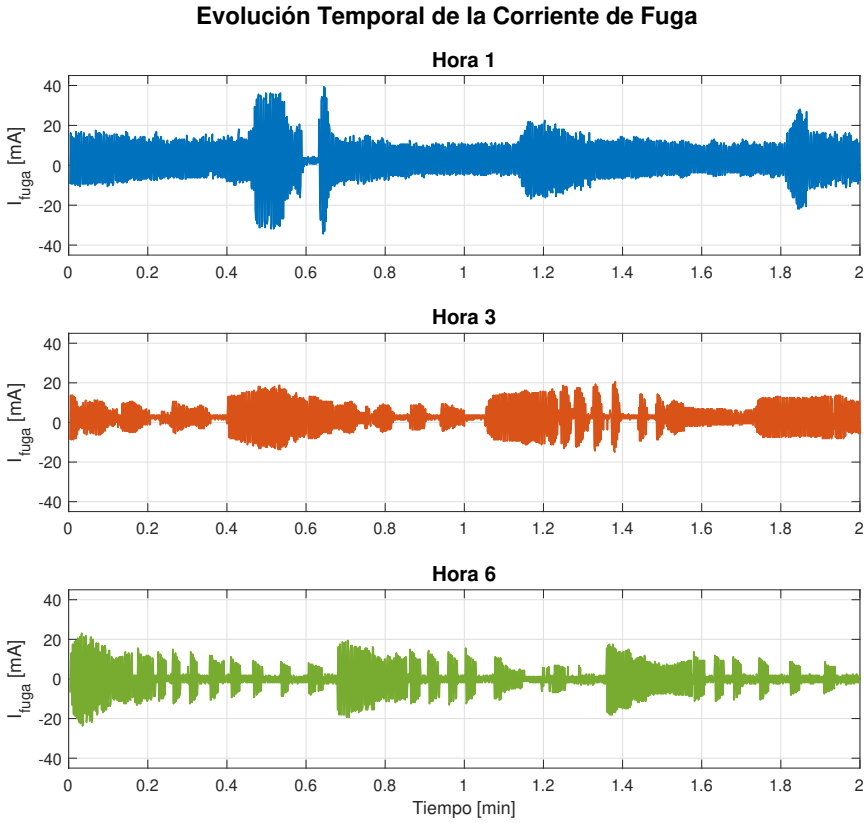


Figura 35: Evolución temporal de la corriente de fuga durante el ensayo de plano inclinado en AC a 2,5 [kV] con contaminación Clase E5.
Fuente: Elaboración propia

Al observar el desempeño en corriente alterna sin contaminación (Tabla 14) frente al grupo con capa sólida E5 (Tabla 26), resumidos en la Tabla 27, se aprecia que la costra contaminante incrementa ligeramente el desgaste superficial, pero sin comprometer la integridad de las probetas. La pérdida de masa pasó de un rango de 0,020–0,030 [g] (AC limpio) a 0,030–0,040 [g] (AC con E5), mientras que la profundidad máxima de erosión subió de 0,083 [mm] a 0,305 [mm] (Probeta 2), con un mínimo de apenas 0,001 [mm] en la Probeta 4. En los oscilogramas de la Figura 35, se observa que durante la Hora 1 la disolución de la sal en la capa E5 genera picos de corriente de hasta 40 [mA] (superiores a los del caso AC limpio), sin embargo, hacia la tercera y sexta hora la corriente disminuye a medida que el flujo lava el canal central, y la interrupción constante de los cruces por cero en AC evita la concentración sostenida de calor.

(AC-IPT a 2,5 kV)	AC (Caso Base)	AC Contaminado (Capa Sólida E5)
Pérdida de masa Mín. (g)	0,020	0,030
Pérdida de masa Máx. (g)	0,030	0,040
Prof. de erosión Mín. (mm)	0,000	0,001
Prof. de erosión Máx. (mm)	0,083	**0,305**
Evolución de la corriente de fuga	Amplitud de corriente baja en la Hora 1 que aumenta levemente hacia la Hora 6 (< 20 mA).	Picos altos en la Hora 1 (~ 40 mA por la sal en la contaminación E5) que decaen en Horas 3 y 6 por lavado.

Tabla 27: Comparación del comportamiento en Corriente Alterna (AC-IPT a 2,5 [kV]): Probetas limpias vs. Probetas con contaminación sólida E5.

5.3.4. Ensayo Acelerado +DC-CTI a 2,5 [kV] con Capa Sólida E5

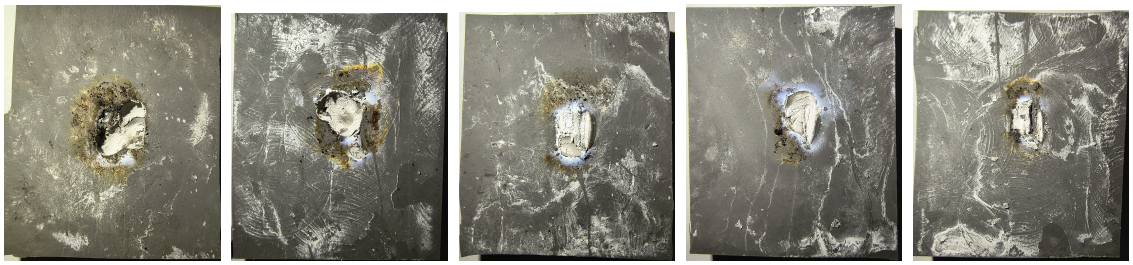
A continuación, se exponen en las Tablas 28 y 29 los resultados de someter las probetas recubiertas con capa sólida E5 al método acelerado +DC-CTI a 2,5 [kV].

