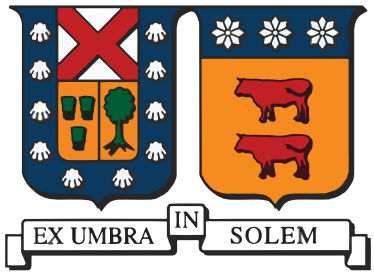
Departamento de Ingeniería Eléctrica UTFSM



Universidad Técnica Federico Santa María
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Desempeño de aisladores en HVDC en condiciones de contaminación severas

Max Pérez Riffo

Trabajo para optar al título de:
Ingeniero Civil Electricista

Profesores:

Profesor patrocinante 1: Roger Schurch Brandt
Profesor patrocinante 2: Jorge Ardila Rey

26 de octubre de 2022

Agradecimientos

Quisiera agradecer a mi familia, mis padres Juana y Max, mis hermanos Felipe y Javier y mi hermana Constanza, quienes siempre me han apoyado y dado esa energía, cariño y amor para seguir adelante. A mi pareja Catalina, a quien también considero parte de mi familia y con quien iniciamos juntos este largo y difícil camino universitario y hoy, finalizando esta etapa, quisiera darle las gracias por su amor y apoyo incondicional en cada uno de los momentos que hemos vivido. Gracias a todos ustedes por aportar y ayudar a ser la persona y profesional que soy hoy.

A mis amigos, compañeros y futuros colegas de carrera, con quienes pasé largas noches de estudio, juegos, fiestas, risas y rabias, quiero que sepan que cada uno de esos momentos los llevaré conmigo y agradeceré siempre el apoyo que me brindaron en todo este tiempo, especialmente en último período de la carrera.

También, quiero hacer una especial mención y agradecer a Cristián Andrades, Claudio Ramos y Carlos Minay, apoyos académicos del Departamento de Electricidad, quienes siempre estuvieron con la mejor disposición y vocación para ayudarme en el laboratorio y apoyarme en todo lo que fuese necesario. Sin su ayuda, todo hubiese sido diferente y más difícil, muchas gracias.

Al profesor Juan Navarrete, con quien compartí sobretodo al final de mi carrera, gracias por sus consejos, ayuda y buenos deseos.

Finalmente, agradecer al profesor Roger Schurch, mi profesor guía, por darme la oportunidad de participar en un tema tan desafiante y nuevo. Agradecer su confianza, disposición y ayuda en todo lo que necesitara.

Índice de Contenidos

1. Introducción **9**

1.1. Depósito de la contaminación 10

1.2. Tensión de ruptura 10

1.3. Recubrimiento siliconado RTV para sistemas de aislación 11

2. Necesidad del estudio y experimentación en HVDC **12**

3. Objetivos de la investigación **12**

3.1. Objetivo general 12

3.2. Objetivos específicos 12

4. Metodologías normadas **14**

4.1. IEC 60815 14

4.1.1. Métodos para la selección y dimensión de un aislador 14

4.1.2. Condiciones ambientales 16

4.1.3. Tipos de entorno 16

4.1.4. Evaluación del grado de contaminación del sitio 17

4.2. IEC 61245 21

4.2.1. Método de capa sólida 21

4.2.2. Método de niebla salina 22

4.3. IEC 62073 23

4.3.1. Método de ángulo de contacto 23

4.3.2. Método de tensión superficial 24

4.3.3. Método *spray* 24

5. Diseño del plan de trabajo **27**

5.1. Etapa 1: Caracterización de la contaminación 27

5.2. Etapa 2: Medición de tensión de ruptura 28

5.3. Etapa 3: Medición de corrientes de fuga 29

5.4. Etapa 4: Determinación clase de hidrofobicidad 29

5.5. Objeto de prueba 29

5.6. Recubrimiento en estudio 30

6. Ejecución plan de trabajo **32**

6.1. Caracterización de la contaminación 32

6.1.1. Paso 1: Preparación de la solución base 33
6.1.2. Paso 2: Limpieza del aislador 33
6.1.3. Paso 3: Cálculo de ESDD 33
6.1.4. Paso 4: Cálculo de NSDD 34
6.2. Medición de tensión de ruptura 36
6.2.1. Ambiente húmedo 36
6.2.2. Ambiente seco 39
6.3. Medición de corrientes de fuga 41
6.3.1. Ambiente húmedo 41
6.3.2. Ambiente seco 42
6.4. Verificación clase de hidrofobicidad 45

7. Análisis de resultados **46**
7.1. Caracterización de la contaminación 46
7.2. Medición de tensión de ruptura en ambiente húmedo 49
7.3. Medición de tensión de ruptura en ambiente seco 52
7.4. Medición de corrientes de fuga en ambiente húmedo 56
7.5. Medición de corrientes de fuga en ambiente seco 60
7.6. Clase de hidrofobicidad 64

8. Comentarios y conclusiones **71**

Referencias **74**

Anexos **76**
Tablas mediciones ESDD y NSDD 76
Tablas mediciones tensión de ruptura 77
Tablas mediciones corrientes de fuga 80

Índice de Figuras

1.1. Distancia de aislamiento requerida: HVAC vs HVDC [1]. 9
1.2. Representación esquemática de la propagación del arco seco en AC y en DC [1]. . . . 10
4.1. Severidad de contaminación tipo A del sitio y relación entre ESDD/NSDD y SPS para aisladores tipo *cap-and-pin* [14]. 20
4.2. Severidad de contaminación tipo B del sitio y relación entre SES y SPS para aisladores tipo *cap-and-pin* y *long rod* [14]. 20
4.3. Ejemplos típicos de las superficies con clases de hidrofobicidad 1 a 6 [16]. 26
5.1. Trazado modelo de la línea HVDC Kimal - Lo Aguirre y ubicación de los casos de estudio [18]. 27
5.2. Probeta de ensayo. 30
(a). Perfil aislador de vidrio tipo disco [20]. 30
(b). Aislador de vidrio tipo disco U120B. 30
5.3. Recubrimiento siliconado RTV. 30
(a). Si-COAT 570 HVIC [21]. 30
(b). Aislador de vidrio recubierto. 30
6.1. Estructura y sistema de pulverización. 32
(a). Estructura de acrílico 110x110x170 cm. 32
(b). Aislador suspendido en la estructura de acrílico. 32
6.2. Proceso de medición y cálculo de ESDD y NSDD. 35
(a). Preparación y medición de conductividad de solución base. 35
(b). Limpieza de la superficie del aislador. 35
(c). Medición de conductividad y temperatura de la muestra que contiene los contaminantes. 35
(d). Proceso de filtración al vacío. 35
(e). Pesaje del papel filtro en balanza de precisión. 35
(f). Secado de muestras en horno. 35
6.3. Fuente de alimentación PGK 110/5 HB marca BAUR [25]. 36
6.4. Circuito de ensayo: tensión de ruptura en ambiente húmedo. 37
6.5. Relación entre tensión real y tensión medida en el divisor resistivo. 38
6.6. Circuito de ensayo: tensión de ruptura en ambiente seco. 40
6.7. Circuito de ensayo: corrientes de fuga en ambiente húmedo. 41
6.8. Circuito de ensayo: corrientes de fuga en ambiente seco. 43
6.9. Setup de ensayos en Laboratorio Alta Tensión UTFSM. 44
(a). Setup de ensayos en ambiente húmedo. 44

(b). Setup de ensayos en ambiente seco. 44
7.1. Resultado mediciones: ESDD y NSDD. 46
7.2. Resultado promedio mediciones de ESDD y NSDD. 47
7.3. Tensión de ruptura en aisladores limpios en condición húmeda. 49
7.4. Tensión de ruptura en aisladores recubiertos en condición húmeda. 51
7.5. Comparación de tensión de ruptura en aisladores con y sin recubrimiento en ambiente húmedo. 52
7.6. Tensión de ruptura en aisladores limpios en condición seca. 53
7.7. Tensión de ruptura en aisladores recubiertos en condición seca. 54
7.8. Comparación de tensión de ruptura en aisladores con y sin recubrimiento en ambiente seco. 55
7.9. Corrientes de fuga en aisladores limpios en condición húmeda. 56
7.10. Corrientes de fuga en aisladores recubiertos en condición húmeda. 57
7.11. Comparación entre aisladores con y sin recubrimiento en función de la evolución de corriente de fuga para cada ambiente. 59
(a). Corrientes de fuga en condición húmeda - caso base. 59
(b). Corrientes de fuga en condición húmeda - E1. 59
(c). Corrientes de fuga en condición húmeda - E2. 59
(d). Corrientes de fuga en condición húmeda - E3. 59
(e). Corrientes de fuga en condición húmeda - E4. 59
(f). Corrientes de fuga en condición húmeda - E5. 59
7.12. Corrientes de fuga en aisladores limpios en condición seca. 60
7.13. Corrientes de fuga en aisladores recubiertos en condición seca. 61
7.14. Comparación entre aisladores con y sin recubrimiento en función de la evolución de corriente de fuga para cada capa de contaminación. 62
(a). Corrientes de fuga en condición seca - caso base. 62
(b). Corrientes de fuga en condición seca - E1. 62
(c). Corrientes de fuga en condición seca - E2. 62
(d). Corrientes de fuga en condición seca - E3. 62
(e). Corrientes de fuga en condición seca - E4. 62
(f). Corrientes de fuga en condición seca - E5. 62
7.15. Hidrofobicidad - Aislador limpio. 64
(a). Clase de hidrofobicidad HC3. 64
(b). Clase de hidrofobicidad HC1. 64
(c). Aislador sin recubrimiento limpio. 64
(d). Aislador con recubrimiento limpio. 64

7.16. Hidrofobicidad - Aislador contaminado con ambiente E1. 65
(a). Clase de hidrofobicidad HC2. 65
(b). Aislador sin recubrimiento - E1. 65
(c). Aislador con recubrimiento - E1. 65
7.17. Hidrofobicidad - Aislador contaminado con ambiente E2. 66
(a). Clase de hidrofobicidad HC2. 66
(b). Aislador sin recubrimiento - E2. 66
(c). Aislador con recubrimiento - E2. 66
7.18. Hidrofobicidad - Aislador contaminado con ambiente E3. 67
(a). Clase de hidrofobicidad HC2. 67
(b). Aislador sin recubrimiento - E3. 67
(c). Aislador con recubrimiento - E3. 67
7.19. Hidrofobicidad - Aislador contaminado con ambiente E4. 68
(a). Clase de hidrofobicidad HC6. 68
(b). Aislador sin recubrimiento - E4. 68
(c). Aislador con recubrimiento - E4. 68
7.20. Hidrofobicidad - Aislador contaminado con ambiente E5. 69
(a). Clase de hidrofobicidad HC4. 69
(b). Aislador sin recubrimiento - E5. 69
(c). Aislador con recubrimiento - E5. 69

Índice de tablas

4.1. Métodos para selección y dimensionamiento de aisladores [14]. 15
4.2. Ejemplos de ambientes típicos [14]. 19
4.3. Criterio para la determinación de la clase de hidrofobicidad [16]. 25
5.1. Comparación de entornos típicos de Norma IEC 60815-1 con los casos de estudio [18]. 28
5.2. Entornos seleccionados para replicar en laboratorio. 28
5.3. Parámetros del aislador de prueba. 30
6.1. Relación experimental entre la tensión real y la tensión del divisor resistivo. 37
7.1. Concentraciones de sal y caolín para generar los cinco tipos de entornos. 46
7.2. Promedio de mediciones ESDD y NSDD para cada tipo de entorno. 47
7.3. Resumen resultados clase de hidrofobicidad. 69
8.1. Mediciones ESDD y NSDD para cada concentración de sal y caolín utilizadas. 76
8.2. Promedio mediciones ESDD y NSDD para cada concentración de sal y caolín utilizadas. 76
8.3. Mediciones tensión de ruptura en aisladores sin recubrimiento en ambiente húmedo. 77
8.4. Mediciones tensión de ruptura en aisladores con recubrimiento en ambiente húmedo. 77
8.5. Mediciones tensión de ruptura en aisladores sin recubrimiento en ambiente seco. . . 78
8.6. Mediciones tensión de ruptura en aisladores con recubrimiento en ambiente seco. . . 79
8.7. Mediciones corrientes de fuga en aisladores sin recubrimiento en ambiente húmedo. . 80
8.8. Mediciones corrientes de fuga en aisladores con recubrimiento en ambiente húmedo. . 80
8.9. Mediciones corrientes de fuga en aisladores sin recubrimiento en ambiente seco. . . . 81
8.10. Mediciones corrientes de fuga en aisladores con recubrimiento en ambiente seco. . . . 81

Nomenclatura

HVDC: Alta tensión continua.

HVAC: Alta tensión alterna.

DC: Tensión continua.

AC: Tensión alterna.

RTV: *Room Temperature Vulcanizing*.

PDMS: Polímero de polidimetilsiloxano.

ATH: Trihidrato de alúmina.

***Flashover*:** Contorneo.

SPS: Gravedad de contaminación del sitio.

ESDD: Densidad de depósito equivalente de sal.

NSDD: Densidad de depósito no soluble.

DDGIS: Índice de medición de depósitos de polvo - soluble.

DDGIN: Índice de medición de depósitos de polvo - no soluble.

SES: Salinidad equivalente del sitio.

HVIC: Recubrimiento de aislación en alta tensión.

MTS: *Multi Test Set*.

HC: Clasificación de hidrofobicidad.

1. Introducción

Las cadenas de aisladores en los sistemas de generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica cumplen un rol fundamental. Por una parte, proporcionan soporte mecánico para los conductores de la línea y por otra, brindan aislación eléctrica con el fin de evitar fallas disruptivas en la red. Es por ello, que la integridad y desempeño de la aislación exterior es crucial para otorgar un suministro continuo de energía eléctrica y así, mantener un sistema seguro, confiable y estable.

La aislación debe soportar la tensión de servicio y las diferentes condiciones ambientales a las que puede estar sujeto, por lo tanto, el comportamiento frente a la contaminación del aislador muchas veces determina el diseño de estos [1].

El diseño y selección de la cadena de aisladores para aplicaciones en corriente continua (DC, por sus siglas en inglés) requiere de la consideración de varios parámetros que no son tan significativos en el caso en corriente alterna (AC, por sus siglas en inglés) [2]. Uno de los problemas clave que afecta el diseño del aislamiento externo de las líneas y subestaciones HVDC es el rendimiento frente a la contaminación [3]. Este rendimiento se ve negativamente afectado cuando la superficie del aislante se contamina con depósitos del aire, como la sal marina o contaminación industrial. Estos depósitos forman una capa superficial conductora que cuando se moja da como resultado descargas, aumento de la corriente de fuga y, en el peor de los casos, provoca la ruptura de los aisladores [3]. Por tanto, se diseña la aislación de forma tal que pueda ser capaz de soportar cualquier tipo de tensión a pesar de la presencia de la capa de contaminación.

En la Figura 1.1 se presenta la comparación de la distancia del aislamiento para la cual los sistemas HVAC y HVDC soportan rayos y sobretensiones de conmutación, así como los efectos de la contaminación del los aisladores.

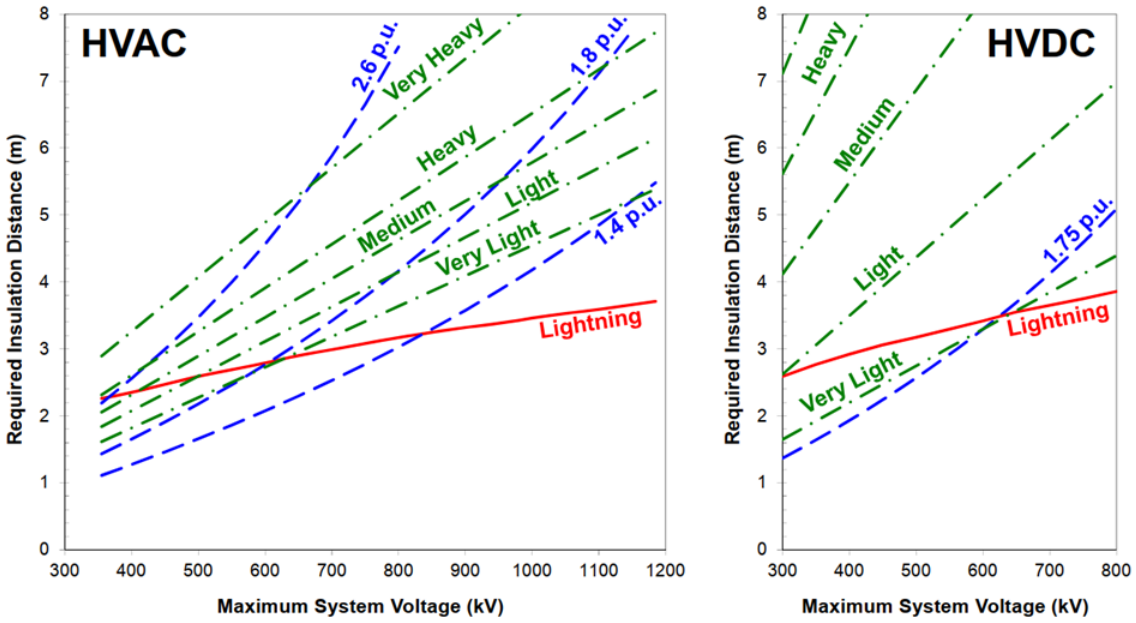


Figura 1.1: Distancia de aislamiento requerida: HVAC vs HVDC [1].

Se observa a partir de la figura anterior que la situación de los sistemas DC es bastante diferente en comparación con los sistemas AC y, además, muestra la importancia del diseño y la selección de aisladores con respecto a la contaminación. En primer lugar, la distancia de aislación requerida para

un mismo tipo de contaminación en DC es mayor que para AC y, en segundo lugar, la magnitud de las sobretensiones de conmutación que un sistema puede tolerar son menores para el caso DC.

En áreas donde los niveles de contaminación son importantes se requiere de grandes dimensiones de la aislación, en otras palabras, una distancia de fuga mayor. Esto puede influir enormemente en el diseño de todo un proyecto. Por lo tanto, un diseño inadecuado en condiciones de alta contaminación puede tener un impacto significativo en el costo general del sistema, ya que se traduce en mayores costos de inversión (dada la necesidad de aumentar la distancia de la cadena de aisladores) y mayores costos de operación (debido a la necesidad de realizar mantenimiento para combatir la contaminación) [1].

Existen también diferencias en la forma en que se deposita la contaminación en AC y en DC y los procesos de descarga disruptiva que pueden afectar el diseño del aislamiento. Por una parte, los aisladores energizados en sistemas DC tienden a acumular más contaminación que los aisladores en AC [3] y, por otra parte, dado un mismo nivel de contaminación, un aislador en DC tiene una tensión de ruptura menor que un aislador energizado en AC [1].

1.1. Depósito de la contaminación

En AC, la contaminación se deposita principalmente en la superficie del aislante por acción aerodinámica. Las partículas son transportadas por el viento, donde se depositan en el aislante dependiendo en gran medida del flujo de aire alrededor de este. En áreas donde hay poco viento, la contaminación se deposita principalmente por gravedad. En efecto, en la mayoría de los casos, no existe diferencia si el aislador se encuentra energizado o no [1].

Sin embargo, en el caso DC el fenómeno es completamente distinto. El efecto del campo eléctrico estático puede contribuir significativamente al depósito de contaminación [4]. Esto empeora si el área presenta bajas velocidades de viento. En general, esto da como resultado un mayor nivel de contaminación en los aisladores en DC en comparación con los aisladores en AC instalados en un mismo lugar. La proporción de depósitos de contaminación de DC a AC puede variar de 1-10 veces más acumulación [5].

1.2. Tensión de ruptura

En AC, el arco de banda seca o *dry arc* se extinguirá y deberá volver a comenzar dado el paso por 0 de la tensión (tensión sinusoidal). Además, los arcos tienden a propagarse a lo largo de la superficie del aislador, en cambio, los arcos bajo excitación continua tienden a propagarse por el aire [6]. En la Figura 1.2 se representa lo descrito anteriormente.

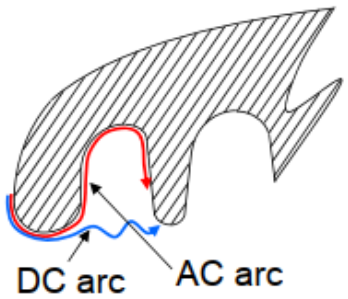


Figura 1.2: Representación esquemática de la propagación del arco seco en AC y en DC [1].

A partir de ello, la literatura ha demostrado que dado un mismo nivel de contaminación se tendrá una menor "resistencia" a la ruptura dieléctrica en DC, en comparación con AC [7][8]. Es por ello que la mayoría de fabricantes ofrecen perfiles especiales de aisladores para sistemas en DC, los cuales suelen tener distancia entre *sheds* más grandes que los aisladores para sistemas AC.

En conclusión, la evaluación del nivel de contaminación es el principio base para seleccionar y dimensionar los aisladores en sistemas HVDC y más aún, es determinante en comparación con sistemas HVAC.

1.3. Recubrimiento siliconado RTV para sistemas de aislación

Uno de los métodos para prevenir la descarga disruptiva del aislamiento exterior en condiciones ambientales de contaminación y humedad es el uso de recubrimientos en base a caucho de silicona vulcanizado a temperatura ambiente (RTV).

La silicona RTV es un tipo de caucho de silicona que se cura a temperatura ambiente. Todas las variantes conocidas producidas comercialmente consisten en un polímero de polidimetilsiloxano (PDMS), un relleno de refuerzo, un fluido PDMS, un relleno de trihidrato de alúmina (ATH), un pigmento colorante, un agente reticulante, un catalizador de condensación y un promotor de adhesión [9].

Los recubrimientos se aplican sobre la superficie de aisladores de porcelana y vidrio templado. La apariencia visual del recubrimiento sobre el aislador debe ser uniforme, libre de burbujas y grumos, lo que ayuda a minimizar las acumulaciones de contaminación y evita la canalización de corrientes de fuga [10].

La propiedad más importante del caucho de silicona RTV como revestimiento aislante es la hidrofobicidad y la migración de la hidrofobicidad. Esta migración puede restaurar la hidrofobicidad de la superficie después de que la capa de contaminación se haya acumulado sobre ella [10].

Los contaminantes ambientales se acumulan en la superficie de los aisladores y degradan la integridad aislante del material. En condiciones húmedas, esta superficie mojada contaminada proporciona un camino para la corriente de fuga que fluye a través de la superficie del aislador. La corriente de fuga conduce a mayores pérdidas, interferencias electromagnéticas, incendios en las crucetas de postes, corrosión acelerada y otros problemas de seguridad. Por lo tanto, para prevenir el *flashover* y reducir estos inconvenientes, es necesario reducir la corriente de fuga [11]. Las prácticas utilizadas para esto se pueden clasificar en los siguientes grupos:

1. Eliminación de la acumulación de contaminación mediante limpieza o lavados periódicos.
2. Minimización de la acumulación de contaminación en la superficie del aislador con el uso de perfiles aerodinámicos.
3. Aumento de la distancia de fuga del aislador aumentando la longitud o utilizando extensores de fuga.
4. Mantener seca una gran área del aislador durante mucho tiempo durante la humectación natural, ya sea mediante el uso de esmalte resistente o el uso de un diseño de recipiente para niebla, que tiene un perfil que hace que sea difícil humedecer la superficie.
5. Ayudar a prevenir la formación de películas de agua en la superficie del aislador al recubrir los aisladores con compuestos hidrofóbicos, por ejemplo, grasa o caucho de silicona RTV.

2. Necesidad del estudio y experimentación en HVDC

A lo largo de los últimos años, la construcción de líneas en corriente continua ha ido en aumento en países como China, India y Brasil, debido a sus ventajas medioambientales, capacidad de transportar una gran cantidad energía con menores pérdidas de transmisión, mejor estabilidad del sistema, superioridad económica sobre los sistemas HVAC para transmisión a larga distancia, entre otras [12].

En Chile se abrió un proceso de licitación internacional para la construcción de la primera línea en corriente continua de 600 kV y 3000 MW Kimal – Lo Aguirre [13]. Este proyecto consiste en el desarrollo de una línea de transmisión de 1500 kilómetros entre las subestaciones Kimal de la región de Antofagasta y Lo Aguirre en la región Metropolitana. La construcción de esta línea constituye un factor importante en el proceso de descarbonización para lograr la carbono neutralidad en 2050 y, además, el objetivo es potenciar y descongestionar la línea ya construida en AC de 500 kV Kimal - Cardones – Polpaico.

Por todo lo anterior, resulta interesante evaluar la relación que hay entre distintos factores, entre ellos el nivel de contaminación y el efecto en el desempeño de aisladores en HVDC, debido a la poca o nula experiencia que existe en nuestro país. La réplica de las condiciones medioambientales del norte de Chile en laboratorio marca un desafío importante dado que, la correcta emulación e implementación en los diferentes ensayos permitirá evaluar el desempeño de aisladores en HVDC.

