

UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Estudio del comportamiento de aisladores de silicona bajo excitación DC polaridad negativa para distintas condiciones de contaminación y humedad

---

Nicolás Beiza Rodríguez
Trabajo para optar al título de:
Ingeniero Civil Electricista

Profesor guía: Roger Schurch

29 de octubre de 2026

Casa Central

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

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

Título del trabajo: Estudio del comportamiento de aisladores de silicona bajo excitación DC polaridad negativa para distintas condiciones de contaminación y humedad.

Nombre del candidato(a): Nicolas Alberto Beiza Rodriguez

Carrera / Grado: Ingeniero civil electricista

Campus: Casa Central **Departamento:** Ingeniería eléctrica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

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

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

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

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

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

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

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

4.- FIRMAS

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

Fecha: 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.

Agradecimientos

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a mi familia, por estar siempre a mi lado y brindarme su apoyo incondicional desde pequeño, acompañándome en cada etapa de mi formación personal y académica. A mi pareja, quien ha sido un pilar fundamental durante este proceso, especialmente en los momentos más críticos, entregándome contención, motivación y apoyo cuando el desgaste y las dudas se hicieron presentes.

Asimismo, agradezco a mis compañeros, quienes estuvieron presentes durante las jornadas de medición, entregando apoyo constante y colaborando activamente tanto en la discusión de resultados como en el análisis de metodologías, lo que enriqueció significativamente el desarrollo de este trabajo. Extiendo también mi agradecimiento al equipo de pañol, por su permanente buena disposición para enseñar el uso adecuado de los distintos instrumentos de laboratorio y por contribuir a nuestro crecimiento profesional mediante su apoyo y orientación.

Finalmente, agradezco de manera especial a mi profesor guía, por confiar en mí al permitirme desarrollar este tema, por su constante orientación frente a las dudas surgidas a lo largo del trabajo y por el apoyo académico brindado tanto en mi rol de tesista como de ayudante, lo cual fue fundamental para la correcta realización de esta memoria.

"*El fracaso existe cuando se deja de intentar.*"

Resumen

El presente trabajo analiza el comportamiento dieléctrico de aisladores poliméricos de silicona sometidos a excitación en corriente continua (DC), bajo distintos escenarios controlados de contaminación superficial y niveles de humedad relativa, con especial énfasis en la corriente de fuga y la tensión de ruptura (o contorneo). Este estudio se enmarca en el contexto del creciente uso de sistemas HVDC, particularmente relevantes para proyectos de transmisión de larga distancia en Chile, como la línea Kimal–Lo Aguirre.

Desde el punto de vista experimental, se ensayaron aisladores poliméricos clase 15 kV en una cámara de niebla, reproduciendo condiciones representativas de distintos entornos geográficos (desértico, costero e interior). La contaminación fue generada artificialmente mediante el método de capa sólida, permitiendo caracterizar cuantitativamente la severidad del contaminante a través de los parámetros ESDD y NSDD, conforme a las recomendaciones de la norma IEC 60815. La humedad relativa fue controlada en valores nominales de 60 %, 75 % y 90 %, lo que permitió evaluar su impacto directo sobre el desempeño eléctrico del aislamiento.

Los resultados muestran que la corriente de fuga es altamente sensible tanto al nivel de contaminación como al grado de humedad. En condiciones secas o de baja humedad, la corriente de fuga se mantiene en valores reducidos, incluso para niveles moderados de contaminación, evidenciando el carácter hidrofóbico del material polimérico. Sin embargo, al aumentar la humedad relativa, se observa un incremento significativo de la corriente de fuga, especialmente en aisladores con mayores valores de ESDD y NSDD.

Este comportamiento se asocia a la formación de capas conductoras superficiales, producto de la disolución de sales presentes en la contaminación al interactuar con la humedad ambiental. Bajo excitación DC, estas capas favorecen una conducción más estable y persistente en el tiempo, lo que incrementa el estrés térmico y eléctrico del aislador. En los escenarios más severos, la corriente de fuga se consolida como un indicador temprano de degradación dieléctrica, precediendo a fenómenos de descarga superficial y ruptura.

En cuanto a la tensión de contorneo, los ensayos evidencian una disminución progresiva de su valor a medida que aumentan la contaminación y la humedad. Los aisladores sometidos a condiciones de alta humedad y elevada severidad de contaminación presentan las menores tensiones de contorneo, debido a la reducción efectiva de la rigidez dieléctrica superficial.

La correlación entre corriente de fuga y tensión de contorneo resulta clara: mayores corrientes de fuga conducen a menores tensiones soportadas antes de la ruptura, confirmando que ambos parámetros están fuertemente interrelacionados bajo excitación DC. Este efecto es particularmente crítico en HVDC, donde la ausencia de cruces por cero impide la autorrecuperación del aislamiento, a diferencia de sistemas AC.

En síntesis, el estudio demuestra que la corriente de fuga y la tensión de contorneo son variables clave y complementarias para la evaluación del desempeño de aisladores poliméricos en sistemas HVDC. La humedad actúa como un factor detonante que amplifica los efectos de la contaminación, acelerando la degradación superficial del aislamiento. Los resultados obtenidos respaldan la necesidad de criterios de diseño más conservadores para HVDC, incluyendo mayores distancias de fuga y una caracterización detallada del entorno ambiental, con el fin de garantizar una operación confiable y segura de las líneas de transmisión en corriente continua.

Abstract

This study analyzes the dielectric behavior of silicone polymer insulators subjected to direct current (DC) excitation under different controlled scenarios of surface contamination and relative humidity levels, with special emphasis on leakage current and breakdown voltage (flashover). This research is framed within the context of the increasing use of HVDC systems, particularly relevant for long-distance transmission projects in Chile, such as the Kimal–Lo Aguirre line.

From an experimental perspective, 15 kV class polymer insulators were tested in a fog chamber, reproducing representative conditions of different geographical environments (desert, coastal, and inland). Contamination was artificially generated using the solid layer method, allowing for quantitative characterization of contamination severity through the ESDD and NSDD parameters, in accordance with the recommendations of IEC 60815. Relative humidity was controlled at nominal values of 60 %, 75 %, and 90 %, enabling evaluation of its direct impact on the electrical performance of the insulation.

The results show that leakage current is highly sensitive to both the level of contamination and the degree of humidity. Under dry or low-humidity conditions, leakage current remains at low values, even for moderate contamination levels, highlighting the hydrophobic nature of the polymer material. However, as relative humidity increases, a significant rise in leakage current is observed, especially in insulators with higher ESDD and NSDD values.

This behavior is associated with the formation of conductive surface layers, resulting from the dissolution of salts present in the contamination when interacting with environmental humidity. Under DC excitation, these layers promote more stable and persistent conduction over time, increasing both thermal and electrical stress on the insulator. In the most severe scenarios, leakage current becomes an early indicator of dielectric degradation, preceding surface discharge phenomena and breakdown.

Regarding breakdown voltage, the tests reveal a progressive decrease in its value as contamination and humidity increase. Insulators subjected to high humidity and severe contamination conditions exhibit the lowest flashover voltages, due to the effective reduction of surface dielectric strength.

The correlation between leakage current and breakdown voltage is clear: higher leakage currents lead to lower voltages sustained before breakdown, confirming that both parameters are strongly interrelated under DC excitation. This effect is particularly critical in HVDC systems, where the absence of zero crossings prevents self-recovery of the insulation, unlike in AC systems.

In summary, the study demonstrates that leakage current and breakdown voltage are key and complementary variables for evaluating the performance of polymer insulators in HVDC systems. Humidity acts as a triggering factor that amplifies the effects of contamination, accelerating surface degradation of the insulation. The obtained results support the need for more conservative design criteria for HVDC, including greater creepage distances and a detailed characterization of the environmental conditions, in order to ensure reliable and safe operation of direct current transmission lines.

Índice

1. Introducción **7**
1.1. Contaminación . . . 7
1.2. Motivación . . . 7
1.3. Objetivos . . . 8

2. Marco Teórico **9**
2.1. Factores ambientales . . . 9
2.1.1. Humedad . . . 9
2.1.2. Contaminación . . . 10
2.2. Metodologías Normadas . . . 11
2.2.1. Norma IEC 60815: "*Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions – Part 1: Definitions, information and general principles*" . . . 11
2.2.2. Norma IEC 61245: "*Artificial pollution tests on high-voltage ceramic and glass insulators to be used on d.c. systems*" . . . 16
2.2.3. Norma IEC 60270: "*High-voltage test techniques – Partial discharge measurements*" . . . 16
2.3. Detección de descargas parciales . . . 17
2.3.1. Métodos de detección . . . 18
2.4. Métodos de análisis de descargas parciales en DC . . . 18
2.4.1. Indicadores estadísticos . . . 19
2.4.2. Análisis de secuencia de pulsos (PSA) . . . 19
2.4.3. Mapas de tiempo-frecuencia (TF) . . . 20

3. Propuesta experimental **21**
3.1. Probeta bajo estudio . . . 21
3.2. Contaminación artificial . . . 22
3.2.1. Caracterización de la contaminación a partir de zona geográfica . . . 22
3.2.2. Generación de contaminación artificial (método de capa sólida) . . . 22
3.3. Cámara de niebla . . . 24
3.3.1. Instrumentación . . . 24
3.3.2. Acondicionamiento para cámara de niebla . . . 25
3.3.3. Metodología de humectación dentro de la cabina . . . 27
3.3.4. Pasos para preacondicionar probeta en cabina . . . 28
3.4. Ensayos de alta tensión . . . 29
3.4.1. Determinación de tensión de contorneo . . . 29
3.4.2. Determinación de corriente de fuga . . . 31
3.4.3. Determinación de descargas parciales . . . 32

4. Resultados experimentales **34**
4.1. Perfiles de contaminación y humedad . . . 34
4.2. Tensiones de contorneo . . . 37
4.2.1. Relación entre tensión de contorneo, contaminación y humedad . . . 40
4.3. Corrientes de fuga . . . 40
4.3.1. Impacto de la humedad en la corriente de fuga para casos de contaminación puntuales 40
4.3.2. Impacto de la contaminación en la corriente de fuga para casos de humedad puntuales 43
4.3.3. Evolución temporal de la corriente de fuga . . . 45
4.4. Descargas parciales . . . 48
4.4.1. Indicadores estadísticos . . . 48
4.4.2. Mapas Tiempo-Frecuencia . . . 52
4.5. Correlación entre tensión de contorneo, corriente de fuga y descargas parciales con medios contaminados . . . 57
4.6. Recomendaciones para la selección, caracterización y monitoreo de aisladores HVDC . . . 58

4.6.1. Selección del aislador según emplazamiento . . . 58
4.6.2. Caracterización experimental del modelo seleccionado . . . 58
4.6.3. Monitoreo del aislador durante su vida útil . . . 59
4.6.4. Dimensionamiento preliminar de aislador . . . 59
4.6.5. Alcance de recomendaciones . . . 61

5. Conclusiones **62**
5.1. Comportamiento de la tensión de contorneo . . . 62
5.2. Corriente de fuga como indicador de severidad . . . 62
5.3. Descargas parciales como indicador de severidad . . . 63
5.4. Recomendaciones de diseño para líneas HVDC . . . 64
5.5. Alcance, limitaciones y proyección del estudio . . . 64

6. Trabajo futuro **65**

A. Anexo **69**
A.1. Mecanismo de contorneo . . . 69
A.1.1. Proceso de activación . . . 69
A.1.2. Esquema proceso de tensión de contorneo . . . 70
A.1.3. Diferencias entre sistema de excitación AC y DC . . . 70
A.2. Instrumentación . . . 71
A.2.1. Equipos para medición de tensión de contorneo: . . . 71
A.2.2. Equipos para medición de corriente de fuga: . . . 72
A.2.3. Equipos para medición de descargas parciales . . . 73
A.3. Tensión de contorneo . . . 74
A.4. Corriente de fuga . . . 76
A.4.1. Tablas para humedad relativa del 60 % . . . 76
A.4.2. Tablas para humedad relativa del 75 % . . . 78
A.4.3. Tablas para humedad relativa del 90 % . . . 80

1. Introducción

Los sistemas de corriente continua en alta tensión (HVDC) son una alternativa estratégica por sobre los sistemas de transmisión tradicional de corriente alterna (HVAC). Aunque la infraestructura eléctrica ha sido históricamente basada en AC, la integración masiva de energías renovables y la necesidad de transportar grandes cantidades de energía a largas distancias han impulsado el uso creciente de sistemas de transmisión en DC, un ejemplo de ello, la línea Kimal-Lo Aguirre en Chile. La transmisión HVDC presenta pérdidas totales menores, ya que elimina algunos efectos que se perciben en AC, como corrientes capacitivas y de reactancias propias de líneas AC, además del nulo efecto skin en sistemas DC, lo que produce una disminución de pérdidas por efecto Joule en DC respecto a AC. Además, su capacidad de transmisión es mayor para un mismo nivel de tensión, y resulta particularmente ventajosa en enlaces subterráneos y submarinos (aunque no es el caso particular de la topología estudiada en Chile), donde las limitaciones capacitivas de AC son especialmente severas [1].

1.1. Contaminación

La contaminación para excitación DC y AC difiere, pues la atracción de contaminantes en ambos escenarios depende fuertemente de la dinámica del campo eléctrico, por lo que varios estudios y notas técnicas indican que el campo eléctrico DC genera fuerzas electrostáticas que favorecen la deposición de partículas cargas y neutras (por polarización), por lo que en muchos casos la ESDD/NSDD medida en aisladores energizados en DC resulta mayor que en AC para un mismo entorno, por lo que es de alta relevancia estudiar el entorno donde se instalará la línea HVDC y poder, dentro de lo posible, evitar zonas con alta disposición de contaminantes producto de zonas urbanas/industriales, tal como se indica en [2]. Esto implica fijar distancias de fuga más altas respecto del caso AC, por lo tanto, es necesario considerar la norma IEC 60815 (en particular IEC 60815-1, 60815-3 y 60815-4) para el correcto diseño de aisladores bajo excitación DC en función del medio contaminante y la severidad que este presente.

1.2. Motivación

La creciente penetración de energías renovables en el norte de Chile ha puesto en evidencia las limitaciones estructurales del sistema de transmisión, el cual opera actualmente cercano a su máximo límite técnico, generando congestión y restricciones en la transferencia de potencia hacia los principales centros de consumo del centro del país. En este contexto, la incorporación de líneas de transmisión en corriente continua de alta tensión (HVDC) se vuelve una solución estratégica para aumentar la capacidad de transporte energético, reducir pérdidas y aliviar la saturación de los corredores existentes [3]. Sin embargo, la implementación de estas tecnologías exige un conocimiento profundo del comportamiento de los sistemas de aislamiento bajo excitación DC, especialmente en condiciones ambientales severas propias del territorio nacional. Por ello, este estudio se motiva en la necesidad de evaluar el desempeño dieléctrico de aisladores poliméricos, considerando corriente de fuga y tensión de contorneo, como variables críticas para asegurar la confiabilidad y continuidad operativa de las futuras líneas HVDC en Chile.

1.3. Objetivos

Objetivo general

- Analizar el impacto de distintos escenarios de contaminación y niveles de humedad en la actividad de descargas parciales, en la corriente de fuga y en la tensión de contorneo de aisladores compuestos sometidos a excitación en corriente continua (DC).

Objetivos específicos

- Realizar una revisión bibliográfica de las técnicas empleadas para el adecuado análisis de datos de descargas parciales en aisladores de líneas HVDC, además del impacto de los distintos escenarios de operación bajo excitación DC.
- Implementar una metodología experimental para acondicionar aisladores con diferentes perfiles de humedad controlada.
- Realizar experimentos a aisladores compuestos con condiciones controladas de contaminación y humedad bajo solicitación DC.
- Correlacionar la dependencia de la corriente de fuga, descargas parciales y tensión de contorneo en función de la contaminación y la humedad, para aisladores compuestos bajo solicitación DC.
- Proponer recomendaciones de diseño para líneas HVDC, basadas en los resultados experimentales obtenidos y ajustados a distintos escenarios de contaminación y humedad.

2. Marco Teórico

2.1. Factores ambientales

Los factores ambientales son fundamentales para el adecuado diseño de los aisladores eléctricos, ya que determinan las condiciones de contaminación, así como la temperatura y la humedad de operación. En este documento se consideran el nivel de contaminación y la humedad como variables manipulables, mientras que la temperatura queda sujeta a las condiciones ambientales diarias. El nivel de contaminación está determinado principalmente por la zona donde se emplaza el aislador, ya sea desértica, costera, industrial, agrícola o de interior.

Por su parte, la humedad influye directamente en las condiciones de operación del aislador, dado que, en función del grado de humedad relativa presente en el entorno, puede producirse la formación de moléculas de agua sobre su superficie. Al mezclarse con los contaminantes depositados, esta humedad puede dar lugar a la generación de caminos conductores, lo que provoca una disminución de la tensión de contorneo para la cual el aislador fue diseñado y un aumento de las corrientes de fuga.

2.1.1. Humedad

La humedad atmosférica corresponde al contenido de vapor de agua presente en el aire, se suele expresar como humedad relativa (HR %). Cuando la humedad relativa alcanza el 100 % el aire se encuentra saturado y cualquier disminución de temperatura o aumento de presión produce la condensación del vapor de agua. La condensación sobre objetos ocurre, en la mayoría de los casos, cuando la temperatura de la superficie de contacto desciende por debajo del punto de rocío del aire circundante. Este fenómeno es relevante en aisladores eléctricos expuestos al exterior, donde los ciclos térmicos diarios (por ejemplo, enfriamiento nocturno, vientos o radiación solar) generan cambios en la temperatura del aire y la superficie del aislador en diferentes medidas.

Los compuestos poliméricos a base de silicona presentan un comportamiento esencialmente hidrofóbico, sin embargo, la contaminación superficial y el envejecimiento pueden reducir temporalmente esta propiedad, aunque los materiales de silicona presentan mecanismos de recuperación de la hidrofobicidad, asociados a la migración de cadenas de bajo peso molecular (LMW) desde el interior del material hacia la superficie, cabe resaltar que estos procesos son fuertemente dependientes de la temperatura ambiente [4,5]. Dicho mecanismo permite que, incluso tras un proceso de humectación severa, la superficie recupere su carácter hidrofóbico, reduciendo nuevamente la continuidad de los caminos conductores formados por la mezcla de agua y lo que impacta directamente en la disminución de la corriente de fuga superficial [6, 7].

Por su parte, una condición específica de operación bajo el estudio presente, es una temperatura ambiente aproximada de $20°C$, en paralelo, la condensación del vapor de agua sobre superficies se da por el punto de rocío, la que es determinada por la temperatura ambiente y la humedad relativa del aire, por ejemplo, si la humedad relativa del aire es de 90 % y la temperatura ambiente es de $20°C$, esto en base a la Gráfica 2 indica que la temperatura de rocío es aproximadamente en los $18°C$, esto quiere decir que a dicha temperatura se comienza a formar la condensación sobre el objeto, por lo tanto, la temperatura del aislador es un parámetro clave para la formación de moléculas de agua y fundamental para las bases del estudio presente.

Por otro lado, en el caso de las descargas superficiales, la tasa de repetición de pulsos puede incrementarse hasta en un orden de magnitud, entre condiciones secas y húmedas (véase Figura 1). Otra característica estrechamente asociada a niveles elevados de humedad es el modo de iniciación de las descargas parciales, bajo condiciones de humedad baja, la tasa de repetición tiende a mantenerse aproximadamente constante en el tiempo, pero a alta humedad, las descargas superficiales suelen manifestarse en forma de ráfagas en lugar de eventos aislados [8, 9].

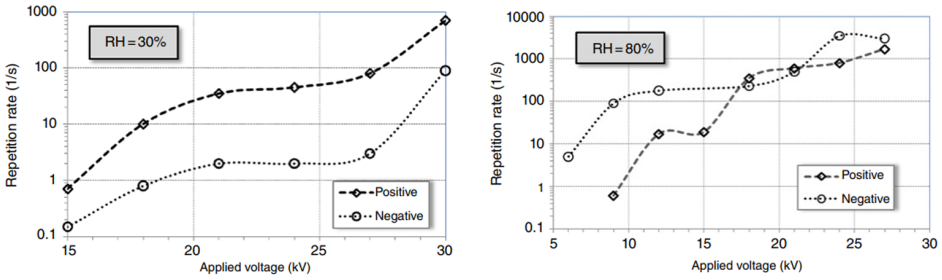


Figura 1: Tasa de repetición vs humedad.

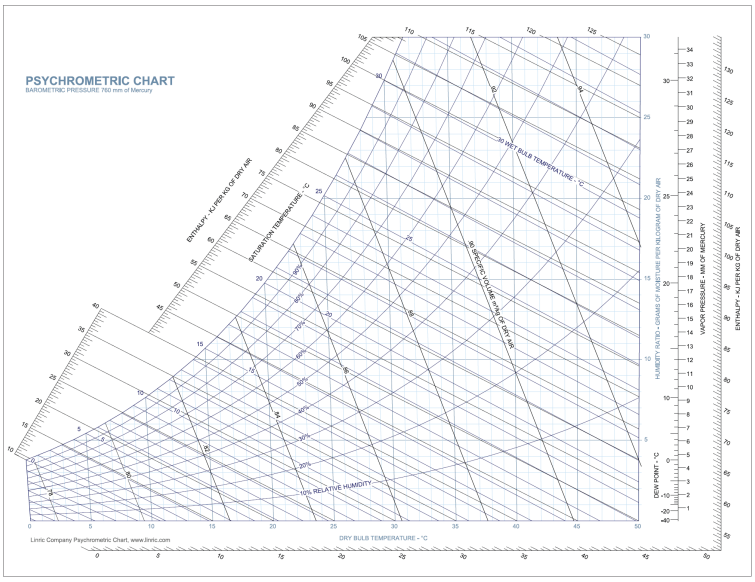


Figura 2: Carta psicrométrica [10].

2.1.2. Contaminación

La contaminación sobre aisladores eléctricos es perjudicial para el rendimiento del aislador, pues en presencia de humedad, las sales de los contaminantes pueden formar caminos conductores que comprometen las resistencia dieléctrica ante efectos como rupturas eléctricas o corrientes de fuga en niveles aceptables, por lo tanto, es importante considerar la contaminación en el adecuado diseño de aisladores [6, 11, 12].
La contaminación, como se detalla en la sección posterior, está compuesta principalmente por elementos solubles y no solubles. Los elementos no solubles permanecen simplemente en suspensión en el agua, sin disolverse, a diferencia de los elementos solubles, como la sal. Este tipo de compuesto químico presenta una alta afinidad por las moléculas de agua, lo que favorece la formación de interacciones entre el soluto y el solvente. Por lo tanto, cuando se forman depósitos de sal sobre la superficie de un aislador, dicha superficie capta con mayor rapidez la humedad presente en el aire, lo que puede dar lugar a la formación de capas conductoras, mientras que la capacidad hidrofóbica del aislador se ve atenuada por la presencia de una capa de elementos solubles que recubre su superficie externa [4, 5, 13].

2.2. Metodologías Normadas

Las múltiples normativas internacionales vigentes que rigen los procedimientos para la medición de la tensión de contorneo, la corriente de fuga y las descargas parciales cumplen un rol fundamental en el diseño y la implementación de estrategias de medición confiables y reproducibles. En particular, el uso de normativas IEC permiten establecer condiciones de ensayo estandarizadas, criterios de aceptación y rechazo, así como los métodos de medición e instrumentación asociados. La adopción de estas normas garantiza que los resultados obtenidos sean comparables con los reportados por otros laboratorios y estudios previos, reduciendo la incertidumbre asociada a variaciones metodológicas y asegurando la estandarización de las mediciones. Asimismo, las normativas IEC han sido desarrolladas a partir de consensos técnicos internacionales y de una amplia base experimental, lo que las convierte en una referencia confiable para la evaluación del comportamiento dieléctrico de sistemas de aislamiento bajo distintas condiciones de exigencia.

2.2.1. Norma IEC 60815: "*Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions – Part 1: Definitions, information and general principles*"

La presente normativa describe las especificaciones técnicas para evaluar la gravedad de la contaminación de un lugar en concreto (SPS) y entregar criterios para el adecuado diseño de distintos tipos de aisladores, ya sean cerámica, vidrio (IEC 60815-2) y polimérico (IEC 60815-3), aunque son para sistemas AC permiten seguir lineamientos generales para la realización de ensayos en DC [12, 13].
En la normativa se definen dos tipos de contaminación, Tipo A y Tipo B:

- **Contaminación Tipo A**: Se compone de contaminación soluble, la que forma una capa conductora al humedecerse, y contaminación no soluble que forma una capa aglutinante para la contaminación soluble.
  - *Contaminación soluble*: Se subdivide en sales de alta solubilidad y baja solubilidad. Esta se mide en términos de densidad de depósito de sal equivalente en mg/cm^2 (ESDD por sus siglas en inglés).
  - *Contaminación no soluble*: Ejemplos de contaminación no soluble son el polvo, arena, arcilla, aceites, etc. La contaminación no soluble se mide en términos de densidad depósitos no solubles en mg/cm^2 (NSDD por sus siglas en inglés).
- **Contaminación Tipo B**: La contaminación de tipo B se asocia con mayor frecuencia a zonas costeras, donde el agua salada o la niebla conductora se depositan sobre la superficie del aislador. Otras fuentes de contaminación tipo B son, por ejemplo, la pulverización de cultivos, las nieblas químicas y la lluvia ácida. Existen distintos tipos de ambientes, la normativa presente detalla cinco tipos de ambientes característicos por contaminación típica según región, donde se abordan contaminación tipo A y tipo B. Cabe mencionar que estos pueden estar de manera individual o en conjunto, siendo incluso una contaminación de tipo A-B en simultáneo, para dichos casos se debe determinar cual es predominante.
  - *Tipo desértico:* Estas áreas se caracterizan por suelos arenosos con largos períodos de sequía. La capa de contaminación en estas áreas normalmente están compuestas por sales que se disuelven lentamente, junto con un alto nivel de NSDD (tipo A). La contaminación se da principalmente por los vientos que arrastran los contaminantes sobre los aisladores.
  - *Tipo costero:* Estas zonas están cercas de la costa, aunque en algunos casos pueden estar hasta 50 km. tierra adentro. La contaminación se deposita sobre los aisladores por pulverización, viento y niebla. La acumulación de contaminantes al corto plazo suele ser rápida, especialmente en condiciones de pulverización o niebla conductora (tipo B). Por otro lado, la acumulación de contaminantes a largo plazo ocurre mediante el depósito de partículas transportadas por el viento, donde la capa de contaminación sobre los aisladores consiste en sales de disolución rápida con un grado de componente no soluble (tipo A).
  - *Tipo industrial:* Son áreas ubicadas en las cercanías de zonas industriales. La capa de contaminación suele estar formada por partículas conductores, como carbón o depósitos metálicos, gases disueltos, como NO_x y SO_x (tipo B); o contaminación de disolución lenta, como el cemento o yeso

(tipo A). La capa de contaminación puede tener componente no soluble de medio a alto (NSDD medio a alto).

- *Tipo agrícola:* Entornos cercanos a actividad agrícola. Normalmente, se trata de áreas sometidas a arado de tierra (tipo A) o pulverización de cultivos (tipo B). La capa de contaminación sobre los aisladores consiste principalmente en sales de disolución rápida o lenta, como productos químicos, excremento de aves o sales presentes en el suelo. La capa de contaminación tiene, principalmente, una componente no soluble de medio a alto (NSDD de medio a alto).
- *Tipo interior:* Se refiere a zonas de interiores, alejadas de la influencia marina directa. Se trata de zonas con un bajo nivel de contaminación, sin fuentes claramente identificables.

La gravedad de la contaminación de un sitio se evalúa en términos de ESDD y NSDD para contaminación tipo A, salinidad equivalente del sitio (SES) para contaminación tipo B (en algunos casos, las mediciones de ESDD pueden utilizarse para la contaminación tipo B).

- **Evaluación de la severidad de la contaminación del sitio**: Puede evaluarse con distinto nivel de confianza, ordenado de mayor a menor, según:
  1. Mediciones directas en terreno (in situ).
  2. Información del comportamiento de aisladores ya instalados en líneas o subestaciones cercanas al sitio.
  3. Simulaciones que estiman el nivel de contaminación a partir de parámetros meteorológicos y ambientales.
  4. Evaluación cualitativa, basada en tablas de referencia, cuando no existen otros datos. Para las mediciones en situ, existen dispositivos para captar la contaminación, por ejemplo, para la normativa presente DDDG es un medidor direccional de depósito de polvo, es de captación pasiva que se instala en terreno para recolectar contaminantes atmosféricos durante un período de exposición (semanas o meses). A partir del DDDG se miden dos componentes, DDGIS el cual corresponde a la densidad de depósito de contaminantes no solubles (NSDD) y DDGIN el que corresponde a la densidad de depósito de contaminantes solubles (ESDD), con ello se emplean distintos métodos según el tipo de sitio contaminado:
     - Sitios tipo A:
       - Medición de ESDD y NSDD sobre aisladores de referencia.
       - Determinación de DDGIS y DDGIN del contaminante recolectado mediante dispositivos DDDG.
     - Sitios tipo B:
       - Evaluación de la severidad equivalente de sal (SES) a partir de mediciones de corriente de fuga o conductancia en aisladores de referencia o monitores.
       - Uso de DDGIS y DDGIN mediante DDDG.