Tipo de Tensión	+DC
Nivel de Tensión (kV)	2,5
Resistencia de balasto (kΩ)	10
Resistencia Fuse (kΩ)	52,4
Contaminante	1 gota sobre capa E5

Tabla 28: Parámetros utilizados en el ensayo +DC-CTI a 2,5 [kV] con contaminación sólida Clase E5.

Probeta N°	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Pérdida de Masa (g)	Profundidad Erosión (mm)
1	5,975	5,907	0,068	1,779
2	6,030	5,944	0,086	1,314
3	5,760	5,745	0,015	0,393
4	5,772	5,754	0,018	0,376
5	5,852	5,841	0,011	0,303

Tabla 29: Registro de variación de masa y erosión tras el ensayo acelerado +DC-CTI a 2,5 [kV] con contaminación E5.



(a) N° 1 (b) N° 2 (c) N° 3 (d) N° 4 (e) N° 5

Figura 36: Muestras de probetas de silicona tras el ensayo +DC-CTI a 2,5 [kV] con contaminación sólida Clase E5.

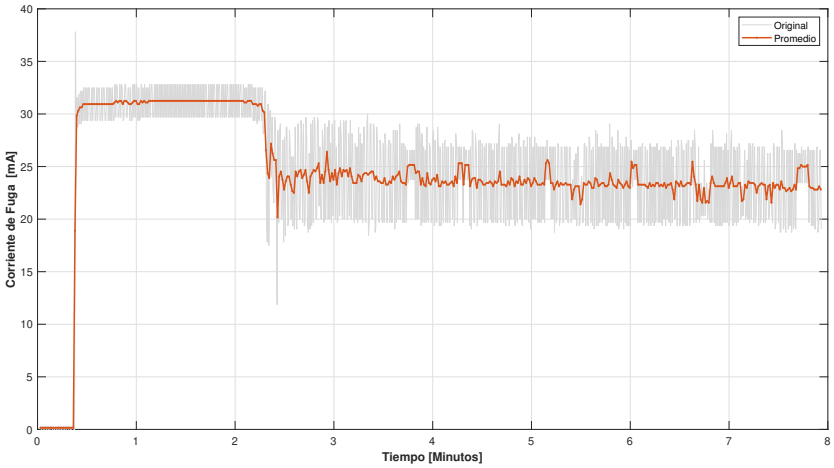


Figura 37: Evolución temporal de la corriente de fuga durante el ensayo +DC-CTI a 2,5 [kV] con contaminación sólida Clase E5.
Fuente: Elaboración propia

En el +DC-CTI con capa E5, la pérdida de masa se incrementó a un rango de entre 0,011 [g] y un máximo de 0,086 [g] (Probeta 2), mientras que la profundidad de erosión varió desde un mínimo de 0,303 [mm] hasta alcanzar una perforación severa

de 1,779 [mm] en la Probeta 1 (Figura 36), cuadruplicando la erosión máxima del caso base limpio (0,415 [mm]).

El oscilograma de la Figura 37 revela el efecto físico de la contaminación E5 sobre las tres fases del ensayo +DC-CTI:

- En la **primera fase**, la costra porosa retiene el electrolito e impide su evaporación rápida, prolongando la conducción líquida durante casi 2 minutos a aproximadamente 30 [mA].
- En la **segunda fase**, al formarse la banda seca, la costra de contaminante sirve como punto de estancamiento y fuerza el anclaje del arco en un bloque oscilante cercano a los 25 [mA].
- En la **tercera fase**, a diferencia de la probeta limpia que apagó el arco al minuto, el material con capa E5 es incapaz de extinguir el arco de manera autónoma, la corriente nunca cae a cero, manteniendo una descarga ininterrumpida por más de 8 minutos hasta el corte del ensayo, fundiendo localmente la silicona.

5.3.5. comparación de métodos de ensayo bajo contaminación clase E5

En la Tabla30 se muestra el resumen comparativo entre los 3 métodos ensayos aplicados en probetas contaminadas con capa solida con contaminación de clase E5.

(Capa Sólida E5)	**AC-IPT + E5 (2,5 kV)**	**+DC-IPT + E5 (2,5 kV)**	**+DC-CTI + E5 (2,5 kV)**
Pérdida de masa Mín. (g)	0,030	0,120	0,011
Pérdida de masa Máx. (g)	0,040	**0,340**	0,086
Prof. de erosión Mín. (mm)	0,001	0,453	0,303
Prof. de erosión Máx. (mm)	0,305	**3,611**	1,779
Comportamiento observado	Cruces por cero y lavado mitigan el daño a pesar de la capa E5.	La costra E5 retiene humedad y ancla el arco continuo, erosión crítica.	Fase líquida extensa por aproximadente 2 minutos y arco de banda seca anclado cercano a 25 [mA] que no se logra extinguir.