Además, dadas las condiciones en las cuales se encuentra este proyecto de la nueva línea de transmisión, sumado a que no existen sistemas DC en servicio en Chile, resalta el concepto de experimentación en laboratorio, el cual podría entregar información relevante acerca de la respuesta de los sistemas de aislación enfrentados a un determinado nivel de contaminación.

3. Objetivos de la investigación

Acorde a las necesidades por las cuales se realiza esta investigación, se han propuesto una serie de objetivos para guiar el estudio.

3.1. Objetivo general

Evaluar el desempeño en laboratorio de aisladores de vidrio bajo distintas condiciones de contaminación, enfocada principalmente en los entornos característicos del Norte y Centro de Chile, incluyendo además, aisladores con y sin recubrimiento siliconado RTV.

3.2. Objetivos específicos

1. Realizar una revisión bibliográfica acerca de los tipos de contaminación ambiental y su efecto en el diseño y mantenimiento de la aislación de líneas HVDC.

2. Diseñar un programa de pruebas en laboratorio que permitan replicar los tipos de contaminación presentes en los entornos característicos del Norte y Centro de Chile.

3. Desarrollar el set de pruebas propuesto en laboratorio con el fin de evaluar el desempeño de aisladores de vidrio.

4. Comparar el desempeño dieléctrico de aisladores de vidrio con y sin recubrimiento siliconado ante excitación continua.

5. Proponer una serie de recomendaciones e indicaciones para la futura construcción de la línea de alta tensión continua del norte - centro del país, basadas en los resultados experimentales obtenidos.

4. Metodologías normadas

4.1. IEC 60815

IEC 60815: "Selección y dimensionamiento de aisladores en alta tensión para usos en condiciones de contaminación" [14], es una especificación técnica que proporciona definiciones generales, métodos para la evaluación de la gravedad de la contaminanación del sitio (*pollution site severity, SPS*) y describe los principios para llegar a un juicio informado sobre el comportamiento probable de un aislador dado ciertos entornos de contaminación.

Dicha normativa se divide en cinco partes:

- IEC 60815: Selección y dimensionamiento de aisladores en alta tensión para usos en condiciones de contaminación.
- IEC 60815 - 2: Aisladores cerámicos y de vidrio para sistemas AC.
- IEC 60815 - 3: Aisladores poliméricos para sistemas AC.
- IEC 60815 - 4: Equivalente IEC 60815 - 2 para sistemas DC.
- IEC 60815 - 5: Equivalente IEC 60815 - 3 para sistemas DC.

4.1.1. Métodos para la selección y dimensión de un aislador

Para seleccionar un determinado tipo de aislador, según los requisitos del sistema y las condiciones ambientales, se recomiendan tres métodos. Aplicar uno u otro depende de los datos disponibles, el tiempo de ensayo y la economía involucrada en el proyecto.

Método 1

En este método, las interacciones entre el medio ambiente y el aislador están bien representadas en una línea operativa o una subestación. También se pueden representar en una estación de prueba.

Se puede considerar aceptable un período de funcionamiento de cinco a diez años. Puede ser un período de tiempo más largo o más corto, según la frecuencia y la gravedad de los eventos climáticos y de contaminación.

Para estaciones de prueba, se puede considerar típico un período de investigación de dos a cinco años. Variará dependiendo de la metodología de prueba y la gravedad de la contaminación.

Método 2

Para el segundo método, las interacciones entre medio ambiente y el aislador no pueden representarse completamente mediante pruebas de laboratorio.

Para medir la gravedad de contaminación del sitio, se requiere de períodos de al menos un año. Para estimar la gravedad de contaminación del sitio, es necesario realizar una investigación del clima y el medio ambiente. Se requiere identificar y analizar todas las posibles fuentes de contaminación. La estimación no es un proceso inmediato y requiere de varias semanas o meses.

Método 3

Con respecto al tercer método, las interacciones entre el medio ambiente y el aislador solo pueden ser representadas en un grado limitado por factores de corrección. Es un método solo de medición y diseño, por tanto, excluye las pruebas.

El método 3 puede ser rápido y económico para el proceso de selección y dimensionamiento, pero puede conducir a una subestimación de la gravedad de contaminación del sitio o a una solución más costoso debido al excesivo diseño.

Se recomienda siempre, en la medida que la circunstancia lo permita, adoptar los métodos 1 o 2. Los tres enfoques se presentan en la Tabla 4.1 que permiten la selección y dimensionamiento del aislador.

Tabla 4.1: Métodos para selección y dimensionamiento de aisladores [14].

<table>
<tr><th></th><th colspan="2">Método 1
(Experiencia pasada)</th><th colspan="2">Método 2
(Medición y pruebas)</th><th colspan="2">Método 3
(Medición y diseño)</th></tr>
<tr><td>Método</td><td colspan="2">• Se utiliza experiencia de campo o estaciones de prueba existentes en el sitio, sitio cercano o condiciones similares.</td><td colspan="2">• Medir/estimar la gravedad de la contaminación del sitio.
• Seleccionar los aisladores candidatos.
• Escoger las pruebas de laboratorio.
• Verificar y ajustar los aisladores candidatos.</td><td colspan="2">• Medir/estimar la gravedad de la contaminación del sitio.
• Utilizar estos datos para escoger el tipo y tamaño del aislamiento según su perfil y distancia de fuga.</td></tr>
<tr><td>Datos de entrada</td><td colspan="2">• Requerimientos del sistema.
• Condiciones ambientales.
• Parámetros del aislador.
• Desempeño histórico.</td><td colspan="2">• Requerimientos del sistema.
• Condiciones ambientales.
• Parámetros del aislador.
• Tiempo y recursos disponibles.</td><td colspan="2">• Requerimientos del sistema.
• Condiciones ambientales.
• Parámetros del aislador.
• Tiempo y recursos disponibles.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Decisiones</td><td colspan="2">• ¿La aislación existente satisface los requisitos del proyecto y está destinado a utilizar el mismo diseño?</td><td colspan="2">• ¿Hay tiempo para medir la gravedad de contaminación del sitio?</td><td colspan="2">• ¿Hay tiempo para medir la gravedad de contaminación del sitio?</td></tr>
<tr><td>SI
Utilice el mismo diseño de aislación.</td><td>NO
Utilice un diseño, material o tamaño diferentes.</td><td>SI
Medir
• El tipo de contaminación determina el método de prueba de laboratorio.
• La gravedad de contaminación del sitio determina los valores de prueba.</td><td>NO
Estimar</td><td>SI
Medir</td><td>NO
Estimar</td></tr>
<tr><td>Proceso de selección</td><td colspan="2">• Si es necesario, utilice el perfil y la distancia de fuga de aquí en adelante para adaptar los parámetros del aislamiento existente a la nueva elección utilizando el método 2 o 3.</td><td colspan="2">• Seleccionar los candidatos.
• Probar si los datos de contaminación no están disponibles para los candidatos.
• Si es necesario, ajuste la selección y tamaño de acuerdo a los resultados de las pruebas.</td><td colspan="2">• Utilice el tipo de contaminación y clima para seleccionar los perfiles apropiados.
• Utilizar el nivel de contaminación y los factores de corrección para el diseño del perfil y el material para dimensionar el aislamiento.</td></tr>
<tr><td>Precisión</td><td colspan="2">• La selección tiene una buena precisión.</td><td colspan="2">• Una selección con una precisión que varía según el grado de errores y/o atajos en la evaluación de la gravedad de contaminación del sitio y con los supuestos y/o limitaciones de las pruebas de laboratorio.</td><td colspan="2">• Una solución posiblemente sobredimensionada o subdimensionada en comparación a los otros 2 métodos.
• Una selección con una precisión que varía según el grado de errores y/o atajos en la evaluación de la gravedad de contaminación del sitio y la aplicabilidad de los factores de corrección seleccionados.</td></tr>
</table>

De la tabla anterior se desprende la importancia que tiene realizar un correcto proceso de evaluación de las condiciones ambientales a la cual estará expuesta la aislación, ya que, dependiendo de la metodología utilizada, el candidato seleccionado puede no ser el más apropiado, afectando directamente su operación y/o desempeño dieléctrico.

4.1.2. Condiciones ambientales

Hay dos tipos principales de contaminación de aisladores que pueden provocar *flashover*:

1. Tipo A: es el tipo de contaminación sólida con un componente insoluble que se deposita sobre la superficie del aislador. Este depósito se vuelve conductor cuando se humedece. Este tipo de contaminación se puede caracterizar mediante mediciones de densidad de depósito equivalente de sal (ESDD, por sus siglas en inglés), densidad de depósito no soluble (NSDD, por sus siglas en inglés), índice de medición de depósitos de polvo soluble (DDGIS, por sus siglas en inglés) e índice de medición de depósitos de polvo no soluble (DDGIN, por sus siglas en inglés).
2. Tipo B: contaminación donde los electrolitos líquidos se depositan sobre el aislante con muy poco o ningún componente no soluble. Este tipo de contaminación se puede caracterizar mediante medidas de conductancia o corrientes de fuga.

Cabe destacar que en un determinado entorno pueden surgir combinaciones de ambos tipos de contaminación.

Contaminación tipo A

Se asocia normalmente con áreas interiores, desérticas o contaminadas industrialmente. También, puede surgir en zonas costeras donde se acumula una capa de sal seca y se humedece rápidamente con el rocío, la niebla o llovizna.

Posee dos componentes, la contaminación soluble que forma una capa conductora cuando se humedece y la contaminación no soluble que forma una capa de unión para la contaminación soluble.

- Contaminación soluble: se subdivide en sales de alta y baja solubilidad. Se mide en términos de una densidad de depósito de sal equivalente (ESDD, por sus siglas en inglés) en mg/cm^2.
- Contaminación no soluble: algunos ejemplos son polvo, arena, arcilla, aceites, etc. La contaminación no soluble se mide en términos de densidad de depósitos no solubles (NSDD, por sus siglas en inglés) en mg/cm^2.

Contaminación tipo B

Este tipo de contaminación se asocia con mayor frecuencia con zonas costeras donde se deposita agua salada o niebla conductora sobre la superficie del aislante. Otras fuentes son, por ejemplo, la fumigación de cultivos, las nieblas químicas y la lluvia ácida.

4.1.3. Tipos de entorno

Asimismo, se pueden definir cinco tipos de entornos o áreas, en donde se pueden describir las características típicas de una determinada región. La mayoría de entornos comprenden más de un tipo de contaminación, por ejemplo, regiones de costeras con playas de arena, en donde es importante determinar qué tipo de contaminación (A o B) es dominante.

1. **Ambiente tipo "desierto"**
   Es un área caracterizada por suelos extensos y arenosos con períodos prolongados de condiciones secas. La capa de contaminación en estas áreas normalmente comprende sales que se disuelven lentamente en combinación con un alto nivel de contaminación no soluble.
   Los aisladores son contaminados principalmente por la acción del viento, en donde la limpieza natural es poco frecuente debido a los escasos períodos de lluvia.
   El rocío es una forma de humectación crítica, ya que representa un riesgo de ruptura en los aisladores.

2. **Ambiente tipo "costero"**
   Áreas que se encuentran en las inmediaciones de la costa, aunque dependiendo de la topografía, pueden extenderse hasta 50 km tierra adentro. La contaminación se deposita sobre los aisladores principalmente por pulverización, viento y niebla.
   La acumulación de contaminación generalmente es rápida, en especial durante condiciones de rocío o niebla conductora (tipo B). También se produce una acumulación de contaminación a largo plazo a través de un depósito de partículas transportadas por el viento, con una capa con sales de rápida disolución con un grado de componente inerte (tipo A).
   La limpieza natural de los aisladores suele ser eficaz, ya que la contaminación activa consiste principalmente en sales de rápida disolución.

3. **Ambiente tipo "industrial"**
   Áreas ubicadas muy cerca de una fuente de contaminación industrial. La capa de contaminación puede constituir contaminación con partículas conductoras como carbón, depósitos metálicos o gases disueltos (NOx, SOx). O contaminación que se disuelve lentamente como cemento y yeso.
   La efectividad de la limpieza natural depende mucho del tipo de contaminación presente.

4. **Ambiente tipo "agrícola"**
   Son zonas que se sitúan en las proximidades donde existe actividad agrícola. Por lo general, se trata de áreas sujetas a arado (tipo A) o fumigación de cultivo (tipo B).
   La capa de contaminación consiste en sales de disolución rápida y lenta, como productos químicos, excrementos de pájaros o sales presentes en el suelo.
   La limpieza natural suele ser bastante eficaz según el tipo de sal depositada.

5. **Ambiente tipo "interior"**
   Es un tipo de área con un bajo nivel de contaminación sin fuentes claramente identificables.

La severidad de la contaminación del sitio, para los casos en que se contamina artificialmente en ensayos de laboratorio, se mide en base a:

- NSDD y ESDD para métodos de capa sólida (tipo A).
- Salinidad de la niebla (SES, por sus siglas en inglés) para métodos de niebla salina (tipo B).

4.1.4. Evaluación del grado de contaminación del sitio

La severidad de contaminación del sitio (SPS, por sus siglas en inglés) es el valor o valores máximos de ESDD y NSDD o SES o DDGIS y DDGIN, medidos mediante los métodos que la misma Norma indica y registrados en intervalos de tiempo apreciables, es decir, uno o más años.

La evaluación del grado de contaminación del sitio se recomienda realizar de la siguiente forma, con un rango de confiabilidad decreciente:

1. A partir de mediciones in situ.
2. A partir de información del comportamiento de aisladores de las líneas y subestaciones ya existentes.
3. A partir de simulaciones que calculan el nivel de contaminación a partir del clima y otros parámetros ambientales.
4. Si no es posible realizar alguna de las maneras anteriores, se propone evaluar cualitativamente a partir de las indicaciones de la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Ejemplos de ambientes típicos [14].

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

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

Adicionalmente, se definen cualitativamente cinco clases de contaminación que caracterizan la gravedad del sitio (SPS). Desde un grado de contaminación leve hasta la contaminación muy intensa, de la siguiente forma:

1. *Very light.*
2. *Light.*

3. *Medium.*
4. *Heavy.*
5. *Very heavy.*

Para la **contaminación tipo A** se muestra en la Figura 4.1 los rangos de valores de ESDD/NSDD correspondientes a cada clase SPS para aisladores tipo *cap-and-pin*. Estos valores resultan de mediciones de campo, experiencia y pruebas de contaminación. Adicionalmente, los ejemplos de entorno de la Tabla 4.2 se reproducen en dicha figura para ilustrar niveles típicos de SPS.

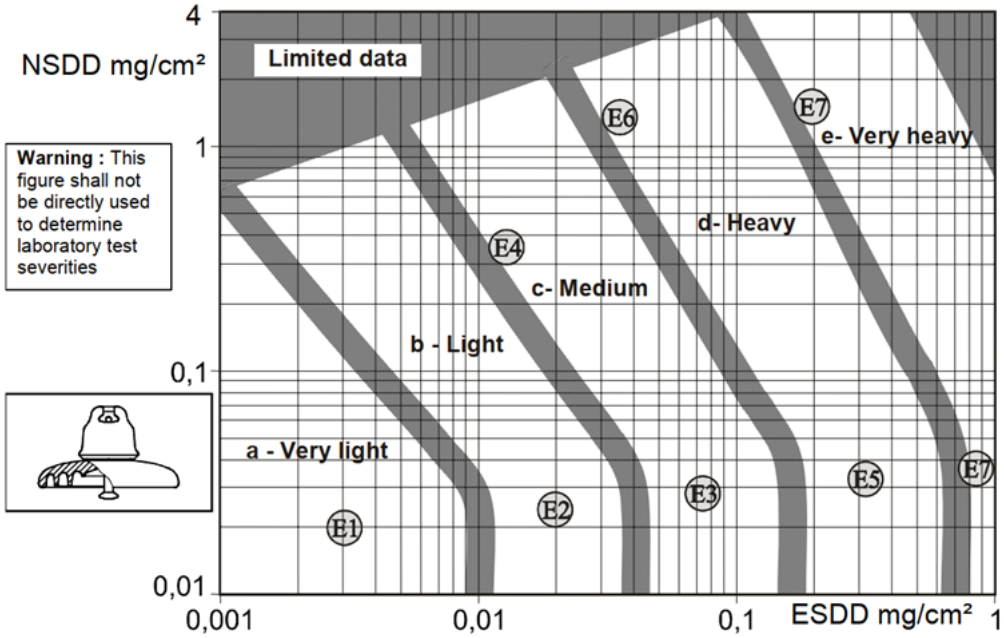


Figura 4.1: Severidad de contaminación tipo A del sitio y relación entre ESDD/NSDD y SPS para aisladores tipo *cap-and-pin* [14].

Para la **contaminación tipo B** la Figura 4.2 muestra la relación entre las medidas de SES y la clase SPS para aisladores tipo *cap-and-pin* y *long rod*.

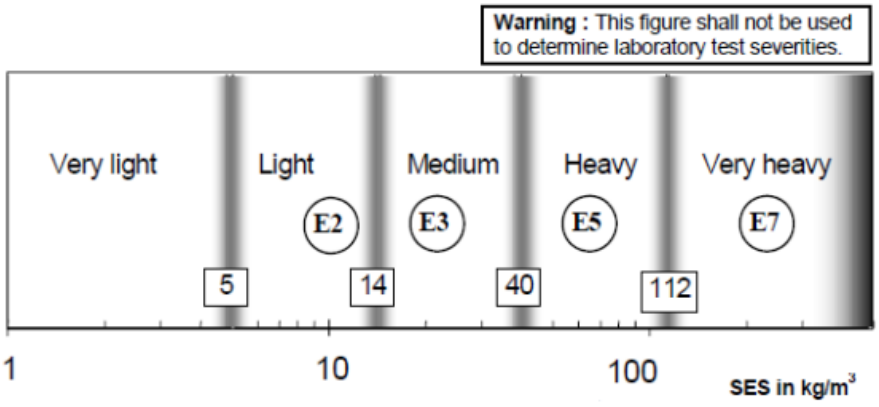


Figura 4.2: Severidad de contaminación tipo B del sitio y relación entre SES y SPS para aisladores tipo *cap-and-pin* y *long rod* [14].

A partir de este punto se aborda en la Norma el proceso correspondiente a la selección y dimensionamiento del aislador. Dicho proceso no será expuesto dado que esta investigación se centra principalmente en la réplica de las condiciones ambientales de un determinado entorno y no en la selección del perfil de los aisladores.

4.2. IEC 61245

IEC 61245: "Pruebas de contaminación artificial en alta tensión para aisladores cerámicos y de vidrio usados en sistemas DC" [15], es una especificación técnica en donde se proporcionan dos tipos de pruebas de contaminación. Dichas pruebas se pueden realizar con dos objetivos:

- Obtener información sobre el comportamiento de los aisladores frente a la contaminación.
- Comprobar el rendimiento de una configuración lo más cercana posible a las condiciones de servicio.

Estas pruebas contemplan tensiones hasta 600 kV. Se recomiendan dos métodos de prueba de contaminación:

- Método de **capa sólida** en el que se deposita sobre la superficie del aislador una capa uniforme de contaminación sólida.
- Método de **niebla salina** en el que el aislador está sujeto a una contaminación ambiental definida.

En estos métodos, la tensión se mantiene constante durante un periodo de, al menos, varios minutos. Se estudia el caso de elevar la tensión continuamente hasta la ruptura, pero dicha práctica no se encuentra estandarizada.

4.2.1. Método de capa sólida

Este procedimiento simula la **contaminación de tipo A** donde una capa sólida que contiene sales y materiales inertes se acumula en la superficie del aislante.

Se realiza una humectación de la capa sólida posterior a la energización del aislador. Esto simula la situación más frecuente de servicio para sitios rurales, industriales y desérticos.

La composición de la solución contaminante se compone de caolín (polvo de arcilla), sal y agua.

La capa de contaminación se aplica por aspersión, flujo o brocha sobre el aislador seco, previamente limpiado, para obtener una capa razonablemente uniforme. Alternativamente, el aislador se puede sumergir en la solución contaminante. La capa se deja secar antes de someter el aislador a la prueba.

Posterior a la fase de contaminación del aislador, el depósito se retira y recoge cuidadosamente de la superficie del aislador para realizar las mediciones correspondientes de ESDD y NSDD para caracterizar la contaminación de tipo A.

Procedimiento de la prueba

El aislador se prepara en su posición vertical de prueba con la capa de contaminación seca. Se utiliza niebla de vapor para humedecer la capa de contaminación. Dicha generación de niebla se mantiene con una caudal constante en la cámara de prueba hasta el final de la prueba.

Se energiza a la tensión de prueba y se comienza a aplicar la niebla de vapor. La tensión de prueba se mantiene constante hasta que se produzca una descarga disruptiva. De lo contrario, debe mantenerse constante durante 100 minutos desde el inicio de la prueba o hasta que el riesgo de ruptura se considere insignificante mediante la medición de corrientes de fuga.

El objetivo de dicha prueba es confirmar la resistencia del aislador a un grado de contaminación específico a un nivel de tensión específico.

El criterio de aceptación del ensayo se confirma si no se produce contorneo durante tres pruebas individuales consecutivas. Si se produce una ruptura, se realizará una cuarta prueba y el aislador pasa la prueba si no se producen más descargas.

4.2.2. Método de niebla salina

Este procedimiento simula la **contaminación de tipo B** donde una capa conductora de líquido cubre la superficie del aislante. En la práctica, esta capa no contiene ningún material insoluble significativo.

El grado de contaminación en esta prueba se define por la salinidad de la niebla salina con la cual se contamina el aislador. La salinidad de la solución se expresa en kg de sal (NaCl) por metro cúbico de agua.

La prueba se divide en dos partes: proceso de pre-acondicionamiento (cuyo objetivo es limpiar la superficie del aislador de prueba) y el ensayo de energización.

Esta prueba se recomienda para tensiones hasta 600 kV.

Solución salina

La solución salina se compone de sal y agua. El agua puede ser utilizada directamente del grifo y, en el caso de que esta presente un alto nivel de dureza, se utiliza agua destilada.

La salinidad de la solución se determina midiendo la conductividad o la densidad de la muestra, con una corrección por temperatura.

La niebla salina se produce en una cámara de prueba a través de boquillas de pulverización que atomizan la solución. La disposición de las boquillas debe ser tal que se obtenga una niebla uniforme sobre el aislador, el cual debe posicionarse verticalmente.

Entre las condiciones antes de comenzar la prueba se encuentran:

- El aislador debe ser previamente lavado para eliminar todo rastro de suciedad y grasa.
- La prueba debe comenzar mientras el aislador este completamente mojado.
- El aislador se energiza y se enciende el sistema de pulverización para generar la niebla salina.

Adicionalmente, se indica en la Norma un proceso de pre-acondicionamiento, en donde el aislador limpio se somete a un nivel de salinidad igual o superior a la del ensayo, aplicando tensión alterna.

La tensión de pre-acondicionamiento se mantiene durante 20 minutos. Si no ocurre una ruptura durante este período de tiempo, la tensión se eleva en pasos de 10 % cada 5 minutos hasta que se produzca una descarga disruptiva. Si ocurre una descarga, la tensión se vuelve a aplicar y se eleva lo más rápido posible al 90 % de la tensión de ruptura recién obtenida y se incrementa en pasos de 5 % cada cinco minutos hasta que ocurra otra descarga.

Este proceso se debe realizar ocho veces, luego se elimina la niebla salina, se lava el aislante y se comienzan las pruebas finales lo antes posible.

Procedimiento de la prueba

La prueba comienza cuando el aislador y las condiciones de la cámara sean las adecuadas y posterior a realizar el proceso de pre-acondicionamiento.

El objetivo es confirmar la resistencia del aislador a un grado de salinidad especificado a una tensión de prueba especificada.

Se debe realizar una serie de pruebas individuales en el aislador, a una tensión de prueba especificada y, a menos que ocurre una descarga disruptiva, la tensión de prueba se mantiene por una hora.

El criterio de aceptación de la prueba se confirma si no ocurre una ruptura en una serie de tres pruebas individuales consecutivas. Si se produce una ruptura, se realiza una cuarta prueba y el aislador pasa la prueba si no se producen más contorneos.

4.3. IEC 62073

IEC 62073: “Guía para la medición de la humedad de la superficie de aisladores”[16], es una guía técnica que incluye métodos que se pueden utilizar para la medición de humectabilidad del material de aisladores compuestos para líneas aéreas, subestaciones y equipos o aisladores de vidrio o cerámicos cubiertos y no cubiertos por un recubrimiento.

Las propiedades humectantes de una superficie por el agua se describen comúnmente mediante los términos hidrofobicidad e hidrofilia. Una superficie hidrófoba repele el agua, mientras que una superficie hidrófila se humedece fácilmente con agua.

En este fenómeno influyen algunos parámetros importantes como tipo de material, rugosidad de la superficie, heterogeneidades de la superficie, composición química y presencia de contaminación.