     Adicionalmente, el comportamiento en servicio puede evaluarse mediante:
     - El número total de rupturas (flashovers) en aisladores de distintas longitudes.
     - La corriente de fuga o conductancia de aisladores de muestra.

- **Caracterización de la severidad de la contaminación del sitio:** Para estandarizar las distintas gravedades de sitios, respecto a su nivel de contaminación, se caracterizan de manera cualitativa en cinco clases:

  1. Very light (muy leve).
  2. Light (leve).
  3. Medium (moderado).
  4. Heavy (alta).
  5. Very heavy (muy alta).

La Figura 3 detalla los limites de cada grado de SPS para la contaminación tipo A, y el como se distribuyen para ser catalogados en base a su nivel de ESDD y NSDD.

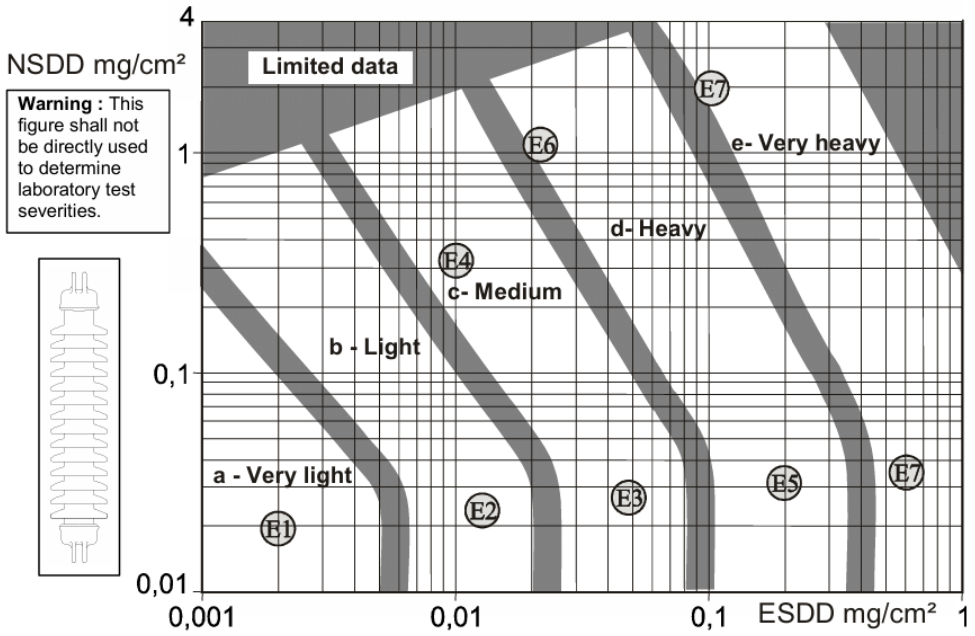


Figura 3: Relación entre NSDD, ESDD y SPS. Fuente IEC 60815-1 [13].

Por otro lado, la Figura 4 muestra la relación entre mediciones de SES y la clase SPS. Los valores detallados se basan en la contaminación natural que se deposita en los aisladores.

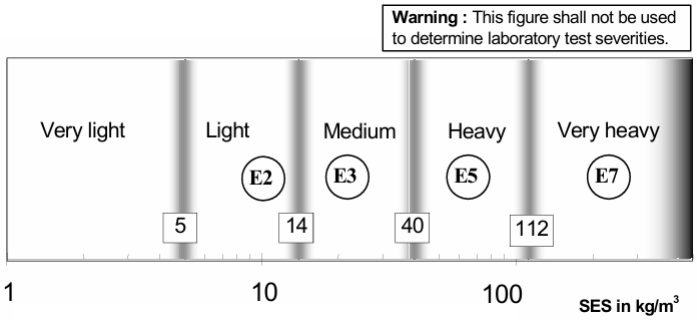


Figura 4: Relación entre SES y SPS. Fuente IEC 60815-1 [13].

Ejemplo	Descripción del ambiente típico
E1	Más de 50 km[a] del mar, desierto o zonas abiertas y secas. Más de 10 km de fuentes de contaminación artificial[b]. Dentro de una distancia menor a la indicada, pero con: • viento predominante no proviene directamente desde las fuentes de contaminación. • y/o lavado regular por lluvias mensuales.
E2	Entre 10 y 50 km[a] del mar, desierto o zonas abiertas y secas. Entre 5 y 10 km de fuentes de contaminación artificial[b]. Dentro de una distancia menor que en E1, pero con: • viento predominante no proviene directamente desde las fuentes de contaminación. • y/o lavado regular por lluvias mensuales.
E3	Entre 3 y 10 km[c] del mar, desierto o zonas abiertas y secas. Entre 1 y 5 km de fuentes de contaminación artificial[b]. Dentro de una distancia menor que la indicada, pero con: • viento predominante no proviene directamente desde las fuentes de contaminación. • y/o lavado regular por lluvias mensuales.
E4	A mayor distancia de las fuentes de contaminación que la indicada en E3, pero con: • presencia frecuente de niebla densa (o llovizna) tras una larga temporada seca de acumulación de contaminación. • y/o lluvias intensas de alta conductividad. • y/o un nivel elevado de NSDD, entre 5 y 10 veces el ESDD.
E5	Dentro de 3 km[c] del mar, desierto o zonas abiertas y secas. Dentro de 1 km de fuentes de contaminación artificial[b].
E6	A mayor distancia de las fuentes de contaminación que la indicada en E5, pero con: • presencia frecuente de niebla densa (o llovizna) tras una larga temporada seca de acumulación de contaminación. • y/o un nivel elevado de NSDD, entre 5 y 10 veces el ESDD.
E7	Dentro de las mismas distancias especificadas para áreas de contaminación pesada, y además: • exposición directa a rocío marino o niebla salina densa. • o exposición directa a contaminantes de alta conductividad o polvo tipo cemento de alta densidad, con humectación frecuente por niebla o llovizna. • zonas desérticas con rápida acumulación de arena y sal, y condensación regular.

[a] Durante una tormenta, el nivel de ESDD a estas distancias del mar puede alcanzar valores significativamente mayores.
[b] La presencia de una gran ciudad puede influir a una distancia mayor que la especificada para el mar, desierto o zonas secas.
[c] Dependiente de la topografía del área costera y de la intensidad del viento.

Tabla 1: Descripción de ambientes típicos según IEC 60815 [13].

- **Cálculo de contaminantes:** Para la adecuada categorización de la contaminación de un respectivo sitio a través de la medición de contaminantes depositados sobre la superficie del aislador se deben seguir los siguientes procesos matemáticos:

  - *Cálculo de ESDD*: Para determinar la ESDD, se deben tomar mediciones de conductividad, volumen y temperatura del agua que contiene los contaminantes una vez limpiado el aislador. Las mediciones se realizarán tras agitar el agua lo suficiente para homogeneizar la mezcla. Para contaminantes de alta solubilidad se requiere una agitación breve, mientras que para contaminantes de baja solubilidad se requiere una agitación más prolongada, alrededor de 30 a 40 minutos. Según el anexo C.4.1 de la norma IEC 60815-1, el ESDD se calcula según:

$$ESDD = S_a \cdot \left(\frac{V}{A}\right) \tag{1}$$

    Donde:

    - V: Volumen del agua desmineralizada en cm^3.
    - A: Área de la superficie del aislador en cm^2.
    - S_a: Salinidad en kg/m^3.

    S_a se determina en base a la conductividad corregida por temperatura del agua empleada para la limpieza del contaminante, a continuación se detallan las expresiones empleadas por la normativa IEC 60815-1:

$$S_a = (5.7 \cdot \sigma_{20})^{1.03} \tag{2}$$

$$\sigma_{20} = \sigma_\theta \cdot [1 - b \cdot (\theta - 20)] \tag{3}$$

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

    Donde:

    - θ : Temperatura de solución, en $°C$.
    - σ_θ : Conductividad volumétrica a temperatura θ, en S/m.
    - σ_{20} : Conductividad volumétrica a temperatura de $20°C$, en S/m.
    - b : Factor que depende de la temperatura.

  - *Cálculo de NSDD:* Tras la medición de ESDD, el agua que contenga el contaminante se filtra mediante un embude y papel filtro presecado y pesado (grado GF/A $1.6\mu m$ o similar). El papel filtro que contenga los contaminantes (residuos) se secará y pesará nuevamente, obteniendo un peso final distinto al inicial. Por lo tanto, el cálculo de NSDD se da según:

$$NSDD = 1000 \cdot \left(\frac{W_f - W_i}{A}\right) \tag{5}$$

    Donde:

    - W_f : Peso del papel filtro posterior al proceso de filtrado que contiene contaminantes en condiciones secas, en gramos.
    - W_i : Peso del papel filtro previo al proceso de filtrado y en condiciones secas, en gramos.
    - A : Área de la superficie del aislador, en cm^2.

2.2.2. Norma IEC 61245: "*Artificial pollution tests on high-voltage ceramic and glass insulators to be used on d.c. systems*"

Es una normativa que detalla pruebas y métodos de contaminación para extraer características de operación del aislador ante contaminación, además es posible emular la operación del mismo bajo condiciones semejantes a las de servicio, en base a la zona que operaría.

Se detallan dos tipos de contaminación: *Método de capa sólida* y *Método de niebla salina*.

- **Método de capa sólida:** Consiste en una capa sólida de contaminación, compuesta por sales y elementos no solubles, lo que se acumulan en la superficie del aislador. Según normativa, para excitación DC, se aplica la tensión constante al aislante seco, y luego inicia el proceso de humectación a caudal constante hasta finalizar la prueba individual. La tensión máxima a emplear, es de 600 kV. Finalmente, se limpia el aislador para medir ESDD y NSDD pudiendo caracterizar la contaminación de tipo A.

  Procedimiento de prueba: La generación de niebla de la cámara de ensayo, se mantendrá constante desde el inicio hasta el final del ensayo, además debe generarse lo más cerca del nivel del suelo, por lo menos a un metro debajo del objeto de prueba. A temperatura ambiente, el caudal nominal de entrada de vapor es de $0.05 \pm 0.01\,[kg/h]$ por metro cúbico de volumen de la cámara de prueba. En caso de que la cámara posea un aislamiento térmico deficiente, puede ser necesaria la comprobación directa de la acción humectante de la niebla.
  La tensión de prueba se mantiene hasta que se produce una ruptura. De lo contrario, se mantiene durante 100 minutos desde el inicio de la prueba o hasta que el riesgo de ruptura se considere poco significativo, mediante la medición de corriente de fuga u otras técnicas.

- **Método de niebla salina:** Se aplica una capa conductora (simula la contaminación tipo B), la que cubre la superficie del aislador, en la práctica, dicha capa no contiene ningún material insoluble. El grado de contaminación se define por la salinidad de la niebla salina, expresada en kg de sal (NaCl) por metro cúbico de agua.
  El ensayo consta de dos partes principales: Proceso de preacondicionamiento (cuyo objetivo es la limpieza de la superficie del aislante ensayado) y el ensayo de resistencia. No se recomienda el ensayo de niebla salina para configuraciones de tensiones superiores a $\pm 600\,kV$.

  Prueba de resistencia: El objetivo de la prueba de resistencia es confirmar que la salinidad especificada a la tensión de operación sea soportada. Consta de pruebas individuales en el aislador con duración de una hora a tensión constante, luego si logra resistir, se realizan tres pruebas consecutivas, si llegase a existir una ruptura, se tomará una cuarta, si la supera, entonces el aislador supera la prueba.

2.2.3. Norma IEC 60270: "*High-voltage test techniques – Partial discharge measurements*"

Establece los circuitos y procesos que se deben realizar para medir descargas parciales. Se establecen las descargas parciales como pulsos de corriente rápidos (entre nanosegundos a microsegundos) y de una magnitud baja. Se producen principalmente cuando el campo eléctrico local supera la rigidez dieléctrica del medio en una región determinada, por ejemplo: bandas secas.
Las descargas parciales suelen identificarse mediante pulsos de corrientes, cada pulso suele tener una frecuencia asociada, además de una frecuencia de repetición (tasa de repetición de pulsos), variables que son claves para cuantificar y localizar la descarga parcial.

- **Tensiones de iniciación y extinción de descargas parciales:** Ambas tensiones de descargas parciales pueden ser difíciles de determinar durante pruebas DC, pues no se tiene una dinámica constante que estimule la aparición de las mismas, como es en AC. Es más probable la aparición de descargas parciales durante la aplicación inicial de tensión o durante cambios de tensión, sin embargo, luego de un tiempo aparecen de manera más pronunciada, en la medida que la tensión se vuelve más resistiva.
  Cabe mencionar que no existe un método general aceptado para la determinación de las magnitudes de descargas parciales durante pruebas con tensión DC. Se debe tener en cuenta que las magnitudes de

descarga pueden ser diferentes en la medida que aumente la duración en el ensayo.

- **Circuito de prueba:** El circuito para medición de DP en AC puede usarse para DC. La normativa establece distintas configuraciones de disposición de los equipos para la medición de descargas parciales. En la Figura 5, la impedancia de medida se conecta en serie con el condensador de acoplamiento, formando parte del circuito de detección de las corrientes impulsivas generadas por las descargas. En la Figura 6 la impedancia de medida se dispone en el camino de retorno a tierra del objeto bajo prueba, actuando en serie con el aislamiento únicamente para las componentes de alta frecuencia asociadas a las descargas parciales.

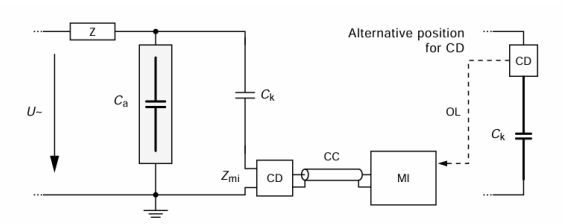


Figura 5: Dispositivo de acoplamiento CD en serie con el condensador de acoplamiento.

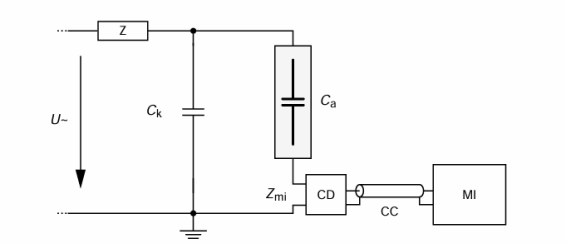


Figura 6: Dispositivo de acoplamiento CD en serie con el objeto de prueba.

2.3. Detección de descargas parciales

La norma IEC 60270 [14] define la descarga parcial (DP) como una descarga eléctrica localizada que atraviesa solo parcialmente el sistema de aislamiento entre conductores y que puede o no presentarse en las proximidades de un conductor. Este fenómeno no implica una ruptura completa del aislamiento, pero constituye un indicio relevante de su degradación progresiva. Desde un punto de vista físico, las descargas parciales pueden entenderse como fenómenos transitorios originados por la intensificación local del campo eléctrico, la cual supera la rigidez dieléctrica (localmente) del medio en regiones específicas del aislamiento. Estas intensificaciones suelen estar asociadas a defectos geométricos, inhomogeneidades del material o condiciones ambientales adversas.
De acuerdo con su ubicación de ocurrencia, las descargas parciales se clasifican en tres tipos principales: internas, superficiales y corona.

- **Descargas internas**: Se desarrollan en el interior de aislamientos sólidos o líquidos, generalmente en cavidades, huecos o irregularidades con menor rigidez dieléctrica, las cuales pueden originarse por defectos de fabricación, envejecimiento del material o presencia de burbujas gaseosas.
- **Descargas superficiales**: Tienen lugar en la interfaz entre dos medios dieléctricos, típicamente entre un material aislante y el aire. Este tipo de descarga se ve favorecido por la presencia de campos eléctricos tangenciales elevados y se intensifica en condiciones de contaminación superficial y alta humedad relativa (principal punto para el tema del presente documento).
- **Descargas corona**: Ocurren en regiones de fuerte concentración de campo eléctrico, como puntas, bordes afilados o elementos metálicos sobresalientes, principalmente en medios gaseosos o líquidos. Su aparición se ve incrementada bajo condiciones ambientales desfavorables, tales como contaminación, lluvia o alta humedad.

Las descargas parciales generan pulsos de corriente de muy corta duración, generalmente del orden de los nanosegundos, los cuales se acompañan de diversas manifestaciones físicas medibles, tales como emisiones electromagnéticas, acústicas, luminosas y químicas. Estas manifestaciones constituyen la base para la aplicación de distintos métodos de detección y diagnóstico, los cuales se presentan y describen en la tabla 2.

Variable física	Método de detección	Norma asociada
Pulsos de corriente	Eléctrica	IEC 60270
Radiación EM	Electromagnética	IEC 62478
Señales de sonido	Acústica	IEC 62478
Luminosidad	Óptica	-
Subproductos químicos	Química	IEC 60599

Tabla 2: Modos de detección DP.

2.3.1. Métodos de detección

- **Detección eléctrica**: Se basa en la medición directa de los pulsos de corriente transitorios generados por la descarga dentro del sistema de aislamiento. Estos pulsos se acoplan al circuito de medición mediante impedancias o acopladores capacitivos, permitiendo cuantificar la actividad de descarga en términos de carga aparente. Este enfoque constituye el método de referencia para la medición de descargas parciales y es implementado mediante sistemas de medición normalizados, como sistema de medición Omicron MPD 600, ampliamente utilizado en ensayos conforme a la norma IEC 60270.
- **Detección electromagnética**: Se fundamenta en la captación de las emisiones electromagnéticas de alta frecuencia generadas por las descargas parciales durante su desarrollo. Estas emisiones se propagan a través de las estructuras metálicas del equipo o del espacio circundante y son detectadas mediante sensores de alta frecuencia, tales como HFCT o antenas UHF. Este método es comúnmente aplicado en mediciones en líneas, especialmente en cables, subestaciones y equipos encapsulados.
- **Detección acústica**: Se basa en la generación de ondas de presión producidas por la rápida liberación de energía durante la descarga parcial. Estas ondas acústicas, generalmente en el rango ultrasónico, se propagan a través del medio aislante y las estructuras mecánicas del equipo, pudiendo ser detectadas mediante sensores piezoeléctricos o transductores ultrasónicos. Un ejemplo representativo de esta técnica es el uso de sensores acústicos ultrasónicos piezoeléctricos, integrados en sistemas portátiles de localización de descargas parciales.
- **Detección óptica**: Se apoya en la emisión de radiación luminosa, principalmente en los rangos ultravioleta y visible, producida durante los procesos de ionización del gas o del medio circundante. Esta radiación puede ser detectada mediante cámaras UV, como las cámaras de corona utilizadas en inspección de líneas y subestaciones, permitiendo identificar visualmente zonas activas de descarga. Este método es de carácter complementario y predominantemente cualitativo.
- **Detección química**: Se basa en la identificación de especies químicas y subproductos de degradación generados como consecuencia de los procesos de ionización y del deterioro del material aislante inducidos por las descargas parciales. En sistemas con aislamiento líquido, esta técnica se implementa mediante el análisis de gases disueltos (DGA), utilizando cromatografía de gases para cuantificar compuestos característicos. En sistemas en aire, pueden emplearse sensores de ozono (O_3) o de óxidos de nitrógeno como indicadores indirectos de actividad de descarga.

2.4. Métodos de análisis de descargas parciales en DC

La detección eléctrica de descargas parciales bajo excitación DC proporciona un conjunto de información comparable al obtenido en ensayos bajo AC. En ambos casos, se analizan magnitudes directamente asociadas a los impulsos de las descargas, con la excepción del ángulo de fase, el cual no tiene sentido físico en condiciones de excitación DC debido a la ausencia de periodicidad temporal [8, 9].

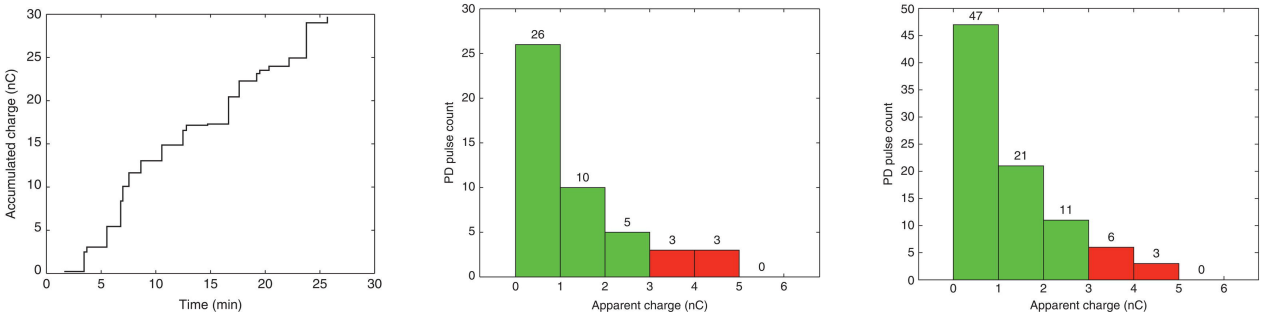
Entre las principales magnitudes que pueden medirse en ensayos de descargas parciales en DC se encuentran la carga aparente, expresada en picocoulomb o milivolts, la tasa de repetición de pulsos, la corriente promedio de descarga, la potencia asociada a la actividad de descarga y parámetros estadísticos como la tasa cuadrática. Adicionalmente, cuando se dispone de sistemas de medición con adecuada tasa de muestreo (f_s) y ancho de banda (BW), es posible registrar la forma de onda individual de los pulsos de descarga parcial, lo que permite

un análisis más detallado del fenómeno, como espectro de frecuencia del pulso y poder diferenciar entre ruido y DP [15].

No obstante, la norma IEC 60270 señala que los procedimientos convencionales utilizados para la determinación de la tensión de iniciación (PDIV) y de extinción (PDEV) de descargas parciales bajo tensión alterna no son, en general, directamente aplicables a ensayos con tensión continua. En condiciones de excitación DC, las descargas parciales suelen manifestarse durante la aplicación de la tensión o ante variaciones de esta (rampas o escalones controlados), y pueden presentar un comportamiento intermitente una vez que la distribución del campo eléctrico se estabiliza. En consecuencia, el análisis de descargas parciales bajo excitación DC requiere el empleo de enfoques y criterios específicos, algunos de los cuales se describen a continuación [16].

2.4.1. Indicadores estadísticos

En condiciones de contaminación y alta humedad, la actividad de descargas parciales superficiales se ve favorecida por la formación de capas conductoras sobre el aislamiento. En este contexto, indicadores simples como la carga aparente individual y la carga acumulada permiten una evaluación básica de la severidad del fenómeno. La carga aparente, definida según IEC 60270, entrega una medida estandarizada de la magnitud de los eventos, mientras que su distribución estadística refleja la dispersión y estabilidad de la actividad eléctrica. Por su parte, la carga acumulada proporciona una estimación global de la intensidad del proceso, resultando especialmente útil bajo excitación en corriente continua (DC), donde los fenómenos dependen de la redistribución de cargas superficiales y no de una referencia periódica de fase, la que esta ausente en DC.



(a) Carga aparente acumulada en DC.

(b) Histograma del conteo de PD vs carga aparente.

(c) Histograma de recuentos acumulados.

Figura 7: Indicadores simples de DP. [17]

2.4.2. Análisis de secuencia de pulsos (PSA)

El Análisis de Secuencia de Pulsos (PSA) es una técnica utilizada en el estudio de descargas parciales que parte de la idea de que cada descarga modifica el estado local del aislamiento, principalmente debido a la carga espacial que queda tras el evento. Esta modificación influye en la aparición del pulso siguiente, por lo que las descargas consecutivas no pueden considerarse independientes [8, 9]. A partir de esta dependencia, el PSA analiza las relaciones entre pulsos sucesivos considerando diferencias de carga, tensión y tiempo. En sistemas sometidos a excitación en corriente alterna, el análisis suele apoyarse en relaciones fase–tensión, mientras que bajo excitación en corriente continua, donde no existe una referencia de fase, el enfoque se basa principalmente en la magnitud de los pulsos y en los intervalos temporales entre ellos [15,18]. Esta metodología permite identificar distintos tipos de descargas parciales, evaluar la estabilidad del fenómeno y detectar la presencia de múltiples fuentes de descarga [19]. No obstante, su aplicación requiere una detección confiable de cada pulso y puede verse limitada en entornos con elevado nivel de ruido o cuando coexisten varios mecanismos de descarga, como ocurre frecuentemente en condiciones de contaminación y alta humedad [20, 21].

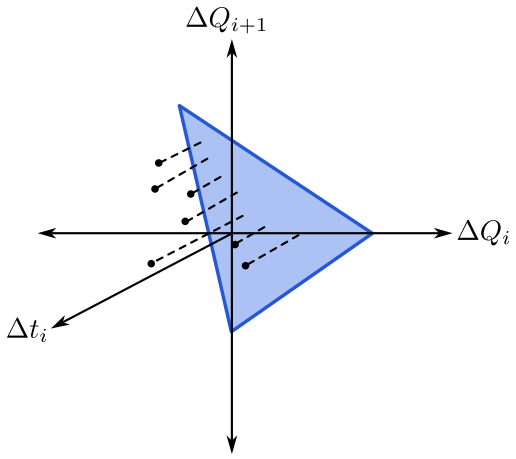


Figura 8: Ilustración de PSA tridimensional. [17]

El gráfico PSA deben considerarse conjuntamente tres variables, es decir, ΔQ_{i+1}, ΔQ_i y Δt_i, tal y como se aprecia en la Figura 8. En la práctica, se suelen usar mapas de calor, donde por ejemplo, colores fríos representan valores bajos, y colores cálidos representan valores altos, se representan de dicha manera, ya que ayuda a la comprensión de mejor manera que un gráfico 3D.

2.4.3. Mapas de tiempo-frecuencia (TF)

El mapa TF utiliza el concepto de longitud de tiempo equivalente (σ_T) y un ancho de banda equivalente (σ_F) para cada pulso, además se pueden resaltar y tratar por separado los grupos de pulsos con diferentes formas. De este modo, los pulsos de las señales se normalizan en el dominio del tiempo según:

$$\tilde{s}(t) = \frac{s(t)}{\sqrt{\int_0^T s^2(\tau)d\tau}} \tag{6}$$

Se debe considerar que, la normalización detallada en la ecuación [6] asigna pulsos con la misma forma, pero que difiere en un factor de escala, al mismo punto original ($s(t_i)$) en el plano TF. Esto es fundamental, pues los pulsos PD provienen de la misma forma de onda, pero con diferentes magnitudes, por lo que deben considerarse como la misma entidad.

Se define el "centro de gravedad" como:

$$t_0 = \int_0^T t \cdot \tilde{s}^2(t)dt \tag{7}$$

Donde t es el tiempo y T la duración del pulso. Luego, se obtiene la longitud del tiempo equivalente:

$$\sigma_T = \sqrt{\int_0^T (t_0 - t)^2 \cdot \tilde{s}^2(t)dt} \tag{8}$$

Por último, se define el ancho de banda equivalente:

$$\sigma_F = \sqrt{\int_0^\infty f^2 \cdot |\tilde{S}(f)|^2 df} \tag{9}$$

Para complementar, el principio de incertidumbre integra problemas en la resolución de tiempo-frecuencia, por lo tanto se pueden aplicar la transformada de wavelet sincronizada (SST), que reubica los coeficientes wavelet según su frecuencia instantánea, logrando representaciones más concentradas y adecuadas para la extracción de características [22, 23].

3. Propuesta experimental

En esta sección se describe la propuesta experimental desarrollada con el objetivo de analizar si existe una correlación entre el estado de contaminación de un aislador y las mediciones de corrientes de fuga y descargas parciales bajo excitación DC, En primer lugar, se identifican los entornos de contaminación correspondientes a la ubicación de la futura línea Kimal–Lo Aguirre, los cuales son posteriormente reproducidos de forma controlada en laboratorio. Luego, mediante ensayos de alta tensión, se miden la tensión de contorneo y la corriente de fuga de los aisladores bajo estudio. Además, se realizan mediciones de descargas parciales bajo tensión DC para cada condición de contaminación analizada y humedad. Finalmente, una vez adquiridos los datos experimentales, se lleva a cabo un análisis de resultados con el fin de relacionar las variables eléctricas medidas con las características de los distintos entornos de contaminación y humedad.