Tabla 30: Cuadro comparativo del impacto de la contaminación sólida Clase E5 en AC-IPT, +DC-IPT y +DC-CTI a 2,5 [kV].

5.4. Impacto del envejecimiento por radiación UV y su efecto combinado con contaminación E5 a 2,5 [kV]

A continuación, se evalúa el desempeño de las probetas sometidas previamente a 531 horas de envejecimiento UV equivalentes a 0,614 años de exposición en el Desierto de Atacama. En primer lugar, se presentan de manera secuencial los ensayos en plano inclinado bajo corriente continua (+DC-IPT solo con envejecimiento UV y combinado UV + E5). Posteriormente, se evalúa el efecto del envejecimiento UV en el método acelerado (+DC-CTI), contrastando los resultados de ambas metodologías.

5.4.1. Ensayo de Plano Inclinado a 2,5 [kV] +DC con Envejecimiento UV

En las Tablas 31 y 32 se presentan los parámetros de configuración y los registros físicos obtenidos al evaluar las tres muestras envejecidas por radiación UV sin contaminación sólida previa.

Tipo de Tensión	+DC
Nivel de Tensión (kV)	2,5
Resistencia de balasto (kΩ)	10
Flujo del Líquido (ml/-min)	0,15
Hora de Inicio	09:30
Hora de Término	15:30

Tabla 31: Parámetros utilizados en el ensayo de plano inclinado a 2,5 [kV] +DC con probetas sometidas a envejecimiento UV.

Probeta N°	**Peso Inicial (g)**	**Peso Final (g)**	**Pérdida de Masa (g)**	**Profundidad Erosión (mm)**
1	37,780	37,590	0,190	0,652
2	37,840	37,640	0,200	1,311
3	38,120	37,880	0,240	1,711

Tabla 32: Registro de variación de masa y erosión tras el ensayo de plano inclinado a 2,5 [kV] +DC en muestras con envejecimiento UV.

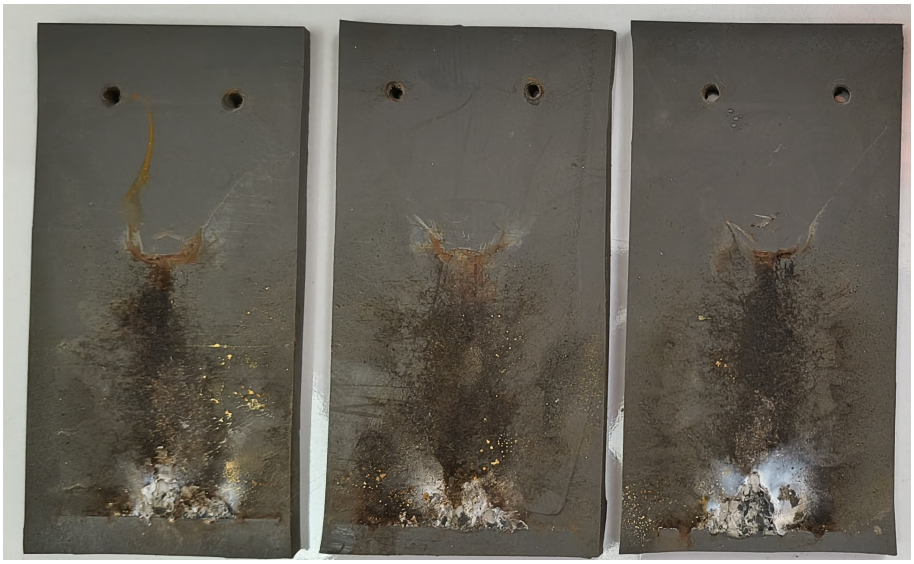


Figura 38: Muestras de probetas de silicona tras el ensayo de plano inclinado en +DC a 2,5 [kV] con envejecimiento UV.