Para algunos materiales aislantes, sus propiedades de humectación pueden variar con el tiempo debido a la influencia de las condiciones ambientales.

4.3.1. Método de ángulo de contacto

Este método se basa en una medida que implica la evaluación del ángulo de contacto formado entre el borde de una sola gota de agua y la superficie de un material sólido.

Los ángulos de contacto dependen en gran medida de la rugosidad de la superficie y además, los ángulos de contacto medidos en superficies contaminadas pueden diferir significativamente de los medidos en superficies lisas, limpias y planas.

4.3.2. Método de tensión superficial

La determinación de la tensión superficial de la superficie de un aislante se basa en el fenómeno que las gotas de una serie de mezclas líquidas orgánicas, con una tensión superficial que aumenta gradualmente, tiene una capacidad diferente para mojar la superficie del aislante.

Este método es una extensión de la Norma IEC 60674-2 [17]. En particular, implica la aplicación de líquidos reactivos en la superficie para determinar un rango de tensión superficial.

4.3.3. Método *spray*

Este método se basa en la respuesta que da una superficie al ser humectada con una fina neblina de agua durante un corto período de tiempo. Se evalúa la humectabilidad después de la exposición a la niebla.

Para producir la niebla es necesario una botella rociadora común. En donde el agua no debe contener impurezas que puedan influir en la tensión superficial del agua, como detergentes, disolventes, etc.

El procedimiento consiste en aplicar la niebla a una distancia de 25 ± 10 cm. La exposición a la niebla es por un período de 20 a 30 s. Normalmente, la cantidad de agua rociada debe estar entre 10 y 30 ml.

La medición debe realizarse de tal manera que se obtenga una imagen clara de la variación de la humectabilidad a lo largo y alrededor del aislador.

Evaluación

La apariencia de la superficie del aislante después de la exposición a la niebla debe identificarse con una de las siete clases de hidrofobicidad que indica la Norma.

Los criterios para las diferentes clases se presentan en la Tabla 4.3

Tabla 4.3: Criterio para la determinación de la clase de hidrofobicidad [16].

Clase de Hidrofobicidad	**Descripción**
1	Solo se forman gotas discretas. Su forma, vista perpendicular a la superficie, es prácticamente circular.
2	Solo se forman gotas discretas. La mayor parte de la superficie está cubierta por gotitas con una forma, vista perpendicular a la superficie, todavía regular pero que se desvía de la forma circular.
3	Solo se forman gotas discretas. La mayor parte de la superficie está cubierta por gotitas de forma irregular.
4	Se observan tanto gotas discretas como trazas humedecidas de los canales de agua o la película de agua. Menos del 10 % del área observada está cubierta por arroyos o película de agua.
5	Se observan tanto gotas discretas como trazas humedecidas de los canales de agua o la película de agua. Más del 10 % pero menos del 90 % del área observada está cubierta por canales de agua o película.
6	Más del 90 % pero menos del 100 % del área observada está cubierta por canales de agua o película (es decir, todavía se observan pequeñas áreas / manchas / trazas no mojadas).
7	Se forma una película de agua continua sobre toda el área observada.

En la Figura 4.3 se presentan imágenes de guía que incluyen seis clases de hidrofobicidad. La clase siete (HC7) corresponde a una superficie 100 % humedecida donde no se observan zonas sin agua.

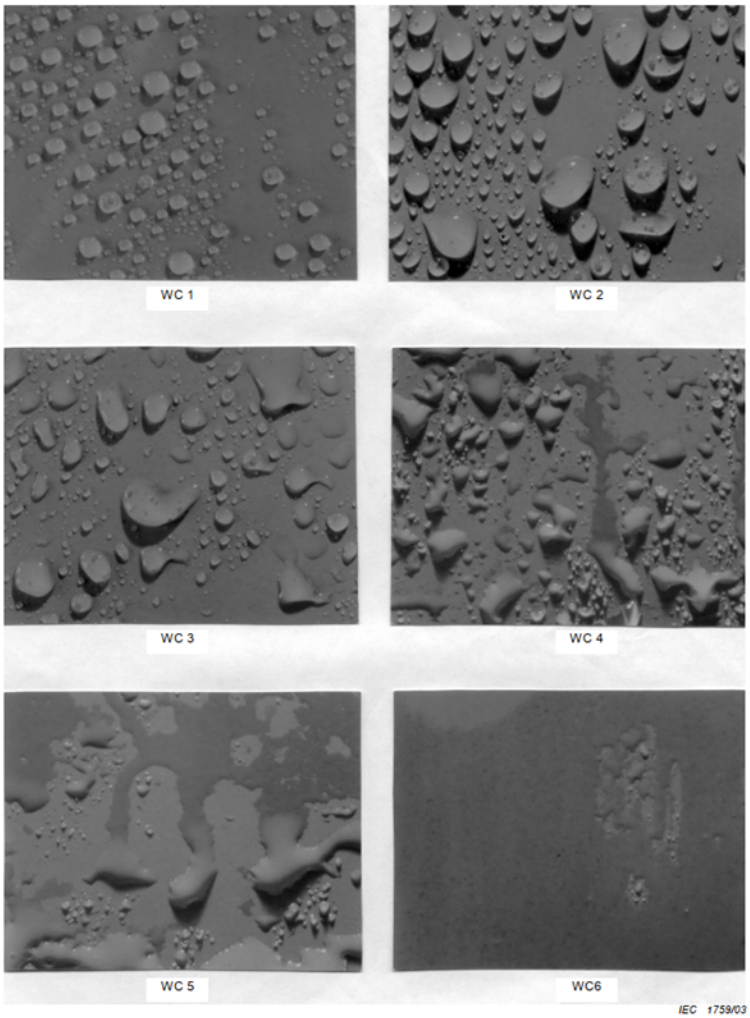


Figura 4.3: Ejemplos típicos de las superficies con clases de hidrofobicidad 1 a 6 [16].

5. Diseño del plan de trabajo

En base a las recomendaciones e información recopilada por la literatura revisada, se diseña un programa de pruebas en laboratorio enfocadas en replicar diferentes niveles de contaminación y de esta forma, relacionarlos con los entornos típicos del norte y centro de Chile.

5.1. Etapa 1: Caracterización de la contaminación

Como punto de partida, se utiliza el estudio *"Diseño eléctrico preliminar de la línea HVDC Kimal - Lo Aguirre"* [18], que desarrolla una coordinación de la aislación en sistemas HVDC aplicado directamente al proyecto de la futura línea en DC de nuestro país.

Tomando en consideración las especificaciones técnicas del proyecto, se propone de forma preliminar la selección del conductor, torres y aislación, cumpliendo con las normativas nacionales e internacionales que se encuentran en las bases de la licitación del proyecto. Adicionalmente, dado que la línea no tiene definido su trazado, se realiza un análisis de sensibilidad para diferentes zonas típicas por las cuales podría atravesar la línea de transmisión. En la Figura 5.1 se presenta un trazado "modelo" de la futura línea de transmisión.



Figura 5.1: Trazado modelo de la línea HVDC Kimal - Lo Aguirre y ubicación de los casos de estudio [18].

Los distintos casos de estudio, que corresponden a distintas zonas a lo largo del tramo de la línea, se comparan con los entornos típicos indicados en la Norma IEC 60815-1 [14] y se selecciona el entorno que tenga una mayor similitud.

A partir del análisis, la Tabla 5.1 contiene la similitud de los entornos típicos con los casos de estudio de la Figura 5.1.

Tabla 5.1: Comparación de entornos típicos de Norma IEC 60815-1 con los casos de estudio [18].

Casos de estudio	**Similitud con entornos típicos**
Caso 1	E2
Caso 2	E3
Caso 3	E6
Caso 4	E5
Caso 5	E7

Por lo tanto, la primera etapa experimental de esta investigación consistirá en determinar diferentes niveles de contaminación ambiental, de acuerdo con mediciones de ESDD y NSDD. En base a lo anterior y de acuerdo con los objetivos, se seleccionan cinco tipos de entornos a los cuales se expondrán los aisladores con el fin de evaluar su desempeño dieléctrico.

Los entornos seleccionados se presentan en la Tabla 5.2, en donde se observa que contiene los casos 1, 2 y 4 del trazado modelo de la línea HVDC de la Figura 5.1.

Tabla 5.2: Entornos seleccionados para replicar en laboratorio.

Entornos seleccionados	**Gravedad del sitio (SPS)**
E1	*Very light*
E2	*Light*
E3	*Medium*
E4	*Heavy*
E5	*Very heavy*

Es importante destacar que la elección de estos entornos típicos a partir de mediciones de ESDD y NSDD, los cuales se ilustran en la Figura 4.1, son de tipo referencial y por ningún motivo deben utilizarse como criterio de diseño de la aislación de acuerdo con dichos niveles de contaminación.

Se realizarán dos tipos de ensayos eléctricos con el fin de evaluar el desempeño dieléctrico de los aisladores y un procedimiento de verificación de la clase de hidrofobicidad de la superficie de los aisladores con diferentes niveles de contaminación.

5.2. Etapa 2: Medición de tensión de ruptura

De acuerdo con las prescripciones de la Norma IEC 60060-1 [19], se llevarán a cabo mediciones de tensión de ruptura a aisladores en dos modalidades:

- **Medición de tensión de ruptura en ambiente húmedo**: se realizarán mediciones de tensión de ruptura en un ambiente húmedo, generando una niebla de contaminación constante en los aisladores que replicará los entornos de la tabla 5.2. Adicionalmente, como caso base se realizará un ensayo con un entorno que contendrá únicamente agua del grifo.
- **Medición de tensión de ruptura en ambiente seco**: se aplicará la niebla contaminante sobre la superficie de los aisladores para cada entorno y se dejará secar la capa de contaminación. Posteriormente, se realizarán mediciones de tensión de ruptura en un ambiente seco.

Como caso base se realizará un ensayo a un aislador que estará completamente limpio y sin ninguna capa de contaminación.

5.3. Etapa 3: Medición de corrientes de fuga

De acuerdo con las prescripciones de la Norma IEC 60060-1 [19], se llevarán a cabo mediciones de corriente de fuga a distintos niveles de tensión a aisladores en dos modalidades:

- **Medición de corriente de fuga en ambiente húmedo**: se realizarán mediciones de corriente de fuga en un ambiente húmedo, generando una niebla de contaminación constante en los aisladores que replicará los entornos de la tabla 5.2. Adicionalmente, como caso base se realizará un ensayo con un entorno que contendrá únicamente agua del grifo.
- **Medición de corriente de fuga en ambiente seco**: se aplicará la niebla contaminante sobre la superficie de los aisladores para cada entorno y se dejará secar la capa de contaminación. Posteriormente, se realizarán mediciones de corriente de fuga en un ambiente seco. Como caso base se realizará un ensayo a un aislador que estará completamente limpio y sin ninguna capa de contaminación.

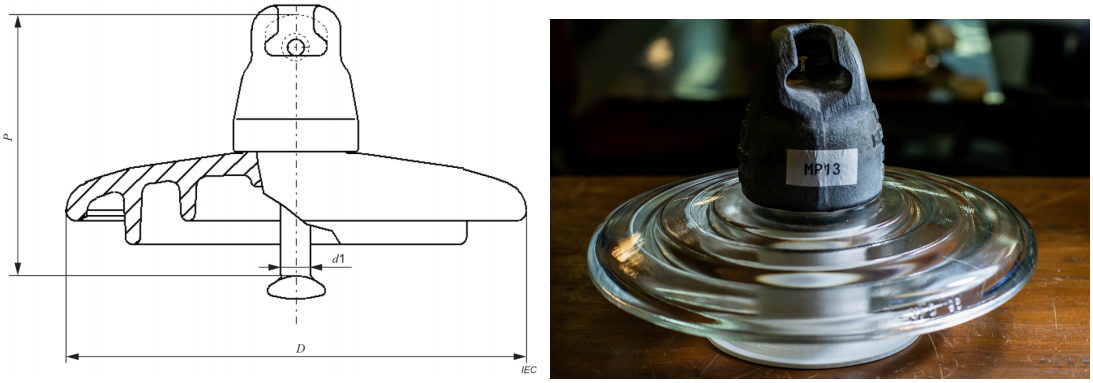
5.4. Etapa 4: Determinación clase de hidrofobicidad

De acuerdo con las prescripciones de la Norma IEC 62073 [16], se realizarán pruebas de hidrofobicidad en la superficie de los aisladores. Como caso base se hará este ensayo a un aislador completamente limpio y seco. Posteriormente, se llevará a cabo el procedimiento para cada capa de contaminación que se depositó en la superficie de los aisladores posterior a la etapa de exposición a los entornos replicados.

5.5. Objeto de prueba

Las probetas que se utilizan corresponden a aisladores de vidrio de suspensión, tipo disco estándar y perfil antiniebla, de 120 kN y clase 70 kV. En las pruebas que se presentan más adelante en este documento se utilizan aisladores con y sin recubrimiento siliconado.

En la Figura 5.2 se presenta el tipo de aislador que será utilizado en todas las pruebas de esta investigación. En la Figura 5.2a se observa el perfil del aislador y, en la Figura 5.2b se tiene una imagen obtenida en el laboratorio del aislador de vidrio sin recubrimiento.



(a) Perfil aislador de vidrio tipo disco [20]. (b) Aislador de vidrio tipo disco U120B.

Figura 5.2: Probeta de ensayo.

El aislador tiene un diámetro de 255 mm (D), una longitud de conexión de 146 mm (P), una distancia de fuga de 295 mm y una superficie de 1575,9 cm^2. Dichos parámetros se resumen en la Tabla 5.3

Tabla 5.3: Parámetros del aislador de prueba.

Diámetro	255 [mm]
Longitud de conexión	146 [mm]
Distancia de fuga	295 [mm]
Superficie	1575,9 [cm^2]

5.6. Recubrimiento en estudio

El recubrimiento siliconado RTV [21] es proporcionado por la empresa NTI (*New Technologies For Innovation*), la cual es un representante oficial y exclusivo de CSL-Silicones en Chile, empresa canadiense que fabrica recubrimientos y resinas en base a silicona.

En la Figura 5.3 se presenta el recubrimiento siliconado RTV *Si-COAT 570* y en la Figura 5.3b se observa el aislador de vidrio recubierto con el producto.



(a) Si-COAT 570 HVIC [21]. (b) Aislador de vidrio recubierto.

Figura 5.3: Recubrimiento siliconado RTV.

Según el fabricante, al recubrir los aisladores con Si-COAT HVIC se eliminan las corrientes de fuga [22]. A medida que las partículas contaminantes se depositan sobre la superficie del aislador recubierto, entran en contacto directo con el componente activo del producto. Al cabo de unos minutos, dicho componente microencapsula las partículas contaminantes.

El agua que pueda acumularse sobre la superficie se aisla de las partículas contaminantes física y eléctricamente. Además, el agua se deposita en forma de ínfimas gotas, influyendo y mejorando el comportamiento hidrofóbico del material. La eliminación de esta película de agua contribuye al impedimento de las corrientes de fuga.

Este producto se utiliza ampliamente en aisladores en AC para mejorar el desempeño ante la contaminación. La ventaja del recubrimiento siliconado radica en disminuir significativamente las descargas/*flashover* producidas por contaminación y, además, las labores de mantenimiento y limpieza de aisladores se ven reducidas [23]. La durabilidad del producto, así como también el desempeño de estos recubrimientos en DC es una incógnita y, por lo tanto, los resultados que se obtendrán serán útiles para determinar si la utilización de este producto en las redes de transmisión en corriente continua son una posible solución para combatir la contaminación.

6. Ejecución plan de trabajo

6.1. Caracterización de la contaminación

En una estructura de acrílico de 110x110x170 cm, que cuenta con un sistema de pulverización de PVC de 20 mm y cuatro *microjets* alimentado por una bomba hidráulica de 0.5 kW, se suspenden los aisladores de vidrio para las distintas pruebas de contaminación con el objetivo de determinar los cinco entornos propuestos. Es importante destacar que, este proceso inicial de caracterización de la contaminación se realiza sin energizar los aisladores.

En la Figura 6.1a se presenta la estructura de acrílico y en la Figura 6.1b se observa el aislador suspendido en medio de la estructura. Esta configuración permite generar una niebla contaminante uniforme en el aislador desde cuatro puntos equidistantes gracias a los cuatro *microjets* que hay dentro de la estructura.



(a) Estructura de acrílico 110x110x170 cm.

(b) Aislador suspendido en la estructura de acrílico.

Figura 6.1: Estructura y sistema de pulverización.

Se preparan soluciones contaminantes con agua del grifo compuestas de material soluble y no soluble en distintas concentraciones y se depositan sobre la superficie del aislador. Para simular la contaminación soluble y no soluble se utiliza sal y polvo de arcilla (caolín), respectivamente. Luego de depositar la capa contaminante sobre la superficie del aislador, se realizan mediciones de depósitos solubles (ESDD) y depósitos no solubles (NSDD), de acuerdo con las prescripciones de la Norma IEC 60815-1 [14]. Es importante que durante todo el proceso de contaminación la mezcla o solución contaminante esté en constante movimiento con el fin de homogeneizar los componentes.

Este proceso se realiza de forma iterativa, a modo de determinar las cantidades iniciales de sal y caolín que debe contener cada solución contaminante para generar los ambientes propuestos (E1, E2, E3, E4 y E5).

Luego de depositar la contaminación sobre la superficie de los aisladores, se debe realizar un proceso de lavado de la superficie para recolectar todos los elementos contaminantes para posteriormente, realizar la medición de ESDD y NSDD.

El equipo utilizado para esta medición es el siguiente:

- Agua desmineralizada.
- Vaso precipitado.
- Guantes de vinilo.
- Tórulas de algodón.
- Medidor de conductividad y temperatura.
- Papel filtro.
- Sistema de filtración.
- Bomba de vacío
- Horno de secado.
- Balanza de precisión.

6.1.1. Paso 1: Preparación de la solución base

Se colocan 400 ml de agua desmineralizada en un vaso precipitado y se sumerge una tórula de algodón. El agua desmineralizada que contiene el algodón, denominada solución base, debe tener una conductividad inferior a 10 μS/cm. Además, el vaso precipitado debe estar lo suficientemente limpio como para eliminar cualquier partícula contaminante que interfiera en la medición.

6.1.2. Paso 2: Limpieza del aislador

Utilizando guantes quirúrgicos, se comienzan a retirar los contaminantes depositados en la superficie del aislador utilizando la tórula de algodón, excluyendo las piezas metálicas. Cada vez que la tórula de algodón recolecte un nivel importante de contaminación, debe sumergirse y exprimirse en la solución base.

Esta etapa de limpieza debe repetirse hasta que no queden más contaminantes en la superficie del aislador. Es importante que la cantidad de agua (400ml) de la solución base no sea modificada antes y después de la recolección de la contaminación, por lo que no se debe perder agua.

6.1.3. Paso 3: Cálculo de ESDD

Se realiza una medición de conductividad y temperatura del agua que contiene los contaminantes con la tórula de algodón en su interior. Previamente a efectuar la medición, debe agitarse el agua lo suficiente para que los componentes solubles y no solubles estén bien mezclados.

Se debe realizar una corrección de la conductividad por temperatura de la siguiente forma:

$$\sigma_{20} = \sigma_\theta[1 - b(\theta - 20)], \tag{6.1}$$

en donde,

- θ: temperatura de la solución, en °C.
- σ_θ: conductividad volumétrica a temperatura θ°C, en S/m.
- σ_{20}: conductividad volumétrica a 20°C, en S/m.
- b: factor que depende de la temperatura según la ecuación (6.2).

$$b = -3.2 \cdot 10^{-8}\theta^3 + 1.032 \cdot 10^{-5}\theta^2 - 8.272 \cdot 10^{-4}\theta + 3.544 \cdot 10^{-2}. \tag{6.2}$$

El ESDD de la superficie del aislador se calcula según la salinidad Sa, en kg/m^3, como:

$$Sa = (5.7\sigma_{20})^{1.03}, \tag{6.3}$$

$$ESDD = Sa \cdot (V/A), \tag{6.4}$$

en donde,

- ESDD: densidad equivalente de deposito soluble, en mg/cm^2.
- V: volumen de agua desmineralizada, en cm^3.
- A: área de la superficie del aislador, en cm^2.

6.1.4. Paso 4: Cálculo de NSDD

El vaso precipitado que contiene los contaminantes, posterior al cálculo del ESDD, se filtra utilizando un papel filtro tamaño de poro de 0.7μm y 47mm de diámetro y un sistema de filtración al vacío. Esta filtración puede, alternativamente, realizarse simplemente con un embudo y el papel filtro, sin embargo, con la técnica de vacío se logra acelerar este proceso. Adicionalmente, se debe pesar el papel filtro utilizando la balanza de precisión.

El papel filtro que contiene los contaminantes, posterior al proceso de filtración, se seca en horno a 105 °C [24] durante una hora y luego se pesa en la balanza de precisión.

Finalmente, el NSDD se calcula como:

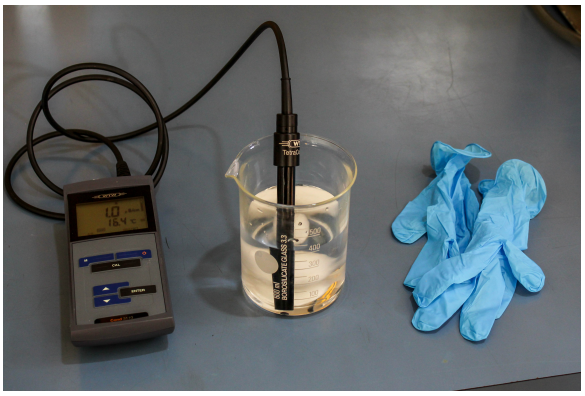
$$NSDD = 1000\left(\frac{W_f - W_i}{A}\right), \tag{6.5}$$

en donde,

- NSDD: densidad del depósito no soluble, en mg/cm^2.

- W_f: peso del papel filtro que contiene contaminantes en condiciones secas, en g.
- W_i: peso del papel filtro en condiciones secas, en g.
- A: área de la superficie del aislador, en cm^2.

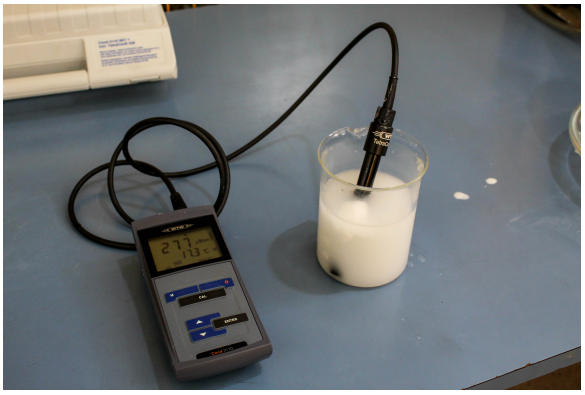
En la Figura 6.2 se presenta el proceso antes detallado para la medición y cálculo de ESDD y NSDD.



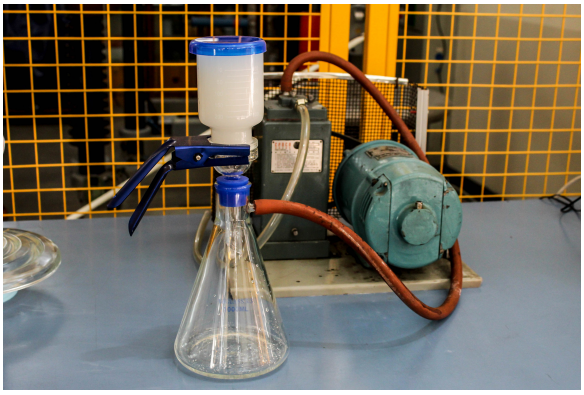
(a) Preparación y medición de conductividad de solución base.



(b) Limpieza de la superficie del aislador.



(c) Medición de conductividad y temperatura de la muestra que contiene los contaminantes.



(d) Proceso de filtración al vacío.



(e) Pesaje del papel filtro en balanza de precisión.



(f) Secado de muestras en horno.

Figura 6.2: Proceso de medición y cálculo de ESDD y NSDD.

6.2. Medición de tensión de ruptura

6.2.1. Ambiente húmedo

Se realizan ensayos de medición de tensión de ruptura en aisladores de vidrio en un ambiente húmedo, los cuales serán expuestos a un ambiente contaminado continuo generando los entornos E1, E2, E3, E4 y E5 (Tabla 5.2) en la estructura de acrílico y sistema de pulverización presentado en la sección 6.1. El objetivo consiste en evaluar el comportamiento del valor de la tensión de ruptura ante distintas condiciones de contaminación. Además, se realiza un ensayo exponiendo el aislador a un ambiente húmedo que solo contiene agua del grifo, denominado caso base.