3.1. Probeta bajo estudio

La probeta bajo estudio corresponde a un aislador polimérico de silicona tipo suspensión - retención, de la marca Silpak de clase $15\,kV$. Dicho aislador esta fabricado con recubrimiento de silicona, núcleo de fibra de vidrio de alta resistencia mecánica y terminales de acero galvanizado en caliente (modelo AS-15-4FD).

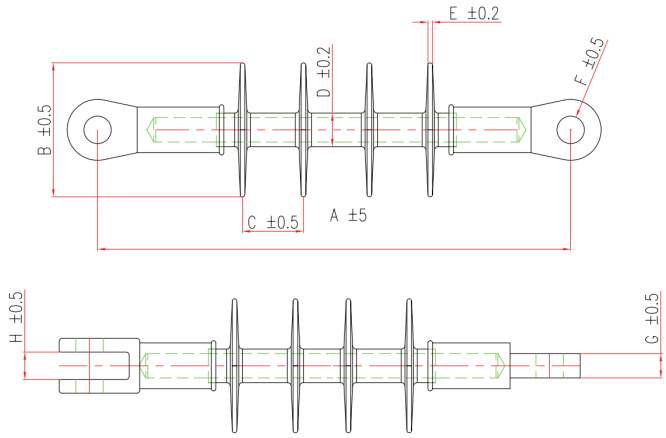


Figura 9: Dimensiones de aislador.



Figura 10: Probeta real de ensayo.

Figura 11: Características de probeta. [24]

Características de aislador										
Modelo	A	B(ϕ)	C	D(ϕ)	E	F(ϕ)	G	H	Distancia fuga	Distancia arco seco
AS-15-4FD	320	89	40	21.7	3	18	14	18.5	387	185

Tabla 3: Características geométricas de aislador.

Se usa dicho aislador dado que permite generar ensayos bajo las condiciones actuales del laboratorio disponible.

3.2. Contaminación artificial

3.2.1. Caracterización de la contaminación a partir de zona geográfica

Con el fin de emular adecuadamente los medios de contaminación se acude al trazado de la línea Kimal-Lo Aguirre, con las zonas destacadas por regiones en Chile, en base a su posición geográfica se proponen los siguientes entornos contaminados, estos son resumidos en la Tabla 4.



Figura 12: Línea Kimal-Lo Aguirre. [25]

Descripción	Entorno
Zona desértica de Atacama	E7
Zona desértica de Copiapó	E5
Zona más próxima a costa Chilena ($\approx 30\,km$)	E4
Distancia a costa ($\approx 50\,km$)	E2

Tabla 4: Clasificación de entornos a partir de trazado de línea.

Los entornos de contaminación detallados en la Tabla 4 son aproximaciones de escenarios reales de contaminación, sin embargo, si bien su precisión es importante para motivos del presente estudio el impacto de distintos escenarios de contaminación en el desempeño de la probeta, toma mayor relevancia que la proximidad entre los entornos a estudiar y los reales de terreno.

3.2.2. Generación de contaminación artificial (método de capa sólida)

Posterior a la categorización de los entornos contaminados se deben definir las concentraciones de elementos solubles (sal) y elementos no solubles (caolín). Para ello se tomaron las concentraciones desarrolladas por el trabajo de Marco Illanes [26], además a partir de sus concentraciones de realizaron tres contaminaciones por probeta para confirmar la metodología de contaminación y verificar los puntos de las concentraciones de ESDD y NSDD en el plano de entornos contaminados (véase Figura 3).

- **Procesos de contaminación:** En primer lugar se define el elemento diluyente, para este caso se emplea agua potable, sal y caolín (en las proporciones que amerite según contaminación). Se deben disponer de todos los equipos a emplear, es decir:
  1. Cabina de acrílico con sistema de aspersores.
  2. Motobomba para drenar solución.
  3. Manguera de conexión entre motobomba con sistema de aspersores.

4. Recipiente de por lo menos 20 litros.
5. Agitador para homogeneizar la mezcla.

Posteriormente se define el proceso para contaminar.

- **Proceso de contaminación:**
  - Limpiar probeta de ensayo adecuadamente con agua desmineralizada ($\sigma < 10\,\mu S/cm$) y un algodon para remover contaminantes depositados, luego dejar secar.
  - Purgar motobomba para eliminar aire atrapado y limpiar los ductos interiores, emplee 1 litro de agua potable para la motobomba sin conectar al sistema de aspersores, luego repetir, pero con la motobomba conectada al sistema de aspersores (esto asegura la limpieza de todos los elementos).
  - Llenar recipiente con 20 litros de agua potable, depositar mezcla contaminante e instalar probeta en el interior de la cabina de acrílico.
  - Mantener el agitador encendido durante todo el proceso de contaminación para asegurar que la mezcla sea homogénea todo el tiempo.
  - Encender motobomba y contaminar probeta hasta que se consumen 8 litros de la solución, posteriormente se contamina otra probeta con 8 litros más.
  - El excedente de 4 litros se mantiene por un margen de error en el proceso de contaminación.
  - Esperar alrededor de 10 minutos para que la solución excedente escurra por el aislador y al momento de retirar no se pierda la capa contaminante por movimiento inadecuado de la probeta.
  - Retirar probeta y dejarla al interior del laboratorio para que seque durante 4 a 8 horas.
  - Posteriormente, mediante inspección visual, se debe observar que la capa contaminante este seca (no tocar aislador).

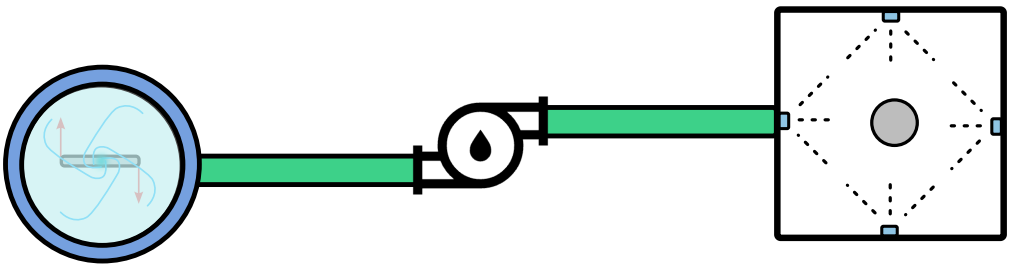


Figura 13: Disposición de equipos para contaminar probeta.

- **Proceso para medir contaminación depositada en probeta:** Una vez la probeta se encuentra con la capa contaminante, se deberán realizar mediciones de ESDD y NSDD, de acuerdo a la norma IEC 60815-1. Los pasos para la correcta medición son los siguientes:
  - **Solución de limpieza:** Se llena un vaso precipitado con 300 ml de agua desmineralizada ($\sigma < 10\mu S/cm$).
  - **Limpieza de probeta:** Mientras se usan guantes de vinilo, se sumerge un algodón en agua desmineralizada y se limpia la superficie del aislador, luego se sumerge la tórula de algodón en el agua desmineralizada y se exprime, se repite el proceso hasta limpiar completamente el aislador, evitando al máximo la pérdida de volumen de agua.
  - **Medición de ESDD:** Con el medidor de conductividad portable (véase Figura 14) se registra la conductividad y temperatura de la solución contaminada (revolver la mezcla para mantenerla homogénea). Posteriormente, se calcula el ESDD con las correcciones necesarias.

- **Medición de NSDD:** Se emplea un papel filtro seco (secado en horno según paso descrito en el siguiente punto). Luego, se emplea un matraz Büchner con bomba al vacío para empujar el fluido contaminado a través del papel filtro y que este pueda captar los contaminantes no solubles. Una vez finalizado, el papel filtro quedará húmedo, por lo tanto, es necesario secar el papel filtro para eliminar la humedad y tomar el peso de contaminantes no solubles de la manera más precisa posible.
- **Proceso de secado:** El proceso de secado consiste en dejar el papel filtro dentro de un horno a 105°C durante una hora, independientemente de si el papel aparenta estar seco o no, ya que esta metodología debe ser considerado como un preacondicionamiento para medir el papel filtro y que este no varíe su peso en función de parámetros ambientales, como es la humedad ambiente, ya que este último factor modifica levemente el peso del papel filtro (la precisión del peso medido es sumamente importante).



Figura 14: Medidor de conductividad Cond 3110.

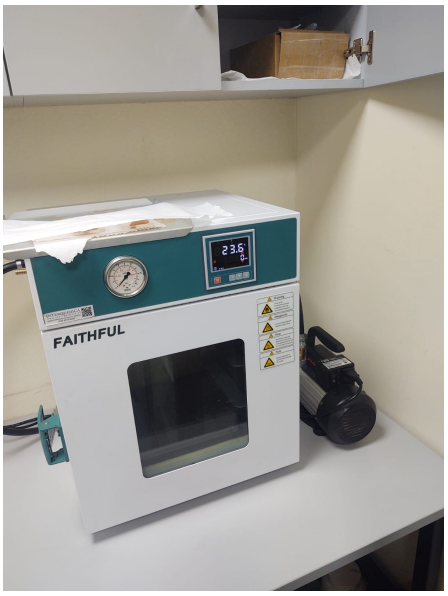


Figura 15: Horno de secado.

3.3. Cámara de niebla

3.3.1. Instrumentación

La cámara de niebla consiste en un recipiente cerrado con dos tapas, una superior para realizar el montaje de instrumentación necesaria para generar los distintos ensayos a la probeta, y una inferior, la que sirve para expulsar el agua producida por la saturación de vapor que pudiese darse dentro de la cabina, o bien, dentro del ducto del humidificador (ver Figuras 16 y 17 para mayor detalle).

Donde las características de humidificador e higrómetro se dan en las Tablas 5 y 6, respectivamente.

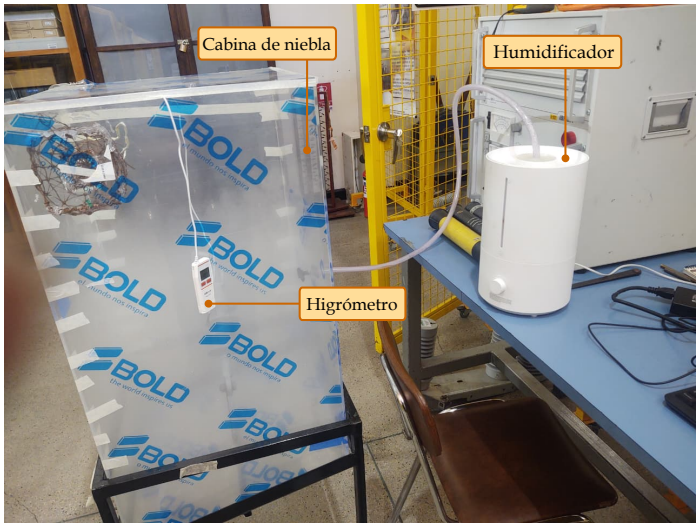


Figura 16: Cabina y humidificador.

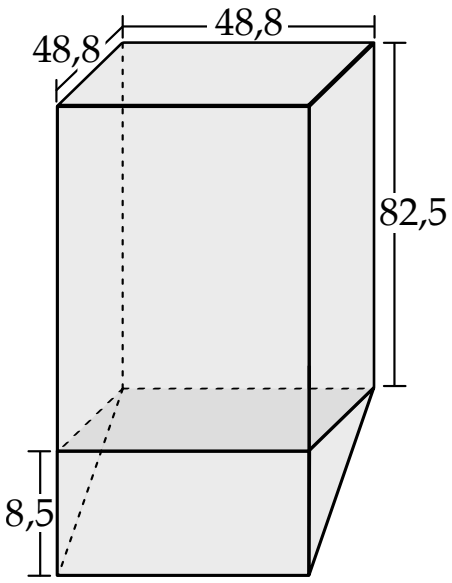


Figura 17: Dimensiones de cabina en centímetros.

Modelo	Xiaomi Humidifier 2 Lite
Tensión nominal	$220\,V$ (AC)
Frecuencia nominal	$50\,Hz$
Potencial nominal	$23\,W$
Capacidad de humidificación	$300\,mL/h$
Capacidad del tanque de agua	$4\,L$
Dimensiones	190x202x315 mm

Tabla 5: Características de humidificador.

Modelo	Tlog 10EH
Validación (HR)	**Tolerancia (HR)**
70 %	±3 %
60 %	±3 %
50 %	±3 %
40 %	±3 %
30 %	±3 %
20 %	±3 %
Otra	±5 %

Tabla 6: Características de higrómetro.

3.3.2. Acondicionamiento para cámara de niebla

Para analizar la hermeticidad de la cabina se realizaron mediciones de humedad en función del tiempo, ya que se debe estimar la cantidad de tiempo disponible que se tiene entre ensayos para considerar una humedad como "constante", posteriormente se estimarán la cantidad de ensayos que se pueden realizar entre intervenciones (intervenciones que consisten en inyección de vapor de agua a la cabina, una vez cae la humedad del interior bajo niveles no deseados).

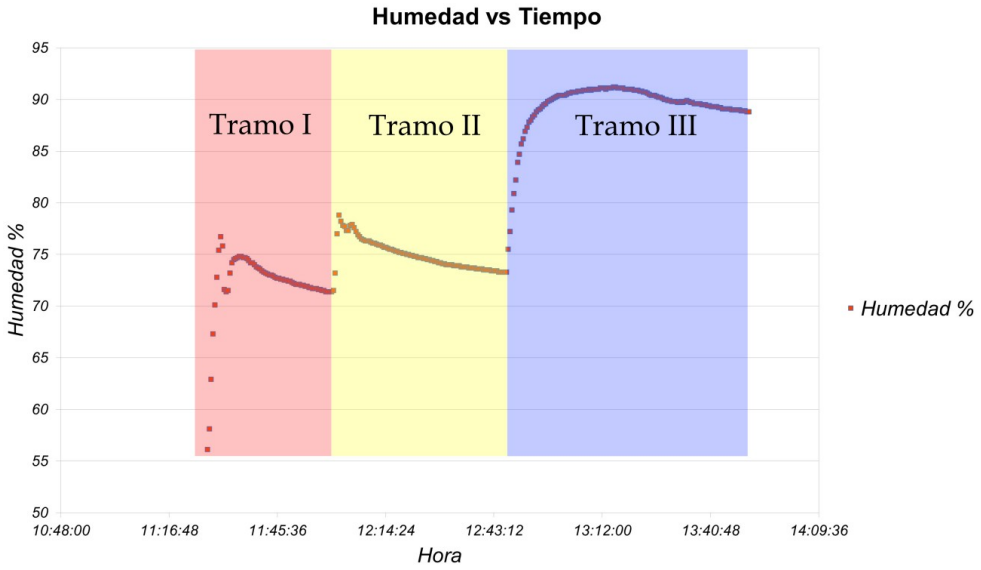


Figura 18: Humedad vs tiempo.

El "Tramo I", con duración de 30 minutos, es un preacondicionamiento que se le realiza a la cabina para que la dinámica de la humedad interior sea levemente más estable, esto se demuestra en el "Tramo II", con duración de 44 minutos (ver Gráficas 19 y 20). Para el "Tramo III", con duración de 56 minutos, la dinámica es diferente, ya que se aprecia un incremento en la humedad, luego de apagar el sistema de humidificación, esto se puede deber principalmente al instrumento y la sonda que posee, en la práctica se observó que a humedad de, aproximadamente el 90 %, la superficie de los objetos tendía a humedecerse, sumado a que la sonda de medición es metálica, vale decir, elementos metálicos presentan una mayor conductividad térmica, por lo que pueden enfriarse más rápidamente, facilitando que su temperatura superficial alcance antes el punto de rocío del aire, lo que favorece la condensación de humedad y la formación de una capa húmeda, la que puede entorpecer la adecuada medición de humedad ambiental, es por ello que se opta por destacar únicamente la pendiente de bajada del "Tramo III".

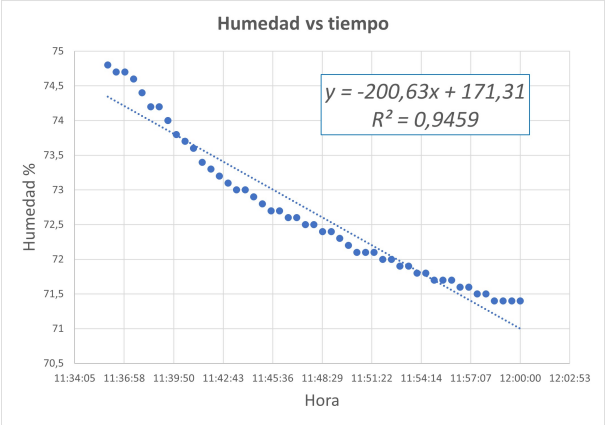


Figura 19: Tramo I - Humedad vs tiempo.

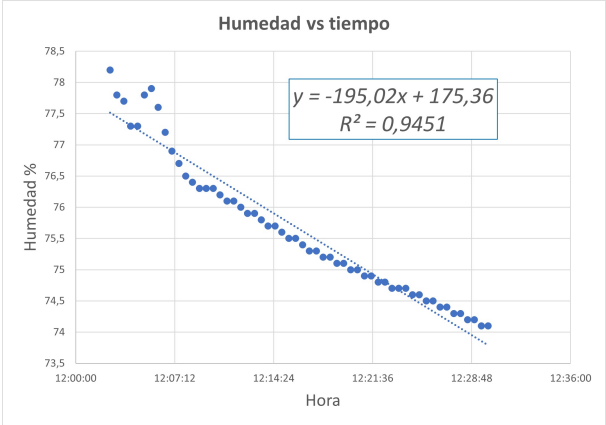


Figura 20: Tramo II - Humedad vs tiempo.

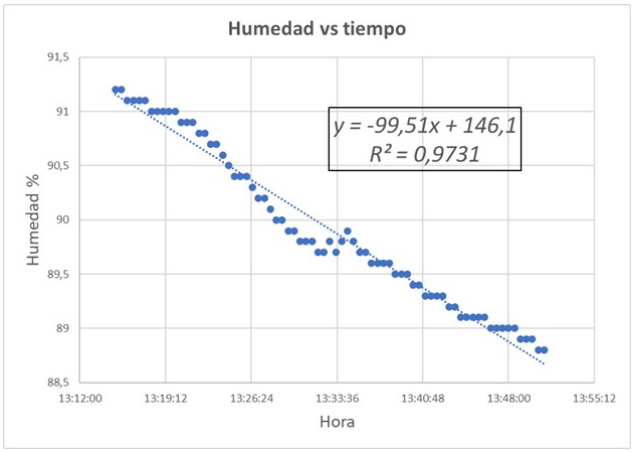


Figura 21: Tramo III - Humedad vs tiempo.

3.3.3. Metodología de humectación dentro de la cabina

Los puntos de interés para los valores de humedad a analizar son tres: 60 %, 75 % y 90 %, se toman esos tres puntos en particular, ya que permite que no se solapen las mediciones a registrar dada la precisión de los instrumentos de medición, por otro lado, se busca una tendencia desde la humedad que se considera habitual 60 %, la que también se considera como seco, hasta una humedad alta como son los 90 %, además se selecciona un punto medio entre ambos, ya que permite observar una transición más suave entre los dos puntos previamente mencionados.
Se permite una holgura del ±2 % (es decir, una ventana de 4 % de HR) de humedad entorno al punto de medición registrado por el higrómetro, ya que se considera una holgura práctica (deja a disposición un tiempo razonable) para los ensayos y a su vez, permite una medición confiable considerando la tolerancia del higrómetro (véase Tabla 6). Por lo tanto, la medición de humedad tendrá las siguientes tolerancias:

Valor de humedad medido	Holgura humedad	Tolerancias sumadas	Máximo valor posible	Mínimo valor posible
60 %	±2 %	±5 %	65 %	55 %
75 %	±2 %	±5 %	80 %	70 %
90 %	±2 %	±7 %	97 %	83 %

Tabla 7: Tolerancias del punto de medición.

Notar que tomando una holgura del ±2 % no se solapan los valores de humedad registrados (peores casos), lo que permite una medición de mayor confianza para la humedad dentro de la cabina. De este modo, considerando la holgura del ±2 % entorno al punto de medición, entonces se pueden estimar los máximos tiempos disponibles para realizar los ensayos, según sea el nivel de humedad. Considerando el ajuste lineal de las curvas 19, 20 y 21 es posible obtener la variación de humedad en función del tiempo:

$$\frac{dHR^{I}(t)}{dt} = -200.63\left[\frac{\%}{dia}\right]\cdot\frac{1}{24}\left[\frac{dia}{hr}\right] = -8.360\left[\frac{\%}{hr}\right] \tag{10}$$

$$\frac{dHR^{II}(t)}{dt} = -195.02\left[\frac{\%}{dia}\right]\cdot\frac{1}{24}\left[\frac{dia}{hr}\right] = -8.126\left[\frac{\%}{hr}\right] \tag{11}$$

$$\frac{dHR^{III}(t)}{dt} = -99.51\left[\frac{\%}{dia}\right]\cdot\frac{1}{24}\left[\frac{dia}{hr}\right] = -4.146\left[\frac{\%}{hr}\right] \tag{12}$$

Luego, considerando que el tiempo se evalúa en minutos, se tendrá que:

$$\frac{dHR^{I}(t)}{dt} = -0.1393\left[\frac{\%}{min}\right] \tag{13}$$

$$\frac{dHR^{II}(t)}{dt} = -0.1354 \left[\frac{\%}{min}\right] \tag{14}$$

$$\frac{dHR^{III}(t)}{dt} = -0.0691 \left[\frac{\%}{min}\right] \tag{15}$$

Si se exige un límite de variación a la humedad (4 % de variación, ya que es el límite de la ventana confiable de medición), entonces se tiene:

$$\frac{\Delta HR^{I}}{\Delta t} = -0.1393 \rightarrow \Delta t^{I}_{max} = \frac{\Delta HR^{I}_{max}}{-0.1393} = \frac{-4}{-0.1393} = 28.72\,[min] \tag{16}$$

$$\frac{\Delta HR^{II}}{\Delta t} = -0.1354 \rightarrow \Delta t^{II}_{max} = \frac{\Delta HR^{II}_{max}}{-0.1354} = \frac{-4}{-0.1354} = 29.54\,[min] \tag{17}$$

$$\frac{\Delta HR^{III}}{\Delta t} = -0.0691 \rightarrow \Delta t^{III}_{max} = \frac{\Delta HR^{III}_{max}}{-0.0691} = \frac{-4}{-0.0691} = 57.89\,[min] \tag{18}$$

- Para el tramo I se disponen de 28 minutos y 43 segundos aproximadamente para realizar las mediciones.
- Para el tramo II se disponen de 29 minutos y 32 segundos aproximadamente para realizar las mediciones.
- Para el tramo III se disponen de 57 minutos y 53 segundos aproximadamente para realizar las mediciones.

Los tiempos son razonablemente útiles para los ensayos a realizar dentro del presente estudio, sin embargo, se irá revisando continuamente la cámara después de cada ensayo.
Se concluye que la cámara de niebla dispone de una hermeticidad suficiente para los ensayos a realizar en las humedades propuestas.

3.3.4. Pasos para preacondicionar probeta en cabina

- Al inicio de cada día, previo a la realización de mediciones, se inyectará vapor a caudal mínimo admisible por humidificador hasta conseguir el primer punto de humedad de interés, pudiendo ser 60 %, 75 % y/o 90 % y se esperan 5 minutos.
- Se instala la probeta dentro de la cabina y se mantiene un caudal de vapor constante y mínimo (en base a la capacidad del humidificador) durante 30 minutos, manteniendo $\pm 2\,\%$ en torno al punto de humedad deseada (apagando y encendiendo cuando sea necesario).
- Para el caso de humedad relativa del 60 %, considerado como "caso seco", queda sujeto a condiciones climáticas diarias, pues si la condición del día es inferior a la deseada, es decir, $HR < 58\,\%$, entonces se deberá aplicar método de humectación, en caso que $58\,\% \leq HR \leq 62\,\%$, se mantiene la probeta tal y como está, por último, si $HR > 62\,\%$, entonces se opta por tomar la medición en otro día o momento del día.
- Cumpliendo lo anterior, se da por finalizado el proceso de humectación de la probeta a ensayar.

3.4. Ensayos de alta tensión

3.4.1. Determinación de tensión de contorneo

En la presente sección se describen los ensayos de medición de tensión de contorneo, la metodología de ensayo es la misma para cualquiera que sea el ambiente y contaminación. Además, los ensayos siguen los lineamientos generales de la norma IEC 60060-1 [27], aplicando tensión de polaridad negativa y una progresión de Clase 3.
En primer lugar, se define el circuito a emplear para el ensayo de tensión de contorneo (véase Figura 22).

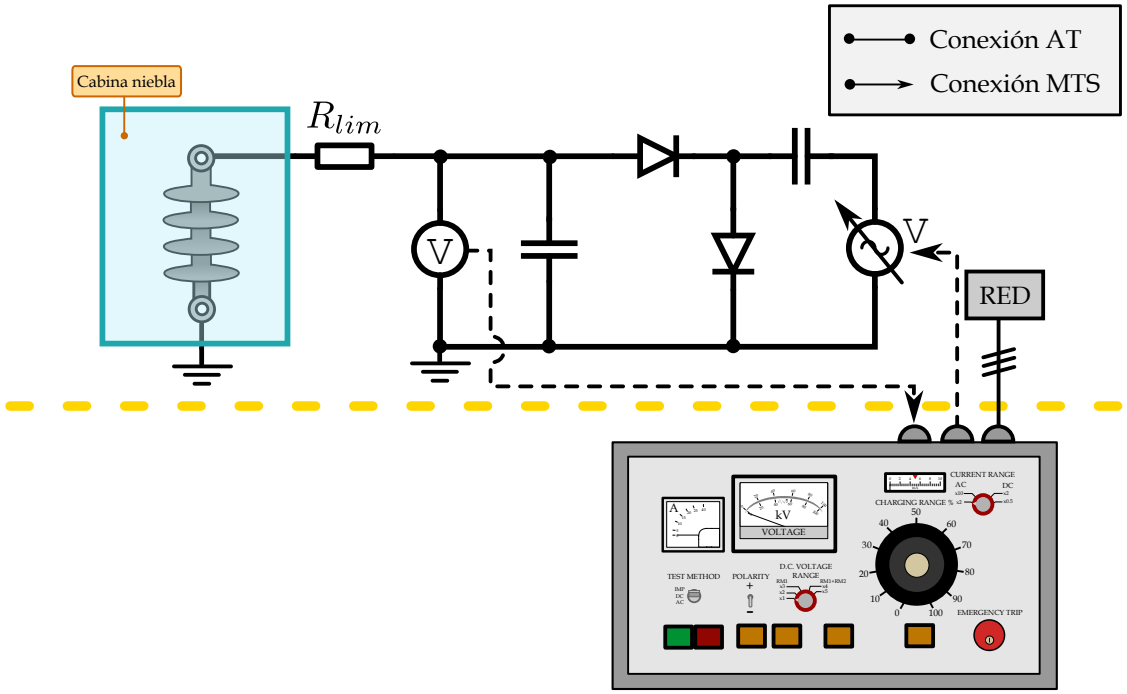


Figura 22: Circuito de medición para tensión de contorneo.

La resistencia limitadora consiste en agua destilada ($\sigma < 10\,\mu S/cm$ mezclada con una pequeña porción de sal común (NaCl)).
Posteriormente, se definen los pasos para tomar mediciones de tensión de contorneo.

Procesos para medir con probeta en seco:

- Energizar el sistema, teniendo especial cuidado con salir del espacio de ensayo con la puerta cerrada y sistema de seguridad activo.
- Encender MTS y activar en modo DC(-).
- Energizar el sistema de manera continua (2 kV/s es una velocidad razonable para el ensayo) hasta generar ruptura.
- Bajar rápidamente la tensión a un nivel bajo (bajo el 20 % de la tensión de contorneo es un valor razonable), esperar 30 segundos y repetir paso anterior.
- Finalmente, se desenergiza el circuito lentamente y se apaga el sistema.
- Se repite el proceso con otra probeta.

Procesos para medir con probeta en húmedo:

- Instalar probeta dentro de la cabina.
- Instalar humidificador y sellar cabina, confirmar que no quede ninguna apertura entre la cabina y el medio circundante.
- Seguir procedimiento de preacondicionamiento descrito en punto 3.3.4.
- Se retira el humidificador y el higrómetro (ya que el pulso electromagnético generado por la ruptura podría dañar los dispositivos), posteriormente se continua con el proceso detallado para medir tensión de contorneo en seco.