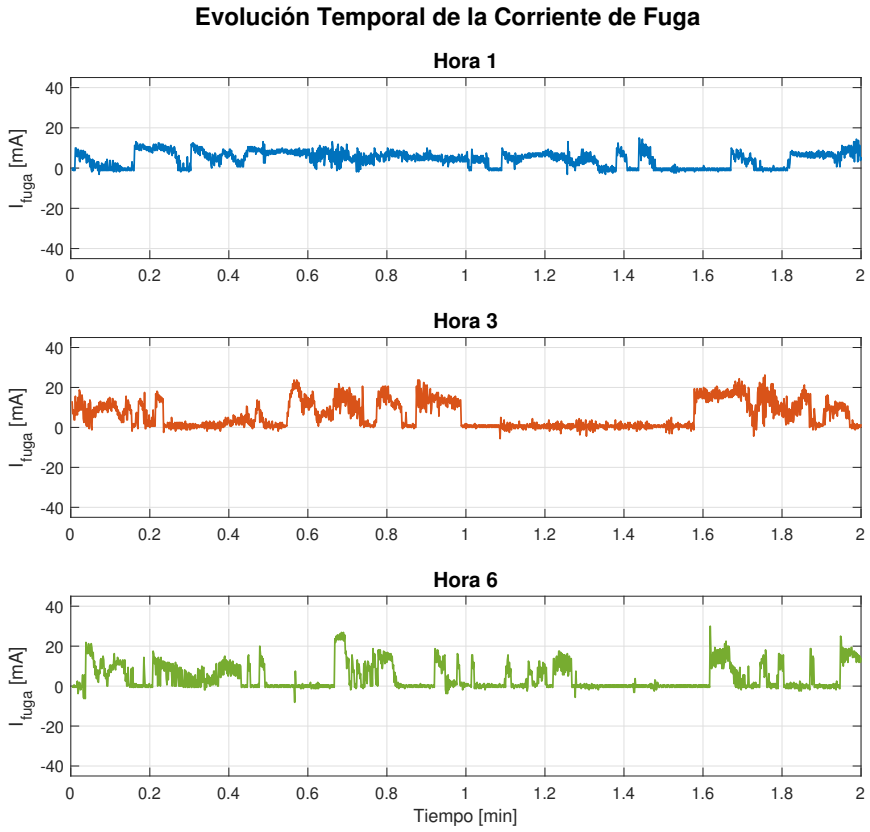


Figura 39: Evolución temporal de la corriente de fuga durante el ensayo de plano inclinado en +DC a 2,5 [kV] con envejecimiento UV.
Fuente: Elaboración propia

Al evaluar los registros físicos de la Tabla 32, se observa una degradación masiva

consistente en las tres probetas ensayadas, con una pérdida de masa que varió entre un mínimo de 0,190 [g] (Probeta 1) y un máximo de 0,240 [g] (Probeta 3). En cuanto a la profundidad de erosión, las penetraciones oscilaron desde 0,652 [mm] hasta alcanzar un valor máximo de 1,711 [mm] en la Probeta 3. Visualmente (Figura 38), las muestras exhiben una franja central severamente oscurecida y más ensanchada que en las probetas en estado limpio, concentrando la erosión hacia la mitad inferior de la placa. Por su parte, los oscilogramas de la Figura 39 muestran pulsos de 10 a 15 [mA] durante la primera hora, los cuales evolucionan hacia ráfagas de hasta 30 [mA] en la tercera y sexta hora, pero intercaladas constantemente con marcados periodos de inactividad donde la corriente cae a cero.

5.4.2. Ensayo de Plano Inclinado a 2,5 [kV] +DC Combinado (Envejecimiento UV y Contaminación E5)

En las Tablas 33 y 34 se consignan las condiciones y resultados de las dos muestras envejecidas por radiación UV a las que posteriormente se les aplicó la capa sólida de contaminación Clase E5.

Tipo de Tensión	+DC (UV y Contaminación E5)
Nivel de Tensión (kV)	2,5
Resistencia de balasto (kΩ)	10
Flujo del Líquido (ml/-min)	0,15
Hora de Inicio	09:30
Hora de Término	15:30

Tabla 33: Parámetros utilizados en el ensayo de plano inclinado a 2,5 [kV] +DC con envejecimiento UV y contaminación sólida Clase E5.

Probeta N°	**Peso Inicial (g)**	**Peso Final (g)**	**Pérdida de Masa (g)**	**Profundidad Erosión (mm)**
1	37,540	37,370	0,170	0,945
2	37,720	37,468	0,252	1,561

Tabla 34: Registro de variación de masa y erosión tras el ensayo de plano inclinado a 2,5 [kV] +DC en muestras con envejecimiento UV y contaminación E5.



Figura 40: Muestras de probetas de silicona tras el ensayo de plano inclinado en +DC a 2,5 [kV] con envejecimiento UV y contaminación sólida Clase E5.
Fuente: Elaboración propia