En contraste, se lleva a cabo el mismo procedimiento en aisladores recubiertos con el recubrimiento siliconado RTV presentado en la sección 5.6, con el fin de evaluar el desempeño de este producto ante diferentes escenarios de contaminación y también, comparar los resultados con lo obtenido en los aisladores sin recubrimiento.

Estos ensayos se ejecutan siguiendo las prescripciones de la Norma IEC 60060-1 [19], en donde se aplica tensión de polaridad negativa debido a que resulta en valores de tensión de ruptura menores en comparación a la polaridad positiva [1][15], por lo que es el caso más crítico.

Adicionalmente, los valores obtenidos de tensión de ruptura deben ser corregidos a condiciones atmosféricas estándar. Para el caso de los ensayos en ambiente húmedo, se realiza solo corrección por densidad de aire (presión y temperatura) y no se corrige por humedad.

Las pruebas se realizan con la fuente de alimentación PGK 110/5 HB marca BAUR, la cual es capaz de entregar una tensión continua de polaridad positiva y negativa, además de tensión alterna de frecuencia de la red. Los datos característicos del equipo son de ±110kV en DC y 80kV RMS en AC. En la Figura 6.3 se observa la fuente de alimentación antes detallada.



Figura 6.3: Fuente de alimentación PGK 110/5 HB marca BAUR [25].

En la Figura 6.4 se presenta el circuito utilizado para el ensayo de tensión de ruptura en ambiente húmedo. Se observa que a la salida de la fuente se conecta un condensador de alisamiento y de esta forma, se obtiene una señal de tensión con menor *ripple* y de mejor calidad.

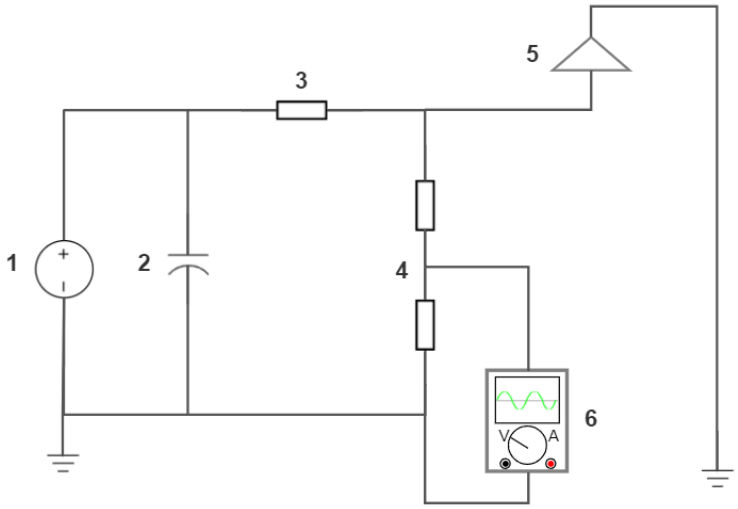


Figura 6.4: Circuito de ensayo: tensión de ruptura en ambiente húmedo.

Los elementos necesarios para armar el circuito presentado en la figura anterior son:

- 1: Fuente de alimentación PGK.
- 2: Condensador de alisamiento de 30nF.
- 3: Resistencia limitadora de corriente de 1MΩ.
- 4: Divisor de tensión resistivo de 140kV, 280MΩ.
- 5: Probeta de ensayo.
- 6: Osciloscopio.

El divisor de tensión resistivo utilizado para la medición de tensión del aislador es de la marca TERCO modelo HV9113. Se determinó experimentalmente la relación entra la tensión de entrada y de salida del divisor, en donde se realizaron escalones de tensión de 10kV de 0 a 100kV y se registró la tensión de salida del divisor y la tensión real de la fuente PGK, utilizando el condensador de alisamiento.

Tabla 6.1: Relación experimental entre la tensión real y la tensión del divisor resistivo.

Tensión real PGK [kV]	**Tensión divisor resistivo [V]**
10	0.352
20	0.717
30	1.093
40	1.437
50	1.781
60	2.152
70	2.497
80	2.935
90	3.197
100	3.562

De acuerdo con los resultados expuestos en la Tabla 6.1, se grafica la tensión real vs tensión de salida del divisor para obtener la relación experimental de este. Lo anterior se realiza con el objetivo de que a partir de una tensión medida en el divisor resistivo ésta sea escalada a la tensión real que soporta el aislador.

En la Figura 6.5 se presenta la gráfica de la tensión de entrada vs tensión de salida del divisor, en donde se observa una relación prácticamente lineal.

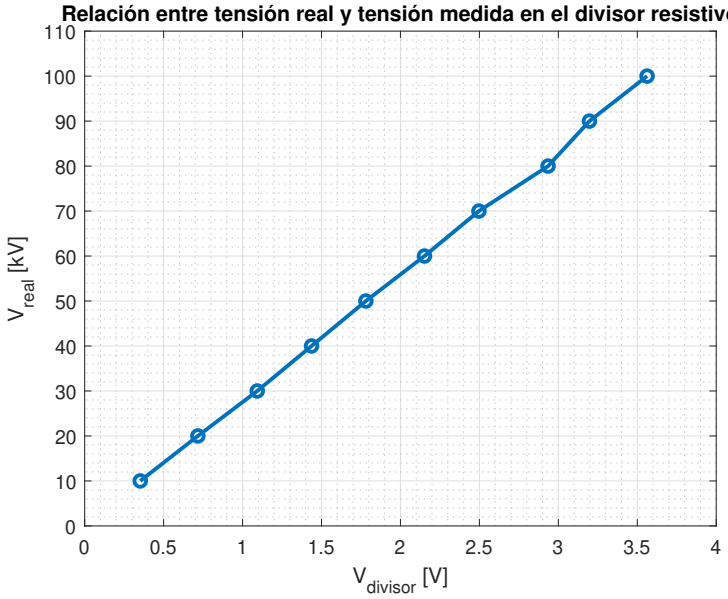


Figura 6.5: Relación entre tensión real y tensión medida en el divisor resistivo.

De acuerdo al gráfico anterior, la relación obtenida entre la tensión del divisor y la tensión real se presenta en la ecuación (6.6), la cual fue utilizada de aquí en adelante para obtener las mediciones de tensiones de ruptura de los aisladores para cada ensayo en el ambiente húmedo.

$$V_{real} = 27.944 V_{divisor} - 0.1135 \tag{6.6}$$

Siguiendo con el procedimiento de medición de tensión de ruptura, este se ejecuta de la siguiente manera:

1. Se arma el circuito de la Figura 6.4.
2. Se posiciona el aislador en la cámara de acrílico y se prepara la solución contaminante de un determinado entorno.
3. Se enciende la bomba hidráulica para dar paso al ambiente húmedo contaminado de forma constante.
4. Se energiza el sistema y se comienza a elevar la tensión rápidamente hasta un valor del 60-70 % el valor de tensión de ruptura. Luego, se sube lentamente la tensión hasta que ocurra el contorneo. El valor de tensión de ruptura se registra cuando sucede alguno de estos criterios:
   - aumento brusco de la corriente de la fuente,

- y/o caída de tensión en el divisor resistivo de tensión observada en osciloscopio,
- y/o ver/oír el fenómeno de contorneo en el aislador.

5. Al ocurrir la ruptura, se disminuye a cero rápidamente la tensión y se mantiene el aislador des-energizado por alrededor de 30 a 60 segundos.

6. Se energiza nuevamente el sistema y se repite cinco veces el proceso. El valor de tensión de ruptura final se obtiene como el promedio aritmético de los cinco ensayos realizados.

6.2.2. Ambiente seco

En esta sección, se realizan ensayos de medición de tensión de ruptura en aisladores de vidrio en un ambiente seco. Los aisladores se exponen a diferentes ambientes, correspondiente a cada uno de los entornos E1, E2, E3, E4 y E5 (Tabla 5.2). Posterior a dicha exposición, se deja secar por al menos 24 horas la capa de contaminación que queda en la superficie de los aisladores. Una vez los aisladores estén completamente secos, se da comienzo al ensayo en cuestión. El objetivo consiste en evaluar el comportamiento del valor de tensión de ruptura en distintas condiciones de contaminación en seco. Además, se realiza un ensayo con un aislador completamente limpio, denominado como caso base.

En contraparte, se lleva a cabo este procedimiento en aisladores recubiertos con el recubrimiento siliconado RTV para analizar el comportamiento de este ante diferentes superficies contaminadas del aislador y, también, comparar los resultados con lo obtenido en los aisladores sin recubrimiento.

Estos ensayos se ejecutan siguiendo las prescripciones de la Norma IEC 60060-1 [19] y aplicando, al igual que los ensayos en ambiente húmedo, tensión de polaridad negativa. Los valores de tensión de ruptura deben ser corregidos a condiciones atmosféricas estándar, corrigiendo por densidad de aire (presión y temperatura) y por humedad.

Para esta etapa de ensayos, se utiliza la fuente de alimentación *Multi Test Set (MTS)* marca HAEFELY, capaz de entregar tensiones en AC de 50/60 Hz hasta 80 kV RMS, tensiones en DC hasta 400 kV y tensiones de impulso hasta 400 kV [26]. El cambio de la fuente se debe principalmente a que los ensayos en ambiente seco requieren un mayor nivel de tensión en comparación con los ensayos en ambiente húmedo.

En la figura 6.6 se presenta el circuito utilizado para el ensayo de tensión de ruptura en ambiente seco. En comparación al circuito utilizado en el ensayo en ambiente húmedo, no es necesario utilizar un condensador de alisamiento, ya que la señal que entrega la fuente MTS es de mejor calidad y prácticamente sin *ripple*.

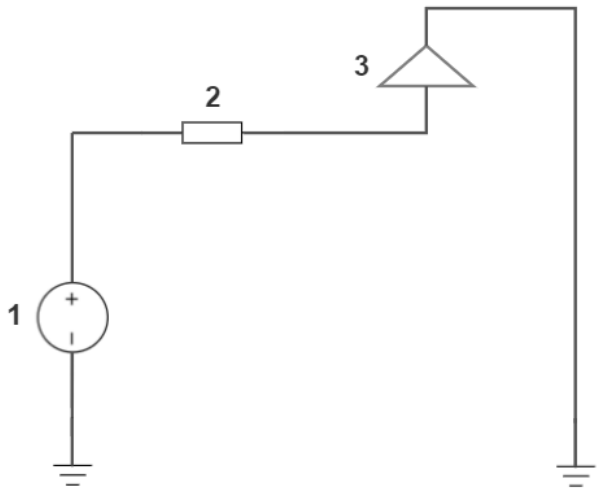


Figura 6.6: Circuito de ensayo: tensión de ruptura en ambiente seco.

Los elementos requeridos para armar el circuito presentado en la Figura 6.6 son:

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

Adicionalmente, por el mismo motivo que se cambió la fuente, en este caso no se cuenta con un divisor resistivo para realizar la medición de tensión que cumpla con los requerimientos del sistema. Por lo tanto, la medición de tensión se extrae directamente desde la consola de control de la fuente, por lo que hay que tener en consideración que los valores registrados incluyen la caída de tensión en la resistencia limitadora de 1MΩ.

El procedimiento de medición de tensión de ruptura se ejecuta de la siguiente manera:

1. Se arma el circuito de la Figura 6.6.
2. Se energiza el sistema y se comienza a elevar la tensión rápidamente hasta un valor del 60-70 % el valor de tensión de ruptura. Luego, se sube lentamente la tensión hasta que ocurra el contorneo. El valor de tensión de ruptura se registra cuando sucede alguno de estos criterios:
   - aumento brusco de la corriente de la fuente,
   - y/o caída de tensión en el divisor resistivo de tensión observada en osciloscopio,
   - y/o ver/oír el fenómeno de contorneo en el aislador.
3. Al ocurrir la ruptura, se disminuye a cero rápidamente tensión y se mantiene el aislador des-energizado por alrededor de 30-60 segundos.
4. Se energiza nuevamente el sistema y se repite cinco veces el proceso. El valor de tensión de ruptura final se obtiene como el promedio aritmético de los cinco ensayos realizados.

6.3. Medición de corrientes de fuga

6.3.1. Ambiente húmedo

Se realizan ensayos de medición de corrientes de fuga en aisladores de vidrio en ambiente húmedo, los cuales serán expuestos a un ambiente contaminado generando los entornos E1, E2, E3, E4 y E5 (Tabla 5.2) en la estructura de acrílico y el sistema de pulverización. El objetivo consiste en evaluar la evolución de las corrientes de fuga de los aisladores ante distintas condiciones de contaminación. Adicionalmente, se realiza un ensayo exponiendo el aislador a un ambiente húmedo que solo contiene agua del grifo, denominado caso base.

En contraparte, se lleva a cabo el mismo procedimiento en aisladores recubiertos con el fin de evaluar el desempeño del producto y también, comparar los resultados con lo obtenido en aisladores sin recubrimiento. Los ensayos se ejecutan siguiendo las prescripciones de la Norma IEC 60060-1 [19], en donde se aplica tensión de polaridad negativa.

En la Figura 6.7 se presenta el circuito utilizado para el el ensayo de tensión de ruptura en ambiente húmedo.

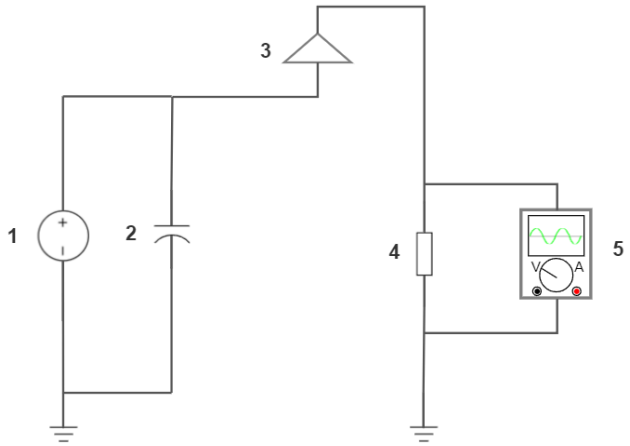


Figura 6.7: Circuito de ensayo: corrientes de fuga en ambiente húmedo.

Los elementos requeridos para armar el circuito presentado anteriormente son:

- 1: Fuente de alimentación PGK.
- 2: Condensador de alisamiento de 30 nF.
- 3: Probeta de ensayo.
- 4: Resistencia *shunt* de 3.2 $k\Omega$.
- 5: Osciloscopio.

Es importante destacar que, para este ensayo no se utiliza un divisor de tensión resistivo para realizar la medición de tensión del aislador. Esto con el fin de no añadir elementos al circuito que interfieran y/o alteren las mediciones de corrientes de fuga, ya que éstas son muy sensibles al ruido. Por lo tanto, las mediciones de tensión del aislador que se registren son provenientes directamente de la consola de control de la fuente.

Por otra parte, la resistencia *shunt* escogida para este procedimiento es un multímetro marca KEYSIGHT modelo U1232A, el cual tiene un valor de resistencia de 3.2 $k\Omega$, en la escala de μA. Sin embargo, este valor de resistencia se mantiene constante siempre y cuando no se modifique la escala de corriente, por lo que, para los ensayos, se mantuvo siempre en μA, pudiendo medir hasta 600μA.

Resulta interesante notar que, en el circuito de la figura 6.7 el osciloscopio registra la tensión del multímetro y, posteriormente, para determinar el valor corriente de fuga, es necesario dividir el(los) valor(es) por la resistencia *shunt*. Pero además, es posible medir en simultáneo los valores de corrientes directamente en el multímetro. Para estos ensayos, se utilizan y registran los valores obtenidos desde el osciloscopio.

El procedimiento de medición de corrientes de fuga, se ejecuta de la siguiente forma:

1. Se arma el circuito de la Figura 6.7.
2. Se posiciona el aislador en la cámara de acrílico y se prepara la solución de un determinado entorno.
3. Se enciende la bomba hidráulica para dar paso al ambiente húmedo contaminado constante.
4. Se energiza el sistema y se eleva la tensión en escalones de 5 kV desde 0 kV hasta un 60 % del valor de tensión de ruptura obtenido en el ensayo del ambiente húmedo. Cada escalón de tensión se mantiene por alrededor de 20-30 segundos hasta que el valor de corriente se mantenga relativamente constante y luego, se registra su valor.

6.3.2. Ambiente seco

Se realizan ensayos de medición de corrientes de fuga en aisladores de vidrio en un ambiente seco. Los aisladores se exponen a diferentes ambientes, correspondiente a cada uno de los entornos E1, E2, E3, E4 y E5 (Tabla 5.2). Posterior a dicha exposición, se deja secar, por al menos 24 horas, la capa de contaminación que queda en la superficie de los aisladores. Una vez los aisladores estén completamente secos, se da comienzo al ensayo en cuestión. El objetivo consiste en evaluar la evolución de las corrientes de fuga de los aisladores ante distintas condiciones de contaminación en seco. Además, se realiza un ensayo con un aislador completamente limpio, denominado como caso base.

En contraste, se lleva a cabo el mismo procedimiento en aisladores recubiertos con el fin de evaluar el desempeño del producto y también, comparar los resultados con lo obtenido en aisladores sin recubrimiento.

Los ensayos se ejecutan siguiendo las prescripciones de la Norma IEC 60060-1 [19], en donde se aplica tensión de polaridad negativa. En la Figura 6.8 se presenta el circuito utilizado para el el ensayo de tensión de ruptura en ambiente seco.

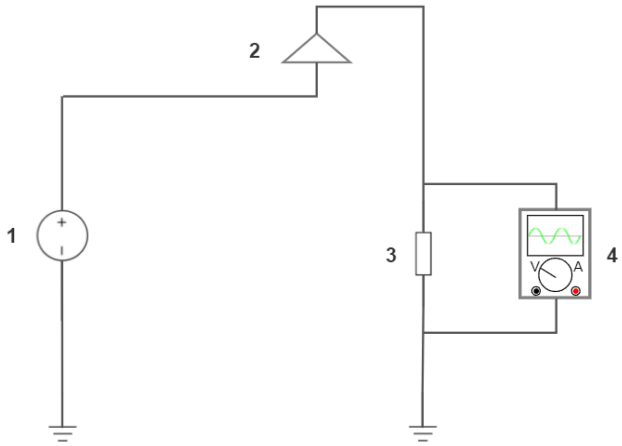


Figura 6.8: Circuito de ensayo: corrientes de fuga en ambiente seco.

Los elementos requeridos para armar el circuito presentado anteriormente son:

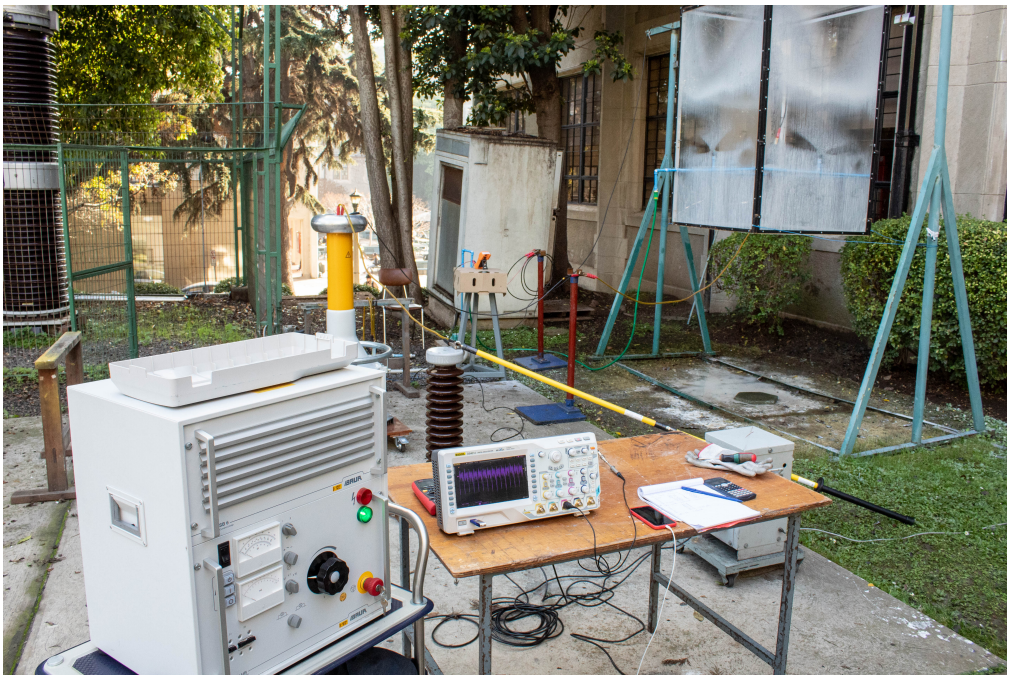
- 1: Fuente de alimentación MTS.
- 2: Probeta de ensayo.
- 3: Resistencia *shunt* de 3.2 $k\Omega$.
- 4: Osciloscopio.

Al igual que en los ensayos de medición de corrientes de fuga en húmedo, se utiliza como resistencia shunt el mismo multímetro presentado en la sección 6.3.1, por lo que, ocurre una situación idéntica.

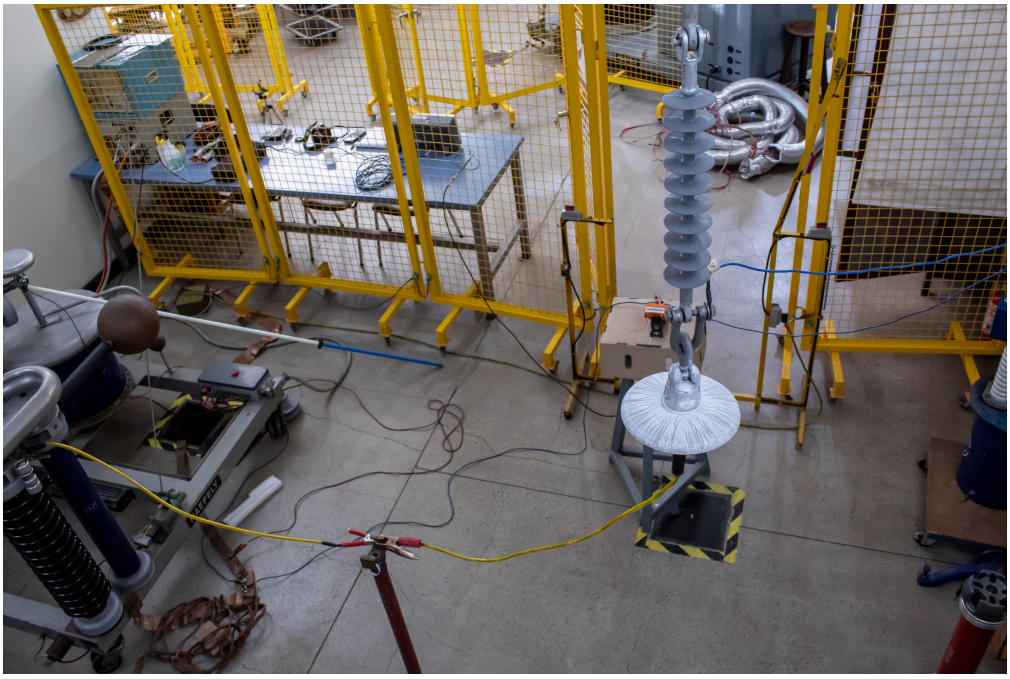
El procedimiento de medición de corrientes de fuga, se ejecuta de la siguiente forma:

1. Se arma el circuito de la Figura 6.8.
2. Se energiza el sistema y se eleva la tensión en escalones de 5kV desde 0kV hasta un 60 % del valor de tensión de ruptura obtenido en el ensayo del ambiente seco. Cada escalón de tensión se mantiene por alrededor de 20-30 segundos hasta que el valor de corriente se mantenga relativamente constante y luego, se registra su valor.

Finalmente, en la Figura 6.9 se presentan las configuraciones de los circuitos utilizados para los diferentes ensayos. Por una parte, en la Figura 6.9a se observa el setup para los ensayos de tensión de ruptura y corrientes de fuga en ambiente húmedo realizados en el patio del Laboratorio de Alta Tensión de la UTFSM. Por otra parte, en la Figura 6.9b se tiene el setup para los ensayos de tensión de ruptura y corrientes de fuga en ambiente seco realizados en el Laboratorio de Alta Tensión de la UTFSM.



(a) Setup de ensayos en ambiente húmedo.



(b) Setup de ensayos en ambiente seco.

Figura 6.9: Setup de ensayos en Laboratorio Alta Tensión UTFSM.

6.4. Verificación clase de hidrofobicidad

De acuerdo con la Norma IEC 62073 [16], se realizan pruebas para verificar la clase de hidrofobicidad de la superficie de los aisladores. El procedimiento escogido corresponde al "método *spray*" expuesto en la sección 4.3.3.