Consideraciones respecto a tiempos de medición:

Considerando que los incrementos de tensión se dan de manera discreta a una tasa de $2\,kV/s$, entonces es posible estimar los tiempos de ensayos, es decir:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = 2\,\frac{kV}{s}$$

Luego, para obtener el tiempo necesario para realizar el ensayo, es necesario conocer el valor de tensión de ruptura, pues este definirá el punto final del ensayo, por lo tanto, si se asume que el valor inicial de tensión es $V_0 = 0\,kV$ (sólo para la primera medición), luego será de $V_0 = 0.2 \cdot V_{rup}$ y el valor de tensión de contorneo V_{rup}, se tendrá que:

$$\Delta t_1 = \frac{V_{rup}}{2} \quad \wedge \quad \Delta t_{(i>1)} = \frac{0.8 \cdot Vrup}{2}$$

Donde Δt está medido en segundos. Suponiendo un umbral de tensión de contorneo de $160\,kV$, se tiene:

$$\Delta \hat{t}_1 = \frac{160}{2} = 80\,s \quad \wedge \quad \Delta t_{(i>1)} = 0.4 \cdot 160 = 64\,s$$

Considerando que se realizan diez mediciones y se deben tomar pausas obligatorias de treinta segundos, entonces el tiempo total del ensayo puede ser obtenido según:

$$\Delta t_{ruptura} = \sum_{i=1}^{10} \Delta \hat{t}_i + 270 \tag{19}$$

Dado el umbral seleccionado de tiempo, se tendrá que el tiempo total del ensayo es:

$$\Delta t_{ruptura} = 926\,s$$

Equivalente a 15 minutos con 26 segundos, tiempo suficiente para la realización de ensayos necesarios. Aún así, se debe monitorear, por lo menos, cada cuatro rupturas el estado del aislador y humedad de cabina, ya que el arco eléctrico puede secar zonas del aislador y modificar la humedad circundante.

3.4.2. Determinación de corriente de fuga

En la presente sección se describen los ensayos de medición de corriente de fuga, la metodología de ensayo es la misma para cualquiera que sea el ambiente y contaminación. Además, los ensayos siguen los lineamientos generales de la norma IEC 60060-1 [27], aplicando tensión de polaridad negativa.
En primer lugar, se define el circuito a emplear para el ensayo de corriente de (véase Figura 23).

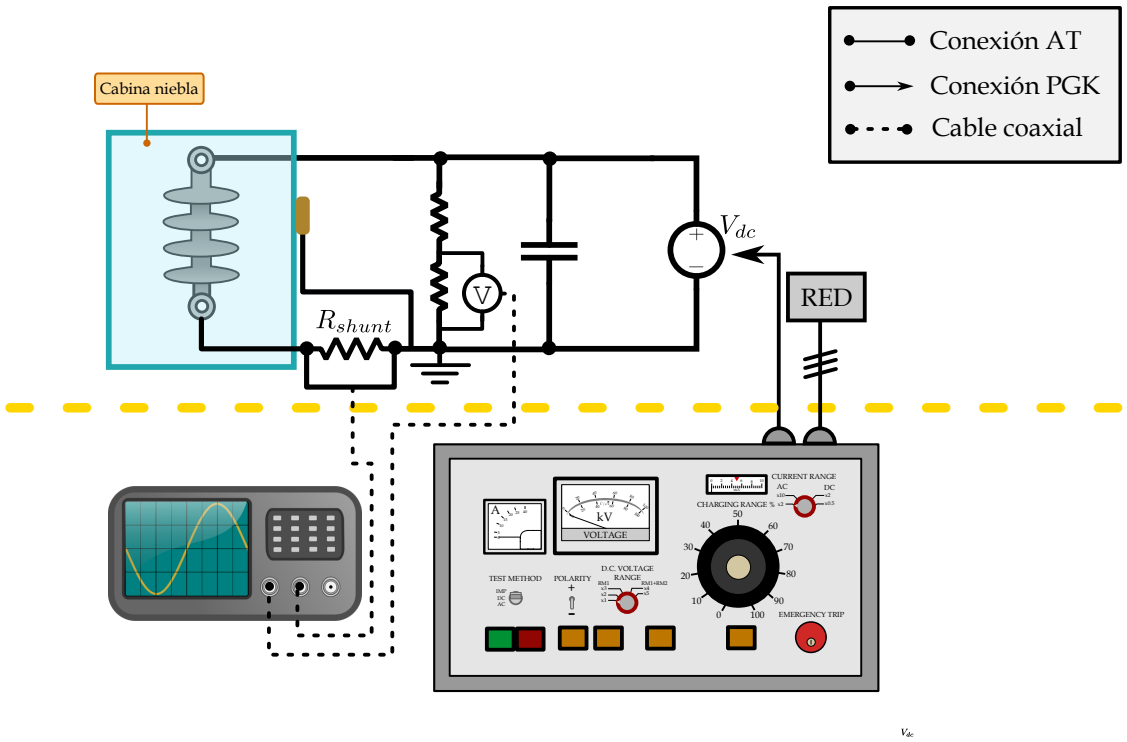


Figura 23: Circuito de medición para corriente de fuga.

Procesos para medir con probeta en seco:

- Definir nivel de tensión de contorneo de la probeta (se debe conocer antes con tal de no sobrepasar el 70 % de dicho valor).
- Ajustar multímetro, con tal de tener una resistencia interna de $3.2k\Omega$.
- Se energiza el aislador a un paso de $2\,kV/s$ hasta conseguir la tensión máxima de prueba.
- Se registra de forma continua el valor de corriente del amperímetro por 180 segundos (es posible grabar la pantalla del amperímetro y posteriormente se registran las mediciones de corriente cada 10 segundos).
- Finalmente, se desenergiza el circuito lentamente y se apaga el sistema.
- Se repite el proceso con otra probeta.

Procesos para medir con probeta en húmedo:

- Instalar probeta dentro de la cabina.
- Instalar humidificador y sellar cabina, confirmar que no quede ninguna apertura entre la cabina y el medio circundante.
- Seguir procedimiento de preacondicionamiento descrito en punto 3.3.4.

- Se retira el humidificador y el higrómetro (ya que el pulso electromagnético generado por la ruptura podría dañar los dispositivos), posteriormente se continua con el proceso detallado para medir corriente de fuga en seco.

Consideraciones respecto a tiempos de medición:

Considerando que se debe aumentar la tensión desde cero hasta un 70 % del valor de ruptura, y que las mediciones de corrientes de fuga toman un tiempo de tres minutos por ensayo, entonces el ensayo completo toma un tiempo de:

$$\Delta t_{fuga} = \frac{0.7 \cdot V_{rup}}{2} + 300 = 356\,s$$

Lo que corresponde a 5 minutos con 56 segundos, tiempo suficiente para la toma de mediciones dada las limitaciones herméticas de la cabina.

3.4.3. Determinación de descargas parciales

En la presente sección se describen los ensayos de medición de descargas parciales, para distintos escenarios de contaminación y humedad en aisladores poliméricos, los entornos son: Caso base (probeta limpia), E2, E4, E5 y E7 (con todas sus variantes de humedad relativa, es decir, 60 %, 75 % y 90 %).
Se siguen lineamientos generales de la norma IEC 60270 [14], además se emplean en simultáneo dos instrumentos de medición, Omicron MPD600 y osciloscopio con HFCT, el cual captura la corriente a través del cable a tierra. El osciloscopio (KEYSIGHT Infiniium DSOS104A) se configuró a una tasa de muestro de 250 MSa/s, ya que se consideró adecuada para la obtención de pulsos de corriente debido a la ionización en la probeta de ensayo.
En primer lugar, se define el circuito a emplear para el ensayo de descargas (véase Figura 24).

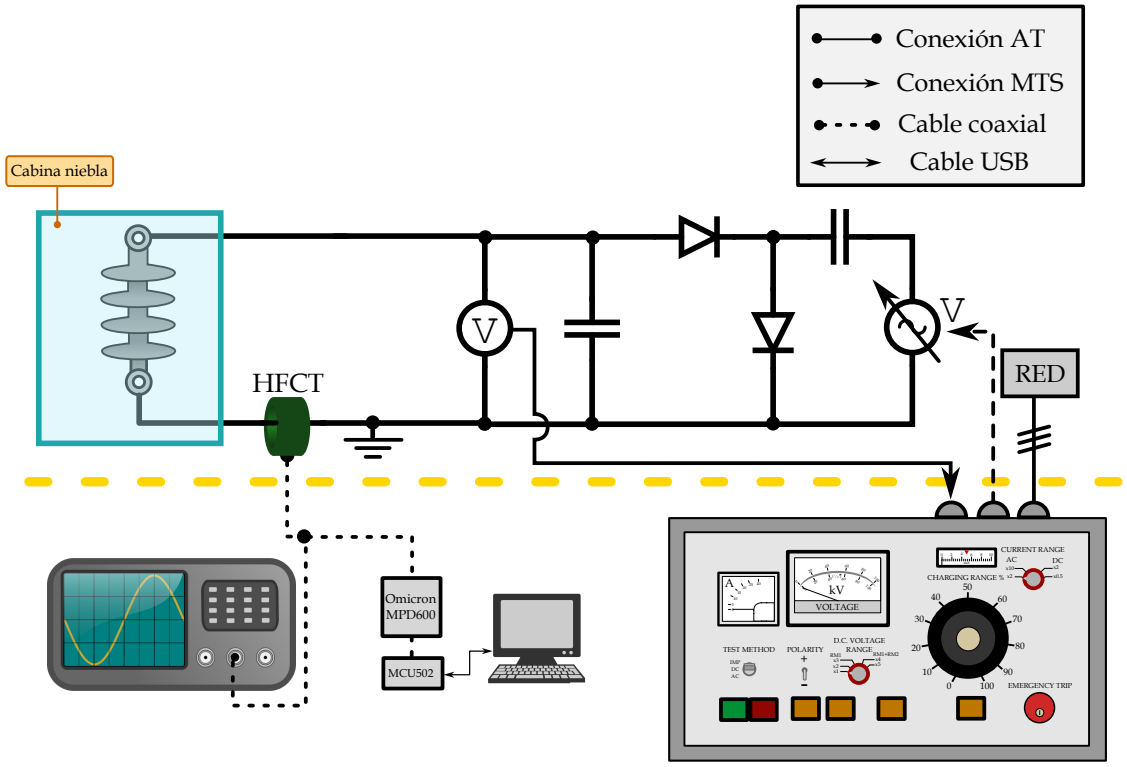


Figura 24: Circuito de medición para descargas parciales.

Proceso para medir descargas parciales:

- Instalar probeta dentro de la cabina.
- Instalar humidificador y sellar cabina, confirmar que no quede ninguna apertura entre la cabina y el medio circundante.
- Seguir procedimiento de preacondicionamiento descrito en punto 3.3.4.
- Calibrar sistema de medición de descargas parciales (se verifican los pulsos mediante osciloscopio y computador).
- Se retira sistema de calibración para continuar con energizar la probeta durante 3 minutos a $60\,kV$, se registran simultáneamente las descargas parciales (esta parte del proceso es útil para dar una primera inspección al ruido que pudiese existir producto de la subida de tensión y posteriormente registrar todas las descargas productos de condiciones intrínsecas de operación).
- Una vez impuesta la tensión deseada en la probeta, se comienza el registro de descargas parciales a través del software del dispositivo omicron "*MPD and MI 1.6.3*" y el osciloscopio manipulado a través de Matlab.
- Finalizada la medición se detiene el registro de medición de DP (10 minutos de medición) y luego se apaga el sistema de excitación.

4. Resultados experimentales

A continuación se detallan y analizan brevemente los resultados obtenidos en laboratorio. Los resultados son presentados en 4 secciones: *Entornos de contaminación, tensiones de ruptura, corrientes de fuga y descargas parciales.*

4.1. Perfiles de contaminación y humedad

Para definir los puntos de contaminación en el plano NSDD y ESDD, se realizan los procesos de medición de contaminantes descritos en la sección 2.2.1. A continuación se definen los puntos promedios de los valores de NSDD y ESDD obtenidos en las mediciones.

Entorno	Concentración de sal g/l	Concentración de caolín g/l	ESDD mg/cm^2	NSDD mg/cm^2	Relación ESDD/NSDD
E2	1	1	0.0139	0.0178	0.78
E4	1	10	0.0150	0.1148	0.13
E5	20	2	0.1922	0.0318	6.04
E7	80	2	0.8980	0.0287	31.33

Tabla 8: Perfiles de entornos contaminados en el plano ESDD y NSDD.

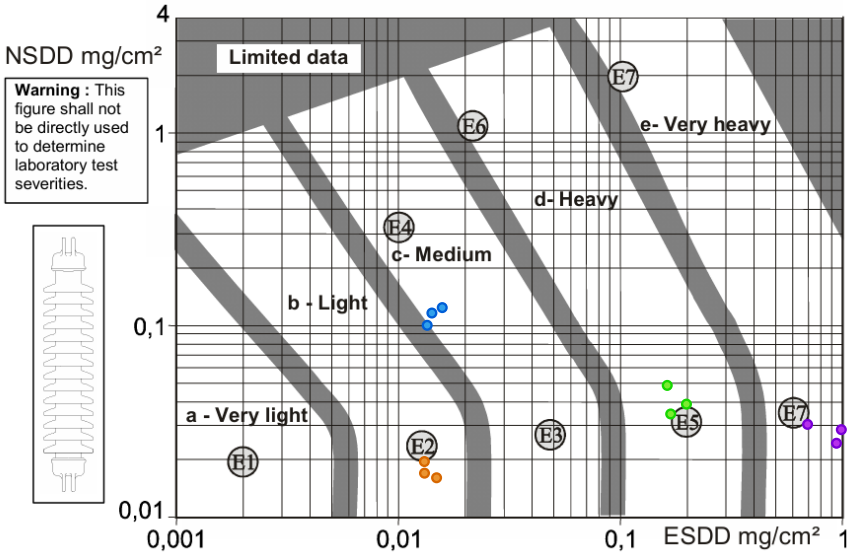


Figura 25: Perfiles de entornos contaminados.

A continuación se detallan el aspecto visual de las probetas contaminadas con los perfiles de humedad relativa de 60 % y 90 %, se omite la condición de 75 %, ya que visualmente no se aprecia diferencia.



Figura 26: Base - 60 % HR.



Figura 27: E2 - 60 % HR.



Figura 28: E4 - 60 % HR.



Figura 29: E5 - 60 % HR.



Figura 30: E7 - 60 % HR.



Figura 31: Base - 90 % HR.



Figura 32: E2 - 90 % HR.



Figura 33: E4 - 90 % HR.



Figura 34: E5 - 90 % HR.



Figura 35: E7 - 90 % HR.

Para la probeta limpia se aprecia, a nivel visual, el nulo impacto de la humedad en la formación de moléculas de agua en su superficie, esto se justifica por la capacidad hidrofóbica del material aislante. Para el entorno $E2$ se aprecian pequeñas formaciones de moléculas de agua, aún son mínimas, pero indica un deterioro en la capacidad hidrofóbica del aislador dada una contaminación ligera. Para el entorno $E4$ no se destaca la formación de moléculas de agua, estas son pequeñas, sin embargo, se aprecia la contaminación no soluble en su superficie. $E5$ destaca un salto importante en el impacto de elementos solubles para la capacidad hidrofóbica del aislador, de este modo rápidamente se concluye que la sal es el principal elemento que afecta de modo negativo a la hidrofóbicidad del aislador, ya que las sales ($NaCl$) capturan las moléculas de agua del aire reteniendolas en la superficie del aislador, por último, $E7$ es una condición similar a $E5$ llevada a un extremo, incluso el agua escurre en algunas zonas del aislador, esto favorece la formación de caminos conductores a la hora de energizar el aislador, lo que puede ser crítico para fenómenos de ruptura.

Se resalta que las condiciones húmedas de operación son respuestas naturales del aislador ante la presencia de una húmedad extremadamente alta (HR $\approx$ 90 %), esto último se considera importante, pues se diferencia del método spray propuesto por la normativa IEC 60815-1, el cual “fuerza” las moléculas de agua sobre el aislador.

4.2. Tensiones de contorneo

Las tensiones de contorneo para tensión de excitación DC negativa son detalladas mediante un diagrama de caja y bigote, donde se destaca cada entorno de contaminación en el "$eje\,x$" y "$eje\,y$" el valor de la tensión asociada, además se destaca con colores las diferentes condiciones de humedad (azul 60 %, rojo 75 % y verde 90 %). Se destacan tensiones sin muchas variaciones para todos los casos, esto indica que el proceso de humectación y mantener la probeta dentro de la cabina con una humedad interior persistente y constante a lo largo de los ensayos es favorable y genera consistencia en las mediciones, en otras palabras, anula parcialmente el secado generado por los flashover.

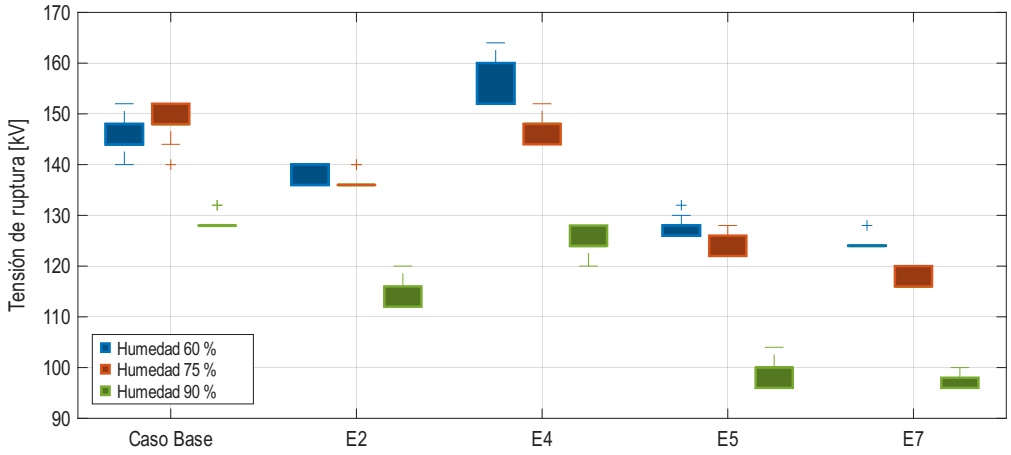


Figura 36: Tensiones de contorneo en base a escenarios de contaminación y humedad.

- **Caso base:** Para el caso base entre la humedad de 60 % y 75 % se aprecia un efecto contraintuitivo de la humedad en la probeta, pues a 75 % se observa una subida en la tensión de contorneo, se propone que una humedad de 60 % no es suficiente como para generar una capa húmeda en la superficie del aislador, es más bien una capa irregular, lo que permite una distribución de campo eléctrico no uniforme, esto desencadena el efecto de ruptura antes de lo que podría ocurrir con una capa húmeda más consistente (dado los gradientes de potencial en puntos secos). Para una humedad del 75 % se estima una capa húmeda más consistente, lo que permite una distribución de campo eléctrico más uniforme por la redistribución parcial de cargas eléctricas. Para una humedad del 90 % se aprecia una capa húmeda mayor que los casos anteriores, y la disminución en la tensión de contorneo indica que dicho camino conductor es predominante respecto a la homogenización de campo eléctrico propuesta en el punto anterior, por lo que la conductividad superficial se ve incrementada, acelerando los fenómenos de ruptura. Esto puede sugerir una transición de mecanismos de ruptura, donde en seco predominan las concentraciones locales de campo eléctrico por variables geométricas del aislador y en húmedo los valores asociados a la conductividad superficial [28].
- **Caso E2:** Nuevamente se aprecia un impacto poco significativo de la humedad para valores inferiores a 75 % y un impacto significativo para una humedad de 90 %, pues la tensión se redujo de manera considerable, esto sugiere que la contaminación salina aún es baja como para producir un incremento apreciable en la conductividad superficial para humedades inferiores al 75 %.
- **Caso E4:** Este caso representa una irregularidad en el comportamiento del contaminante, ya que la tensión de contorneo es incluso superior al caso limpio, el exceso de elementos no solubles parece incrementar levemente la tensión de ruptura, sin embargo, esto también puede ser explicado por una variabilidad en las tensiones de contorneo al momento de las mediciones. El caolín sugiere un incremento en la tensión para humedades bajas, sin embargo, para altas humedades los mecanismos de ruptura tienden a ser dominados por altas humedades, cabe resaltar que el caso E2 y E4 tienen concentraciones salinas similares, y la tensión de contorneo es superior para E4, donde existe una mayor concentración de caolín, esto puede sugerir un incremento en los valores de conductividad superficial del caso E4

respecto a E2 (para apoyar dicha afirmación, véase la tabla comparativa porcentual de tensiones de ruptura 9).

- **Caso E5:** Existe una diferencia menor entre la humedad de 60 % y 75 %, aún así se aprecia un impacto de la humedad en la capacidades aislantes de la probeta, esto sugiere el efecto dominante de las sales interactuando con la capa húmeda formada en la superficie, se destaca que desde este entorno contaminado el nivel de humedad de 75 % muestra un efecto mayormente conductivo en el aislador, además existe una caída considerable en el 90 %, donde se hace notar el elevado ESDD del contaminante depositado en la probeta.
- **Caso E7:** Caso similar al anterior, se aprecian disminuciones de la capacidad aislante en función de la humedad de manera aún más evidente, pues las contaminaciones son, en esencia E5, pero llevada al extremo.

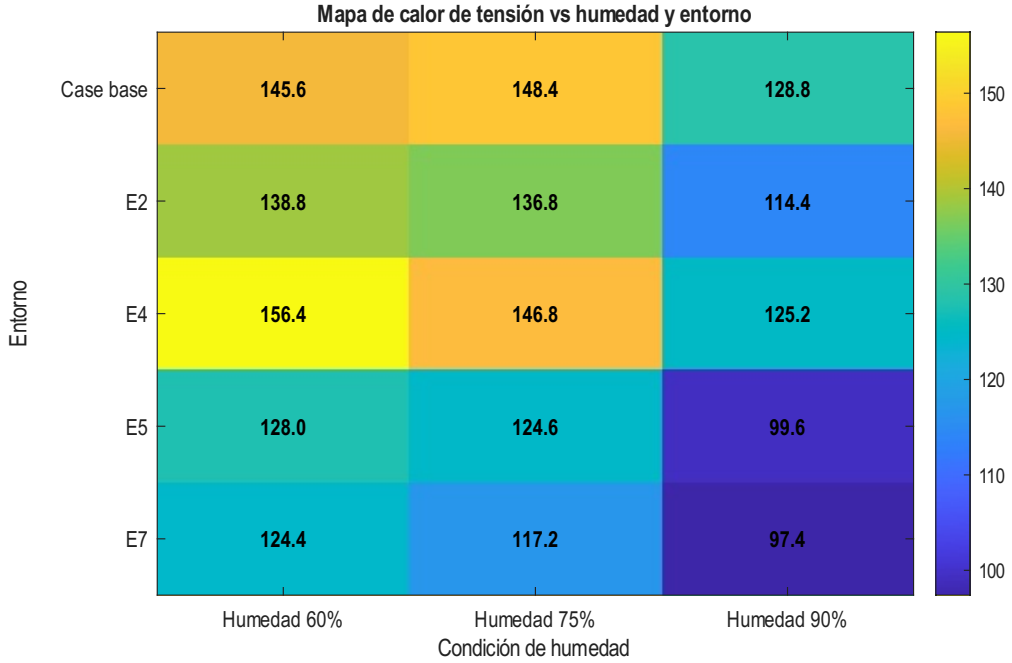


Figura 37: Mapa de calor para tensiones de ruptura en función de contaminación y humedad.

El mapa de calor muestra una disminución sistemática de la tensión soportada a medida que aumenta la humedad relativa. Esta reducción no es lineal, sino que se vuelve especialmente pronunciada al pasar de 75 % a 90 % HR, lo que sugiere la formación de una película conductora continua sobre la superficie del aislador, facilitando el incremento de la corriente de fuga, dado el incremento de la conductividad por las sales presentes. No obstante, como se discutió previamente en el análisis del caso base y del caso E4, existe un punto en el cual la distribución del campo eléctrico adquiere mayor relevancia que la propia conductividad superficial en el comportamiento dieléctrico del aislador.

Para analizar adecuadamente se toman como referencias las tensiones de contorneo del caso base a un 60 % de HR, ya que representa el punto de partida para todas las demás condiciones. La forma de obtener los porcentajes de variación en la tensión de contorneo es:

$$\%V_{rup} = \frac{V_i - V_{ref}}{V_{ref}} \cdot 100 \tag{20}$$

- V_i : Tensión de la condición particular.
- V_{ref} : Tensión de referencia, es decir, tensión de contorneo a 60 % de HR y limpio.

Notar que el porcentaje de variación podrá ser positivo o negativo, según sea el caso, esto se mantiene, ya que permite observar si existe incremento o disminución en la tensión a partir de la humedad y/o el contaminante. A continuación se presenta la tabla con los porcentajes de incremento o disminución en la tensión de contorneo:

Condición de operación	**Perfil de humedad**		
	60 %	**75 %**	**90 %**
Caso Base	-	1.9 %	-11.5 %
Caso E2	-4.7 %	-6.0 %	-21.5 %
Caso E4	7.4 %	0.8 %	-14.0 %
Caso E5	-12.1 %	-14.4 %	-31.6 %
Caso E7	-14.6 %	-19.5 %	-33.1 %

Tabla 9: Diferencias porcentuales respecto a caso base limpio a 60 % HR.

Observando la Tabla 8 y 9 se aprecian ciertas particularidades, los ya mencionados por cada caso, donde se refuerza la idea de que la presencia de elemento no soluble (caolín) parece anular la componente salina, al menos de manera parcial, por lo que el entorno E4 no se diferencia en gran medida del caso base (parece absorber la humedad, siendo un elemento de baja conductividad). Para el resto de casos (E2, E5 y E7) existe una relación deducible, los tres casos poseen una concentración de caolín parecida entre ellos, por lo que se puede asociar los cambios en la tensión de contorneo al grado de ESDD (deducción sólo válida entre ellos), sin embargo, para el 90 % de HR, si bien existe un elevado deterioro en la tensión de contorneo, entre el caso E5 y E7 no parece existir una diferencia notable, considerando únicamente la tensión de contorneo, aunque en la práctica esta diferencia es mínima, incluso se puede estimar que son similares y considerar que en dichos niveles de humedad, el grado de efecto que tiene el nivel de ESDD alcanza un límite entre E5 y E7, posterior a dicho grado de contaminación las capacidades dieléctricas del aislador parecen no verse afectadas en mayor medida para lo que respecta a la capacidad de ruptura del aislador, por ello se debe complementar este fenómeno con el análisis de la corriente de fuga. Los resultados sugieren la existencia de un régimen de saturación en la influencia del ESDD sobre la tensión de contorneo bajo condiciones de alta humedad relativa [29]. En particular, a 90 % HR el incremento del nivel de contaminación soluble no produjo una reducción apreciable adicional de la tensión soportada, lo que podría indicar que el mecanismo de ruptura deja de estar dominado únicamente por la conductividad superficial, aunque esta condición también podría sugerir que el método de humectación tiene sus limitantes ante elevados niveles de ESDD, pudiendo no ser capaz de disolver toda la sal depositada en la superficie del aislador, en complemento con la alta capacidad hidrofóbica del material del aislador.

4.2.1. Relación entre tensión de contorneo, contaminación y humedad

Se destaca la correlación en términos generales de las distintas variables estudiadas.

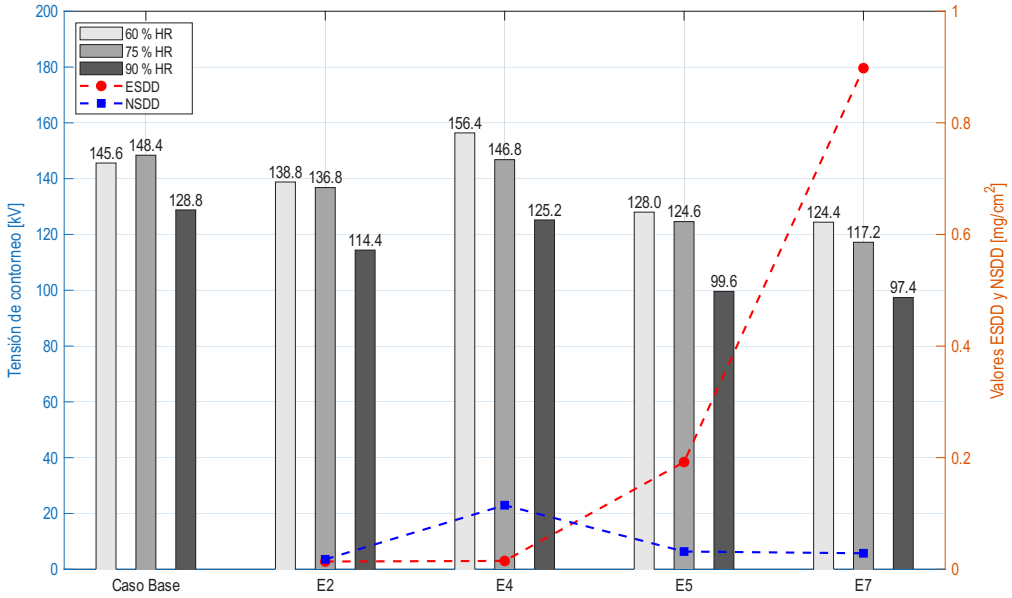


Figura 38: Tensiones de contorneo y entornos de contaminación.