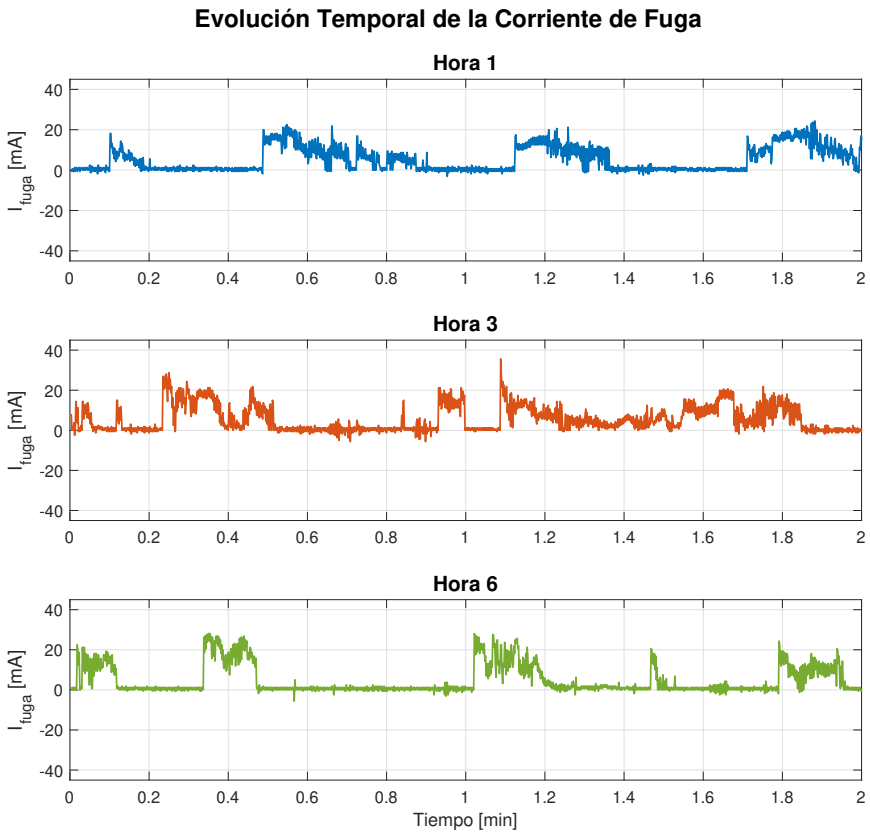


Figura 41: Evolución temporal de la corriente de fuga durante el ensayo de plano inclinado en +DC a 2,5 [kV] con envejecimiento UV y contaminación Clase E5.
Fuente: Elaboración propia

Bajo la acción combinada de envejecimiento UV y contaminación sólida E5 (Tabla 34), la pérdida de masa registrada fue de 0,170 [g] en la Probeta 1 y de 0,252 [g] en la Probeta 2, mientras que la profundidad de erosión alcanzó 0,945 [mm] y un máximo de 1,561 [mm], respectivamente. La inspección visual (Figura 40) evidencia una extensa zona carbonizada que cubre el centro y parte inferior de las probetas. Asimismo, los oscilogramas de la Figura 41 muestran bloques de conducción intensos separados por intervalos recurrentes de corte donde la corriente cae a cero.

Al comparar los ensayos con envejecimiento UV frente a las probetas sin envejecer, se observa que el envejecimiento previo por radiación UV mitigó la penetración vertical máxima del daño, tanto en probetas sin contaminación previa como en aquellas recubiertas con capa sólida E5. Mientras en probetas sin envejecer el arco logró anclarse y perforar hasta 2,754 [mm] con una pérdida de masa máxima de 0,290 [g], en probetas sin envejecer con contaminación E5 se observo un erosión de hasta 3,611 [mm] y una pérdida máxima de masa de 0,340 [g], en las probetas envejecidas por UV la erosión máxima se redujo a 1,711 [mm] y una pérdida de masa máxima de 0,240 [g] y en el ensayo en probetas con envejecimiento mas contaminacion E5 se obtuvo una perforacion por erosion de 1,561 [mm] y pérdida máxima de masa de 0,252 [g], comportamiento que concuerda con estudios previos documentados en la literatura [15].

La justificación física de este comportamiento radica en la alteración superficial que la radiación ultravioleta provoca en la silicona. El envejecimiento vuelve la superficie más áspera y reseca, en consecuencia, cuando el líquido escurre, se esparce y su tasa de evaporación aumenta considerablemente frente a una probeta nueva. Esta rápida vaporización interrumpe el camino conductor de manera prematura y frecuente, lo que impide que el arco de banda seca se estabilice en un único punto fijo durante periodos prolongados. Como resultado, aunque el material envejecido sufre una pérdida de masa mínima más alta y presenta una franja carbonizada más ancha, la falta de anclaje puntual reduce a menos de la mitad la profundidad máxima de perforación.
En la Tabla 35 se consolidan los resultados de las cuatro configuraciones principales evaluadas en el ensayo de plano inclinado bajo corriente continua +DC-IPT a 2,5 [kV].

Parámetro (+DC-IPT a 2,5 kV)	+DC-IPT Caso Base	+DC-IPT Contaminado (E5)	+DC-IPT Envejecido (UV)	+DC-IPT Combinado (UV + E5)
Muestras ensayadas	5	5	3	2
Pérdida de masa Mín. (g)	0,040	0,120	0,190	0,170
Pérdida de masa Máx. (g)	0,290	**0,340**	0,240	0,252
Prof. de erosión Mín. (mm)	0,297	0,453	0,652	0,945
Prof. de erosión Máx. (mm)	2,754	**3,611**	1,711	1,561
Daño superficial observado	Erosión concentrada en la parte inferior de la muestra. Alta dispersión entre los resultados obtenidos.	Erosión profunda y focalizada junto a restos de contaminación. Alta dispersión en los resultados.	Franja central oscurecida más ancha, pero con menor perforación por erosión.	Desgaste ancho y carbonización extensa en zona central e inferior.
Dinámica eléctrica (Corriente de fuga)	Ráfagas densas de hasta aproximadamente 30 [mA] que aumentan hacia la sexta hora.	Bloques continuos y sostenidos de 30 a 40 [mA] desde la primera hora.	Ráfagas de hasta 30 [mA] intercaladas con cortes por rápida evaporación.	Bloques densos de pulsos con interrupciones por evaporación superficial.

Tabla 35: Cuadro comparativo del desempeño en el ensayo de Plano Inclinado en Corriente Continua (+DC-IPT a 2,5 [kV]) bajo las cuatro condiciones de estudio.