El objetivo consiste en evaluar la hidrofobicidad de la superficie de los aisladores al variar el nivel de contaminación de estos. Por lo que, las pruebas se realizan de la siguiente forma:

1. En una botella rociadora común, se prepara agua desmineralizada para evitar la presencia de cualquier agente contaminante.
2. Se aplica una niebla sobre la superficie del aislador a una distancia de 25 ± 10cm por alrededor de 20 a 30 segundos.
3. Posterior al proceso de rocío, se esperan 20-30 segundos y se realiza una fotografía clara y en alta definición para obtener una imagen clara de las gotas que se forman en la superficie.
4. Se compara la imagen obtenida con las imágenes de de la figura 4.3 para determinar la clase de hidrofobicidad.

Cada prueba se realizará en:

- Aisladores de vidrio sin recubrimiento contaminados con los entornos E1, E2, E3, E4 y E5. Además, como caso base, se utilizará un aislador completamente limpio.
- Aisladores de vidrio con recubrimiento RTV contaminados con los entornos E1, E2, E3, E4 y E5. Además, como caso base, se utilizará un aislador recubierto completamente limpio.

7. Análisis de resultados

7.1. Caracterización de la contaminación

De acuerdo con el procedimiento expuesto en la sección 6.1, las mediciones de ESDD y NSDD obtenidas se exponen en la Figura 7.1.

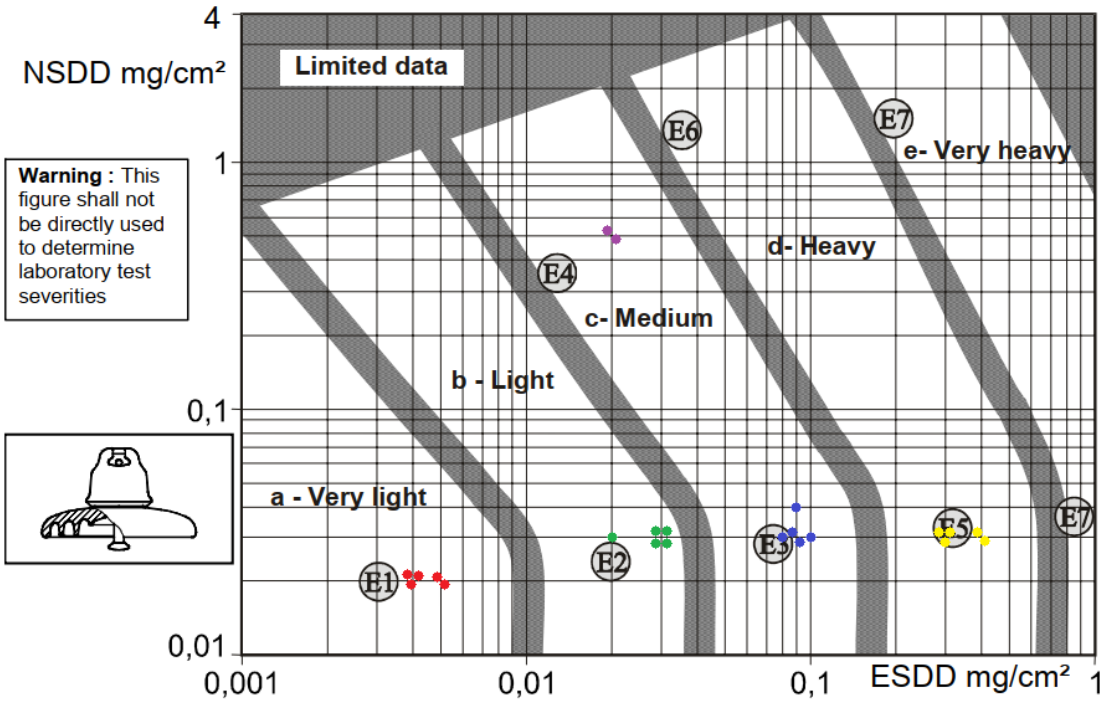


Figura 7.1: Resultado mediciones: ESDD y NSDD.

En la figura anterior se pueden observar, de forma gráfica, el resultado de las mediciones obtenidas para determinas los distintos entornos escogidos y propuestos en la Tabla 5.2. Para obtener dichos entornos, las concentraciones iniciales de sal y caolín utilizadas para preparar la solución contaminante se presentan en la Tabla resumen 7.1.

Tabla 7.1: Concentraciones de sal y caolín para generar los cinco tipos de entornos.

Tipo de entorno	Concentración sal [g/l]	Concentración caolín [g/l]
E1	1	5
E2	10	10
E3	35	10
E4	10	150
E5	150	12

Es importante destacar que, se realizaron solo dos mediciones para determinar el entorno E4. Lo anterior se debe principalmente a la cantidad de caolín que era necesario para generar dicho entorno, el cual tiene un valor comercial considerablemente más alto que la sal.

Por otro lado, en la Figura 7.1 se presentaron solo las mediciones de los cinco entornos. Sin

embargo, este proceso de caracterización de la contaminación requirió alrededor de 50 mediciones en total, debido a que en un inicio, se debía calibrar y conocer la sensibilidad en las mediciones al modificar las concentraciones de sal y caolín.

Además, solo en algunos de los entornos se logró la medición exacta del nivel de ESDD y NSDD, como en el caso de E3 y E5, no obstante, se obtuvieron valores en el rango o región de dichos entornos con gran exactitud.

En la Figura 7.2 se presenta el promedio de las mediciones para cada entorno.

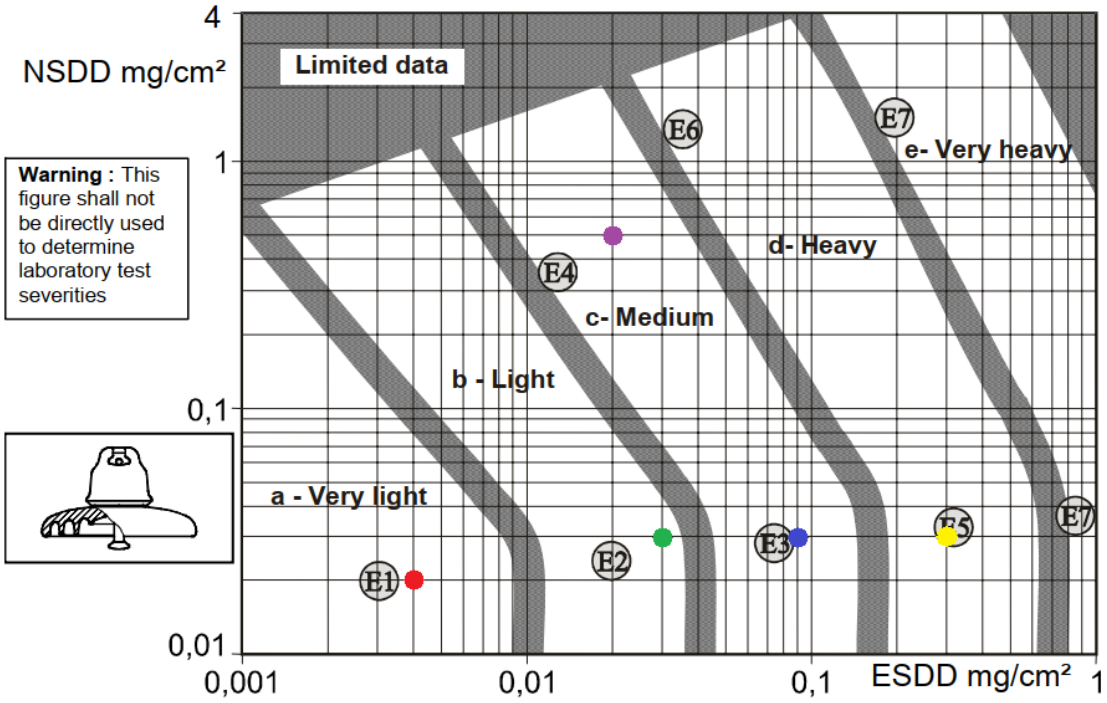


Figura 7.2: Resultado promedio mediciones de ESDD y NSDD.

Los niveles calculados de ESDD y NSDD promedio se presentan en la Tabla 7.2. Además, en Anexos al final del documento, se presentan todas las mediciones presentadas de manera gráfica en la Figura 7.1.

Tabla 7.2: Promedio de mediciones ESDD y NSDD para cada tipo de entorno.

Tipo de entorno	**Promedio ESDD [mg/cm^2]**	**Promedio NSDD [mg/cm^2]**
E1	0.004	0.02
E2	0.03	0.03
E3	0.09	0.03
E4	0.02	0.5
E5	0.3	0.03

Con respecto a las características de los entornos y la relación entre ellos, se observa lo siguiente:

- Los entornos E1, E2, E3 y E5 tienen prácticamente el mismo nivel de NSDD y entre cada uno de ellos varía la cantidad de material soluble presente (ESDD).

- El entorno E2 y E4 presentan prácticamente el mismo nivel de ESDD y varía considerablemente el nivel de NSDD. El entorno E4 presenta un nivel de NSDD alrededor de 17 veces mayor que el nivel de NSDD del entorno E2.
- La relación entre ESDD/NSDD de E1 es igual a 0.2.
- La relación entre ESDD/NSDD de E2 es igual a 1.
- La relación entre ESDD/NSDD de E3 es igual a 3.
- La relación entre ESDD/NSDD de E4 es igual a 0.04.
- La relación entre ESDD/NSDD de E5 es igual a 10.

Para finalizar, es importante destacar que, los resultados obtenidos para cada uno de los entornos dependen directamente del perfil y tipo de aislador. Al efectuar los cálculos para determinar los niveles de contaminación se utiliza el área de la superficie del aislador, por lo tanto, no es posible suponer que utilizando las mismas cantidad de sal y caolín, se obtengan los mismos resultados de ESDD y NSDD en otro tipo de aislador.

7.2. Medición de tensión de ruptura en ambiente húmedo

De acuerdo al procedimiento expuesto en la sección 6.2.1, se presenta en la Figura 7.3 la tensión de ruptura promedio normalizada para cada tipo de ambiente y para aisladores de vidrio sin recubrimiento en condición húmeda. Es importante destacar que, se presentan los valores normalizados para poder compararlos entre ellos, debido a que todos los ensayos no se realizan bajo las mismas condiciones ambientales.

Adicionalmente, en el capítulo de Anexos al final de este documento, se presentan todos los valores y el promedio de tensión de ruptura obtenido de cada ambiente para construir los gráficos presentados en esta sección.

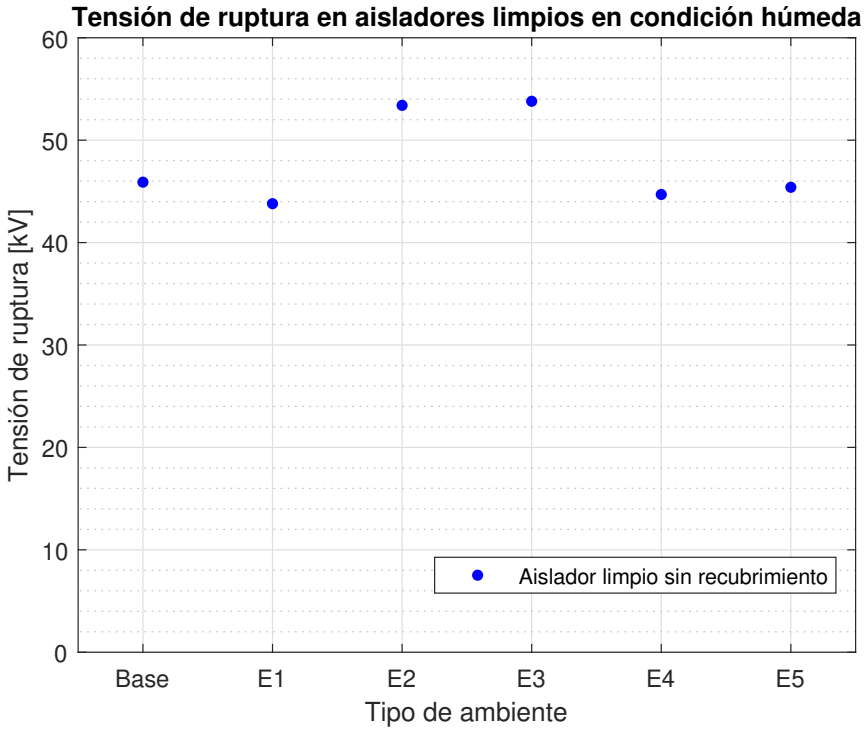


Figura 7.3: Tensión de ruptura en aisladores limpios en condición húmeda.

A partir de los resultados, se observa que no existe un tendencia que permita suponer de forma clara cómo varía el valor de tensión de ruptura de los aisladores al exponerlos a distintos niveles de contaminación. El ambiente E1 tiene un valor de tensión de ruptura un 4.6 % menor en comparación al caso base. Parece razonable lo obtenido, teniendo en cuenta que el entorno E1 presenta una gravedad de contaminación del sitio calificada como "*very light*". Es por ello que, esta diferencia es prácticamente despreciable y por lo tanto, no hay una variación importante en el valor de ruptura entre E1 y el caso base.

El ambiente E2 tiene un valor de tensión de ruptura un 16.3 % mayor en comparación con el caso base. Hay que considerar que el entorno E2 está calificado con una gravedad de contaminación del sitio mayor en comparación al caso base y que el ambiente E1, por lo tanto, no es un resultado consistente debido a que se esperaba que, con el aumento del nivel de contaminación, disminuyera el valor de tensión de ruptura.

Ocurre una situación similar a E2 en el ambiente E3, obteniéndose un valor de tensión de

ruptura un 17.2 % mayor en comparación con el caso base. Teniendo en cuenta que el entorno E3 está calificado con una gravedad de contaminación del sitio como "*medium*" y, además, es un ambiente con mayor contaminación que el caso base, E1 y E2, es un resultado inesperado y por lo demás, interesante.

Como se puede observar en la figura 7.3, se presentan valores de tensión de ruptura de manera ascendente desde E1 hasta E3. Por lo que, la tensión de ruptura aumenta a medida que se incrementa el nivel contaminación. Sin embargo, esta tendencia se modifica al incluir en el análisis los ambientes E4 y E5, en donde la tensión de ruptura disminuye y es del orden de la tensión de ruptura del caso base y E1.

Con respecto al ambiente E4, se obtiene un valor de tensión de ruptura un 2.6 % menor en comparación con el caso base. Por lo que se obtiene un comportamiento similar al ambiente E1, teniendo en cuenta además que el entorno E4 es calificado con una gravedad de contaminación del sitio como "*medium*".

Finalmente, el ambiente E5, el cual tiene un nivel de ESDD muy alto en comparación con todos lo demás ambientes y está calificado con una gravedad de contaminación del sitio como "*heavy*", se obtiene un valor de ruptura un 1.1 % menor en comparación con el caso base. Lo anterior es prácticamente despreciable, teniendo como resultado que no hay variación del valor de tensión de ruptura entre un ambiente húmedo solo con agua en comparación con un ambiente muy contaminado y, por lo demás, con una solución contaminante muy conductiva.

A partir de los resultados obtenidos en aisladores recubiertos, se observa en la Figura 7.4, que existe un aumento de la tensión de ruptura al aumentar el nivel de contaminación desde el ambiente E1 hasta el ambiente E4 y, al incluir en el análisis el ambiente E5, la tensión de ruptura disminuye considerablemente, obteniéndose el valor más bajo de todos los ensayos. Con esto, es posible determinar que, con el recubrimiento RTV, los aisladores presentan un mejor comportamiento del valor de tensión de ruptura a medida que aumenta el nivel de contaminación. Sin embargo, al exponer la probeta a un ambiente con una gravedad de contaminación del sitio catalogada como "*heavy*", se modifica dicha tendencia.

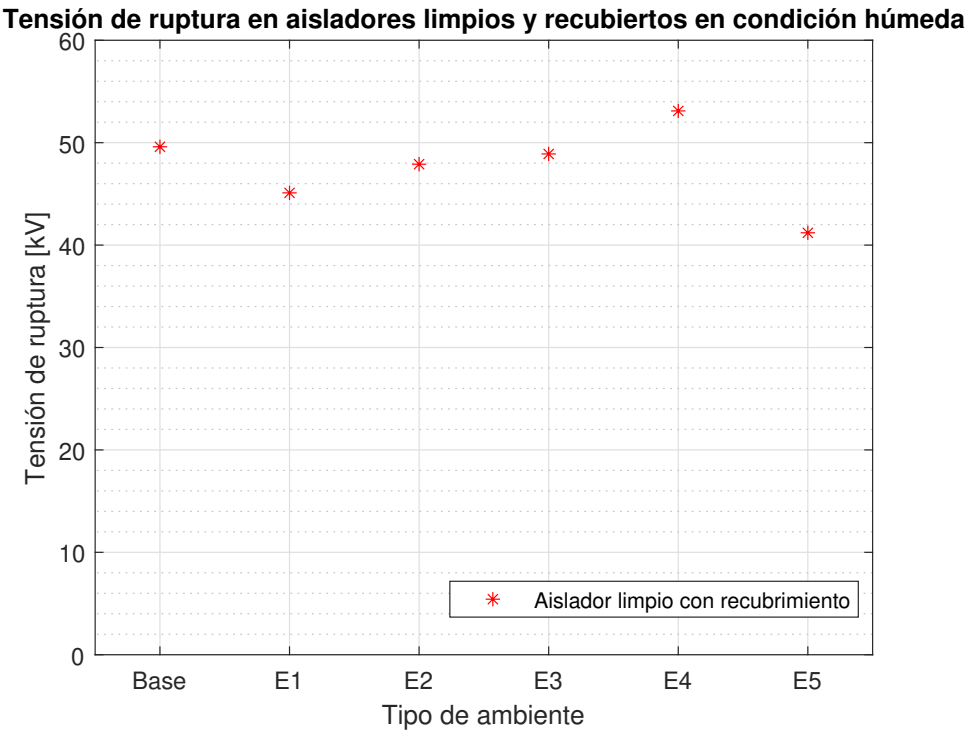


Figura 7.4: Tensión de ruptura en aisladores recubiertos en condición húmeda.

El ambiente E1 tiene un valor de tensión de ruptura un 9.1 % menor en comparación al caso base. A pesar de que el entorno E1 presenta una gravedad de contaminación del sitio calificada como "*very light*", parece razonable obtener un valor menor de tensión ruptura al aumentar el nivel de contaminación.

El ambiente E2 tiene un valor de tensión de ruptura un 4.6 % menor en comparación con el caso base, sin embargo, es un valor mayor en comparación al entorno E1, observando una tendencia en aumento cuando la gravedad de contaminación del sitio varía de "*very light*" a "*light*".

El ambiente E3 tiene un valor de tensión de ruptura un 1.4 % menor en comparación con el caso base, por lo que prácticamente no hay diferencia. Sin embargo, es un valor mayor en comparación al entorno E1 y E2, manteniéndose la tendencia en aumento del valor de tensión de ruptura.

Por su parte, el ambiente E4, catalogado con una gravedad de contaminación del sitio como "*medium*", presenta un valor de tensión de ruptura un 7.1 % mayor en comparación con el caso base. Adicionalmente, este valor es mayor también en comparación a los entornos E1, E2 y E3, manteniendo la tendencia antes expuesta.

Con respecto al ambiente E5, presenta un valor de tensión de ruptura un 16.9 % menor en comparación con el caso base. Sumado a lo anterior, su valor de tensión de ruptura es el más bajo obtenido en todos los ensayos en húmedo, tomando en cuenta aisladores sin recubrimiento y con recubrimiento.

En la Figura 7.5 se presenta la combinación de resultados de los dos tipos de probetas, es decir, aisladores con y sin recubrimiento en condición húmeda.

Se observa que, incluir el recubrimiento siliconado RTV en aisladores de vidrio, aumenta el valor de tensión de ruptura en los ambientes base, E1 y E4. Sin embargo, el comportamiento de

la tensión de ruptura aumenta en aisladores de vidrio sin recubrimiento en los ambientes E2, E3 y E5, en comparación a los resultados obtenidos en aisladores con recubrimiento. Por lo tanto, no se observa una clara tendencia que determine que el recubrimiento mejora el comportamiento de la tensión de ruptura en un ambiente húmedo al variar el nivel de contaminación.

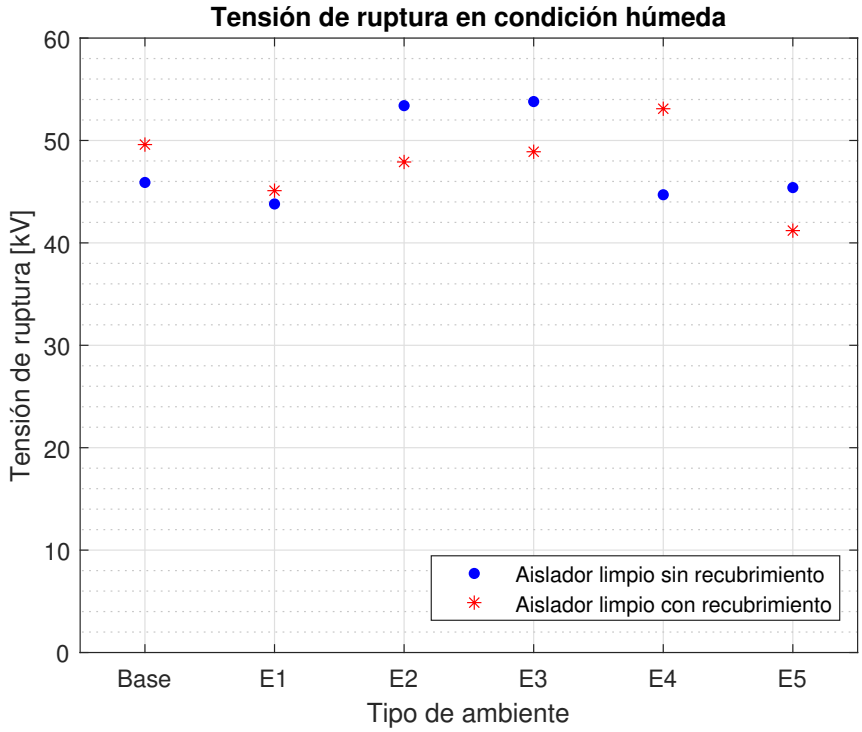


Figura 7.5: Comparación de tensión de ruptura en aisladores con y sin recubrimiento en ambiente húmedo.

Finalmente, es importante mencionar que, durante los ensayos de medición tensión de ruptura realizados en el ambiente húmedo E5 y en aisladores de vidrio sin recubrimiento, se tuvo que repetir la prueba en tres ocasiones, debido a que dos aisladores presentaron fallas. Dicho fenómeno no fue posible determinarlo de forma visual, sin embargo, al energizar las probetas, la corriente de la fuente PGK se elevaba drásticamente. Con ello, se realizó una medición de resistencia de aislamiento en un aislador en buen estado, obteniendo un valor en torno a los 2 GΩ, en cambio, en los dos aisladores antes mencionados, se obtuvieron mediciones en torno a los 20 MΩ. Lo anterior mencionado pareciera no ser una coincidencia, debido a que las fallas se presentaron en el ambiente más contaminado de todos los ensayados y con una gravedad de contaminación del sitio calificada como "*heavy*".

7.3. Medición de tensión de ruptura en ambiente seco

De acuerdo al procedimiento expuesto en la sección 6.2.2, se presenta en la Figura 7.6 la tensión de ruptura promedio normalizada para cada capa de contaminación depositada sobre la superficie de los aisladores de vidrio sin recubrimiento en condición seca. En la sección de Anexos, al final de este documento, se presentan todos los valores y el promedio de tensión de ruptura obtenido de cada ambiente para construir los gráficos presentados en esta sección.

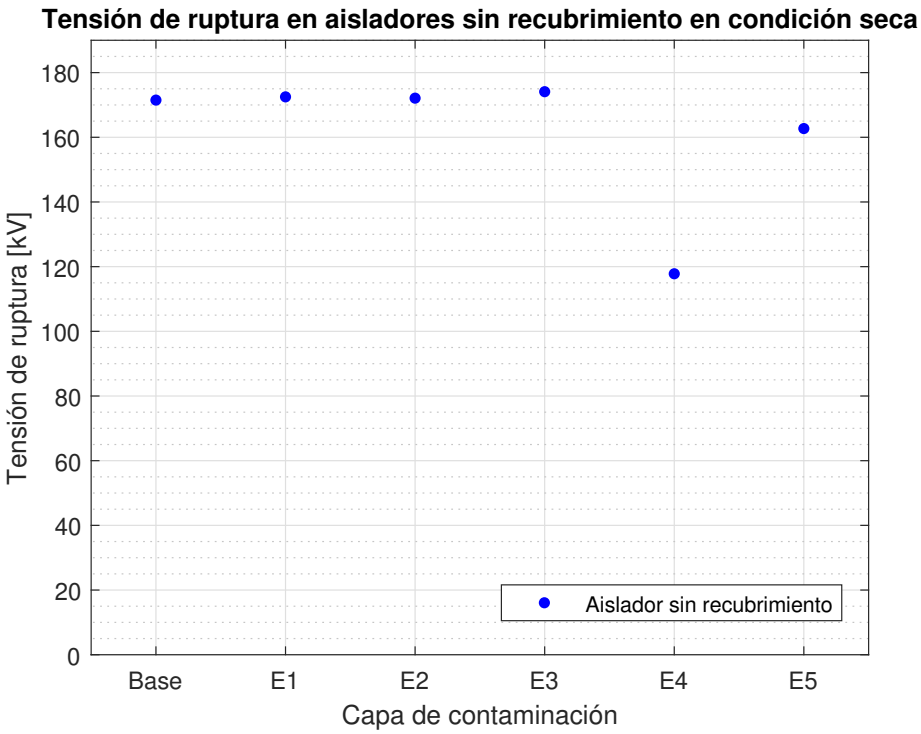


Figura 7.6: Tensión de ruptura en aisladores limpios en condición seca.