4.3. Corrientes de fuga

Para abordar adecuadamente la acción de las distintas variables sobre la corriente de fuga y su dinámica, se grafican curvas de corriente de fuga en función de la tensión para cada nivel de contaminación por grado de humedad, luego se grafican curvas por cada grado de humedad por nivel de contaminación, la idea es identificar las distintas maneras de como la contaminación y humedad afectan valores de corriente de fuga y tendencias.

4.3.1. Impacto de la humedad en la corriente de fuga para casos de contaminación puntuales

Se presenta el impacto de la humedad para los distintos escenarios de contaminación de modo individual.

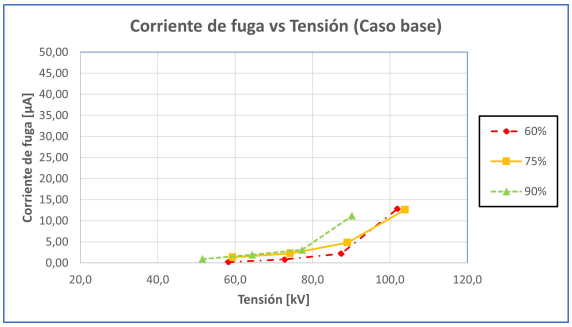


Figura 39: CF Caso base - Impacto humedad.

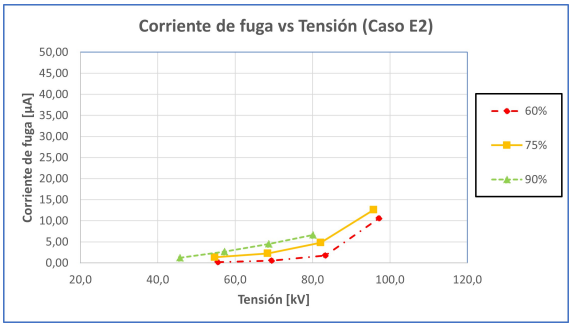


Figura 40: CF Caso E2 - Impacto humedad.

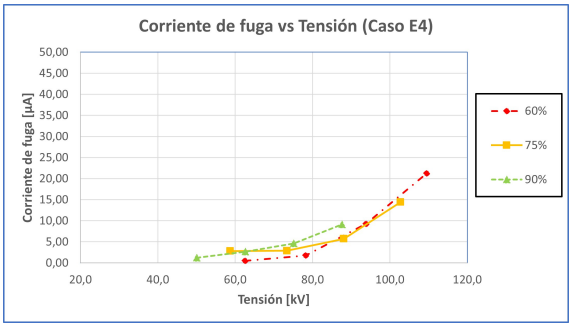


Figura 41: CF Caso E4 - Impacto humedad.

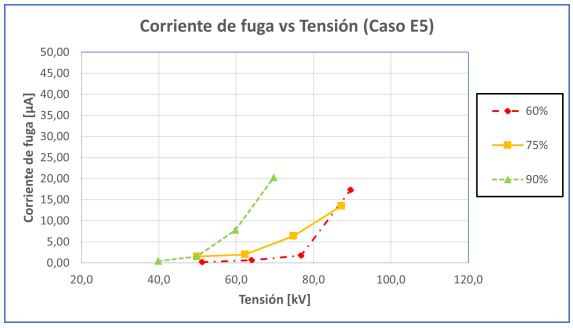


Figura 42: CF Caso E5 - Impacto humedad.

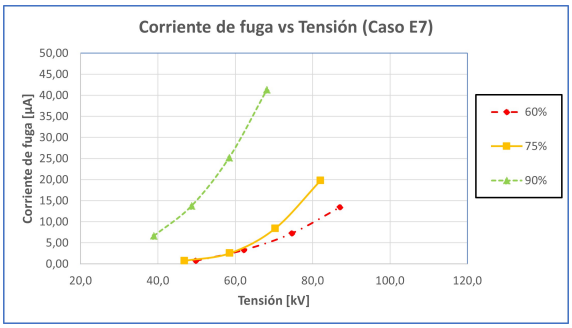


Figura 43: CF Caso E7 - Impacto humedad.

- **Caso base:** No existe un impacto significativo de la humedad para los valores de corriente de fuga y tendencia registrado, todas las curvas se encuentran agrupadas de manera similar sin distinguir una de otra de manera predominante, con la única excepción del último punto para la curva de 90 % HR, esto sugiere que la humedad afecta el desempeño de la probeta para tensiones del 70 % de la tensión de contorneo bajo un perfil de humedad agresivo.
- **Caso E2:** Las tres curvas presentan una tendencia similar, con leves diferencias en la magnitud de la corriente de fuga. Sin embargo, se mantiene un comportamiento predominantemente lineal en los tres casos, lo que indicaría que, bajo estas condiciones, la corriente de fuga está asociada principalmente a la conductividad superficial del aislador.
- **Caso E4:** Para los tres casos no se observan diferencias notables en el comportamiento de las curvas. La principal diferencia se relaciona con la tensión de contorneo registrada para la contaminación E4, la cual es superior a la de los demás casos. En consecuencia la contaminación E4 permite que la curva se extienda hacia valores de tensión más elevados. En particular, sobre los 80 kV se observa una tendencia no lineal en la corriente de fuga, la cual estaría asociada principalmente al incremento del nivel de tensión aplicada, lo que trae consigo concentraciones localizadas de campo eléctrico que pueden desencadenar descargas y favorecer la aparición de componentes de corriente no consideradas en tensiones menores, esto sugiere un cambio en el mecanismo de conducción superficial del aislador.
- **Caso E5:** Se aprecian diferencias entre las curvas. El caso de 60 % de HR continúa mostrando un incremento de la corriente de fuga por sobre los 80 kV. Sin embargo, la curva correspondiente a 75 % de HR presenta un comportamiento no lineal a partir de aproximadamente 60 kV, lo que constituye un primer indicio del efecto de la humedad sobre la corriente de fuga. Esta tendencia se hace más evidente para 90 % de HR, donde el comportamiento no lineal se observa desde aproximadamente 50 kV. Lo anterior evidencia el efecto de la humedad sobre la aparición de tendencias no lineales en la corriente de fuga, lo que podría asociarse a la presencia de componentes de corriente no óhmicas debido a la conducción a través de la capa húmeda de contaminación salina.

- **Caso E7:** Este caso es una situación más crítica del caso anterior, donde se aprecian que los efectos previamente detallados aparecen antes ($\approx 40\,kV$), la tendencia indica que la componente óhmica de la corriente se ve afectada por la contaminación, en especial por la componente salina, dada las curvas, es el caso donde más impacta la humedad, esto se concluye por la separación de las curvas en diferentes valores de humedad.

En síntesis, en términos del efecto de la humedad sobre cada nivel de contaminación, se observa una respuesta progresiva del aislador. Para los casos Limpio (Caso base), $E2$ y $E4$, las tres curvas mantienen un comportamiento similar hasta aproximadamente el ($70\,\%\,V_{rup}$), donde la corriente de fuga aumenta principalmente por el elevado nivel de tensión y sus elevados gradientes de potencial en la probeta, esto sugiere que la humedad no afecta en gran medida bajo estos perfiles de contaminación, lo que propone una cota para la influencia de la humedad sobre un tipo de medio contaminado en cuestión.
En $E5$ y $E7$, la influencia de la humedad se vuelve evidente, incrementándose la corriente de fuga y adelantándose la aparición del comportamiento no lineal (entre 40 kV y 60 kV), mientras que para los casos anteriores se daban para tensiones mayores a $80\,kV$. En particular, $E7$ corresponde al escenario más crítico, donde la humedad produce el mayor incremento en la corriente de fuga y el inicio más temprano de la no linealidad ($\approx 40kV$), evidenciando que el aumento del contenido salino potencia considerablemente el efecto de la humedad sobre la conducción superficial.

4.3.2. Impacto de la contaminación en la corriente de fuga para casos de humedad puntuales

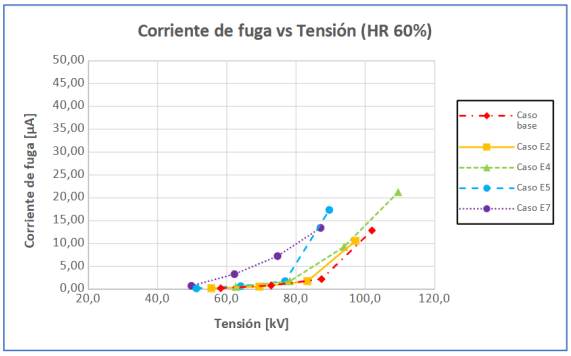


Figura 44: CF HR 60 % - Impacto contaminación.

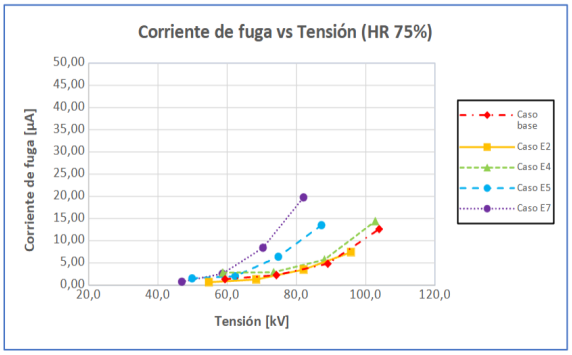


Figura 45: CF HR 75 % - Impacto contaminación.

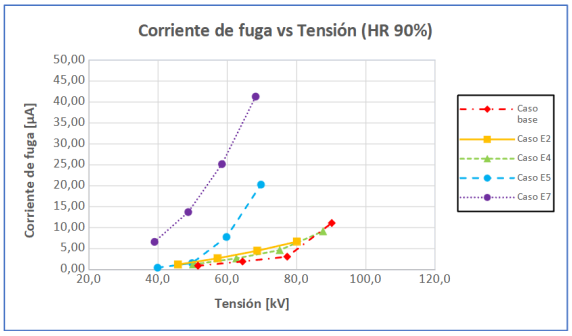


Figura 46: CF HR 90 % - Impacto contaminación.

- **Caso HR** 60 %**:** No existe un impacto significativo de la contaminación para este perfil de humedad, la corriente de fuga comienza su comportamiento no lineal principalmente por valores elevados de tensión ($\approx 80\,kV$), aunque si se destaca que el contaminante tiene una leve influencia, pues para el caso $E7$ se muestra una tendencia levemente no lineal desde los 40 kV. Lo mayormente destacable es que el comportamiento no lineal para todos los casos, algunos más pronunciados que otros, aparecen para tensiones mayores a los $80\,kV$, esto se contrasta con la tensión de operación nominal del aislador, la cual es de $15,kV$, por lo tanto, empleando dicho valor como referente, entonces el comportamiento no lineal para una humedad del 60 %, independiente del grado de contaminación, aparece en 5.3 veces la tensión de operación nominal, o bien, $0.7\,V_{rup}$.
- **Caso HR** 75 %**:** Los casos E2, E4 y caso base muestran poca influencia del contaminante en las tendencias de la corriente de fuga, esto puede indicar que las proporciones de sal no aumentan en gran medida la componente óhmica del aislador, pues no se capta la humedad suficientemente bien, la capacidad hidrofóbica del aislador sigue trabajando relativamente bien bajo dicho perfil de humedad y nivel de contaminación, sin embargo, para los casos con mayor concentración salina, como son E5 y E7, muestran mayor incremento en la corriente para mismos valores de tensión, esto sugiere que el nivel de conductividad óhmico aumenta, se atribuye dicho cambio al mayor nivel de contaminación salina presente y la capacidad de la superficie contaminada para atraer las moléculas de agua suspendidas en el aire, por lo que la capacidad hidrofóbica del aislador se ve deteriorada por la capa húmeda y contaminada.
- **Caso HR** 90 %**:** Nuevamente los casos E2, E4 y caso base no muestran mayor influencia en sus tendencias. Los casos E5 y E7 muestran una clara tendencia no lineal para valores tempranos de tensión, lo

que significa que las sales depositadas en el aislador influyen significativamente en la corriente de fuga y la tendencia de su valor.

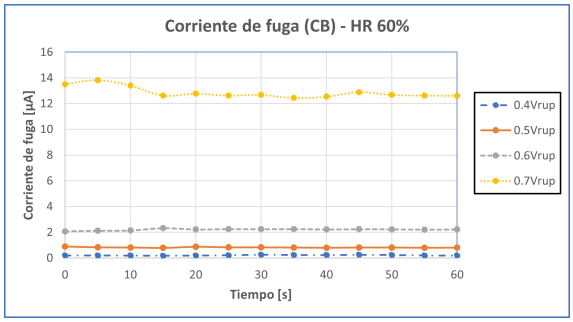
En síntesis, una humedad del 60 % es insuficiente para que la contaminación tenga un efecto realmente apreciable (resultado predecible según la normativa IEC 60815 [13]). Por otro lado, para una humedad del 75 % se comienzan a apreciar levemente los efectos del contaminante. Por último, para una humedad del 90 % se maximiza el efecto de los contaminantes sobre el aislador, especialmente para los casos $E5$ y $E7$.

Sin lugar a dudas, en la contaminación, el parámetro ESDD es más determinante en la corrientes de fuga y tendencias de sus valores, pues tendencias no lineales tempranas sugieren un deterioro en la capacidad aislante de las probetas, por otro lado, la tensión de contorneo por si misma no es un parámetro suficiente para determinar el estado de un aislador, pues para las probetas $E5$ y $E7$ a HR de 90 % no muestran gran diferencia (alrededor de $2\,kV$, cuando existe una diferencia considerable de ESDD, alrededor de 4 veces), si bien sugiere un deterioro, parece existir un umbral para el alcance que tiene a la hora de identificar dos probetas bajo elevados niveles de ESDD y humedad, mientras que la corriente de fuga es un parámetro mucho más determinante, pues se aprecia notablemente la dinámica (no linealidad) de la corriente de fuga en función de la tensión aplicada.

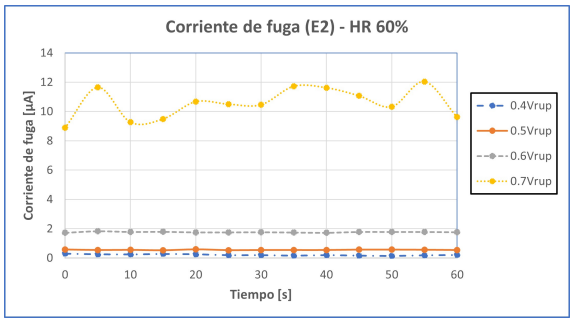
Los casos *Caso base, E2 y E4*, pueden encapsularse como casos no críticos, pues no muestran ninguna diferencia realmente clara entre ellos bajo contaminación y humedad (en lo que respecta a desempeño eléctrico), el caso *E5* es el primer caso que realmente muestra una diferencia apreciable respecto a una probeta limpia, pues su acelerado comportamiento no lineal y alta susceptibilidad a la humedad, indica que es una probeta altamente cuestionable en términos de rendimiento por razones ya mencionadas, por último, el caso *E7* es el caso extremo, tiene un decremento en la tensión de contorneo considerable y la corriente incrementa aceleradamente su valor bajo niveles de tensión similares a los estudiados respecto al caso *E5*.

4.3.3. Evolución temporal de la corriente de fuga

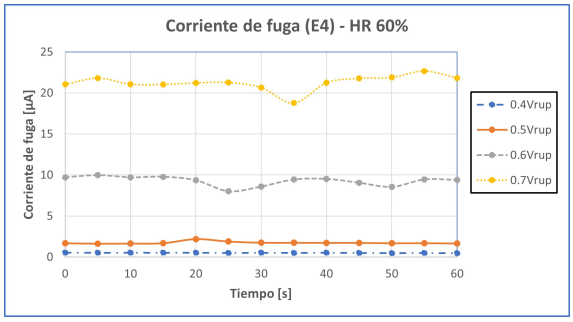
Dado que la corriente de fuga varía en función de contaminación, tensión y humedad, se detallan las gráficas de corriente de fuga en función del tiempo durante 1 minuto, previo a un preacondicionamiento. Para ello se evalúa un caso particular de contaminación y humedad con distintas curvas para cada valor de tensión de operación, siendo estas el 40 %, 50 %, 60 % y 70 % de la tensión de contorneo del caso particular.



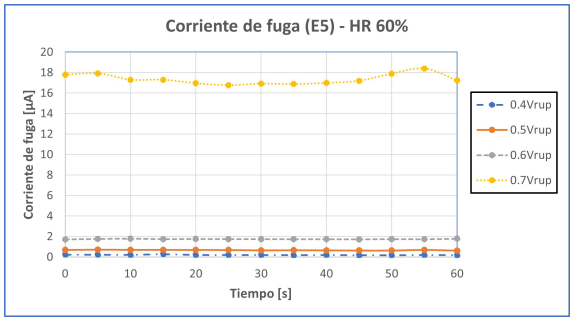
(a) Caso base - HR 60 %



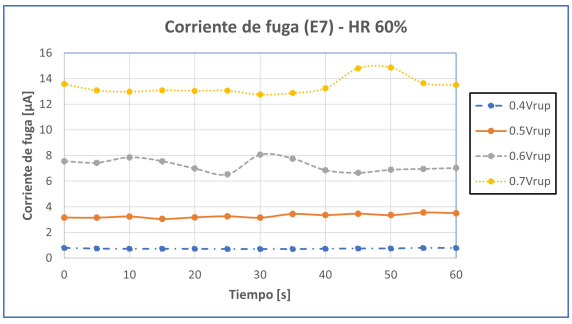
(b) Caso E2 - HR 60 %



(c) Caso E4 - HR 60 %

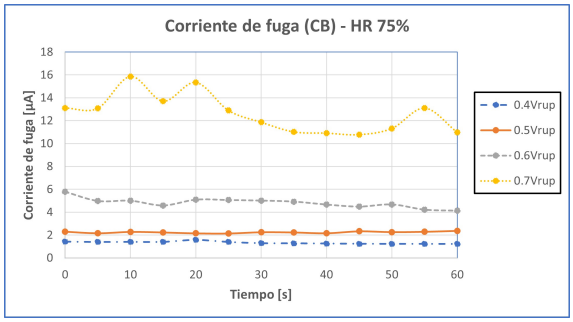


(d) Caso E5 - HR 60 %

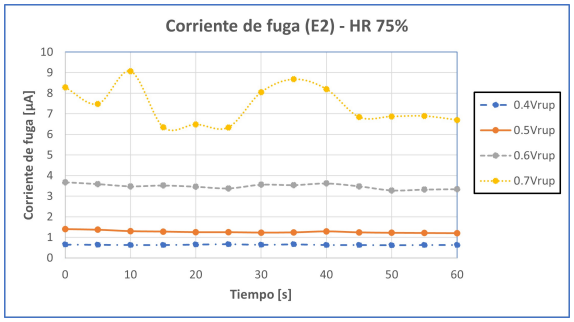


(e) Caso E7 - HR 60 %

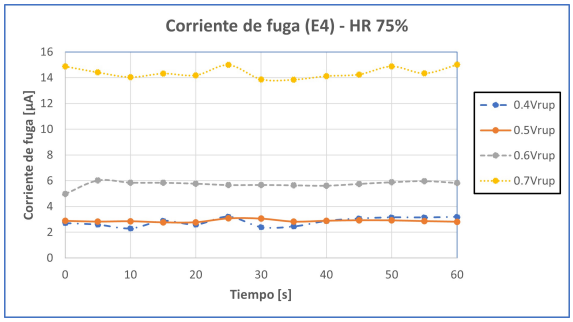
Figura 47: Corriente de fuga en función del tiempo para humedad relativa del 60 % y distintos escenarios de contaminación para cada tensión de operación.



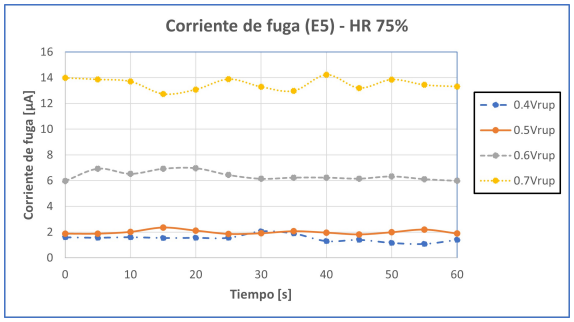
(a) Caso base - HR 75 %



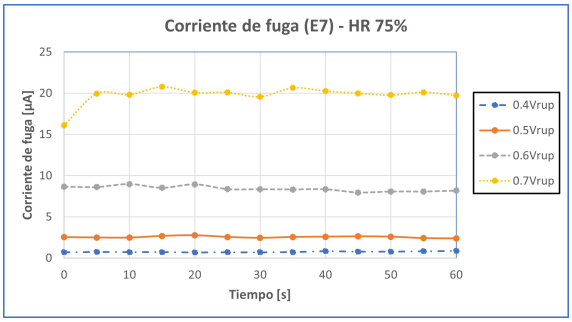
(b) Caso E2 - HR 75 %



(c) Caso E4 - HR 75 %

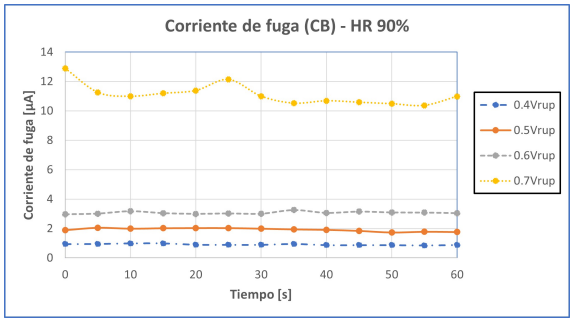


(d) Caso E5 - HR 75 %

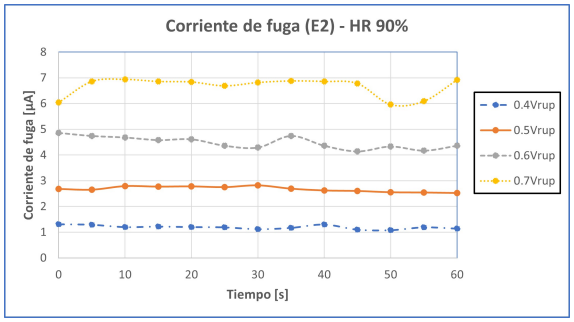


(e) Caso E7 - HR 75 %

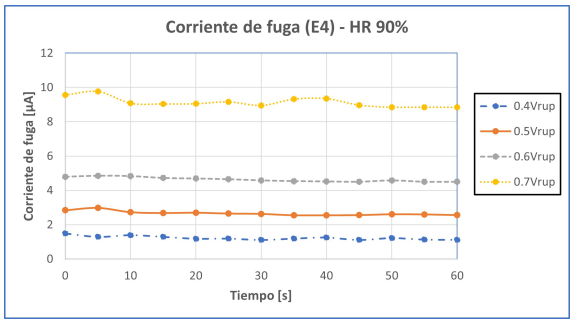
Figura 48: Corriente de fuga en función del tiempo para humedad relativa del 75 % y distintos escenarios de contaminación para cada tensión de operación.



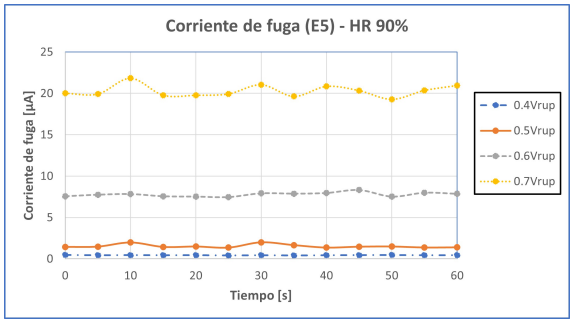
(a) Caso base - HR 90 %



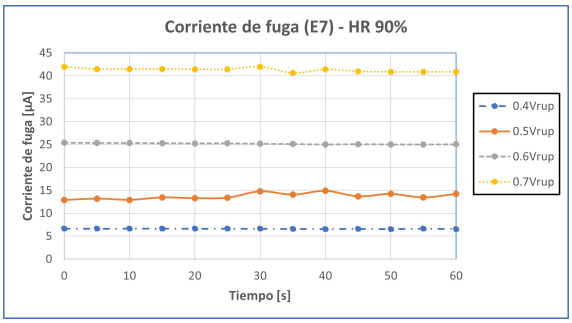
(b) Caso E2 - HR 90 %



(c) Caso E4 - HR 90 %



(d) Caso E5 - HR 90 %



(e) Caso E7 - HR 90 %

Figura 49: Corriente de fuga en función del tiempo para humedad relativa del 90 % y distintos escenarios de contaminación para cada tensión de operación.

Todas las corrientes de fuga muestran un comportamiento relativamente continuo con leves oscilaciones, lo más importante es que se aprecian incrementos en la magnitud de la corriente de fuga según el grado de tensión de operación y humedad aplicada, en detalle, para humedad del 60 %, caso base, E2, E4 y E5 (con excepción del punto 0.6 V_{rup} de E4), todas presentan una brecha considerable entre 0.7 V_{rup} y los demás valores de tensión de operación (sean estos 0.4, 0.5 y 0.6 de V_{rup}). Mientras que para el caso de 75 % de HR, esa brecha es menor que el caso anterior, lo que indica una transición del incremento de la corriente de fuga en función de la tensión de operación, pues esto comienza a indicar la aparición de la severidad de la contaminación y humedad existente, además de valores de tensión que permiten evaluar el grado de exigencia que debe tener la probeta para divisar el grado con el que se ve afectada la capacidad aislante de la probeta. Por último, la humedad relativa de 90 %, muestra incrementos de corriente de fuga menos pronunciados para el macro del desempeño de la probeta, es decir, la curva de $i_f(v_{op})$ es más suave en la medida que crece la humedad, con la única excepción del caso base, pues la humedad no parece afectar en gran medida la dinámica que presenta la corriente en función de la tensión, pues no existen sales depositadas en su superficie.

4.4. Descargas parciales

Se presentan los resultados que corresponden a las descargas parciales, dada le metodología empleada en la sección 3.4.3. Se repite la manera de analizar, dado que se poseen dos variables, contaminación y humedad, se analiza como impacta la humedad por grado de contaminación, luego se analiza como impacta la contaminación por nivel de humedad.

Se destaca que todas las probetas fueron ensayadas a un nivel de tensión de $60\,kV$, puesto que a mayores niveles de tensión aparece ruido de fondo debido al propio circuito de medición, dicho valor de tensión fue registrado por el propio MTS, ya que emplear un divisor aumentaba el ruido intrínseco del circuito, además, los $60\,kV$ empleados se consideró un valor razonable para estimular suficientemente el circuito con tal de poder apreciar descargas en la probeta, un valor muy pequeño implicaba no apreciar ninguna medición en absoluto, por otro lado, se ajustó el sistema para visualizar descargas que superaran los $100\,pC$ como medida para no visualizar ruido existente.

4.4.1. Indicadores estadísticos

Debido a la naturaleza estocástica de las descargas parciales bajo excitación en DC y al reducido número de eventos registrados durante cada ensayo (salvo casos extremadamente críticos, *E7* con 90 % HR), técnicas de análisis basadas en patrones de secuencia de pulsos (PSA) presentan una capacidad limitada para discriminar el comportamiento de los aisladores. En consecuencia, se emplearon tres parámetros representativos y complementarios: el valor Q_{95}, como indicador de la magnitud característica de las descargas; la cantidad total de pulsos para la ventana de tiempo de estudio (PDs), para evaluar la frecuencia de ocurrencia de los eventos de descarga y la carga acumulada (Q_A), para cuantificar la actividad total de descarga para la ventana de ensayo correspondiente a 10 minutos.

Humedad 60 %														
Caso base			**Caso E2**			**Caso E4**			**Caso E5**			**Caso E7**		
PDs	$Q_{95}[pC]$	$Q_A[nC]$	PDs	$Q_{95}[pC]$	$Q_A[nC]$	PDs	$Q_{95}[pC]$	$Q_A[nC]$	PDs	$Q_{95}[pC]$	$Q_A[nC]$	PDs	$Q_{95}[pC]$	$Q_A[nC]$
28	2200	33	101	2200	70	64	2600	89	55	1900	65	54	2500	74

Tabla 10: Datos de Q_{95}, PDs y carga acumulada para una humedad relativa de 60 %.

Humedad 75 %														
Caso base			**Caso E2**			**Caso E4**			**Caso E5**			**Caso E7**		
PDs	$Q_{95}[pC]$	$Q_A[nC]$	PDs	$Q_{95}[pC]$	$Q_A[nC]$	PDs	$Q_{95}[pC]$	$Q_A[nC]$	PDs	$Q_{95}[pC]$	$Q_A[nC]$	PDs	$Q_{95}[pC]$	$Q_A[nC]$
73	4100	79	89	4600	150	180	4300	130	180	450	54	37	1800	20

Tabla 11: Datos de Q_{95}, PDs y carga acumulada para una humedad relativa de 75 %.