5.4.3. Ensayo Acelerado +DC-CTI a 2,5 [kV] con Envejecimiento UV y comparación general del método.

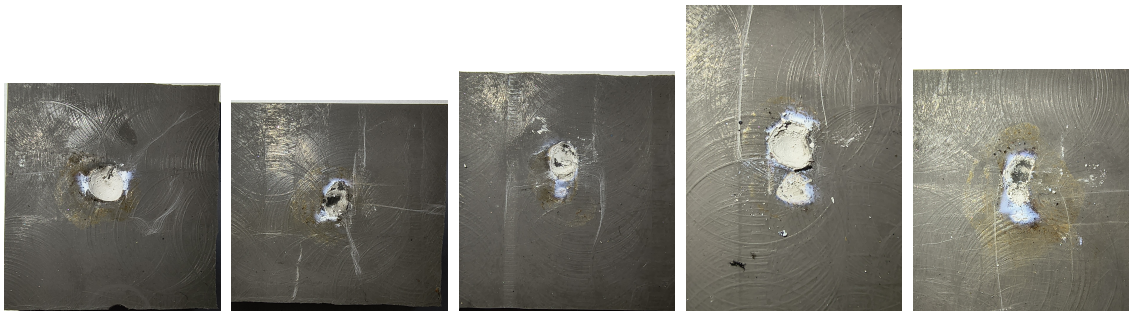
Para completar la evaluación experimental, se sometieron cinco probetas envejecidas por radiación UV al método acelerado +DC-CTI a 2,5 [kV], cuyos parámetros y registros físicos se presentan en las Tablas 36 y 37.

Tipo de Tensión	+DC (CTI con Envejecimiento UV)
Nivel de Tensión (kV)	2,5
Resistencia de balasto (kΩ)	10
Resistencia Fuse (kΩ)	52,4
Contaminante	1 gota

Tabla 36: Parámetros utilizados en el ensayo +DC-CTI a 2,5 [kV] con probetas sometidas a envejecimiento UV.

Probeta N°	**Peso Inicial (g)**	**Peso Final (g)**	**Pérdida de Masa (g)**	**Profundidad Erosión (mm)**
1	4,866	4,852	0,014	0,556
2	5,240	5,234	0,006	0,269
3	5,482	5,477	0,005	0,205
4	6,187	6,182	0,005	0,168
5	5,371	5,364	0,007	0,018

Tabla 37: Registro de variación de masa y erosión tras el ensayo acelerado +DC-CTI a 2,5 [kV] en muestras con envejecimiento UV.



(a) N° 1 (b) N° 2 (c) N° 3 (d) N° 4 (e) N° 5

Figura 42: Muestras de probetas de silicona tras el ensayo +DC-CTI a 2,5 [kV] con envejecimiento UV.

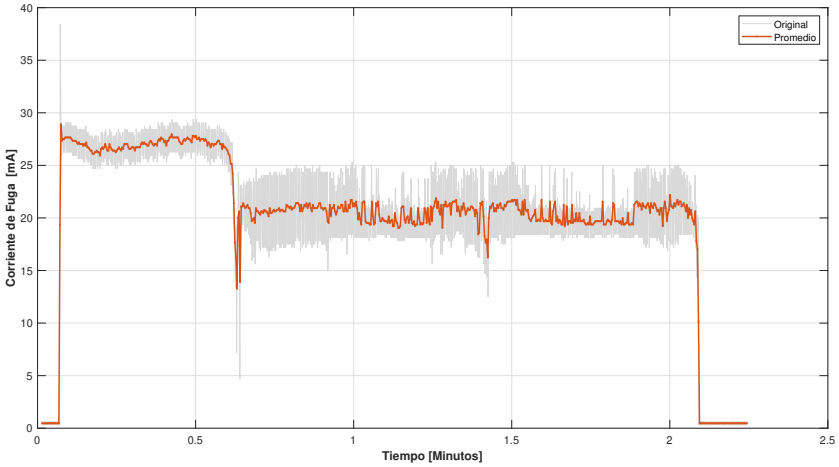


Figura 43: Evolución temporal de la corriente de fuga durante el ensayo +DC-CTI a 2,5 [kV] con envejecimiento UV.
Fuente: Elaboración propia

A diferencia de lo ocurrido en el plano inclinado, donde el flujo libre y la rápida evaporación redujeron la erosión en las muestras envejecidas, al reducir la descarga en un espacio fijo de 3 [mm], en método +DC-CTI sí demuestra debilitamiento superficial producido por la radiación UV. Frente al Caso Base, en las muestras con envejecimiento UV la pérdida de masa subió a un rango de 0,005 a 0,014 [g] (caso base entre 0,000 0,006 [g]) y la profundidad máxima de erosión aumentó de 0,415 [mm] a 0,556 [mm] (Probeta 1).

Este diagnóstico se confirma con total claridad en las tres fases de la corriente de fuga (Figura 43), mientras en el Caso Base el material extingue el arco rápidamente tras aproximadamente 1 minuto de actividad, en la probeta envejecida por UV la fase de la fase de oscilación de arco de banda seca se prolonga considerablemente, retrasando la extinción total del arco hasta pasados los 2 minutos.

En la Tabla 38 se muestra la comparación de los resultados obtenidos en la 3 condiciones realizadas con el ensayo +DC-CTI.