Primero que todo, a partir del gráfico anterior, se observa que el valor de tensión de ruptura en ambiente seco es considerablemente más alto que todos los valores obtenidos en los ensayos en húmedo. Lo anterior explica el cambio en la fuente de alimentación PGK y el no utilizar el divisor de tensión resistivo, debido a que la tensión máxima de operación era de 110 kV en DC y 140 kV, respectivamente.

Con respecto a los resultados obtenidos, se observa un comportamiento prácticamente similar y sin mayor variación del valor de tensión de ruptura del caso base y las capas de contaminación de los ambientes E1, E2 y E3, en donde el aumento de la contaminación pareciera no tener un efecto importante. Analizando la capa de contaminación del entorno E4, se observa una disminución de forma drástica del valor de tensión de ruptura. Con respecto la capa de contaminación de E5, el valor de tensión de ruptura es menor en comparación al caso base, E1, E2 y E3, pero mayor que el entorno E4, volviendo a la tendencia obtenida y acercándose más a dichos resultados.

El resultado obtenido en la capa de contaminación del ambiente E4 es el único que induce al error de medición, sin embargo, se descartó al verificar el estado del aislador. La explicación pareciera ser debido a que el alto nivel de NSDD presente en la capa de contaminación en la superficie del aislador, forme un camino "preestablecido" para que se genere la ruptura.

Con respecto a las variaciones del valor de tensión de ruptura de las capas de contaminación de los entornos en comparación al caso base, se tiene en E1 un valor 0.6 % mayor, en E2 un valor 0.3 % mayor, en E3 un valor 1.5 % mayor, en E4 un valor 31.3 % menor y en E5 un valor 5.1 % menor. De lo anterior se desprende que, la tendencia es constante comparando el caso base y las capas de contaminación de los entornos E1, E2, E3 y E5. Por lo tanto, el nivel de contaminación presente en un ambiente seco, al variar el nivel de salinidad, no tiene mayor influencia en el valor de tensión de ruptura en aisladores sin recubrimiento.

En la Figura 7.7 se presenta la tensión de ruptura promedio normalizada para cada capa de contaminación depositada en la superficie de aisladores de vidrio con recubrimiento en condición seca.

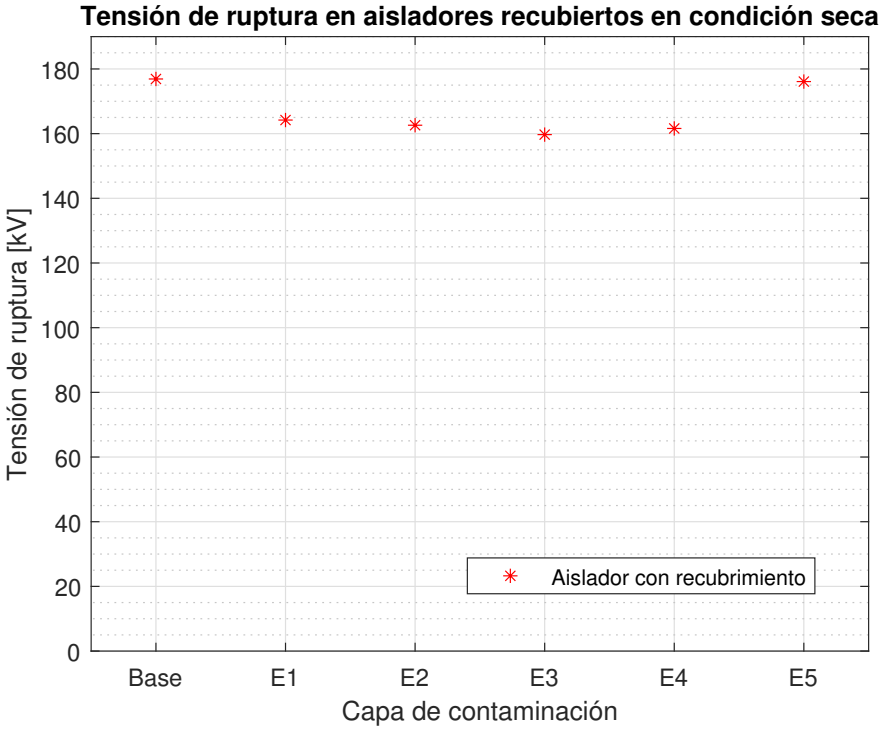


Figura 7.7: Tensión de ruptura en aisladores recubiertos en condición seca.

Observando los resultados obtenidos en la figura anterior, se observa que el caso base presenta el valor de tensión de ruptura más alto en comparación a todas las capas de contaminación presentes en la superficie de los aisladores. En relación al aislador contaminado con una capa de contaminación del ambiente E1, se tiene un valor de tensión de ruptura 7.2 % menor en comparación al caso base.

El aislador contaminado con una capa de contaminación del ambiente E2, presenta un valor de tensión de ruptura 8.1 % menor en comparación con el caso base. Por lo que, añadiendo E1, se observa que, al aumentar el nivel de contaminación, la tensión de ruptura tiende a decrecer.

Analizando el aislador contaminado con una capa de contaminación del ambiente E3, este presenta un valor de tensión de ruptura 9.7 % menor en comparación con el caso base. Se mantiene el comportamiento decreciente de la tensión de ruptura al aumentar el nivel de contaminación, tomando en consideración el caso base y los ambientes E1, E2 y E3.

El aislador contaminado con una capa de contaminación del ambiente E4, a pesar de presentar valor de tensión de ruptura ligeramente mayor que el ambiente E3, se tiene una tendencia similar y se obtiene un valor de tensión de ruptura 8.6 % menor en comparación al caso base.

Por último, analizando el aislador contaminado con una capa de contaminación del ambiente E5, se tiene un valor de tensión de ruptura 0.5 % menor en comparación al caso base, lo cual es despreciable. Por lo tanto, de acuerdo a lo obtenido, un aislador con una capa de contaminación con un alto nivel de material soluble, presenta prácticamente el mismo valor de tensión de ruptura que un aislador limpio y seco, alterando la tendencia que se observó en los demás casos.

En la Figura 7.8 se presenta la combinación de resultados de los dos tipos de probetas, es decir, aisladores con y sin recubrimiento en condición seca.

Se observa que, incluir el recubrimiento siliconado RTV en aisladores de vidrio, aumenta el valor de tensión de ruptura en aisladores que presentan una capa de contaminación de los ambientes E4 y E5, sumando además el caso base. No es coincidencia que se obtengan mejores resultados en los ambientes más contaminados, catalogados con una gravedad de contaminación del sitio "*medium*" y "*heavy*". Por lo que, para dichos casos, la utilización del producto sería recomendable pues mejora el nivel de tensión de ruptura en presencia de ambientes secos y con altos niveles de ESDD y NSDD.

Por otro lado, el comportamiento de la tensión de ruptura aumenta en aisladores de vidrio sin recubrimiento en presencia de un capa de contaminación de los ambientes E1, E2 y E3, en comparación a los resultados obtenidos en aisladores con recubrimiento. Por lo tanto, en dichos entornos no se obtienen resultados favorables que determinen que el recubrimiento mejora el comportamiento de la tensión de ruptura en un ambiente seco, al variar el nivel de contaminación.

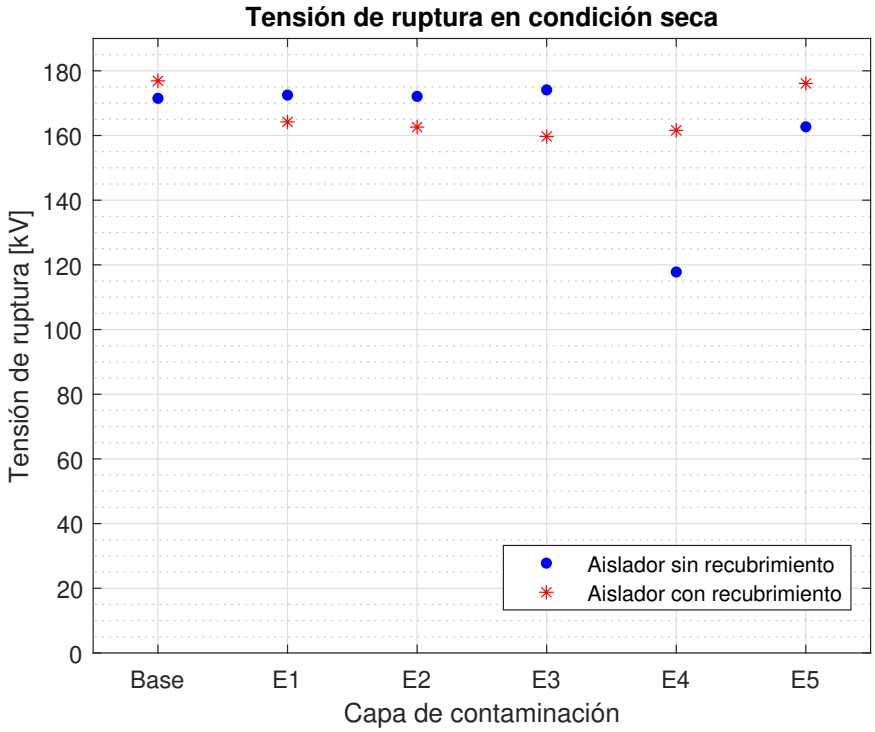


Figura 7.8: Comparación de tensión de ruptura en aisladores con y sin recubrimiento en ambiente seco.

7.4. Medición de corrientes de fuga en ambiente húmedo

De acuerdo con el procedimiento expuesto en la sección 6.3.1, se presenta en la Figura 7.9 la evolución del valor de corrientes de fuga en función de la tensión aplicada para cada tipo de ambiente y para aisladores de vidrio sin recubrimiento en condición húmeda. Además, en la sección de Anexos, al final de este documento, se presentan todos los valores de corrientes de fuga de cada ambiente para construir los gráficos mostrados en esta sección.

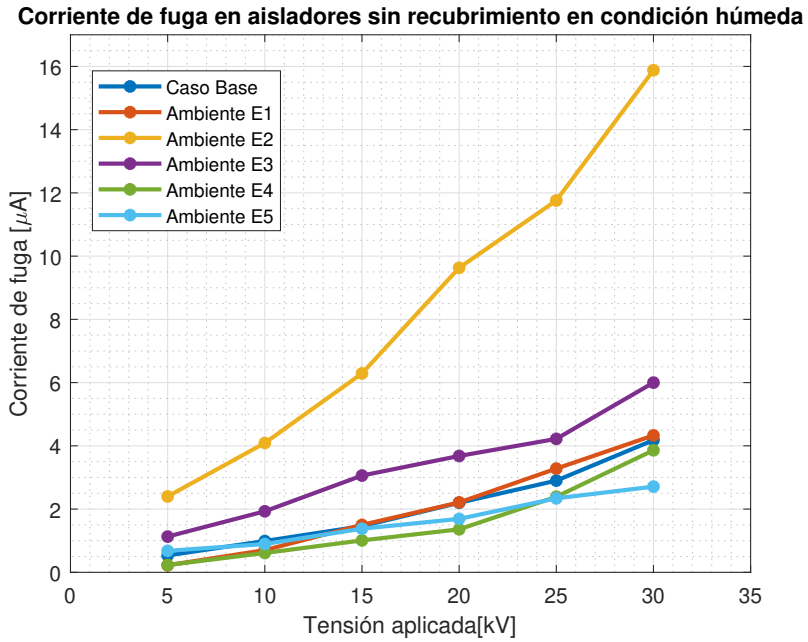


Figura 7.9: Corrientes de fuga en aisladores limpios en condición húmeda.

En la figura anterior se evidencian varios fenómenos, comenzando por el análisis del ambiente E2, en donde se observa que es el ambiente con los valores de corriente de fuga que supera todos los demás valores de los distintos ambientes contaminados, para cada escalón de tensión. Lo anterior resulta interesante, debido a que el ambiente E2 no es el más contaminante ni el que presenta mayor nivel de ESDD. En particular, dada la tendencia de los resultados obtenidos en este ambiente, se decidió repetir el ensayo con otro aislador, con el fin de descartar una posible falla en éste. Sin embargo, la tendencia se mantuvo prácticamente igual y no hubo mayor variación en los datos medidos.

Por una parte, observando la tendencia de la corriente de fuga en cada ambiente, se tiene que ésta evoluciona de forma aproximadamente lineal. Todo parece indicar que, en aisladores de vidrio sin recubrimiento en condición húmeda, la corriente de fuga tiene un comportamiento que aumenta de forma lineal hasta la ruptura. Sin embargo, no es posible afirmar lo anterior de forma categórica, ya que la tensión aplicada en los ensayos no sobrepasa el 60 % del valor de la tensión de ruptura. Realizar este ensayo hasta que ocurra el contorneo, podría significar que la fuente de alimentación sufra un desperfecto, debido a la exposición directa a un cortocircuito.

Por otra parte, analizando el ambiente E4, que tiene el más alto nivel de NSDD y está clasificado con un SPS "*medium*", los valores de corriente de fuga resultaron ser más bajos en comparación a todos los demás ambientes, con excepción de la última medición realizada a 30 kV, en donde su valor solo supera al ambiente E5. Por lo tanto, se podría suponer que el caolín tiene un efecto positivo

en relación con el valor de corriente de fuga, ya que, comparando con los valores del ambiente E2, en E4 se obtienen valores bastante menores, siendo que ambos ambientes presentan el mismo nivel de ESDD.

Resulta llamativo el caso del ambiente E5, el cual tiene un SPS "*heavy*" y el mayor nivel de ESDD, es decir, es el ambiente en donde hay mayor presencia de sal y, por tanto, es el ambiente más conductivo. Por ello, era de suponer que se obtendrían mediciones de corriente mayores en comparación a los demás ambientes, sin embargo, sus valores de corriente de fuga están prácticamente por debajo de todos los demás casos analizados.

Finalmente, se puede ver que existen valores de corriente muy similares en los ambientes E1, E4, E5 y en el caso base. Por su parte, el ambiente E3 es el que más se aleja de los anteriores ambientes, sin embargo, esta diferencia no supera los 3μA, por lo que es prácticamente despreciable. Por todo lo anterior, no es posible determinar una tendencia clara en los resultados. En un principio se esperaba que, a mayor nivel de ESDD, aumentara también el valor de la corriente de fuga, pero de acuerdo a lo observado en la Figura 7.9, no fue así. Por lo que se tiene un comportamiento un tanto impredecible, al menos en este tipo de aisladores y en un ambiente húmedo.

En la Figura 7.10 se presenta la evolución del valor de corrientes de fuga en función de la tensión aplicada para cada tipo de ambiente y para aisladores de vidrio con recubrimiento en condición húmeda. Observando los datos obtenidos en cada ambiente, se tiene un comportamiento totalmente distinto en comparación a los resultados en aisladores sin recubrimiento. En primer lugar, la tendencia de los datos es de tipo exponencial, por lo que es de suponer que, al acercarse a la tensión de ruptura, la corriente debería aumentar considerablemente. En segundo lugar, los datos obtenidos en cada entorno son mas homogéneos, es decir, no hay mayor diferencia de los valores de corriente en función del nivel de contaminación. Lo cual es tremendamente importante, debido a que la variación en el tipo de ambiente no pareciera afectar el comportamiento del aislador y en el valor de las corrientes de fuga en presencia del recubrimiento siliconado RTV.

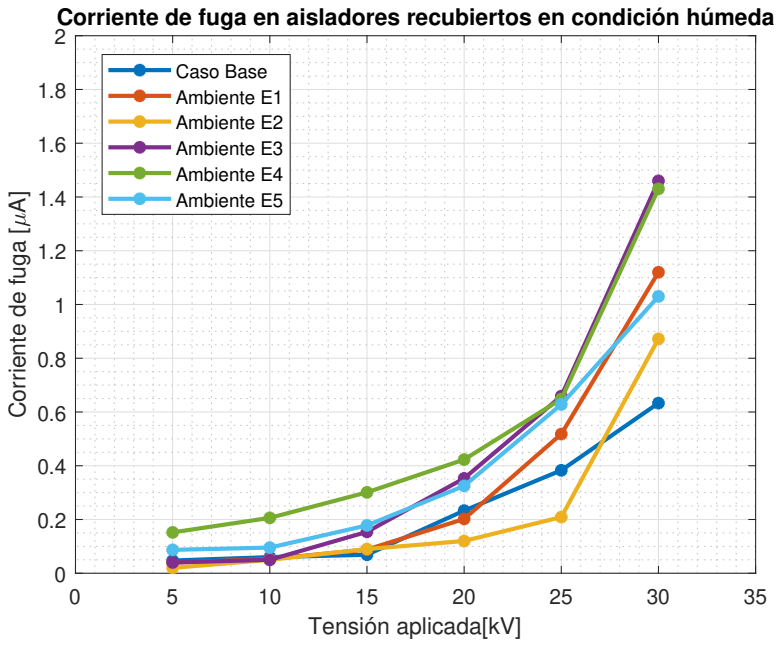
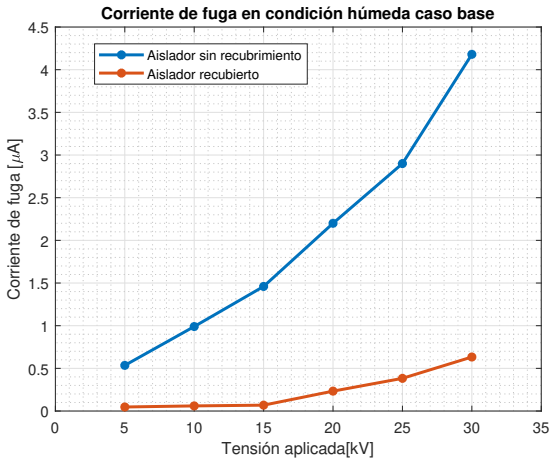
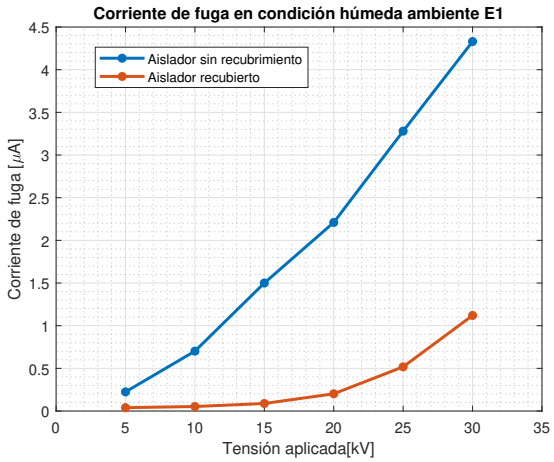


Figura 7.10: Corrientes de fuga en aisladores recubiertos en condición húmeda.

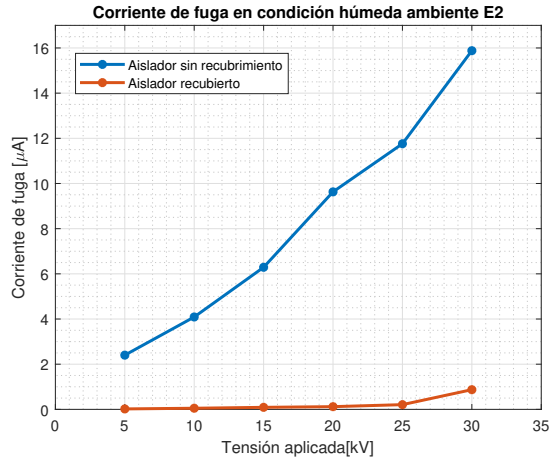
En la Figura 7.11 se expone, por separado, la evolución de la corriente de fuga para cada ambiente húmedo ensayado. De esta forma, resulta más sencillo evaluar los resultados entre aisladores que cuentan con el recubrimiento y aisladores sin el recubrimiento. El análisis a partir de cada gráfica presentada en la Figura 7.11 es categórico. Utilizar el recubrimiento siliconado RTV en aisladores de vidrio expuestos a condiciones húmedas reduce, en todos los ambientes estudiados, el valor de la corriente de fuga. Por lo que es totalmente recomendable su uso, desde el punto de vista de la reducción de la corriente de fuga.



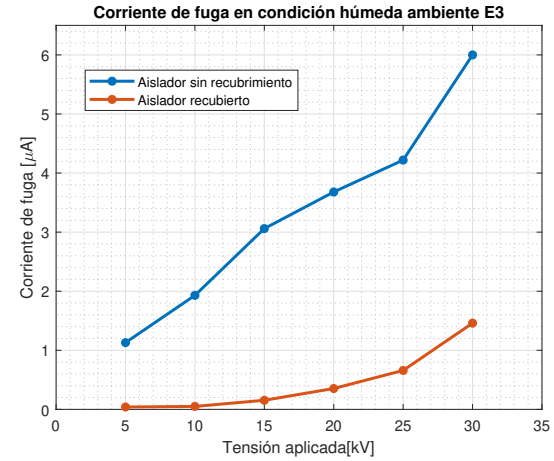
(a) Corrientes de fuga en condición húmeda - caso base.



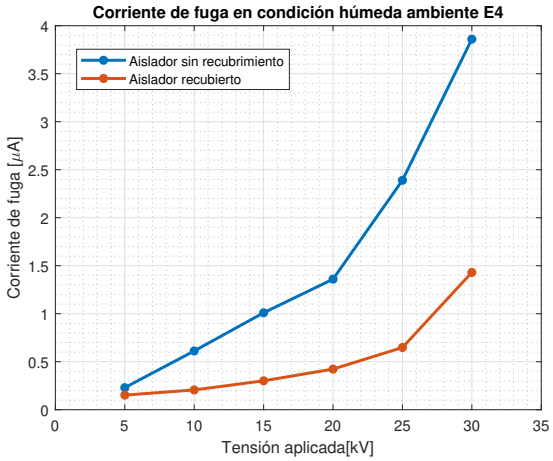
(b) Corrientes de fuga en condición húmeda - E1.



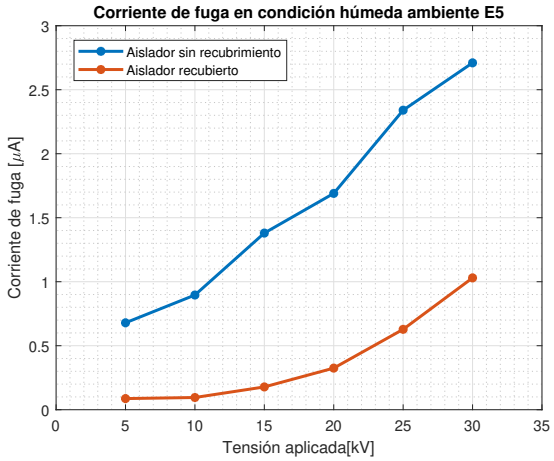
(c) Corrientes de fuga en condición húmeda - E2.



(d) Corrientes de fuga en condición húmeda - E3.



(e) Corrientes de fuga en condición húmeda - E4.



(f) Corrientes de fuga en condición húmeda - E5.

Figura 7.11: Comparación entre aisladores con y sin recubrimiento en función de la evolución de corriente de fuga para cada ambiente.

7.5. Medición de corrientes de fuga en ambiente seco

De acuerdo con el procedimiento expuesto en la sección 6.3.2, se presenta en la Figura 7.12 la evolución del valor de corrientes de fuga en función de la tensión aplicada para cada capa de contaminación depositada sobre la superficie de los aisladores de vidrio sin recubrimiento en condición seca. Además, en el capítulo de Anexos, al final de este documento, se presentan todos los valores de corrientes de fuga de cada ambiente para construir los gráficos mostrados en esta sección.