Humedad 90 %														
Caso base			**Caso E2**			**Caso E4**			**Caso E5**			**Caso E7**		
PDs	$Q_{95}[pC]$	$Q_A[nC]$	PDs	$Q_{95}[pC]$	$Q_A[nC]$	PDs	$Q_{95}[pC]$	$Q_A[nC]$	PDs	$Q_{95}[pC]$	$Q_A[nC]$	PDs	$Q_{95}[pC]$	$Q_A[nC]$
10	3300	9,4	4595	1600	1200	743	280	180	25147	210	2700	22408	250	3900

Tabla 12: Datos de Q_{95}, PDs y carga acumulada para una humedad relativa de 90 %.

Las Tablas 10, 11 y 12 resumen los indicadores de descargas parciales para los distintos escenarios de contaminación y humedad relativa. En las condiciones de 60 % y 75 % HR no se observa una relación clara entre la severidad de contaminación y los parámetros evaluados. Sin embargo, al 90 % HR se aprecia un cambio significativo en el comportamiento de los escenarios contaminados, particularmente en el número de descargas registradas y la carga acumulada. En E2, E5 y E7 aumenta considerablemente la cantidad de eventos respecto al 75 % HR, mientras que Q_{95} disminuye, evidenciando una mayor frecuencia de pulsos de menor carga aparente característica. Este comportamiento no se reproduce en el caso base, donde disminuyen tanto las PDs como la carga acumulada. Estos resultados destacan la influencia de la humedad sobre la descargas

parciales y justifican el análisis individual de cada condición experimental para examinar con mayor detalle la relación entre contaminación y descargas parciales.

- **Efecto de la humedad y contaminación en la magnitud de carga:**

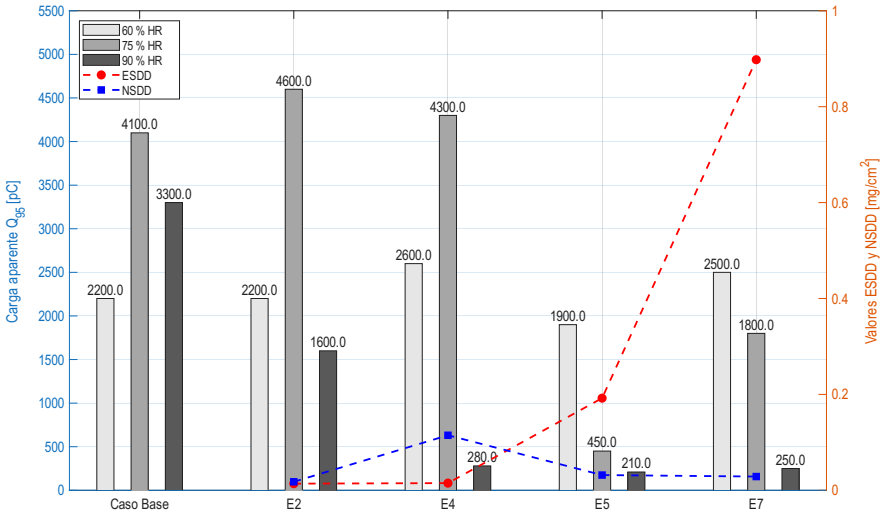


Figura 50: Magnitud de Q_{95} para distintas condiciones de contaminación y humedad.

A partir de la gráfica 50, se deja en evidencia que Q_{95} presenta un comportamiento no monótono tanto con la humedad relativa como con el nivel de contaminación superficial. En particular, los escenarios correspondientes al Caso Base, E2 y E4 exhiben los mayores valores de Q_{95}, alcanzando su máximo a 75 % de humedad relativa. Este comportamiento sugiere que dicho nivel de humedad constituye una condición favorable para el desarrollo de descargas parciales de mayor magnitud, se plantea que la humedad incrementa la conductividad superficial lo suficiente para facilitar la formación de trayectorias de descarga, pero sin generar una película de agua completamente continua. En estas condiciones, persisten regiones con elevada concentración de campo eléctrico y acumulación localizada de carga, favoreciendo la aparición de pulsos individuales de mayor energía, por lo que una capa de humedad parcial presenta picos de descarga localizadas.

En contraste, al aumentar la humedad hasta el 90 % se observa una disminución de Q_{95} para todos los casos, los resultados sugieren que una mayor cantidad de agua sobre la superficie favorece una conducción más uniforme de la corriente de fuga, la que es proporcional a la concentración salina, sin embargo, E4 en particular muestra una reducción considerable, atribuible a la alta concentración de NSDD, sin embargo, se debe tomar esta hipótesis con cuidado.

Por otro lado, el efecto de la contaminación presenta un comportamiento interesante, mientras que el Caso Base, E2 y E4 mantienen valores elevados de Q_{95}, respecto a los demás casos; entre E4, E5 y E7 se aprecia una disminución abrupta de Q_{95} para una humedad del 90 %. Esta reducción parece indicar un cambio de régimen en el mecanismo predominante de conducción superficial. Hasta niveles moderados de contaminación, la superficie del aislador aún permite el desarrollo de descargas parciales relativamente energéticas, sin embargo, al aumentar la contaminación soluble e insoluble, se favorece la formación de caminos conductivos más estables, que se activa con humedades altas, permitiendo que una fracción importante de la corriente circule mediante conducción superficial en lugar de liberarse en forma de pulsos de alta energía [30].

- **Efecto de la humedad y contaminación en la tasa de repetición de pulsos:**

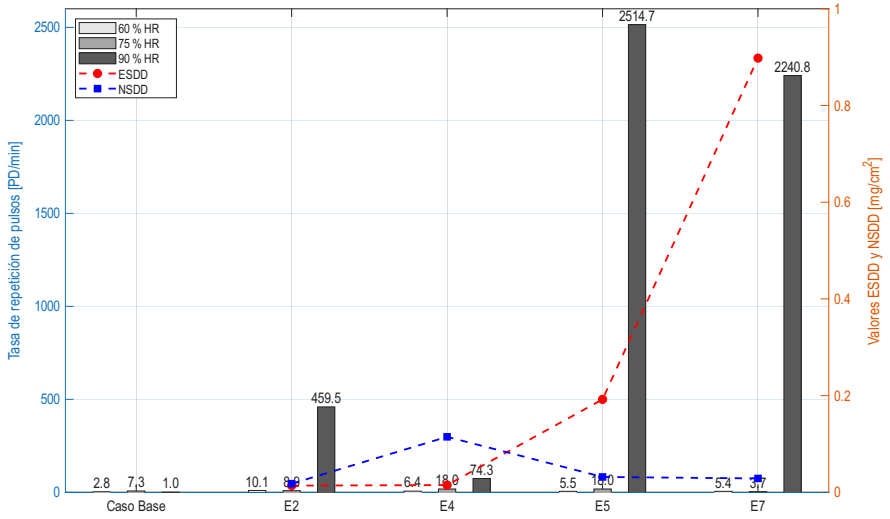


Figura 51: Tasa de repetición de pulsos para distintas condiciones de contaminación y humedad.

En primer lugar, en la gráfica 51 se observa un incremento significativo en la tasa de repetición de pulsos para la condición de 90 % de humedad relativa, particularmente en los ambientes donde predomina la componente soluble de la contaminación. En contraste, al aumentar la proporción de componente insoluble, la tasa de repetición tiende a disminuir (comparando los casos aislados de E2 y E4, que tienen ESDD similares), aunque este efecto resulta considerablemente menos marcado que el producido por la humedad. Lo anterior sugiere que la disponibilidad de humedad y ESDD constituye el principal factor que gobierna la frecuencia de ocurrencia de las descargas parciales.

Desde un punto de vista físico, una mayor humedad favorece la disolución de las sales presentes sobre la superficie del aislador, incrementando la conductividad superficial y facilitando el establecimiento de trayectorias conductoras. Como consecuencia, disminuye el tiempo necesario para que la superficie recupere las condiciones que permiten la iniciación de una nueva descarga, incrementándose así la tasa de repetición de pulsos. Este comportamiento resulta consistente con la disminución de la magnitud de descargas representativas (Q_{95}) observada bajo estas mismas condiciones, lo que sugiere que la energía almacenada se libera mediante un mayor número de descargas de menor magnitud, en lugar de un menor número de pulsos altamente energéticos.

Por otra parte, para humedades de 60 % y 75 % no se observa una tendencia claramente definida entre los distintos niveles de contaminación, manteniéndose la tasa de repetición relativamente constante para todas las condiciones evaluadas. Esto indica que, bajo estas condiciones de humedad, la conductividad superficial aún no alcanza niveles suficientes para modificar de manera significativa la frecuencia de ocurrencia de las descargas. En consecuencia, los resultados permiten concluir que el incremento de la tasa de repetición de pulsos está asociado principalmente a la presencia simultánea de alta humedad y contaminación con predominio de componente soluble, condiciones que favorecen el establecimiento de una superficie eléctricamente más conductiva y la generación de descargas parciales más frecuentes.

- **Efecto de la humedad y contaminación en la carga acumulada:**

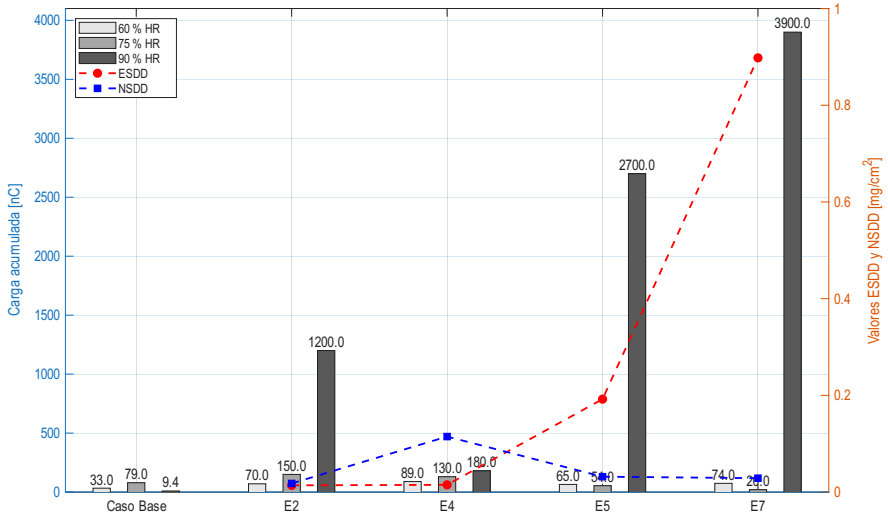


Figura 52: Magnitud de carga acumulada para distintas condiciones de contaminación y humedad.

Lo primero que se aprecia es que la carga acumulada alcanza sus mayores valores en condiciones de 90 % HR, particularmente en los ambientes E2, E5 y E7. Este comportamiento indica que, aunque la magnitud individual de las descargas disminuye respecto a 75 % HR, el aumento considerable en la tasa de repetición de pulsos compensa ampliamente dicha reducción, produciendo una mayor transferencia total de carga durante el intervalo de medición. En otras palabras, la carga acumulada parece estar dominada por la frecuencia de ocurrencia de las descargas más que por la magnitud individual de cada una, al menos en los extremos estudiados que favorecen a la magnitud (60 % HR) y a la tasa de repetición de pulsos (90 % HR).

Este resultado es consistente con las observaciones realizadas previamente. Mientras que el parámetro Q_{95} mostró una reducción de la carga aparente representativa bajo condiciones de alta humedad, la tasa de repetición aumentó de forma muy significativa. Como consecuencia, la energía liberada no se concentra en unos pocos pulsos de gran amplitud, sino que se distribuye entre un número considerablemente mayor de descargas de menor magnitud, incrementando la carga total transferida.

Por otra parte, la alta humedad sigue siendo necesaria para activar el efecto de la contaminación sobre el aislador, pues a 60 % y 75 % HR las diferencias entre ambientes son relativamente pequeñas y no se identifica una tendencia monótona con el incremento del ESDD. Sin embargo, a 90 % HR se aprecia que los ambientes con predominio de componente soluble (E2, E5 y especialmente E7) presentan las mayores cargas acumuladas, mientras que Caso Base y E4 exhiben una reducción importante de este parámetro. Esto sugiere que, aunque la elevada humedad favorece un aumento generalizado de la actividad de descargas parciales, una mayor proporción de componente insoluble limita la cantidad total de carga acumulada.

Desde un punto de vista físico, este comportamiento puede explicarse considerando que la humedad incrementa la conductividad superficial mediante la disolución de las sales presentes sobre el aislador, favoreciendo una rápida sucesión de eventos de descarga. Sin embargo, cuando aumenta la proporción de contaminantes insolubles, la continuidad y homogeneidad de los caminos conductores puede verse afectada, reduciendo tanto la frecuencia efectiva de las descargas como la carga total transferida. En consecuencia, la carga acumulada refleja el equilibrio entre ambos mecanismos, mostrando que la humedad constituye el principal factor que incrementa la actividad global de descargas parciales, mientras que la composición de la contaminación (relación entre ESDD y NSDD) modula la intensidad de dicho incremento.

Por último, cabe destacar que el mayor valor de Q_{95} se encuentra para una humedad del 75 % en el

grupo Caso Base, E2 y E4; mientras que la mayor repetición de pulsos se da para los medios E2, E5 y E7 en un 90 % de HR, por lo que, al aumentar la humedad, el mecanismo evoluciona desde pocos pulsos intensos hacia muchos pulsos menos energéticos, pero cuya contribución conjunta resulta mayor en la carga total acumulada, sin embargo, no es posible determinar si es más crítico la magnitud de descargas o la tasa de repetición de pulsos, por otro lado, la humedad ambiental a 90 % revela con mayor exactitud el tipo de contaminación de la probeta.

4.4.2. Mapas Tiempo-Frecuencia

Por la insuficiencia de descargas para los casos de 60 % y 75 % de humedad, ambos casos son excluidos del análisis. Esto indica que ambos niveles de humedades para los casos estudiado no logran activar las descargas suficientes para análisis vía HFCT, esto último también aplica para el caso de probeta limpia a una humedad relativa del 90 %.

Se continua detallando el análisis para los casos con humedad relativa del 90 %.

Casos de estudio para humedad relativa del 90 %:

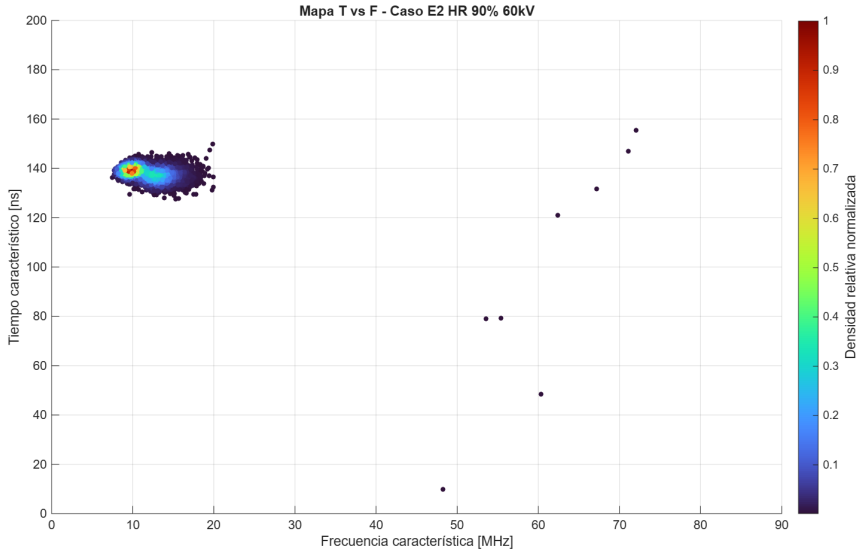


Figura 53: Mapa Tiempo-frecuencia para caso E2 y HR 90 %.

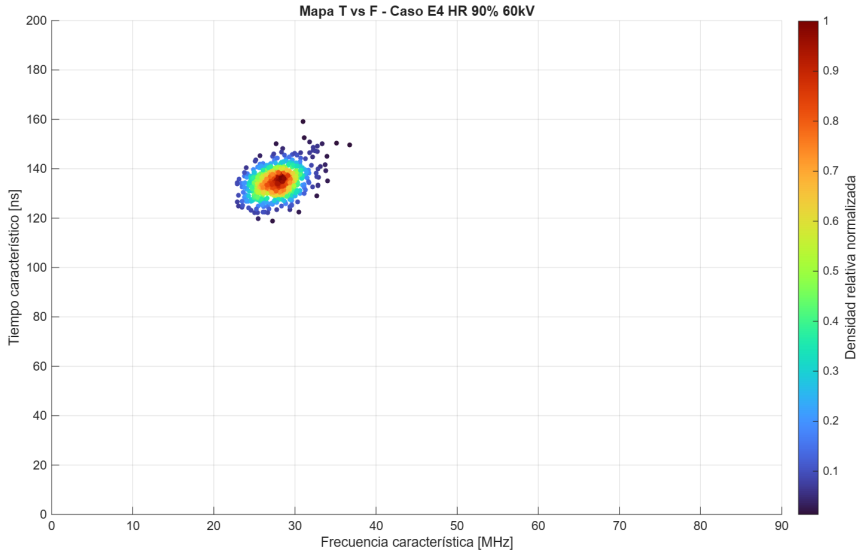


Figura 54: Mapa Tiempo-frecuencia para caso E4 y HR 90 %.

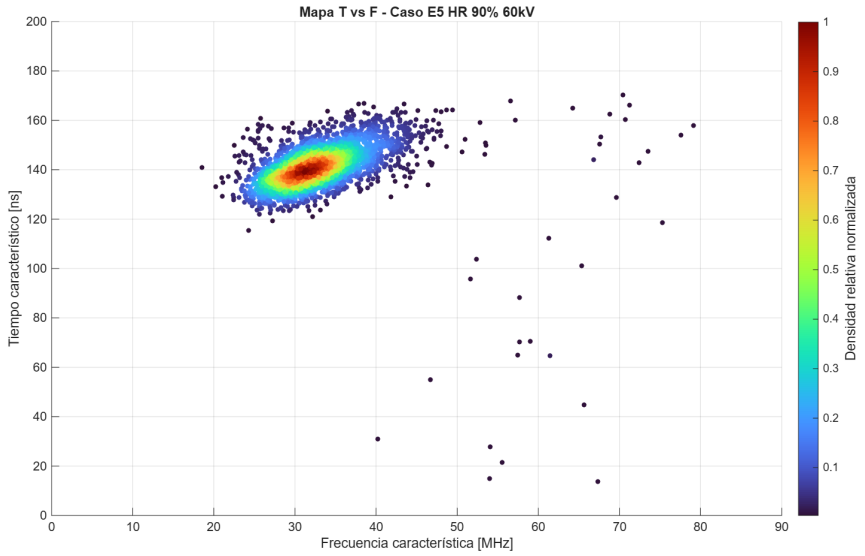


Figura 55: Mapa Tiempo-frecuencia para caso E5 y HR 90 %.

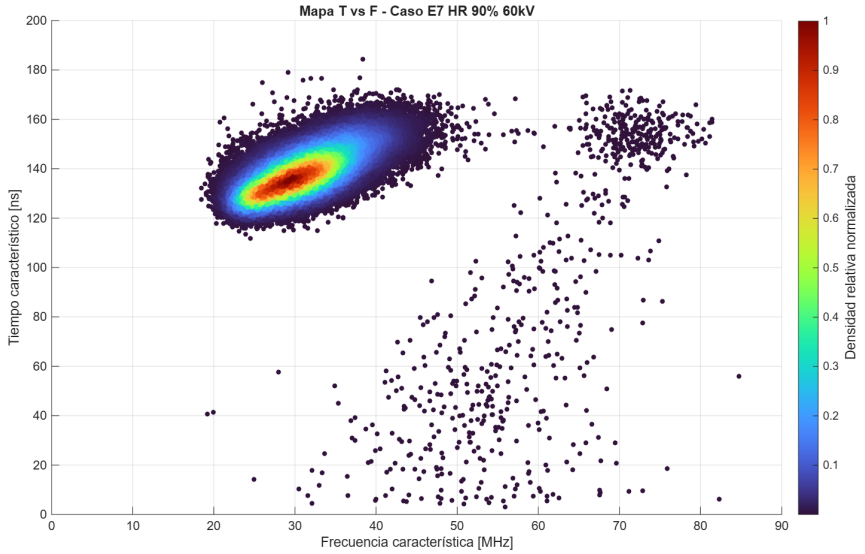


Figura 56: Mapa Tiempo-frecuencia para caso E7 y HR 90 %.

A continuación se presenta el centroide y dispersión de tiempo característico y frecuencia característica:

Caso	Centroide		Dispersión	
	F_c [MHz]	T_c [ns]	σ_F [MHz]	σ_T [ns]
E2	11.49	138.22	2.64	3.15
E4	27.82	134.76	2.18	5.40
E5	33.06	140.78	5.96	10.69
E7	30.92	137.48	5.26	9.97

Tabla 13: Parámetros de las distribuciones Tiempo-Frecuencia.

En primer lugar, el caso E4 debe tomarse con cautela, pues su mapa T-F presenta una cantidad menor considerable de descargas registradas, por lo que la dispersión de los datos señalada en la Tabla 13 podría no ser tan representativa como en los demás casos.

Dado que sólo se dispone de mapas T-F a una humedad fija del 90 %, entonces se contrastan los resultados entre sí, es decir, se busca observar como cambian los resultados en función de la contaminación para un nivel alto de humedad.

- **Tiempo característico:** En lo que respecta a la duración característica de las descargas (T_c), no se observan diferencias significativas entre los distintos escenarios de contaminación, concentrándose las distribuciones en torno a los 138 ns. Sin embargo, se aprecia una variación en la dispersión de las nubes de puntos que conforman los mapas T–F. Para E2 se observa una distribución relativamente concentrada, mientras que E4 presenta una dispersión ligeramente mayor. Por otro lado, E5 y E7 presentan distribuciones similares tanto en términos de dispersión como de tiempo característico. Esto resulta particularmente relevante al considerar la diferencia en el nivel de contaminación salina entre ambos casos, ya que E7 presenta una cantidad de descargas considerablemente superior a E5, sin que ello se traduzca en una modificación evidente de (T_c) o de la dispersión de la distribución.

  Este comportamiento podría indicar que, bajo las condiciones experimentales utilizadas, el incremento de la contaminación salina no modifica sustancialmente las características temporales de las descargas, sino principalmente su ocurrencia. Una posible explicación es que el método de humectación empleado

no haya generado diferencias suficientemente marcadas en las condiciones superficiales para los niveles de contaminación más elevados. Alternativamente, podría existir un régimen de saturación en el comportamiento de la probeta, a partir del cual un aumento adicional de la contaminación, como el observado entre E5 y E7, incrementa la cantidad de descargas sin producir modificaciones apreciables en sus características temporales. Esta última interpretación debe considerarse como una hipótesis, dado que los resultados obtenidos no permiten distinguir de manera concluyente entre ambos mecanismos.

Un comportamiento análogo se observa al analizar las tensiones de ruptura, donde las diferencias de magnitud entre los escenarios de contaminación tampoco resultan particularmente marcadas.

- **Frecuencia característica:** La distribución de las frecuencias características permite diferenciar el caso E2 respecto de los demás escenarios. En este caso, las descargas presentan un perfil de frecuencias características menor, concentrándose alrededor de 11,49 MHz. Para E4, se observa un desplazamiento hacia frecuencias características mayores respecto de E2, lo que sugiere que el incremento del nivel de contaminación ya produce una modificación en el contenido frecuencial de las descargas. Sin embargo, la dispersión de E4 se mantiene relativamente similar a la observada en E2, indicando que este aumento en frecuencia no está acompañado de una mayor variabilidad en la distribución de los eventos.

  Por otro lado, los casos E5 y E7 presentan frecuencias características superiores a E2 y una dispersión mayor, aunque entre ambos escenarios no se observan diferencias particularmente notorias. Esto sugiere que, a medida que aumenta la contaminación, pueden distinguirse dos efectos: inicialmente, como se observa entre E2 y E4, se produce principalmente un desplazamiento de las descargas hacia frecuencias mayores sin un aumento significativo de su dispersión; posteriormente, en E5 y E7, además del incremento de la frecuencia característica, se observa una mayor dispersión de los eventos. Sin embargo, el comportamiento entre E5 y E7 resulta nuevamente similar, diferenciándose principalmente en la cantidad de descargas registradas.

  En este sentido, los resultados sugieren que la componente salina podría favorecer tanto un incremento de la frecuencia característica como de la dispersión de las descargas. No obstante, la ausencia de diferencias apreciables entre E5 y E7, pese al mayor nivel de contaminación salina de este último, vuelve a plantear la posibilidad de que el método de humectación utilizado no haya sido suficiente para reproducir diferencias significativas en condiciones de contaminación extrema, o bien que la probeta alcance un régimen de saturación, en el cual un aumento adicional de la contaminación afecta principalmente la cantidad de descargas y no sus características de frecuencia.

Por último, se destaca la relación mostrada por los ensayos entre el centroide y dispersión con el nivel de contaminación para los casos que fue posible obtener una medición.

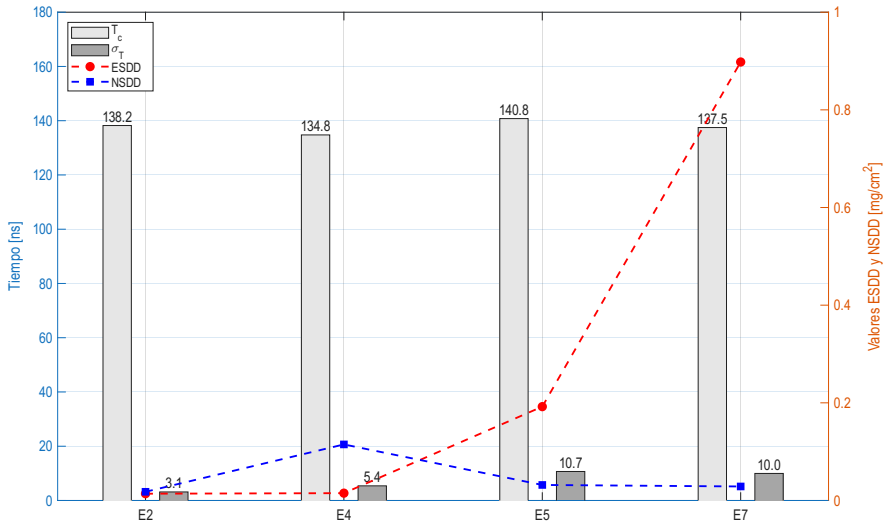


Figura 57: Tiempo equivalente en función de la contaminación.

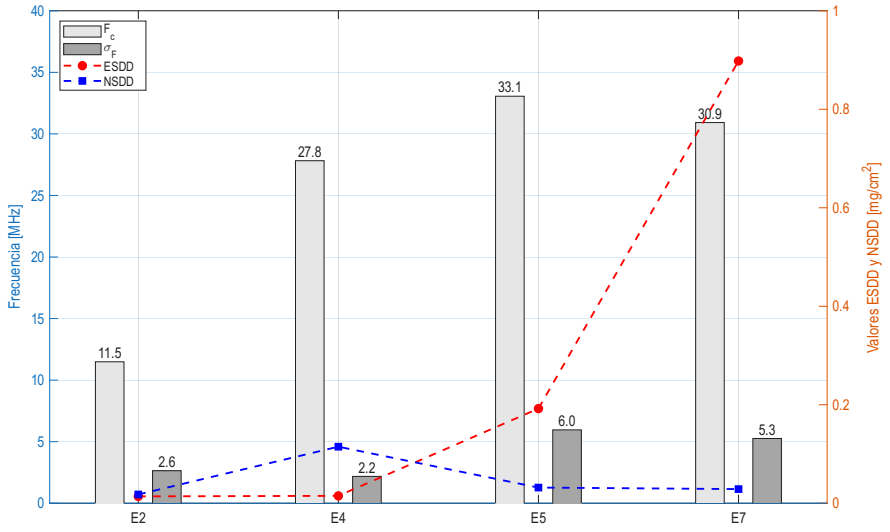


Figura 58: Frecuencia equivalente en función de la contaminación.

4.5. Correlación entre tensión de contorneo, corriente de fuga y descargas parciales con medios contaminados

Al comparar los resultados obtenidos a 60 % y 90 % de humedad relativa para: el caso limpio, los escenarios E2 y E4, y los escenarios E5 y E7. Esta clasificación permite relacionar las tendencias observadas en la corriente de fuga con la cantidad de descargas parciales para la ventana de estudio, la carga aparente y la tensión de contorneo.