+DC-CTI a 2,5 kV	+DC-CTI Caso Base	+DC-CTI Contaminado (E5)	+DC-CTI Envejecido (UV)
Pérdida de masa Mín. (g)	0,000	0,011	0,005
Pérdida de masa Máx. (g)	0,006	**0,086**	0,014
Prof. de erosión Mín. (mm)	0,000	0,303	0,018
Prof. de erosión Máx. (mm)	0,415	**1,779**	0,556
Daño superficial observado	Daño puntual leve y tenues marcas confinadas entre los electrodos.	Erosión más profunda y carbonización severa .	Pequeños cráteres focalizados con mayor desgaste que el caso base.
Fase I (Conducción líquida)	Bloque estable inicial cercano a 28–30 [mA] de corta duración (aproximadamente 30 segundos).	Duración considerablemente extendida hasta aproximadente 2 minutos en un valor cercano a los 30 [mA].	Bloque estable cercano a 29 [mA] durante aproximadamente medio minuto al igual que el caso base.
Fase II (Arco de banda seca)	Escalón de arco estacionario breve entre los 22 y 25 [mA].	Oscilaciones continuas e ininterrumpidas de arco anclado ($\sim$ 25 [mA]).	Fase de oscilación e inestabilidad prolongada en torno a los 20 [mA].
Fase III (Extinción del arco a 0 [mA])	**Extingue rápido** tras aproximadamente 1 minuto de conducción continua.	**No logra extinguir el arco** (conducción persistente hasta el corte).	**Extinción tardía** (decae a cero pasados los 2 minutos de ensayo).

Tabla 38: Cuadro comparativo del desempeño físico y eléctrico en el método acelerado (+DC-CTI a 2,5 [kV]) bajo las tres condiciones de estudio.

5.4.4. Contraste de la respuesta frente al envejecimiento UV entre ensayo +DC-CTI y +DC-IPT

Para sintetizar la diferencia de respuesta entre ambos métodos de ensayo frente al envejecimiento por radiación UV, en la Tabla 39 se contrasta el efecto físico y diagnóstico observado en el plano inclinado (+DC-IPT) frente al método acelerado (+DC-CTI).

Criterio de Comparación	Plano Inclinado (+DC-IPT con UV)	Método Acelerado (+DC-CTI con UV)
Variación de erosión máx. respecto a su Caso Base	**Disminuye** de 2,754 [mm] a 1,711 [mm] (y de 3,611 [mm] a 1,561 [mm] con capa E5).	**Aumenta** de 0,415 [mm] a 0,556 [mm] (y pérdida de masa máx. sube de 0,006 a 0,014 [g]).
Fenómeno hidrodinámico y térmico en la superficie	La rugosidad UV esparce y evapora rápido el flujo, impidiendo el anclaje en un solo cráter profundo (daño más ancho).	Al estar la gota confinada en 3 [mm], no hay dispersión del flujo y el arco ataca directamente la superficie degradada.
diagnóstico sobre el envejecimiento UV	La disminución de erosión puede interpretarse erróneamente como una mejora .	Detecta la pérdida de resistencia superficial al duplicar el tiempo de extinción del arco .

Tabla 39: Contraste metodológico de la respuesta frente al envejecimiento UV entre el ensayo de Plano Inclinado (+DC-IPT) y el Método Acelerado (+DC-CTI) a 2,5 [kV].

Capítulo 5

6. Conclusiones

A partir del desarrollo experimental y la evaluación comparativa frente al tracking y la erosión en probetas de silicona para aplicaciones HVDC, se desprenden las siguientes conclusiones principales en función de los objetivos planteados.

- Mediante la ejecución de los ensayos normalizados de plano inclinado, se determinó que la silicona presenta un comportamiento altamente estable bajo corriente alterna (AC) a 2,5 [kV], tanto en estado limpio como bajo contaminación sólida Clase E5 . Sin embargo, al aplicar el mismo nivel de tensión bajo corriente continua de polaridad positiva (+DC), el daño se incrementó drásticamente, alcanzando perforaciones severas tanto en probetas limpias como con contaminación E5. Esto confirma que la ausencia de cruces por cero en condiciones HVDC impide la extinción natural de las descargas, anclando los arcos de banda seca y generando un desgaste térmico continuo sobre el material.

- Se comprobó experimentalmente que el método clásico de plano inclinado a voltaje constante somete a la silicona a una fatiga errática en corriente continua. Tal como se evidenció en los ensayos a 2,5 [kV] +DC, el arco de banda seca produce perforaciones severas de manera no lineal, generando daños que variaron desde erosiones superficiales de 0,297 [mm] hasta perforaciones críticas de 3,611 [mm] como en el caso bajo contaminación E5. Este comportamiento inestable ratifica directamente los recientes hallazgos internacionales del grupo de trabajo D1.72 del CIGRE (TB 998) [14], los cuales concluyen que este método normativo presenta deficiencias de reproducibilidad. En consecuencia, los resultados demuestran que el DC-IPT tradicional no es la herramienta óptima para el control de calidad rápido de los aisladores destinados a proyectos HVDC. Por lo que podría justificar el desarrollo e implementación del método acelerado (+DC-CTI).

- La comparación entre los métodos de aplicación de contaminación de Clase E5 en +DC demostró que el riesgo crítico radica en la acumulación estática de una costra sólida pre-secada y no en la contaminación fluida dinámica . La capa sólida de caolín actúa como una superficie porosa que retiene el líquido, impidiendo su evaporación rápida y forzando la creación de arcos estacionarios destructivos.