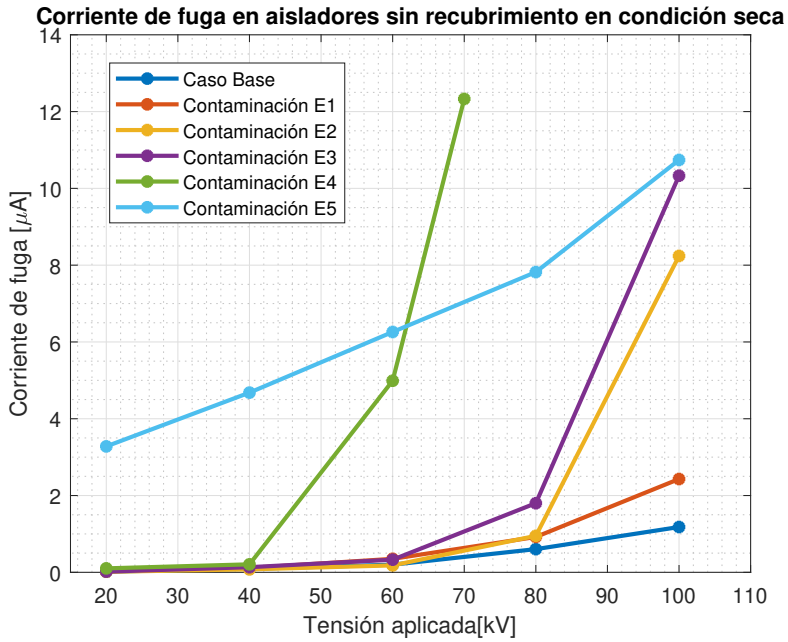


Figura 7.12: Corrientes de fuga en aisladores limpios en condición seca.

En primer lugar, es importante destacar que, para la capa de contaminación del ambiente E4, solo se obtuvieron mediciones hasta los 70 kV, debido al valor de tensión de ruptura obtenido del ensayo en ambiente seco. Pero, dada la tendencia presentada, es de esperar que para valores mayores de tensión, se tengan valores aún más elevados de corrientes de fuga. Este caso, que presenta el valor más alto de NSDD y de caolín, mantiene prácticamente constante el valor de corriente hasta los 40 kV, luego, drásticamente su valor se aumenta de forma exponencial.

Se observa también que, en comparación a los resultados de los ensayos en húmedo, el aumento en el nivel de ESDD resulta en un valor de corriente de fuga más elevado. Por lo que, de cierta forma, se obtienen curvas de nivel, en donde en la parte inferior se tiene el caso base y a medida que aumenta el valor de ESDD, las curvas resultan estar por encima de aquellas que presentan un menor nivel de ESDD. Mismo análisis puede efectuarse si se compara la gravedad de la contaminación del sitio.

En la Figura 7.13 se presenta la evolución del valor de corrientes de fuga en función de la tensión aplicada para cada capa de contaminación depositada sobre la superficie de los aisladores de vidrio con recubrimiento en condición seca. Observando los datos obtenidos en cada ambiente, se tiene un comportamiento muy similar en comparación a los resultados en aisladores sin recubrimiento.

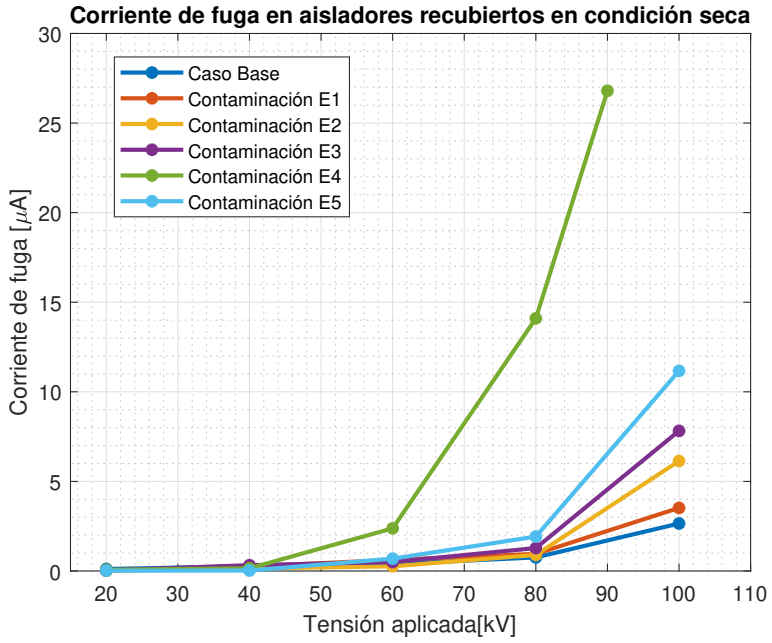
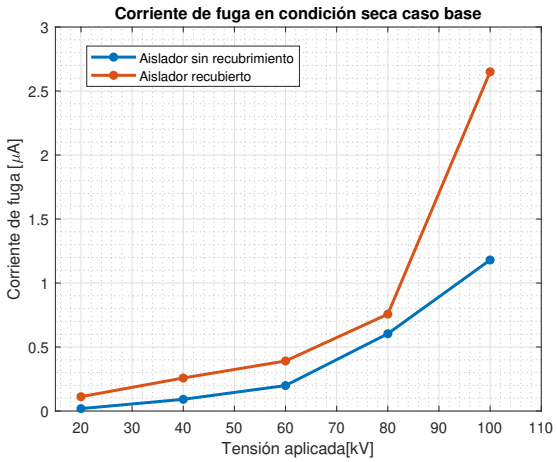


Figura 7.13: Corrientes de fuga en aisladores recubiertos en condición seca.

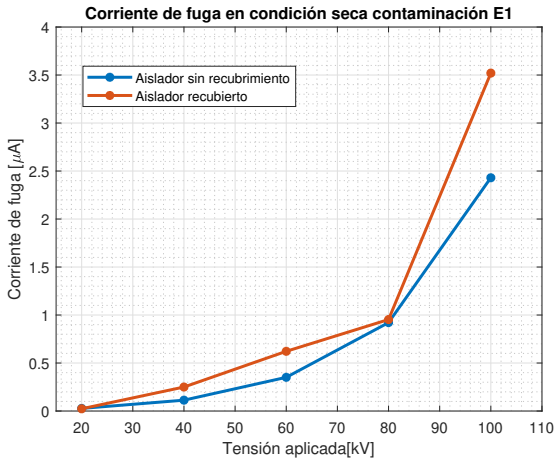
Por una parte, la tendencia de los datos es claramente de tipo exponencial. Por otra, se destaca el aumento de la corriente de fuga de los aisladores que presentan un capa de contaminación de los ambientes E1, E2, E3 y E5, los cuales presentan niveles de ESDD en aumento, respectivamente, en comparación con el caso base. Lo anterior se puede comprobar si se observan las curvas de los ambientes del caso base antes mencionados, en donde cada curva está por sobre la anterior. Sin embargo, este comportamiento se evidencia a partir de los 60 kV. Para menores valores de tensión, el comportamiento de todos ellos es prácticamente idéntico.

Finalmente, al igual que en el ensayo en ambiente seco con aisladores sin recubrimiento, el aislador con una capa de contaminación del ambiente E4 es el que tiene el mayor valor de corriente de fuga al aumentar progresivamente la tensión, en comparación a todos los otros ambientes. A partir de dichos resultados, es de suponer que es consecuencia de la gran cantidad de caolín presente en la capa de contaminación de dicho ambiente, por lo que, el material no soluble afecta directamente en los valores de corriente de fuga, a pesar de ser un material no conductivo.

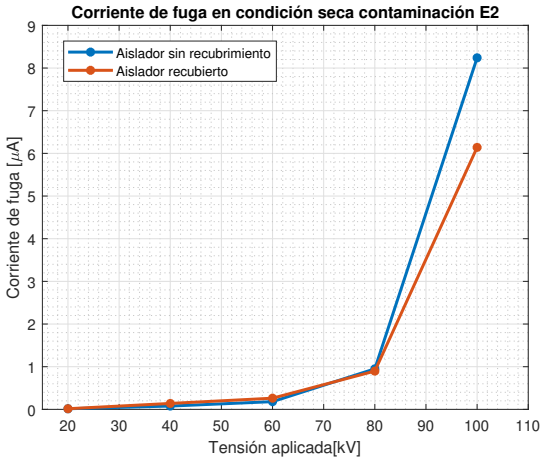
En la Figura 7.14 se expone, por separado, la evolución de la corriente de fuga para cada aislador que presenta una capa de contaminación seca de cada ambiente. De esta forma, resulta más sencillo evaluar los resultados entre aisladores que cuentan con el recubrimiento y aisladores sin el recubrimiento.



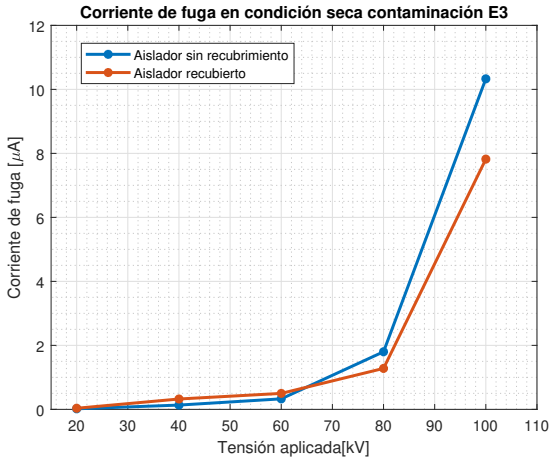
(a) Corrientes de fuga en condición seca - caso base.



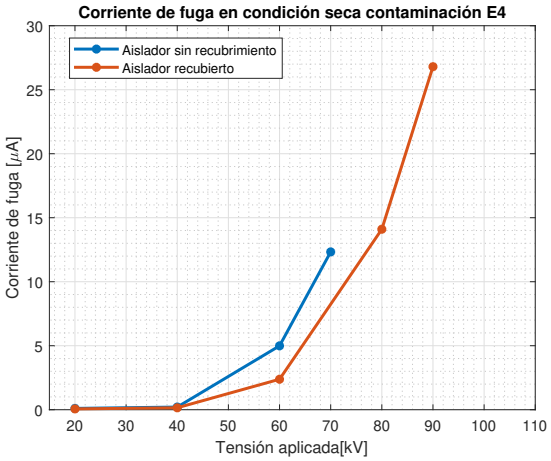
(b) Corrientes de fuga en condición seca - E1.



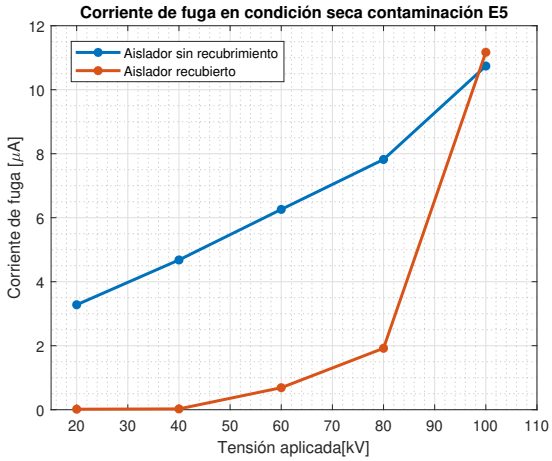
(c) Corrientes de fuga en condición seca - E2.



(d) Corrientes de fuga en condición seca - E3.



(e) Corrientes de fuga en condición seca - E4.



(f) Corrientes de fuga en condición seca - E5.

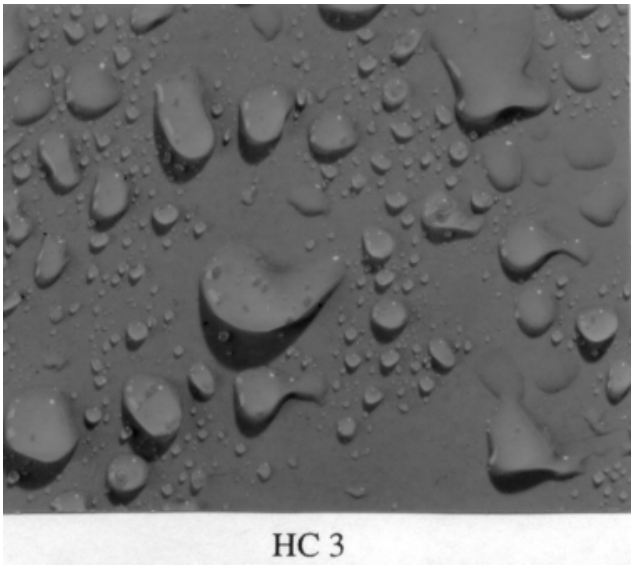
Figura 7.14: Comparación entre aisladores con y sin recubrimiento en función de la evolución de corriente de fuga para cada capa de contaminación.

A partir de las Figuras 7.14a y 7.14b, se observa que se obtiene un mejor comportamiento en aisladores sin recubrimiento, sin embargo, al incluir en el análisis las Figuras 7.14c, 7.14d, 7.14e y 7.14f, en donde el nivel de contaminación aumentó, respectivamente, los niveles de corriente de fuga disminuyen al utilizar aisladores de vidrio con el recubrimiento siliconado RTV. Por lo tanto, de igual forma que en los ensayos en húmedo, es recomendable su uso, desde el punto de vista de la reducción de la corriente de fuga. Sin embargo, es importante destacar que analizando el valor de la corriente de fuga obtenida en los ensayos en seco, se observa una diferencia entre aisladores con y sin recubrimiento que es sustancialmente menor en comparación a los ensayos realizados en húmedo. Lo anterior se comprueba al comparar las Figuras 7.11 y 7.14. Además, hay que destacar la diferencia en el desempeño dieléctrico del aislador con y sin recubrimiento en el ambiente E5, en donde se observa una mayor diferencia en los valores de corriente de fuga en comparación con los demás entornos.

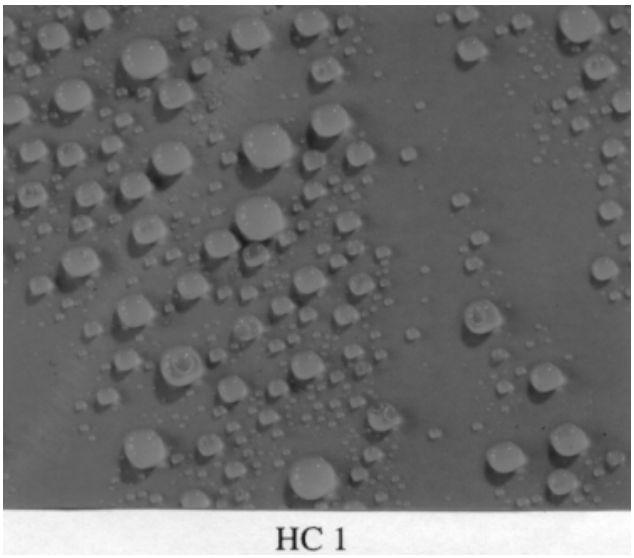
7.6. Clase de hidrofobicidad

De acuerdo a lo expuesto en la sección 6.4, se presentan los resultados de las pruebas del verificación del grado de hidrofobicidad realizadas en la superficie de los aisladores con y sin recubrimiento. Para determinar cada una de las clases de hidrofobicidad, o HC, se comparan las imágenes obtenidas en laboratorio con las imágenes de la Figura 4.3 y se utiliza también la descripción de las clases de hidrofobicidad expuestas en la Tabla 4.3.

En la Figura 7.15 se presentan ambos tipos de aisladores, en donde cada uno se encuentra completamente limpio y seco. Por un lado, el aislador sin recubrimiento (Figura 7.15c) presenta un HC3, en donde es posible observar que la superficie está cubierta por gotas de forma irregular. Por otro lado, el aislador con recubrimiento (Figura 7.15d) tiene un HC1, en donde todas las gotas depositadas en la superficie son prácticamente de forma circular.



(a) Clase de hidrofobicidad HC3.



(b) Clase de hidrofobicidad HC1.



(c) Aislador sin recubrimiento limpio.

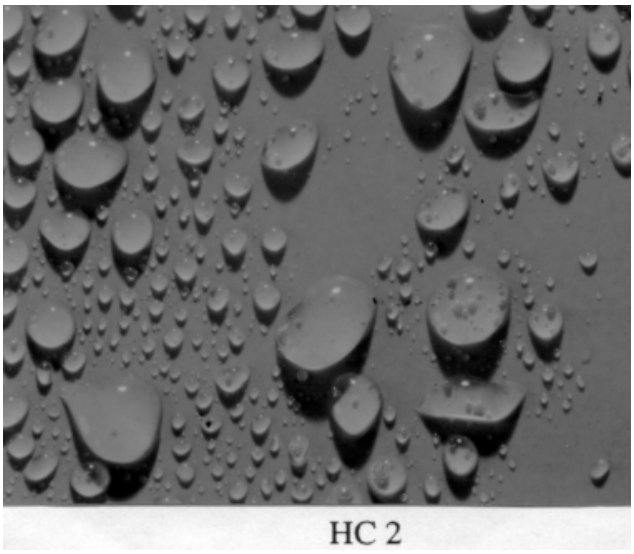


(d) Aislador con recubrimiento limpio.

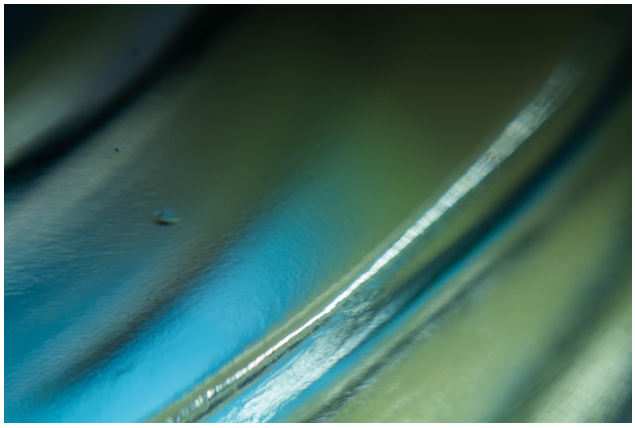
Figura 7.15: Hidrofobicidad - Aislador limpio.

En la Figura 7.16 se expone la prueba de hidrofobicidad en aisladores que fueron expuestos al ambiente contaminado E1. En el aislador sin recubrir (Figura 7.16b) se tiene un HC7, en donde

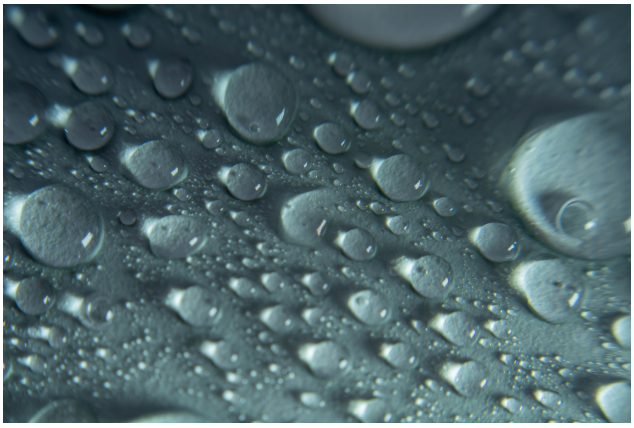
no hay ninguna gota, ya que sobre la superficie se forma una película completa de agua. Una clase HC2 se obtiene en el aislador con recubrimiento (Figura 7.16c), observando que sobre la superficie se forman en su mayoría gotas discretas, en donde algunas de ellas se desvían de la forma circular.



(a) Clase de hidrofobicidad HC2.



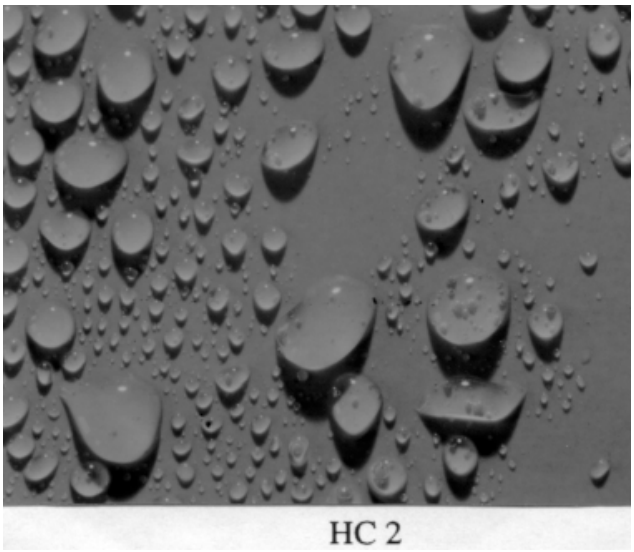
(b) Aislador sin recubrimiento - E1.



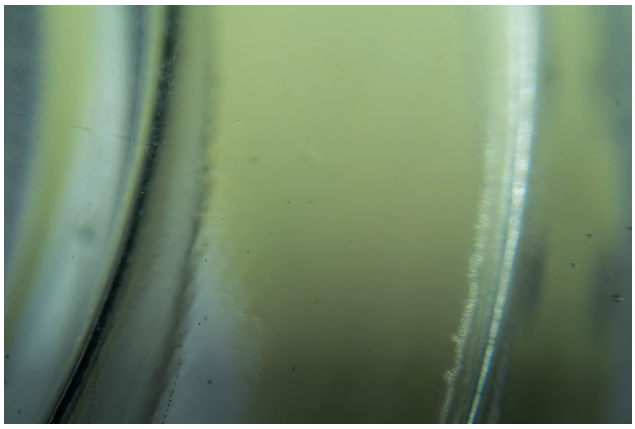
(c) Aislador con recubrimiento - E1.

Figura 7.16: Hidrofobicidad - Aislador contaminado con ambiente E1.

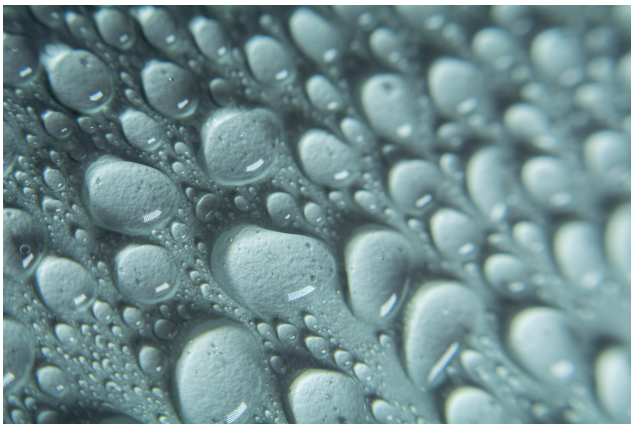
En la Figura 7.17 se expone la prueba de hidrofobicidad en aisladores que fueron expuestos al ambiente contaminado E2. En el aislador sin recubrir (Figura 7.17b) se tiene un HC7, en donde se forma una película completa de agua. En el aislador con recubrimiento (Figura 7.17c) se tiene una clase HC2, observando que sobre la superficie se forman en su mayoría gotas discretas, en donde algunas de ellas se desvían de la forma circular.



(a) Clase de hidrofobicidad HC2.



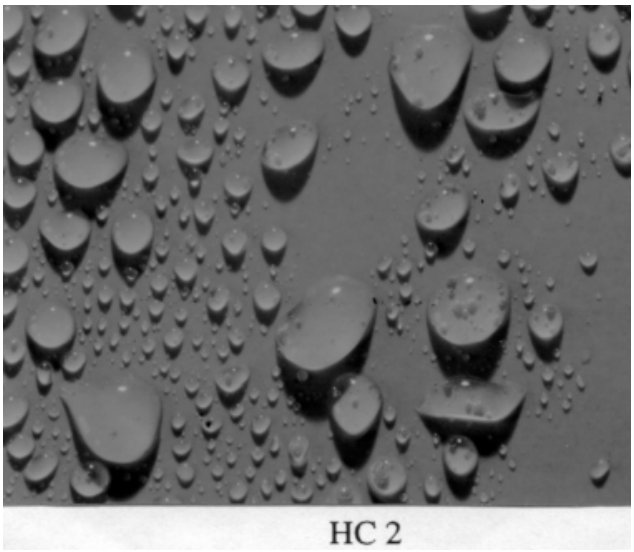
(b) Aislador sin recubrimiento - E2.



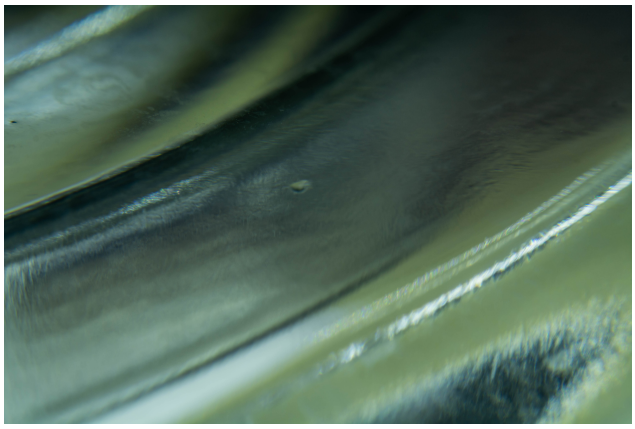
(c) Aislador con recubrimiento - E2.

Figura 7.17: Hidrofobicidad - Aislador contaminado con ambiente E2.