En el caso limpio, la cantidad de descargas parciales registradas es reducida y la corriente de fuga presenta un comportamiento lineal, lo que evidencia una respuesta diferente de la observada en los escenarios con contaminación más severa. En E2 y E4, aunque se registra un incremento del número de descargas al pasar de 60 % a 90 % HR, la cantidad de eventos es considerablemente menor que la registrada en E5 y E7. Además, las curvas de corriente de fuga mantienen un comportamiento relativamente similar al del caso limpio, sin manifestar una transición no lineal tan pronunciada como la observada en los escenarios E5 y E7.

Por el contrario, en E5 y E7 se aprecia una respuesta más marcada frente al incremento de la humedad relativa. En ambos escenarios, la corriente de fuga presenta una transición no lineal más evidente, que coincide con un aumento considerable de las descargas parciales y una reducción en la magnitud de la carga aparente. En E5, el número de PDs aumenta de 55 a 25147, mientras que Q_{95} disminuye de 1900 a 210 pC. De manera similar, en E7 el número de PDs aumentan de 54 a 22408 y Q_{95} disminuye de 2500 a 250 pC. Esta coincidencia sugiere que la combinación de humedad elevada y contaminación favorece una modificación de la dinámica de conducción y descarga superficial, manifestada mediante una mayor repetición de eventos y una reducción de Q_{95} representada por este indicador, complementado con una aparición temprana de tendencias no lineales en la corriente de fuga.

La diferencia entre estas familias de respuesta refuerza la idea de que el comportamiento no lineal de la corriente de fuga está asociado a las condiciones combinadas de humedad y contaminación, y no únicamente al incremento de la humedad relativa. Mientras que el caso limpio y los escenarios E2 y E4 presentan una respuesta menos pronunciada, E5 y E7 muestran una coincidencia más evidente entre la no linealidad de la corriente de fuga y la intensificación de las descargas parciales. Por consiguiente, se puede plantear que la transición no lineal está asociada a un cambio en el régimen de conducción superficial, que coincide con una mayor cantidad de eventos de descarga con magnitud de pulsos menores, sin embargo, los resultados no permiten establecer por sí solos una relación causal directa entre ambos fenómenos.

Esta interpretación también se ve respaldada por la evolución de la tensión de contorneo. Al aumentar la humedad del 60 % al 90 % HR, dicha tensión disminuye en todos los escenarios, aunque la reducción es más pronunciada en E5 y E7. En conjunto, la comparación de las tres familias muestra que la respuesta más marcada se presenta en los escenarios E5 y E7, donde coinciden una mayor no linealidad de la corriente de fuga, un aumento importante de las descargas parciales, una disminución de la carga aparente y menores tensiones de contorneo.

4.6. Recomendaciones para la selección, caracterización y monitoreo de aisladores HVDC

4.6.1. Selección del aislador según emplazamiento

Antes de seleccionar un aislador, se recomienda caracterizar el entorno donde será instalado, identificando sus condiciones de contaminación, humedad y temperatura. Esto resulta especialmente relevante en líneas HVDC de gran extensión, cuyos trazados pueden atravesar sectores costeros, desérticos e industriales con características ambientales diferentes. La selección inicial debe considerar la geometría del aislador, su distancia de fuga, el material de fabricación, las propiedades de hidrofobicidad y sus características eléctricas. Estos antecedentes permiten identificar modelos candidatos y establecer las condiciones ambientales representativas para su posterior evaluación experimental. En lugar de aplicar indiscriminadamente los mismos perfiles de contaminación a todos los modelos, se propone seleccionar los escenarios de ensayo en función de los niveles de ESDD y NSDD característicos del emplazamiento. Así, los aisladores destinados a zonas con predominio de contaminación soluble deberían evaluarse bajo perfiles salinos representativos, mientras que aquellos expuestos a cantidades importantes de polvo u otros contaminantes insolubles requerirían considerar también esta componente. Esta caracterización complementaría el dimensionamiento de los aisladores según la severidad del sitio, sin sustituir los criterios normativos de distancia de fuga y coordinación de aislamiento [31].

4.6.2. Caracterización experimental del modelo seleccionado

Escenario	Objetivo de caracterización
Caso base	Establecer el comportamiento de referencia del aislador limpio.
E2	Representar la primera familia de comportamiento, con contaminación soluble reducida.
E4	Evaluación adicional cuando el emplazamiento presente una componente insoluble elevada.
E5	Estudiar el cambio hacia una respuesta más sensible a la humedad, con aparición temprana de no linealidad.
E7	Caracterizar la respuesta bajo contaminación salina extrema, cuando sea pertinente al emplazamiento.

Tabla 14: Matriz experimental propuesta.

La condición E2 puede utilizarse como referencia inicial de la primera familia, puesto que presentó menores tensiones de ruptura que E4 y una actividad de DP superior al 90 % HR. Sin embargo, E4 no debe excluirse automáticamente: sus diferencias de NSDD y algunas particularidades de sus curvas de corriente de fuga justifican conservarlo cuando exista contaminación insoluble relevante.

Las condiciones E5 y E7 deberían evaluarse por separado, debido a que presentan curvas de corriente de fuga diferentes incluso cuando sus tensiones de ruptura son muy similares.

Para cada condición seleccionada se recomienda construir una referencia experimental mediante tres indicadores complementarios.

- **Tensión de contorneo:** Caracterizar la reducción de tensión soportada respecto al caso limpio, considerando la variabilidad experimental. Este indicador aportaría información sobre la capacidad dieléctrica ante los escenarios ambientales estudiados.
- **Corriente de fuga**: Obtener curvas de corriente en función de la tensión y de la humedad. Se recomienda analizar no solamente su magnitud, sino también sus pendientes, cambios de tendencia y respuesta a una misma tensión absoluta.
- **Descargas parciales:** Caracterizar la actividad de DP mediante la tasa de repetición, Q_{95} y carga acumulada. Considerando los resultados obtenidos, se propone prestar especial atención a condiciones de humedad elevada, en las cuales aparecieron las diferencias más evidentes entre escenarios contaminados.

La caracterización debería incluir condiciones representativas de la tensión real de servicio y realizarse en instalaciones de ensayo especializadas. Esto es fundamental porque las curvas obtenidas a distintos porcentajes de tensión de contorneo no son directamente comparables con las mediciones que se realizarían en una línea energizada.

4.6.3. Monitoreo del aislador durante su vida útil

Una vez establecidas las referencias experimentales, se propone utilizarlas como punto de comparación para interpretar el comportamiento eléctrico del aislador instalado. La estrategia consiste en aprovechar las variaciones naturales de humedad del emplazamiento, puesto que los resultados muestran que las diferencias entre escenarios de contaminación se acentúan considerablemente bajo humedad elevada.

En este contexto, se recomienda utilizar registros meteorológicos históricos para identificar períodos de observación representativos. Las ventanas de monitoreo podrían incluir tanto condiciones relativamente secas como períodos de humectación intensa, permitiendo comparar la respuesta del aislador ante distintos estados ambientales.

El seguimiento debería priorizar la corriente de fuga, considerando su evolución temporal y su sensibilidad a los cambios de humedad. Las descargas parciales podrían emplearse como indicador complementario durante los períodos en que se disponga de una actividad impulsiva suficiente para realizar un análisis representativo.

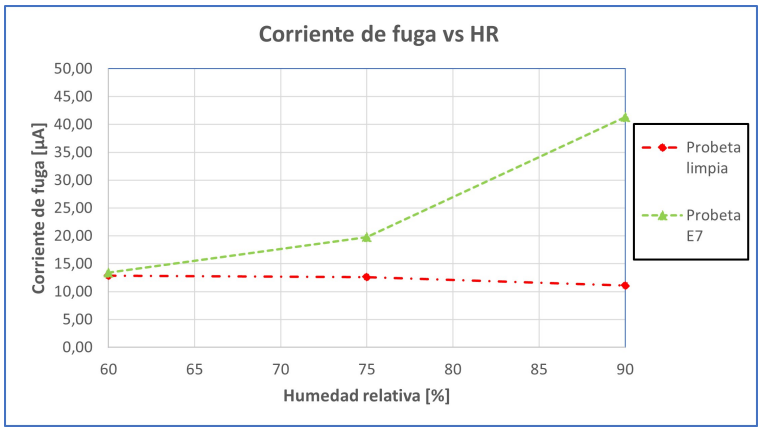


Figura 59: Comportamiento esperado de la corriente de fuga en función de HR para una probeta limpia y una probeta con contaminación E7.

Para evitar interpretaciones erróneas, las comparaciones deberían considerar también la temperatura, la tensión de operación, el historial de humectación y el posible envejecimiento del material. Asimismo, la correspondencia entre las variaciones eléctricas y los niveles reales de contaminación tendría que comprobarse mediante inspecciones y mediciones independientes de ESDD y NSDD.

4.6.4. Dimensionamiento preliminar de aislador

Dado que existen variables que no han sido controladas en el presente estudio, como temperatura, velocidad de viento y su dirección, tiempo en que acumula el aislador el nivel de contaminación de la zona, las implicancias que dichas variables tengan sobre el comportamiento del aislador deberán considerarse, es por ello, que el dimensionamiento que se propone esta en base a lo realizado en laboratorio y se considera preliminar. En base al análisis y resultados se mantienen dos familias principales de los aisladores, es decir, grupo 1 entran los entornos contaminados E2 y E4, mientras que en el grupo 2 los entornos contaminados E5 y E7, y de ambos grupos se toman los casos más críticos en base a parámetros estudiados, tal como tensión de contorneo, corriente de fuga (tendencia no lineal y valor) y descargas parciales (tasa de repetición de pulsos y carga aparente), de ambos grupos los medios más críticos fueron E2 y E7, ambos abordan una cota inferior de desempeño para el aislador. Por lo tanto, para los emplazamientos que contengan niveles de contaminación E5 o E7, bastará con considerar sólo E7, si bien E2 y E4 fueron considerados como un único grupo, la alta concentración de NSDD de E4 no permite excluirlo del todo, por lo que también se considerará en el dimensionamiento de manera particular. Esto permite acotar el análisis a entornos más representativos, esto puede ser especialmente práctico en la medida que permite establecer cotas en los niveles de contaminación que pudiesen cambiar en épocas del año, pudiendo enfocar el diseño del aislador a uno con holgura sin

sobredimensionar de manera agresiva en el proceso. Dicho lo anterior, se emplea la normativa IEC 60815-4 [31] como primera estimación a la distancia de fuga del aislador.

Considerando material hidrofóbico (silicona), entonces las ecuaciones que define la normativa son:

$$K_{NSDD} = \begin{cases} \left(\frac{NSDD}{0.1}\right)^{0.35} & \text{,si } NSDD \geq 0.02\,[mg/cm^2] \\ 1 & \text{,si } 0 \leq x < 0.02[mg/cm^2] \end{cases} \tag{21}$$

$$ESDD_{dc} = ESDD_{ave} \cdot K_{NSDD} \tag{22}$$

$$RUSCD_{dc} = 65(ESDD_{dc})^{0.25} \tag{23}$$

Además, considerando la Tabla 8, se tiene que:

$$RUSCD_{dc,E2} \approx 22.32 \left[\frac{mm}{kV}\right] \tag{24}$$

$$RUSCD_{dc,E4} \approx 23.02 \left[\frac{mm}{kV}\right] \tag{25}$$

$$RUSCD_{dc,E7} \approx 56.73 \left[\frac{mm}{kV}\right] \tag{26}$$

Por último, se corrige por altitud (C_a) y por efecto del diámetro ante la contaminación (C_d). Por lo presentado en los estudios presentes, en concreto para los medios E5 y E7, existe pérdida parcial en la hidrofobicidad ante niveles de humedad elevados (véase gráficas 49(d), 49(e) y 46), si bien no hubo una categorización directa de la clase de hidrofobicidad, los resultados sugieren una pérdida parcial de la misma, mientras que para E2 y E4 no ocurre lo antes mencionado, por lo tanto, el factor de corrección por diámetro queda según:

- Para E2 y E4:

$$C_d = 1 \tag{27}$$

- Para E7:

$$C_d = \left(\frac{D}{250}\right)^{0.17} \tag{28}$$

La corrección por altitud queda según:

$$C_a = e^{0.35\left(\frac{H-1000}{8150}\right)} \tag{29}$$

Dado aún no se conoce la altitud de todas las torres de alta tensión del proyecto Kimal-Lo Aguirre, se considerará la altitud de la S/E Kimal (pues la mayor altura es más crítica en esta aplicación por Ley de Paschen), la cual es de 1300 m.s.n.m. [32], por lo que se considerará dicha altura para el factor de corrección por altitud, por lo tanto:

$$C_a = 1.013 \tag{30}$$

Por otro lado, para motivos de cálculos y un primer acercamiento, se empleó un valor de radio típico en aisladores poliméricos para sus aletas de 190/110mm. y su núcleo de 28mm. (véase [33] y [34]).

De este modo se obtiene:

- Para E2 y E4:

$$C_d = 1 \tag{31}$$

- Para E7:

$$C_d = 0.839 \tag{32}$$

Finalmente, para obtener el valor de $USCD_{req}$:

$$USCD_{req} = RUSCD_{dc} \cdot C_a \cdot C_d \tag{33}$$

- Para E2:

$$USCD_{req} = 22.61 \left[\frac{mm}{kV}\right] \tag{34}$$

- Para E4:

$$USCD_{req} = 23.32 \left[\frac{mm}{kV}\right] \tag{35}$$

- Para E7:

$$USCD_{req} = 48.21 \left[\frac{mm}{kV}\right] \tag{36}$$

Las distancias de fuga pueden ser estimadas según [31] como:

$$L_{fuga} = USCD_{req} \cdot U_{op,max} \tag{37}$$

En base a [35] se considera una tensión máxima de operación DC de $615\,kV$, por lo tanto:

- Para E2:

$$d_{fuga} = 13905\,[mm] \approx 13.91\,[m] \tag{38}$$

- Para E4:

$$d_{fuga} = 14342\,[mm] \approx 14.35\,[m] \tag{39}$$

- Para E7:

$$d_{fuga} = 29649\,[mm] \approx 29.65\,[m] \tag{40}$$

4.6.5. Alcance de recomendaciones

Los resultados permiten proponer una selección de escenarios de ensayo, identificar indicadores eléctricos que podrían utilizarse para caracterizar un aislador, plantear un sistema de monitoreo basado en referencias experimentales y especificar una distancia de fuga preliminar, sin embargo, todavía no permiten establecer umbrales universales de corriente de fuga, actividad de DP o ESDD que determinen cuándo un aislador debe ser reemplazado, esto debe ser evaluado in-situ. Tampoco permiten definir de manera definitiva directamente las dimensiones de un aislador para una línea HVDC (sólo una aproximación preliminar), sin embargo, a través de los ensayos realizados en laboratorio, se presentan recomendaciones considerando las 3 principales probetas ensayadas (E2, E4 y E7) que representan los aspectos más críticos estudiados o con particularidades en su desempeño.

5. Conclusiones

5.1. Comportamiento de la tensión de contorneo

Para los tres niveles de HR evaluados, se observa una disminución progresiva de la tensión de contorneo al pasar de los escenarios E2 a E5 y E7. Esta tendencia se aprecia con mayor claridad al 90 % de HR, donde las tensiones registradas son de 114,4 kV, 99,6 kV y 97,4 kV, respectivamente. No obstante, esta comparación no permite atribuir dicha disminución exclusivamente al incremento del ESDD, ya que los escenarios también presentan diferencias en el valor de NSDD, aunque la diferencia es leve, pues se encuentran en valores reducidos en lo que respecta las escalas de la Figura 25, esto puede dar una visión sugerente de la relación entre ESDD y la tensión de contorneo. Por otra parte, el escenario E4 presenta un ESDD similar al de E2, pero un NSDD aproximadamente 6,4 veces mayor. A pesar de esta diferencia, E4 registra tensiones de ruptura superiores a las de E2 en los tres niveles de humedad relativa.

Esto demuestra que la cantidad total de contaminación no explica por sí sola la tensión de contorneo. La proporción de componentes solubles e insolubles parece intervenir en el comportamiento, aunque no es posible afirmar que el caolín aumente la capacidad dieléctrica sin ensayos adicionales, lo que si es posible afirmar, es que la componente de ESDD deteriora la capacidad dieléctrica del aislante.

Existe una posible disminución de la sensibilidad a ESDD entre E5 y E7, ambos escenarios tienen valores de NSDD relativamente similares. Aunque E7 contiene aproximadamente 4.7 veces más ESDD que E5, al 90 % de humedad la tensión de contorneo solamente disminuye de 99.6 a 97.4 kV, lo que equivale a un deterioro de 2.21 %.

Esto es compatible con una posible saturación del efecto de ESDD, pero también podría deberse a las limitaciones de humectación o a la variabilidad experimental. No constituye una demostración de saturación o falla en la metodología de humectación.

Por último, se resume la severidad de la humedad y contaminación de forma independiente:

Respecto a contaminación			
Contaminación	**HR**		
	60	75	90
Caso Base	0.0 %	0.0 %	0.0 %
E2	-4.7 %	-7.8 %	-11.2 %
E4	7.4 %	-1.1 %	-2.8 %
E5	-12.1 %	-16.0 %	-22.7 %
E7	-14,6 %	-21,0 %	-24,4 %

Tabla 15: Variación porcentual relativa a Caso Base de tensión de contorneo por contaminación.

Respecto a humedad			
Contaminación	**HR**		
	60	75	90
Caso Base	0,0 %	1,9 %	-11,5 %
E2	0,0 %	-1,4 %	-17,6 %
E4	0,0 %	-6,1 %	-19,9 %
E5	0,0 %	-2,7 %	-22,2 %
E7	0,0 %	-5,8 %	-21,7 %

Tabla 16: Variación porcentual relativa a 60 % HR de tensión de contorneo por humedad.

Tabla 17: Comparación porcentual de tensiones de ruptura para variables ambientales.

5.2. Corriente de fuga como indicador de severidad

A partir del análisis de las curvas de corriente de fuga en función de la tensión aplicada, es posible identificar dos familias principales de comportamiento, cuya diferenciación se vuelve más evidente a medida que aumenta la humedad relativa. La primera comprende los escenarios Caso Base, E2 y E4, los cuales presentan una evolución relativamente similar, caracterizada por un crecimiento acelerado de la corriente principalmente a tensiones elevadas. La segunda comprende los escenarios E5 y E7, donde la combinación de contaminación soluble y humedad favorece una aparición más temprana del comportamiento no lineal.

Dentro de esta segunda familia, es posible distinguir dos respuestas. En E5, la aceleración pronunciada de la corriente se adelanta al punto $0.5V_{rup}$ y 75 % de HR, mientras que E7 presenta una intensificación de

este comportamiento, ya para una humedad del 60 % se aprecia un leve comportamiento no lineal, el cual se intensifica para distintos perfiles de humedad.

Estos resultados sugieren que la evolución de la corriente de fuga constituye un criterio complementario para caracterizar el comportamiento de aisladores sometidos a distintos escenarios de contaminación. No obstante, la agrupación propuesta es de carácter experimental y descriptivo, por lo que no permite establecer límites definitivos de severidad ni identificar umbrales específicos de contaminación soluble, aunque si entrega un primer vistazo para las familias propuestas. Agregar que las tendencias se observan de mejor manera para perfiles de humedad elevados, es decir, es mucho más fructífero estudiar el comportamiento de un aislador contaminado bajo perfiles de humedad elevados, ya que acentúa el comportamiento de la corriente de fuga, por lo que puede ser razonable monitorear la corriente de fuga del aislador haciendo uso de distintos perfiles de humedad a lo largo del día, esto permitiría caracterizar el grado de contaminación de la probeta entre grupo 1 (Caso base, E2 y E4) y grupo 2 (E5 y E7), aunque se recomienda realizar ensayos previos a las probetas para conocer su comportamiento ante distintos tipos de escenarios contaminados, pues el comportamiento puede cambiar por aspectos geométricos de la probeta.

De este modo, la corriente de fuga puede ser empleada como un criterio cuantitativo de evaluación de riesgo, especialmente útil en ensayos de laboratorio y en estrategías de monitoreo en servicio, aunque debe ser explorada más en detalle, en especial por aspectos de temperatura que no fue una variable controlada dentro de los ensayos, aunque se mantuvo acotada entre 10 a 20$°C$.

5.3. Descargas parciales como indicador de severidad

Los resultados experimentales evidencian que la capacidad de las descargas parciales para caracterizar los distintos escenarios de contaminación depende considerablemente de la humedad relativa. Para las condiciones de 60 % y 75 % HR, la reducida cantidad de eventos registrados limita la identificación de tendencias consistentes con la severidad de contaminación. No obstante, el 75 % HR permite observar valores elevados de Q95 en los escenarios Caso Base, E2 y E4, los cuales disminuyen al alcanzar el 90 % HR. Bajo una humedad relativa del 90 % se evidencia una mayor diferenciación entre los escenarios contaminados. En particular, E2, E5 y E7 presentan incrementos importantes en la cantidad de eventos registrados y en la carga acumulada. Al comparar E2 y E4, caracterizados por valores similares de ESDD, se observa una menor actividad impulsiva en E4, lo que sugiere que la composición de la contaminación, particularmente su componente insoluble, podría influir en el desarrollo de las descargas. Por otra parte, E5 y E7 presentan una elevada actividad impulsiva, acompañada de valores reducidos y relativamente similares de Q_{95}. A pesar de que E7 posee una cantidad de contaminación soluble considerablemente superior, ambos escenarios registran un número de eventos comparable, aunque E7 presenta una mayor carga acumulada. Este resultado indica que el número de pulsos no mantiene una relación estrictamente monótona con ESDD y que resulta necesario complementar su análisis con otros indicadores de actividad.

Finalmente, los mapas tiempo-frecuencia permiten identificar diferencias entre determinados escenarios de contaminación, principalmente mediante la frecuencia característica y la dispersión de los pulsos. Sin embargo, las semejanzas observadas entre E5 y E7, así como la ausencia de una tendencia definida en los parámetros temporales, limitan su utilización para establecer grados específicos de severidad.

En consecuencia, los resultados sugieren que las descargas parciales constituyen una herramienta complementaria para caracterizar aisladores contaminados bajo condiciones de elevada humedad (90 % HR según estudio). No obstante, a diferencia de la corriente de fuga, los indicadores evaluados no permiten establecer una clasificación inequívoca de los grupos de escenarios de contaminación. Su principal contribución radica en evidenciar las diferencias en la actividad impulsiva producidas por la interacción entre la humedad y la composición de los contaminantes.

5.4. Recomendaciones de diseño para líneas HVDC

Se recomienda establecer una metodología de selección, caracterización y monitoreo de aisladores para líneas HVDC, considerando sus características geométricas, materiales y eléctricas, así como las condiciones ambientales del emplazamiento. Para ello, se propone realizar ensayos de tensión de contorneo, corriente de fuga y descargas parciales bajo condiciones limpias y escenarios representativos de contaminación y humedad, obteniendo curvas de referencia propias de cada modelo de aislador.

Posteriormente, estas referencias podrían utilizarse para evaluar su comportamiento en servicio, aprovechando las variaciones naturales de humedad mediante horarios estratégicos de monitoreo de corriente de fuga y descargas parciales. Esto permitiría identificar posibles cambios en el estado del aislamiento y orientar las actividades de mantenimiento. No obstante, la metodología requiere validación en terreno antes de establecer criterios definitivos de diagnóstico.

Por último, en base a lo obtenido en los ensayos de tensión de ruptura, corriente de fuga y descargas parciales, los aisladores de silicona muestran un desempeño razonable, pues en niveles de contaminación extremos como $E5$ y $E7$, es cuando comenzaron a demostrar una pérdida gradual de la capacidad hidrofóbica y con ello una actividad elevada de descargas y pérdida en la linealidad de la corriente de fuga, es por ello que se mantiene la selección de aislador de silicona, aunque debe observarse el deterioro por envejecimiento UV. Como selección preliminar se mantienen las distancias de fuga recomendadas para probar su desempeño en las condiciones seleccionadas.

Contaminación	**Humedad relativa**	**Distancia de fuga [m]**
E2	90 %	13.91
E4	90 %	14.35
E7	90 %	29.65

Tabla 18: Distancias de fuga recomendadas según emplazamiento.

5.5. Alcance, limitaciones y proyección del estudio

Si bien el presente estudio se desarrolla en condiciones controladas de laboratorio y sobre un tipo específico de aislador de silicona, los resultados obtenidos reproducen tendencias coherentes con escenarios reales de operación, particularmente en lo relativo al efecto dominante de la humedad sobre la contaminación superficial y su impacto en la corriente de fuga, la tensión de contorneo y descargas parciales. Esto permite considerar los resultados como representativos desde el punto de vista físico, aunque no directamente extrapolables a todas las configuraciones posibles.

En este sentido, el trabajo aporta evidencia experimental relevante para la comprensión del desempeño de aisladores poliméricos bajo excitación DC y sienta una base sólida para estudios futuros que incorporen otras geometrías, materiales y perfiles de contaminación. Asimismo, los resultados obtenidos pueden servir como apoyo técnico para el desarrollo de criterios de ensayo y diseño más ajustados a las condiciones reales de operación de sistemas HVDC.

6. Trabajo futuro

- **Método de humectación:**

  Se propone observar el método de humectación bajo la cantidad de tiempo a la que se expone la probeta, pues para el presente estudio se consideró un tiempo de exposición de 30 minutos, para probarlo se recomienda emplear las probetas bajo contaminación E5 y E7, posteriormente someterla a una humedad del 90 % y variar la cantidad de tiempo de exposición, posteriormente realizar ensayos.

- **Monitoreo de contaminación mediante la respuesta de corriente de fuga a variaciones naturales de humedad:**

  A partir de los resultados obtenidos, se propone estudiar la viabilidad de utilizar los perfiles horarios de humedad relativa como una variable de referencia para el monitoreo de la corriente de fuga en aisladores poliméricos sometidos a excitación DC. Esta metodología permitiría aprovechar las variaciones ambientales naturales para analizar la respuesta eléctrica superficial del aislador, manteniendo aproximadamente constante la tensión de operación de la línea.

  En particular, se propone evaluar si las diferencias experimentales observadas entre los escenarios de contaminación pueden reproducirse mediante el análisis de la sensibilidad de la corriente de fuga frente a variaciones de humedad. Para ello, sería necesario disponer de registros meteorológicos representativos del emplazamiento y desarrollar curvas de referencia para diferentes niveles de ESDD y NSDD a una misma tensión aplicada, en condición de laboratorio esto puede ser emulado mediante una cámara de humectación.

Referencias

[1] CIGRÉ, "Hvdc transmission: Economic and technical advantages," Tech. Rep., 2005.

[2] L. Li, Y. Jiang, M. Lu, Z. Liu, K. Hua, and Z. Li, "Study on the difference of chemical composition of insulator contamination on uhv-ac and -dc transmission lines," *IET Science, Measurement & Technology*, vol. 12, no. 1, pp. 17–24, 2018.

[3] C. Jorquera Ovalle. (2025) Almacenamiento, infraestructura y descentralización: el desafío de chile para detener la pérdida de energía. Consultado: 18-mar-2026. [Online]. Available: https://climatetrackerlatam.org/historias/almacenamiento-infraestructura-y-descentralizacion-el-desafio-de-chile-para-detener-la-perdida-de-energia/

[4] J. Kim, M. K. Chaudhury, and M. J. Owen, "Hydrophobicity loss and recovery of silicone hv insulation," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 6, no. 5, pp. 695–702, Oct. 1999.

[5] J. W. Chang and R. S. Gorur, "Surface recovery of silicone rubber used for hv outdoor insulation," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 1, no. 6, pp. 1039–1045, 1994.

[6] Y. Tu, B. Gong, C. Wang, K. Xu, Z. Xu, S. Wang, F. Zhang, and R. Li, "Effect of moisture on temperature rise of composite insulators operating in power system," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 22, no. 4, pp. 2207–2215, Aug. 2015.

[7] Y. Tu, B. Gong, Z. Yuan, C. Wang, Z. Xu, R. Li, and F. Zhang, "Moisture induced local heating of overhead line composite insulators," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 24, no. 1, pp. 483–491, Feb. 2017.

[8] U. Fromm, "Interpretation of partial discharges at dc voltages," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 2, no. 5, pp. 761–770, Oct. 1995.

[9] P. H. F. Morshuis and J. J. Smit, "Partial discharges at dc voltage: Their mechanism, detection and analysis," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 12, no. 2, pp. 328–340, 2005.

[10] Process Sensing Technologies. (2024) How to read a psychrometric chart: An 8-step guide for hvac professionals. Consultado: 18-mar-2026. [Online]. Available: https://www.processsensing.com/es-es/blog/how-to-read-a-psychrometric-chart.htm

[11] S. C. Oliveira, E. Fontana, and F. J. M. M. Cavalcanti, "Leakage current activity on glass-type insulators of overhead transmission lines in the northeast region of brazil," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 2, pp. 822–829, Apr. 2009.