- El envejecimiento por radiación UV alteró la rugosidad del material. En el ensayo +DC-IPT, esta alteración facilitó la rápida vaporización del fluido, generando un desgaste más ancho pero mitigando la erosión máxima del arco . No obstante, en el método +DC-CTI, el envejecimiento evidenció claramente la pérdida de resistencia eléctrica superficial, incrementando la erosión máxima y retrasando al doble el tiempo de extinción del arco eléctrico.

- Se logró implementar con éxito el montaje experimental +DC-CTI, operando a 2,5 [kV] con un gap de 3 [mm]. El monitoreo oscilográfico de la corriente de fuga permitió capturar el comportamiento termodinámico del arco en tres fases bien definidas, demostrando que el tiempo de extinción del arco puede predecir de manera rápida la vulnerabilidad de la superficie al tracking y la erosión severa. Por lo tanto, el +DC-CTI se consolida como una herramienta de diagnóstico ágil y prometedora para la evaluación de materiales aislantes en proyectos HVDC.

7. Trabajos Futuros

- El siguiente paso para continuar esta investigación es escalar el ensayo +DC-CTI, probando un mayor número de muestras y diferentes compuestos poliméricos. Realizar un estudio a gran escala permitirá demostrar la repetibilidad estadística del método en distintos materiales y establecer límites exactos para aprobar o descartar un aislador basándose en el comportamiento de la corriente de fuga durante la prueba, facilitando su integración como herramienta estándar en la industria para sistemas HVDC.

- Dado que este estudio y las recientes investigaciones del CIGRE (TB 998) [14] demostraron que la aplicación de voltaje continuo constante (Método 1) en el ensayo de plano inclinado genera una alta dispersión estadística y distribuciones de falla erráticas, se recomienda para futuras investigaciones implementar metodologías de evaluación mediante voltaje escalonado (*Step-Test Method*), lo que permitirá identificar umbrales precisos de inicio de tracking y mejorar la repetibilidad de los diagnósticos en laboratorios de alta tensión.

8. Referencias

[1] Ministerio de Energía de Chile, *Plan de Descarbonización: Estrategia de transición justa y sostenible del sector energía*, Santiago, Chile, Nov. 2024.

[2] M. Ridhwan, L. S. Lumba, and S. Suwarno, "Effects of UV radiation and contaminant on the properties of polymeric insulator," in *Proc. 3rd Int. Conf. High Voltage Eng. Power Syst. (ICHVEPS)*, Bandung, Indonesia, 2021, pp. 85–90.

[3] S. M. Rowland, O. de la Cerda, and N. R. Haigh, "Implementation of a solution to the problem of dry-band arcing on ADSS cables," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 22, no. 1, pp. 703–709, Jan. 2007.

[4] G. Heger, H. J. Vermeulen, J. P. Holtzhausen, and W. L. Vosloo, "A comparative study of insulator materials exposed to high voltage AC and DC surface discharges," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 17, no. 2, pp. 513–520, Apr. 2010.

[5] *Electrical insulating materials used under severe ambient conditions — Test methods for evaluating resistance to tracking and erosion*, BS EN IEC 60587:2022, 2022.

[6] *IEEE Guide for DC Inclined Plane Tracking and Erosion Test for Outdoor Insulation Applications*, IEEE Std 2652-2021, 2021.

[7] B. Mehmood, R. A. Ghunem, A. El-Hag, and L. L. Tay, "UHF detection of the eroding DC dry-band arcing on silicone rubber insulation," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 32, no. 3, pp. 1380–1386, Jun. 2025.

[8] A. Alqudsi, R. A. Ghunem, D. McIntyre, H. Parks, and Y. Hadjadj, "An accelerated testing framework for assessing the DC erosion resistance of silicone rubber composites," in *Proc. IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena (CEIDP)*, Montreal, QC, Canada, 2024, pp. 1–4.

[9] *Method for the determination of the proof and the comparative tracking indices of solid insulating materials*, BS EN IEC 60112:2025, 2025.

[10] *Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions — Part 1: Definitions, information and general principles*, IEC TS 60815-1:2008, 2008.

[11] O. Esteban Núñez, "Análisis de la resistencia al tracking de probetas de silicona bajo corriente continua y diferentes condiciones ambientales emuladas," Memoria de Ingeniero Civil Electricista, Depto. Ing. Eléctrica, Univ. Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile, 2025.

[12] *Artificial pollution tests on high-voltage ceramic and glass insulators to be used on d.c. systems*, PD IEC TS 61245:2015, 2015.

[13] J. Correa-Puerta *et al.*, "Comparing the effects of ultraviolet radiation on four different encapsulants for photovoltaic applications in the Atacama Desert," *Sol. Energy*, vol. 228, pp. 625–635, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.solener.2021.10.003.

[14] CIGRE Working Group D1.72, *Further Investigations on a DC Tracking & Erosion Test*, CIGRE Tech. Brochure 998, Aug. 2026.

[15] P. N. Ashitha and S. Ganga, "A study on tracking and erosion resistance of silicone rubber during DC inclined plane tracking with UV radiations superimposed," *Int. J. Eng. Res. Technol. (IJERT)*, vol. 6, no. 8, pp. 154–158, Aug. 2017.