[12] J. M. George, E. Brocard, D. Lepley, and F. Virlogeux, "Dc pollution performance: Current approximations and future needs," SEDIVER Research Center, France, Tech. Rep., 2018.

[13] *Selection and Dimensioning of High-Voltage Insulators Intended for Use in Polluted Conditions – Part 1*, International Electrotechnical Commission Std. IEC/TS 60 815-1, 2008.

[14] *High-Voltage Test Techniques – Partial Discharge Measurements*, International Electrotechnical Commission Std. IEC 60 270, 2000.

[15] O. Kozák and J. Pihera, "Partial discharge analysis and simulation using the consecutive pulses correlation method," *Energies*, vol. 14, no. 9, p. 2567, 2021.

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

[17] E. Gulski, *Practical Partial Discharge Measurement on Electrical Equipment*, 1st ed. Wiley, 2020.

[18] J. Pihera, P. Trnka, O. Kozák, and J. Hornák, "Pulse sequence analysis of corona discharge at dc voltage," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Dielectric Materials*, 2016, pp. 71–74.

[19] B. Yazici, "Statistical pattern analysis of partial discharge measurements for quality assessment of insulation systems in high-voltage electrical machinery," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 40, no. 6, pp. 1579–1588, 2004.

[20] S. Tenbohlen, A. Pfeffer, and S. Coenen, "On-site experiences with multi-terminal iec pd measurements, uhf pd measurements and acoustic pd localisation," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Dielectric Liquids*, 2010, pp. 1–6.

[21] Y. Li, J. Han, Y. Du, and H. Jin, "Time–frequency maps for multiple partial discharge sources separation in cable terminations," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 38, no. 3, pp. 2228–2236, 2023.

[22] I. Daubechies, J. Lu, and H.-T. Wu, "Synchrosqueezed wavelet transforms: An empirical mode decomposition-like tool," *Applied and Computational Harmonic Analysis*, vol. 30, no. 2, pp. 243–261, 2011.

[23] P. S. Addison, *The Illustrated Wavelet Transform Handbook: Introductory Theory and Applications in Science, Engineering, Medicine and Finance*. Bristol, UK: Institute of Physics Publishing, 2002.

[24] SILPAK S.A., "Aisladores poliméricos de silicona tipo suspensión–retención," SILPAK S.A., Chile, Tech. Rep., ficha técnica conforme a IEC 61109 e IEC 815-1.

[25] B. Montoya, "Kimal – lo aguirre: la carretera eléctrica clave para la transición energética en chile, bajo la lupa," Climate Tracker LatAm, 2024, accedido: 2025-01-XX. [Online]. Available: https://climatetrackerlatam.org/historias/kimal-lo-aguirre-la-carretera-electrica-clave-para-la-transicion-energetica-en-chile-bajo-la-lupa/

[26] M. I. Illanes Jorquera, "Análisis del desempeño de aisladores en condiciones de contaminación bajo excitación continua mediante medición de descargas parciales," Valparaíso, Chile, 2024.

[27] *High-Voltage Test Techniques – Part 1: General Definitions and Test Requirements*, International Electrotechnical Commission Std. IEC 60 060-1, 2010.

[28] M. Y. Kamel, M. AbouelSaad, A. S. El-Wakeel, and H. A. Hassan, "Influences of water droplet size and pollution layer permittivity on the electric field and potential distribution on a polluted insulator surface," in *Proceedings of the 6th International Conference on Electrical Engineering (ICEENG)*, Cairo, Egypt, May 2008, pp. EE176–1–EE176–12.

[29] Z. Zhang, X. Liu, X. Jiang, J. Hu, and D. W. Gao, "Study on insulator flashover voltage gradient correction considering soluble pollution constituents," *Energies*, vol. 9, no. 11, p. 954, 2016.

[30] X. Wang, N. Taylor, and H. Edin, "Effect of humidity on partial discharge in a metal-dielectric air gap on machine insulation at trapezoidal testing voltages," *Journal of Electrostatics*, vol. 83, pp. 88–96, Oct. 2016.

[31] *IEC TS 60815-4: Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions – Part 4: Insulators for DC systems*, International Electrotechnical Commission Std., 2016.

[32] Coordinador Eléctrico Nacional, "Bases de licitación para la adjudicación de los derechos de ejecución y explotación del proyecto línea HVDC kimal–lo aguirre: Anexo 4, especificaciones técnicas generales," Coordinador Eléctrico Nacional, Santiago, Chile, Tech. Rep. 19-231-HVDC-01, Feb. 2021. [Online]. Available: https://es.scribd.com/document/543348454/19-231-HVDC-01-Anexo-4-ETG

[33] TCI Group Company Limited, *Composite Long Rod Suspension Insulators: IEC Standard*, TCI Group Company Limited, catálogo técnico de aisladores compuestos. [Online]. Available: https://tciinsulator.com/UploadFile/2023/6/8/20230608092932971 5.pdf

[34] Power Grid Corporation of India Limited, "Standard specification of transmission line: Section viii, composite long rod insulator," Power Grid Corporation of India Limited, Technical Specification Section VIII, Volume II, Revision 4, Oct. 2024, revised October 2024. [Online]. Available: https://apps.powergrid.in/pgciltenders/Files/2baaa1bd-dc12-4478-97b8-b0a1a5dac32e/07-2_to_12.pdf

[35] V. Lima, "Informe de cruce con ruta d-669 (camino regional provincial): Línea de transmisión hvdc 600 kv kimal–lo aguirre," Proyecto Línea HVDC Kimal–Lo Aguirre, Ingeniería básica y de detalle CNX-KILO-002-DL-L5-EM-ITC-E-0043, Aug. 2025, revisión 0. Preparado el 20 de agosto de 2025. [Online]. Available: https://es.scribd.com/document/904326651/CNX-KILO-002-DL-L5-EM-ITC-E-0043

[36] B. Dong, B. Wu, Z. Wang, and X. Jiang, "Theoretical and experimental investigation of AC and DC arc propagation on polluted insulators surface," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 16, no. 13, pp. 2681–2687, 2022.

A. Anexo

A.1. Mecanismo de contorneo

A.1.1. Proceso de activación

En lo detallado por el anexo B de la norma IEC 60815-1 [13], la cual define a detalle el proceso de contorneo para un aislador en sistema AC, lo separa en 6 fases:

- **Fase 1:**

  El aislador queda recubierto por una capa contaminante, si dicha componente contaminante no es conductora cuando está seca (baja conductividad), es necesario que ocurra algún proceso de humectación (Fase 2) antes de que se produzca el contorneo eléctrico.

- **Fase 2:**

  La superficie del aislador contaminado se humedece. La absorción de humedad ocurre durante períodos de alta humedad relativa ($HR > 75\,\%$), cuando la temperatura del aislador y la del aire son iguales. La condensación se produce cuando la humedad presente en el aire se condensa sobre una superficie cuya temperatura es inferior al punto de rocío.

- **Fase 3:**

  A través de la superficie del aislador energizado transita una corriente que, por efecto térmico, tiende a secar algunas zonas de la capa contaminante. Esto ocurre principalmente en los puntos donde la corriente es más alta, es decir, en sectores más estrechos del aislador, como resultado se forman **bandas secas**.

- **Fase 4:**

  Producto de la no-homogeneidad del contaminante y humectación, la capa contaminante no se seca de manera uniforme, por lo que el camino conductor se interrumpe debido a la formación de bandas secas, la que impiden la circulación de la corriente de fuga.

- **Fase 5:**

  La tensión entre fase y tierra que se redistribuye en los distintos puntos del aislador (siendo alta en aquellos puntos secos por baja conductividad) provoca la ruptura dieléctrica del aire. Como consecuencia, se forman arcos eléctricos que puentean las bandas secas y quedan eléctricamente en serie con la resistencia de la parte de la capa contaminante que permanece húmeda y es conductora, por lo que, cada vez que se produce una descarga localizada por las bandas secas, se genera un aumento repentino de la corriente de fuga.

- **Fase 6:**

  Si la conductividad de la zona de la capa contaminante que permanece húmeda y es conductora es suficientemente alta, los arcos eléctricos que puentean bandas secas se mantienen y pueden llegar a extenderse a lo largo del aislador. Esto reduce aún más la resistencia en serie con los arcos, aumentando la corriente y permitiendo que estos abarquen una porción superficial del aislador cada vez mayor. Finalmente, el arco eléctrico cubre toda la superficie del aislador y se establece una falla eléctrica entre línea y tierra, conocido como **contorneo eléctrico**.

A.1.2. Esquema proceso de tensión de contorneo

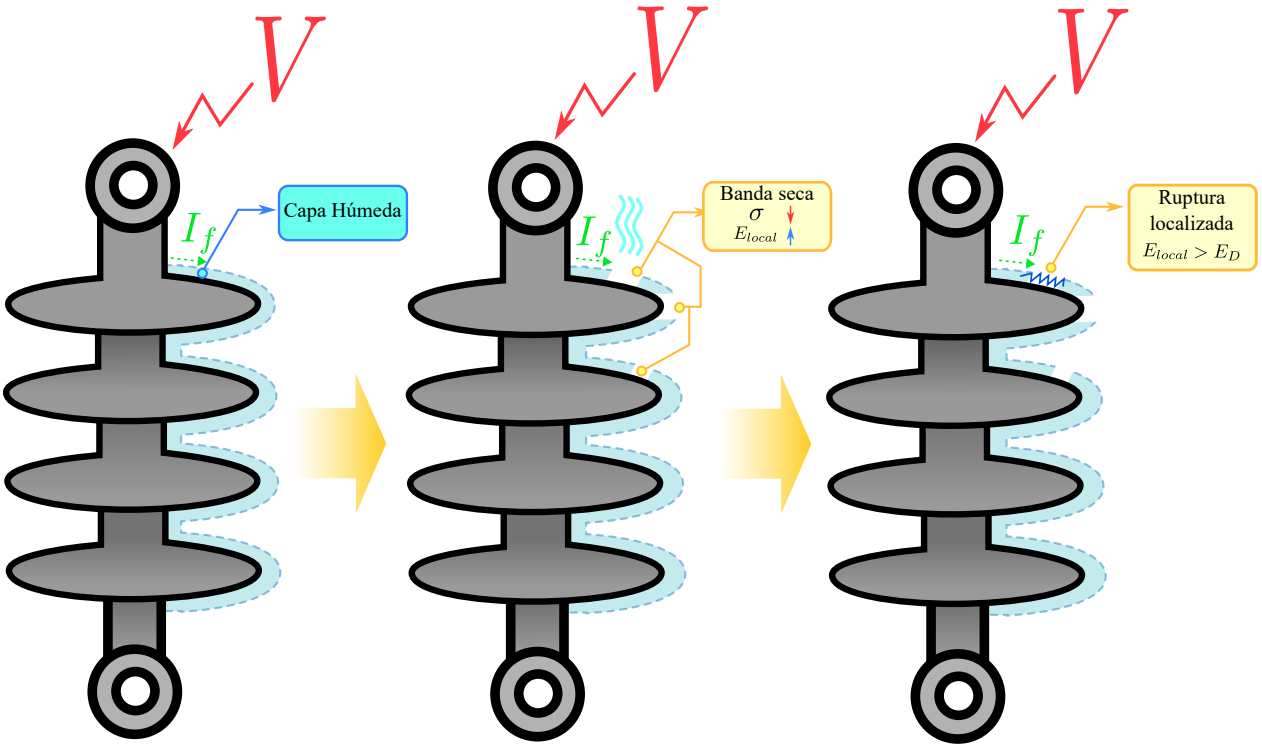


Figura 60: Esquema de proceso tensión de contorneo.

A.1.3. Diferencias entre sistema de excitación AC y DC

Efecto	AC	DC
Extinción de arco	Corriente pasa periodicamente por cero, lo que favorece extinción. Pudiendo reencender.	No existe una extinción por cruces por cero. Arco se mantiene por condiciones superficiales y de corriente de fuga.
Propagación de arco	Se encuentra condicionada por la variación temporal de tensión y condiciones de extinción y reencendido.	Puede presentar desviaciones alejandóse de la superficie del aislador, producto de las cargas acumuladas.
Carga superficial	La acumulación y distribución de carga están condicionadas por la polaridad alternante.	Pueden acumularse cargas superficiales cuya distribución depende de la polaridad, el material y condiciones eléctricas.
Evolución de contorneo	Depende de la formación de bandas secas y la capacidad del arco para reencenderse y propagarse.	Depende de la formación de bandas secas y de la capacidad para mantenerse y extenderse.

Tabla 19: Comparación entre tipos de excitación para fenómeno de contorneo [36].

A.2. Instrumentación

A continuación se detallan los instrumentos a emplear para la realización de los ensayos de tensión de contorneo, corriente de fuga y descargas parciales.

A.2.1. Equipos para medición de tensión de contorneo:

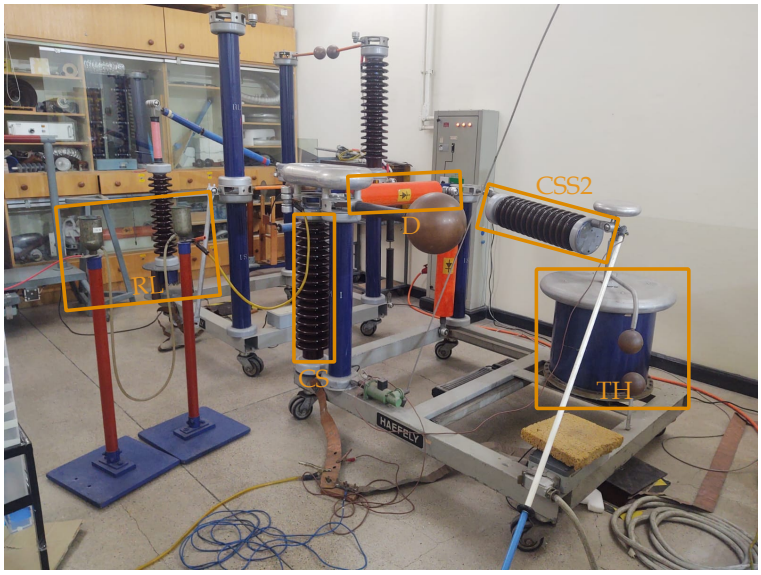


Figura 61: Dispositivos para medición de tensión de contorneo.

Equipos	Sigla
Transformador	TH
Condensador de entrada	CSS2
Diodo de alta tensión	D
Condensador de carga	CS
Resistencia limitadora	RL

Tabla 20: Elementos para circuito de ruptura.

A.2.2. Equipos para medición de corriente de fuga:



Figura 62: Sistema de control de tensión PGK 150 5HB.



Figura 63: Generador de tensión PGK.



Figura 64: Capacitor alisamiento.



Figura 65: Divisor de tensión.

Figura 66: Dispositivos para medición de corriente de fuga.

PGK 150 5HB	Valor	Unidad
Tensión de entrada	220/240	V
Tensión de salida	150	kV
Corriente de salida	18	mA
Frecuencia de entrada	45/60	Hz

Tabla 21: Características de Generador de tensión.

Equipos	Tensión [kV]	Capacitancia [pF]	Relación
Condensador de alisamiento	200	15	-
Divisor de tensión	150 (DC)	-	10000:1

Tabla 22: Características de condensador y divisor de tensión.

A.2.3. Equipos para medición de descargas parciales



Figura 67: Osciloscopio KEYSIGHT DSOS104A.



Figura 68: OMICRON MPD600.



Figura 69: Transformador de corriente de alta frecuencia (HFCT).

A.3. Tensión de contorneo

N° Medición	Caso limpio		
	60 % HR	75 % HR	90 % HR
1	144	140	128
2	148	144	128
3	152	148	128
4	144	152	132
5	144	148	128
6	140	148	132
7	152	152	128
8	144	152	128
9	144	148	128
10	148	152	128
Media	146	148,4	128,8

Tabla 23: Tensiones de contorneo en kV para caso limpio.

N° Medición	Caso E2		
	60 % HR	75 % HR	90 % HR
1	140	136	120
2	140	136	116
3	140	140	116
4	140	136	112
5	136	136	116
6	136	136	112
7	140	136	116
8	140	140	112
9	136	136	112
10	140	136	112
Media	138,8	136,8	114,4

Tabla 24: Tensiones de contorneo en kV para caso E2.

N° Medición	Caso E4		
	60 % HR	75 % HR	90 % HR
1	160	144	124
2	164	148	124
3	156	144	128
4	152	148	128
5	152	144	128
6	156	148	124
7	156	152	128
8	152	148	120
9	160	144	124
10	156	148	124
Media	156,4	146,8	125,2

Tabla 25: Tensiones de contorneo en kV para caso E4.

N° Medición	Caso E5		
	60 % HR	75 % HR	90 % HR
1	126	128	104
2	126	128	96
3	128	126	104
4	128	124	100
5	132	126	100
6	130	124	96
7	126	122	96
8	128	122	100
9	128	124	100
10	128	122	100
Media	128	124,6	99,6

Tabla 26: Tensiones de contorneo en kV para caso E5.

N° Medición	Caso E7		
	60 % HR	75 % HR	90 % HR
1	128	120	96
2	124	116	98
3	124	116	96
4	124	116	98
5	124	120	96
6	124	116	100
7	124	116	96
8	124	120	98
9	124	116	100
10	124	116	96
Media	124,4	117,2	97,4

Tabla 27: Tensiones de contorneo en kV para caso E7.

A.4. Corriente de fuga

A.4.1. Tablas para humedad relativa del 60 %

t [s]	Caso base	Caso E2	Caso E4	Caso E5	Caso E7
0	0,2	0,29	0,54	0,21	0,79
5	0,2	0,25	0,52	0,21	0,74
10	0,19	0,24	0.53	0,2	0,72
15	0,18	0,27	0,52	0,26	0,73
20	0,19	0,25	0,53	0,19	0,72
25	0,22	0,19	0,5	0,18	0,71
30	0,26	0,19	0,52	0,18	0,71
35	0,24	0,16	0,51	0,17	0,71
40	0,23	0,19	0,52	0,18	0,73
45	0,25	0,16	0,5	0,16	0,75
50	0,24	0,14	0,48	0,16	0,75
55	0,2	0,18	0,49	0,18	0,79
60	0,19	0,2	0,47	0,17	0,78
Media	0,21	0,21	0,51	0,19	0,74

Tabla 28: Corriente de fuga en $[\mu A]$ - 40 % de Tensión de contorneo - HR 60 %.

t [s]	Caso base	Caso E2	Caso E4	Caso E5	Caso E7
0	0,89	0,58	1,68	0,69	3,16
5	0,83	0,54	1,63	0,72	3,15
10	0,82	0,55	1,64	0,7	3,24
15	0,79	0,52	1,69	0,7	3,05
20	0,87	0,59	2,18	0,69	3,18
25	0,83	0,53	1,89	0,68	3,26
30	0,83	0,54	1,74	0,65	3,15
35	0,82	0,54	1,74	0,66	3,44
40	0,8	0,54	1,73	0,65	3,35
45	0,82	0,57	1,73	0,63	3,46
50	0,82	0,57	1,68	0,63	3,35
55	0,8	0,56	1,69	0,69	3,55
60	0,81	0,54	1,65	0,62	3,5
Media	0,83	0,55	1,74	0,67	3,30

Tabla 29: Corriente de fuga en $[\mu A]$ - 50 % de Tensión de contorneo - HR 60 %.

t [s]	Caso base	Caso E2	Caso E4	Caso E5	Caso E7
0	2,07	1,72	9,71	1,71	7,56
5	2,12	1,83	9,97	1,76	7,44
10	2,14	1,78	9,71	1,79	7,86
15	2,32	1,79	9,78	1,74	7,56
20	2,22	1,75	9,35	1,76	6,99
25	2,25	1,75	8,02	1,74	6,54
30	2,24	1,76	8,59	1,74	8,06
35	2,25	1,74	9,44	1,73	7,76
40	2,22	1,72	9,51	1,73	6,86
45	2,24	1,78	9,05	1,72	6,66
50	2,23	1,78	8,55	1,74	6,89
55	2,21	1,78	9,45	1,73	6,96
60	2,22	1,76	9,38	1,78	7,03
Media	2,21	1,76	9,27	1,74	7,24

Tabla 30: Corriente de fuga en $[\mu A]$ - 60 % de Tensión de contorneo - HR 60 %.

t [s]	Caso base	Caso E2	Caso E4	Caso E5	Caso E7
0	13,51	8,89	21,05	17,78	13,58
5	13,82	11,65	21,81	17,92	13,08
10	13,4	9,27	21,06	17,3	12,99
15	12,62	9,49	21,03	17,3	13,09
20	12,78	10,67	21,23	16,96	13,05
25	12,62	10,5	21,27	16,77	13,06
30	12,68	10,46	20,65	16,92	12,76
35	12,44	11,72	18,77	16,88	12,88
40	12,54	11,62	21,24	16,99	13,25
45	12,89	11,07	21,77	17,2	14,8
50	12,68	10,32	21,89	17,89	14,86
55	12,62	12,04	22,66	18,39	13,65
60	12,61	9,62	21,82	17,23	13,5
Media	12,86	10,56	21,25	17,35	13,43

Tabla 31: Corriente de fuga en $[\mu A]$ - 70 % de Tensión de contorneo - HR 60 %.

A.4.2. Tablas para humedad relativa del 75 %

t [s]	Caso base	Caso E2	Caso E4	Caso E5	Caso E7
0	1,42	0,65	2,7	1,59	0,7
5	1,39	0,64	2,58	1,56	0,74
10	1,4	0,63	2,29	1,6	0,73
15	1,4	0,63	2,88	1,54	0,73
20	1,58	0,65	2,59	1,55	0,69
25	1,39	0,67	3,2	1,55	0,7
30	1,28	0,64	2,39	2,06	0,7
35	1,27	0,66	2,44	1,89	0,73
40	1,25	0,63	2,87	1,29	0,84
45	1,23	0,63	3,06	1,39	0,79
50	1,22	0,62	3,15	1,15	0,79
55	1,22	0,63	3,14	1,07	0,83
60	1,21	0,63	3,19	1,39	0,88
Media	1,33	0,64	2,81	1,51	0,76

Tabla 32: Corriente de fuga en $[\mu A]$ - 40 % de Tensión de contorneo - HR 75 %.

t [s]	Caso base	Caso E2	Caso E4	Caso E5	Caso E7
0	2,3	1,4	2,88	1,88	2,54
5	2,16	1,37	2,82	1,88	2,49
10	2,28	1,3	2,85	2,02	2,48
15	2,23	1,28	2,76	2,36	2,68
20	2,15	1,25	2,77	2,12	2,76
25	2,14	1,25	3,08	1,86	2,56
30	2,25	1,23	3,06	1,91	2,45
35	2,23	1,24	2,82	2,07	2,56
40	2,16	1,29	2,89	1,96	2,59
45	2,33	1,24	2,93	1,82	2,63
50	2,26	1,22	2,92	1,99	2,59
55	2,29	1,21	2,86	2,2	2,42
60	2,37	1,2	2,81	1,89	2,38
Media	2,24	1,27	2,88	2,00	2,55

Tabla 33: Corriente de fuga en $[\mu A]$ - 50 % de Tensión de contorneo - HR 75 %.

t [s]	Caso base	Caso E2	Caso E4	Caso E5	Caso E7
0	5,79	3,68	4,97	5,98	8,66
5	4,98	3,59	6,02	6,92	8,61
10	5	3,48	5,85	6,53	8,97
15	4,58	3,52	5,84	6,92	8,52
20	5,09	3,46	5,77	6,96	8,94
25	5,06	3,38	5,66	6,44	8,36
30	5,01	3,56	5,67	6,15	8,35
35	4,92	3,54	5,64	6,24	8,32
40	4,66	3,62	5,61	6,24	8,34
45	4,48	3,48	5,75	6,16	7,95
50	4,67	3,28	5,88	6,33	8,07
55	4,21	3,32	5,97	6,12	8,07
60	4,12	3,34	5,82	5,99	8,18
Media	4,81	3,48	5,73	6,38	8,41

Tabla 34: Corriente de fuga en $[\mu A]$ - 60 % de Tensión de contorneo - HR 75 %.

t [s]	Caso base	Caso E2	Caso E4	Caso E5	Caso E7
0	13,11	8,28	14,88	13,98	16,08
5	13,08	7,48	14,41	13,86	19,94
10	15,86	9,07	14,04	13,7	19,83
15	13,7	6,35	14,32	12,74	20,78
20	15,34	6,48	14,19	13,08	20,07
25	12,89	6,34	14,99	13,88	20,09
30	11,86	8,05	13,87	13,29	19,57
35	11,02	8,68	13,84	12,98	20,65
40	10,91	8,2	14,12	14,22	20,26
45	10,78	6,84	14,25	13,2	19,98
50	11,32	6,87	14,88	13,85	19,77
55	13,1	6,89	14,34	13,44	20,11
60	10,98	6,7	15,01	13,31	19,72
Media	12,61	7,40	14,40	13,50	19,76

Tabla 35: Corriente de fuga en $[\mu A]$ - 70 % de Tensión de contorneo - HR 75 %.

A.4.3. Tablas para humedad relativa del 90 %

t [s]	Caso base	Caso E2	Caso E4	Caso E5	Caso E7
0	0,94	1,31	1,49	0,48	6,63
5	0,95	1,29	1,29	0,44	6,63
10	0,99	1,2	1,39	0,46	6,65
15	0,99	1,22	1,29	0,44	6,67
20	0,9	1,2	1,18	0,45	6,63
25	0,89	1,19	1,19	0,41	6,65
30	0,89	1,12	1,11	0,44	6,62
35	0,95	1,17	1,19	0,41	6,57
40	0,87	1,3	1,25	0,44	6,54
45	0,87	1,1	1,11	0,46	6,6
50	0,87	1,08	1,22	0,47	6,52
55	0,85	1,19	1,13	0,44	6,63
60	0,88	1,14	1,12	0,45	6,54
Media	0,91	1,19	1,23	0,45	6,61

Tabla 36: Corriente de fuga en $[\mu A]$ - 40 % de Tensión de contorneo - HR 90 %.

t [s]	Caso base	Caso E2	Caso E4	Caso E5	Caso E7
0	1,89	2,68	2,84	1,44	12,88
5	2,05	2,65	2,98	1,48	13,19
10	1,99	2,79	2,73	1,98	12,92
15	2,02	2,77	2,68	1,44	13,44
20	2,03	2,78	2,7	1,49	13,28
25	2,03	2,75	2,65	1,36	13,39
30	1,99	2,82	2,63	2	14,79
35	1,94	2,69	2,55	1,66	14,07
40	1,91	2,62	2,55	1,36	14,89
45	1,84	2,6	2,56	1,47	13,68
50	1,73	2,55	2,61	1,49	14,21
55	1,78	2,54	2,6	1,37	13,46
60	1,76	2,52	2,56	1,39	14,21
Media	1,92	2,67	2,66	1,53	13,72

Tabla 37: Corriente de fuga en $[\mu A]$ - 50 % de Tensión de contorneo - HR 90 %.

t [s]	Caso base	Caso E2	Caso E4	Caso E5	Caso E7
0	2,96	4,86	4,79	7,56	25,4
5	3,01	4,74	4,85	7,75	25,34
10	3,18	4,68	4,83	7,83	25,33
15	3,04	4,58	4,72	7,56	25,3
20	2,99	4,61	4,69	7,52	25,25
25	3,02	4,36	4,65	7,46	25,27
30	3	4,29	4,58	7,92	25,18
35	3,26	4,74	4,54	7,88	25,1
40	3,06	4,36	4,52	7,96	25,02
45	3,15	4,14	4,5	8,32	25,08
50	3,09	4,33	4,58	7,52	25,02
55	3,08	4,17	4,5	7,99	25,02
60	3,04	4,36	4,5	7,86	25,04
Media	3,07	4,48	4,63	7,78	25,18

Tabla 38: Corriente de fuga en $[\mu A]$ - 60 % de Tensión de contorneo - HR 90 %.

t [s]	Caso base	Caso E2	Caso E4	Caso E5	Caso E7
0	12,88	6,04	9,56	20,02	41,98
5	11,25	6,86	9,77	19,93	41,48
10	10,99	6,94	9,08	21,83	41,48
15	11,19	6,86	9,04	19,78	41,47
20	11,38	6,84	9,05	19,78	41,43
25	12,13	6,69	9,16	19,94	41,41
30	10,99	6,82	8,95	21,05	41,99
35	10,52	6,88	9,32	19,64	40,62
40	10,68	6,86	9,35	20,85	41,4
45	10,58	6,78	8,97	20,34	40,99
50	10,48	5,96	8,85	19,29	40,88
55	10,37	6,09	8,85	20,36	40,88
60	10,98	6,92	8,84	20,96	40,86
Media	11,11	6,66	9,14	20,29	41,30

Tabla 39: Corriente de fuga en $[\mu A]$ - 70 % de Tensión de contorneo - HR 90 %.