En la Figura 7.18 se presenta la prueba de hidrofobicidad en aisladores que fueron expuestos al ambiente contaminado E3. En el aislador sin recubrir (Figura 7.18b) se tiene un HC7, en donde se forma una película completa de agua. En el aislador con recubrimiento (Figura 7.18c) se tiene una clase HC2, observando que sobre la superficie se forman en su mayoría gotas discretas, en donde algunas de ellas se desvían de la forma circular.



(a) Clase de hidrofobicidad HC2.



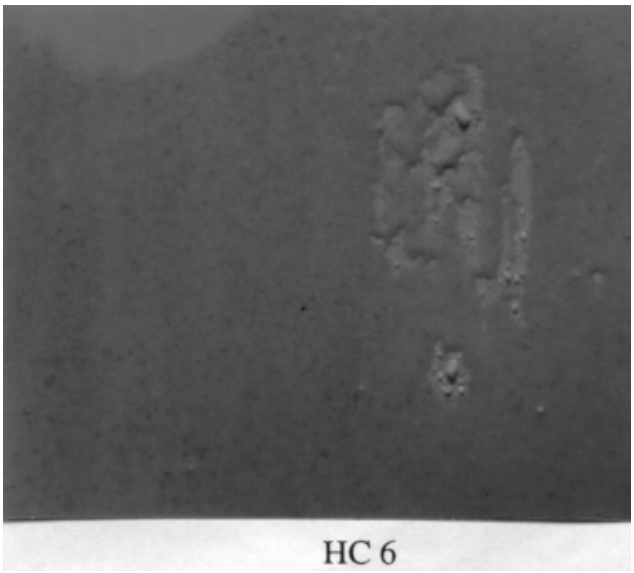
(b) Aislador sin recubrimiento - E3.



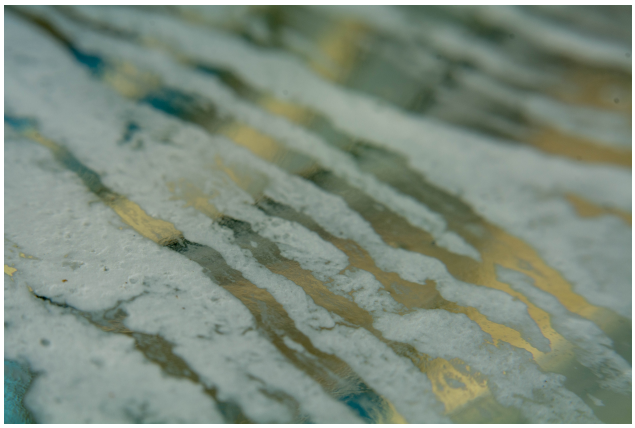
(c) Aislador con recubrimiento - E3.

Figura 7.18: Hidrofobicidad - Aislador contaminado con ambiente E3.

En la Figura 7.19 se presentan los resultados de la prueba de hidrofobicidad en aisladores que fueron expuestos al ambiente contaminado E4. En el aislador sin recubrir (Figura 7.19b) se tiene un HC7, en donde se forma una película completa de agua. En el aislador con recubrimiento (Figura 7.19c) se tiene una clase HC6, observando que la superficie está cubierta por canales de agua y todavía se tienen pequeñas áreas no mojadas.



(a) Clase de hidrofobicidad HC6.



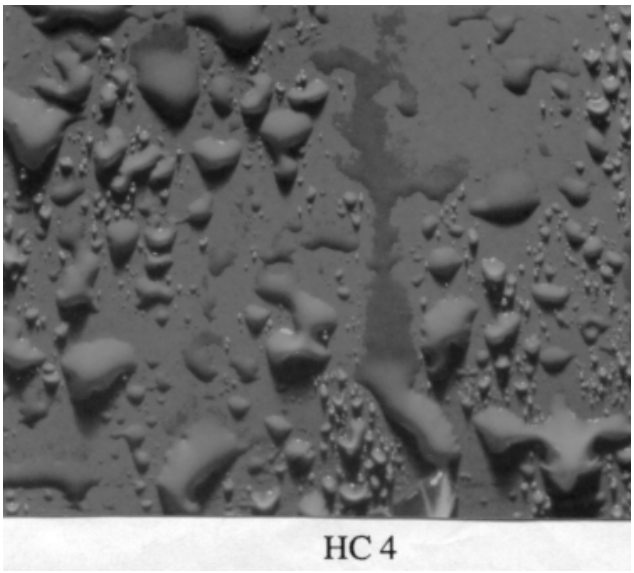
(b) Aislador sin recubrimiento - E4.



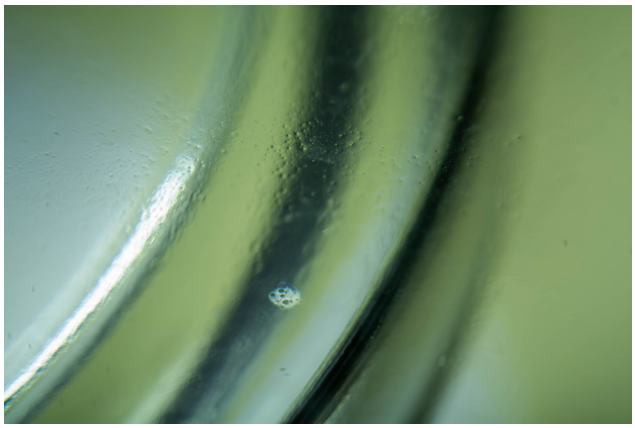
(c) Aislador con recubrimiento - E4.

Figura 7.19: Hidrofobicidad - Aislador contaminado con ambiente E4.

Finalmente, en la Figura 7.20 se presentan los resultados de la prueba de hidrofobicidad en aisladores que fueron expuestos al ambiente contaminado E5. En el aislador sin recubrir (Figura 7.20b) se tiene un HC7, en donde se forma una película completa de agua. En el aislador con recubrimiento (Figura 7.20c) se tiene una clase HC4, observando que sobre la superficie se depositan algunas gotas discretas, pero con presencia de algunos canales de agua humedecidos.



(a) Clase de hidrofobicidad HC4.



(b) Aislador sin recubrimiento - E5.



(c) Aislador con recubrimiento - E5.

Figura 7.20: Hidrofobicidad - Aislador contaminado con ambiente E5.

A partir de los resultados obtenidos, se presenta en la Tabla 7.3 el resumen de las clases de hidrofobicidad obtenidas para cada aislador y para cada tipo de superficie contaminada, incluyendo el caso base, es decir, el aislador con la superficie completamente limpia.

Tabla 7.3: Resumen resultados clase de hidrofobicidad.

Tipo de superficie	**Grado de contaminación del sitio SPS**	**HC aislador sin recubrimiento**	**HC aislador con recubrimiento**
Limpia	-	HC3	HC1
Contaminada E1	*Very light*	HC7	HC2
Contaminada E2	*Light*	HC7	HC2
Contaminada E3	*Medium*	HC7	HC2
Contaminada E4	*Medium*	HC7	HC6
Contaminada E5	*Heavy*	HC7	HC4

Con respecto a los aisladores que no tienen recubrimiento, se determinó que, por muy leve que

sea el tipo de contaminación, E1 en específico, la superficie del aislador pierde toda su capacidad de repeler el agua y se forma una película completa de agua. Lo anterior ocurre sin importar qué tan contaminada esté la superficie, ya que con todos los ambientes, se obtuvo la misma clase de hidrofobicidad HC7. El único caso en que el ocurrió algo diferente, fue la prueba en donde la superficie estaba completamente limpia, sin embargo, se determinó un HC3, con gotas en su superficie de forma irregular.

Los resultados obtenidos en aisladores con recubrimiento son completamente diferentes. Por una parte, en el caso base se determinó una clase de hidrofobicidad HC1, en otras palabras, la superficie repele y encapsula el agua, permitiendo que la superficie no se moje completamente. Por otro lado, al aumentar el nivel de contaminación de la superficie, en E1, E2 y E3 se obtuvo un HC2, en donde el material activo del recubrimiento responde de buena manera encapsulando las partículas contaminantes y permitiendo también que la superficie no se moje completamente.

En la superficie del aislador recubierto contaminada con E4, se obtuvo un HC6, en donde gran parte de la superficie se encontraba con una película de agua. Es de suponer que este fenómeno ocurre por la alta presencia de caolín en la superficie del aislador, por lo que, el material no soluble parece tener un efecto negativo en el desempeño del recubrimiento.

Finalmente, incorporando al análisis la superficie más contaminada de todas (E5), el aislador con recubrimiento responde de manera correcta pero, de todas formas, se observan algunos canales de agua que no logran ser repelidos por el material, debido a presencia de una gran cantidad de sal.

En consecuencia, según los resultados obtenidos, el recubrimiento en aisladores de vidrio mejora la hidrofobicidad del conjunto y responde de muy buena forma al aumentar el nivel de contaminación que se deposita sobre la superficie de los aisladores. Sin embargo, se debe tener especial atención en entornos que presenten una cantidad no despreciable de material soluble y no soluble, ya que, tiene un impacto negativo en la forma en que el recubrimiento encapsula la contaminación.

8. Comentarios y conclusiones

En relación con los objetivos propuestos presentados en el inicio de este documento y tomando en cuenta todo lo desarrollado a lo largo de la investigación, es posible concluir que cada uno de los objetivos fueron cumplidos satisfactoriamente. Por un lado, con respecto a la revisión bibliográfica, esta permitió recabar información relacionada con el comportamiento de los sistemas de aislación frente a distintos factores que afectan su diseño y operación, siendo el más importante, la exposición a distintos niveles de contaminación. Se logró presentar además, los diferentes parámetros, entre ellos el nivel de ESDD y NSDD, con los cuales fue posible caracterizar cada uno de los ambientes que se replicaron en los ensayos para evaluar el desempeño de la aislación. Si bien, no se llevó a cabo la metodología de ensayos normada en forma idéntica, conocer dichos procedimientos permitió adaptar y diseñar, en base a los recursos y equipos presentes en el Laboratorio de Alta Tensión de la UTFSM, el set de pruebas propuesto en el capítulo 5.

Por otro lado, en los capítulos 5 y 6, se presentaron los diferentes ensayos propuestos de este trabajo y la metodología implicada en cada uno de ellos respectivamente. Dicho diseño experimental, llevado a cabo en el laboratorio, permitió en una primera etapa, replicar los diferentes ambientes y así, relacionarlos y compararlos con los distintos entornos a los que estaría expuesta la futura línea HVDC Kimal - Lo Aguirre, basándose en el estudio presentado en *"Diseño eléctrico preliminar de la línea HVDC Kimal - Lo Aguirre"* [18]. Dicha etapa inicial fue primordial dado que, permitió seleccionar y obtener los diferentes ambientes a los cuales se expusieron tanto a aisladores sin recubrimiento como aisladores con recubrimiento en los diferentes ensayos eléctricos. De acuerdo a lo anterior, se presentaron todos los resultados en el capítulo 7, con el fin de evaluar y analizar el desempeño dieléctrico de los aisladores y el comportamiento del recubrimiento siliconado RTV.

De acuerdo a los resultados de los ensayos, se presentan a continuación los siguientes comentarios:

- En los ensayos de medición de tensión de ruptura realizados en un ambiente húmedo y en aisladores sin recubrimiento, no se obtuvo una tendencia que permita suponer de forma clara cómo se comportan los aisladores al variar el nivel de contaminación. La tensión de ruptura fue en aumento a medida que aumenta la contaminación, sin embargo, en la exposición del aislador a los ambientes con mayor cantidad de material soluble y no soluble, el valor de tensión de ruptura resultó ser menor, pero comparables con el caso base. Por lo tanto, es posible observar una variabilidad en los resultados que no aporta información para lograr determinar una tendencia.

- En los ensayos de medición de tensión de ruptura realizados en un ambiente húmedo y en aisladores con recubrimiento, se evidenció que el comportamiento de la tensión de ruptura fue en aumento a medida que aumenta la contaminación, lo cual resulta interesante, ya que mejora el desempeño dieléctrico. Sin embargo, al exponer el aislador al ambiente con un SPS *heavy* (E5), el valor de tensión de ruptura resultó ser el más bajo registrado. Además, al comparar los resultados obtenidos en aisladores con y sin recubrimiento, los resultados no muestran una tendencia ya que, en algunas ocasiones el desempeño de los aisladores mejora y en otras, empeora al incluir el recubrimiento RTV. Por tanto, se concluye que no se obtuvo una tendencia que determine que el comportamiento de tensión de ruptura mejore al utilizar el recubrimiento RTV en aisladores de vidrio expuestos a un ambiente húmedo.

- En los ensayos de medición de tensión de ruptura ante solicitación DC realizados en un ambiente seco, se obtuvieron valores de tensión de ruptura considerablemente más altos que todos los valores registrados en los ensayos en húmedo. Aunque dichos resultados no son comparables, dada la modificación de los circuitos de medición, se pone en evidencia lo crítico que resulta

para la operación de la aislación, cuando está expuesta a condiciones ambientales húmedas, por lo que, sin dudas debe tomarse en cuenta en el diseño de un determinado sistema.

- En los ensayos de medición de tensión de ruptura realizados en un ambiente seco y en aisladores sin recubrimiento, fue posible observar un comportamiento similar del valor de tensión de ruptura en la mayoría de los casos estudiados. Lo anterior descrito, se modifica drásticamente al incluir el caso con la capa de contaminación con el mayor nivel de NSDD, en donde la tensión de ruptura disminuyó de manera importante. El alto nivel de caolín y, en consecuencia, de NSDD, podría explicar esta disminución de la tensión de ruptura, ya que el material no soluble podría generar caminos preestablecidos para que se produzca el contorneo. Sin embargo, para establecer lo anterior, es necesario realizar más pruebas con diferentes niveles de NSDD. Por otra parte, al variar el nivel ESDD de los ambientes, no se observa una influencia negativa en el valor de tensión de ruptura en aisladores sin recubrimiento.

- En los ensayos de medición de tensión de ruptura realizados en un ambiente seco y en aisladores con recubrimiento, se tiene que el caso base es el que presenta el valor de tensión de ruptura más alto en comparación a todos los demás ambientes. Se observa un comportamiento decreciente de la tensión de ruptura a medida que aumenta el nivel de contaminación. Pero, con los casos con SPS *medium* y *heavy*, la tensión de ruptura tiende a ir en aumento, sin sobrepasar el caso base, lo cual es ventajoso dado que se mejora el nivel de tensión de ruptura al tener más contaminación depositada sobre la superficie de los aisladores recubiertos. Además, comparando los resultados con los aisladores sin recubrimiento, se obtienen mejores resultados en los ambientes más contaminantes cuando se incluye el recubrimiento RTV.

- En los ensayos de medición de corrientes de fuga en húmedo, se obtuvo por un lado, que en aisladores sin recubrimiento los resultados evidencian un comportamiento de la corriente de fuga que aumenta aproximadamente de forma lineal a medida que aumenta la tensión. Además, no se observa un comportamiento claro de cómo afecta la contaminación en los valores de corriente, ya que en un principio, se esperaba que con el aumento del nivel de contaminación, aumentara también la corriente de fuga, pero de acuerdo a los resultados, no ocurrió dicho fenómeno. Por otro lado, en aisladores de vidrio con recubrimiento la situación es muy distinta, comenzando por el comportamiento exponencial de la corriente de fuga en función de la tensión. Los resultados obtenidos para cada entorno son más homogéneos y no hay mayor variación en el valor de la corriente de fuga al aumentar el nivel de contaminación. Si se comparan los casos con y sin recubrimiento, es posible concluir que el recubrimiento siliconado RTV no elimina completamente las corriente de fuga, sin embargo, si disminuye su valor y su rendimiento es mejor en todos los casos en comparación a los aisladores sin recubrir.

- En los ensayos de medición de corrientes de fuga en seco, en los aisladores sin recubrimiento se evidenció que con el aumento del nivel de contaminación, aumenta también la corriente de fuga para cada escalón de tensión y tiende a comportarse de forma exponencial. En aisladores con recubrimiento, se obtuvieron resultados similares, observando la misma tendencia. Por tanto, al comparar ambos tipos de aisladores, se concluye que al utilizar el recubrimiento siliconado RTV mejora el valor de la corriente de fuga en los aisladores que presentan una capa con un alto nivel de contaminación. Además, es importante destacar que al analizar el valor de la corriente de fuga obtenida en los ensayos en seco, se observa una diferencia entre aisladores con y sin recubrimiento que es sustancialmente menor en comparación a los ensayos realizados en húmedo.

- Con respecto al nivel de hidrofobicidad determinado en la superficie contaminada de aisladores con y sin recubrimiento, fue posible observar que el recubrimiento siliconado RTV mejora el

nivel de hidrofobicidad de la superficie al variar el nivel de contaminación. Sin embargo, hay que tener especial cuidado en entornos en donde se deposita una importante cantidad de material soluble y no soluble, por lo que, podría resultar interesante analizar el desempeño dieléctrico al realizar el lavado de la aislación. Además, se observó que para todos los tipos de superficies contaminadas, los aisladores sin recubrimiento se mojan completamente y no repelen de ninguna forma el agua, pudiendo tener consecuencias negativas en su operación. Por otra parte, los resultados obtenidos en el aislador recubierto contaminado con el ambiente E4, el cual presenta un alto nivel de material no soluble, indicaron una clase de hidrofobicidad HC6, en donde gran parte de la superficie se encontraba humedecida. Es de suponer que este fenómeno podría ocurrir debido a la alta presencia de caolín en la superficie del aislador, por lo que, el material no soluble pareciera tener un efecto negativo en el desempeño del recubrimiento.

De acuerdo a lo presentado anteriormente, es posible concluir que el recubrimiento siliconado RTV analizado en esta investigación, mejora el comportamiento dieléctrico de aisladores de vidrio, en lo que a corrientes de fuga y nivel de hidrofobicidad se refiere. En tanto, los resultados obtenidos de los ensayos de tensión de ruptura no son tan concluyentes en relación a su uso. Sin embargo, disminuir la corriente de fuga resulta sumamente beneficioso, pensando en que está presente en la mayoría de casos y, que además, la prolongación en el tiempo de dicho fenómeno puede generar una ruptura o distintos problemas en cuanto a la seguridad y operación del sistema eléctrico [11].

Finalmente, luego de todo lo desarrollado a lo largo de esta investigación y teniendo en consideración que este es uno de los primeros estudios realizados en la UTFSM en el área de HVDC, se pueden realizar las siguientes recomendaciones para trabajos futuros:

1. A modo de comparación con los resultados obtenidos, sería interesante realizar un set de ensayos a aisladores con otros perfiles y de otro tipo de material. De esta forma, quizá sea posible determinar un comportamiento o tendencia similar que entregue y confirme información relevante en cuanto al desempeño de aisladores en HVDC. Adicionalmente, hay que tener en cuenta que los niveles de contaminación medidos en este trabajo dependen directamente del tipo de aislador, por lo tanto, no es posible suponer que las mismas concentraciones de sal y caolín generen los mismos ambientes en otros aisladores.

2. Es posible también estudiar otros factores que afectan el desempeño de los aisladores, por ejemplo, la polaridad de la tensión. De esta forma, se podrían obtener resultados que muestren el efecto de energizar con polaridad positiva al variar los niveles de contaminación. Comparar dichos resultados con los obtenidos en este estudio determinaría en qué medida afecta el energizar el sistema con una u otra polaridad.

3. En adición al punto anterior, se podría realizar el set de ensayos en aisladores con recubrimiento siliconado RTV envejecido aceleradamente por radiación UV. Así, podría evaluarse qué tanto afecta la radiación en el deterioro del material y con ello, su efecto en el comportamiento dieléctrico del aislador.

4. Sería recomendable analizar la posibilidad de realizar los métodos de niebla salina y capa sólida de la Norma IEC 61245 [15]. Para ello, hay que tener en consideración la cantidad de recursos que se requieren para realizar ensayos que son prolongados en el tiempo, dado que se necesita una cantidad importante de sal y caolín, pero también, fuentes de alimentación que permitan ciclos de operación constantes en el tiempo.

Referencias

[1] CIGRE, *"Outdoor insulation in polluted conditions: Guidelines for selection and dimensioning, Part 2: The DC case"*, C4.303, W.G., 2008.

[2] CIGRE, *"Outdoor insulation in polluted conditions: Guidelines for selection and dimensioning: Part 1: General principles and the AC case"*, C4.303, W.G., 2008.

[3] CIGRE TF 33.04.01, *"Polluted Insulators: A review of current knowledg", Technical Brochure*, No. 158, 2000.

[4] CIGRE TF 33.04.04, *"Artificial pollution testing of HVDC insulators analysis of factors influencing performanc"*, ELECTRA, No. 140, 1992.

[5] CIGRE Task Force 33.04.04, *"Artificial pollution testing of HVDC insulators analysis of factors influencing performanc"*, ELECTRA, No 140, February 1992, pp 99-113.

[6] Pigini A. and al. *"Performance of insulators for EHVDC systems under polluted conditions"*, Cigré Paris Session 1988, Paper 33.22.

[7] A. C. Baker, L. E. Zaffanella, L. D. Anzivino, H. M. Schneider and J. H. Moran, *"A comparison of HVAC and HVDC contamination performance of station post insulators"* in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4, no. 2, pp. 1486-1491, April 1989, doi: 10.1109/61.25636.

[8] I. Kimoto, T. Fujimura and K. Naito, *"Performance of Insulators for Direct Current Transmisson Line Under Polluted Condition"* in IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-92, no. 3, pp. 943-949, May 1973, doi: 10.1109/TPAS.1973.293660.

[9] Siti Huzaimah Kamal Hamadi, Muzamir Isa, Syahrun Nizam Md Arshad Hashim and Mardianaliza Othman, *"Review on RTV Silicone Rubber Coatings Insulator for Transmission Line"*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 864, 2nd Joint Conference on Green Engineering Technology Applied Computing 2020 4-5 February 2020, Bangkok, Thailand.

[10] Zhicheng G and Zhidong H 2002 IEEE/PES *Transmission and Distribution Conference and Exhibition* 3 2203-06

[11] IEEE, *Guide for the Application, Maintenance, and Evaluation of Room-Temperature Vulcanizing (RTV) Silicone Rubber Coatings for Outdoor Ceramic Insulators,"* in IEEE Std 1523-2018 (Revision of IEEE Std 1523-2002), vol., no., pp.1-25, 21 Dec. 2018.

[12] A. Alassi, S. Banales, O. Ellabban, G. Adam, and C. MacIver, *"HVDC Transmission: Technology Review, Market Trends and Future Outlook,"* Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 112, pp. 530 – 554, 2019.

[13] Licitación Internacional Proyecto HVDC Kimal – Lo Aguirre, Jaime Peralta: Coordinador Eléctrico Nacional, 27 octubre 2020.

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

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

[16] IEC, 62073:*"Guidance on the measurement of wettability of insulator surfaces"*, 2003.

[17] IEC 60674-2:*'Specification for plastic films for electrical purposes – Part 2: Methods of test"*, 1998.

[18] B. Cancino, *"Diseño eléctrico preliminar de la línea HVDC Kimal - Lo Aguirre"*, 2021.

[19] IEC, 60060-1: *"High-voltage test techniques. Part 1: General definitions and test requeriments"*, 2021.

[20] IEC, 60305: *"Insulators for overhead lines with a nominal voltage above 1 000 V - Ceramic or glass insulator units for AC systems - Characteristics of insulator units of the cap and pin typ"*, 2021.

[21] Recubrimiento eléctrico para equipos e insumos de Aislación Si – COAT 570 HVIC - *https://gruponti.cl/productos/recubrimiento-el%C3%A9ctrico-para-equipos-e-insumos-de-aislaci%C3%B3n-si-coat-570-hvic.*

[22] Hoja de información técnica Si-COAT® 570™ Recubrimiento de aisladores de alta tensión de silicona RTV - *https://gruponti.cl/sites/default/files/ficha_comercial_si-coat_570.pdf*

[23] Hoja de información técnica Si-COAT® 570™ Recubrimiento de aisladores de alta tensión de silicona RTV - *https://gruponti.cl/sites/default/files/ficha_tecnica_si-coat_570.pdf*

[24] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, *"Sólidos suspendidos totales en agua secados a 103-105°C*, Colombia, 2007.

[25] Hoja de datos: BAUR GmbH · 846-013-4 · 05.2019

[26] HAEFELY: "Manual de operación del MTS".

Anexos

Tablas mediciones ESDD y NSDD

Tabla 8.1: Mediciones ESDD y NSDD para cada concentración de sal y caolín utilizadas.

Concentración sal [g/l]	Concentración caolín [g/l]	Volumen solución de limpieza [ml]	Conductividad base [μS/cm]	Conductividad solución contaminada [μS/cm]	Temperatura solución contaminada [°C]	Peso papel filtro [g]	Peso papel filtro con contaminantes [g]	b	Conductividad 20°C [S/m]	Salinidad [kg/m^3]	ESSD [mg/cm^2]	NSDD [mg/cm^2]
5	1	400	1	33	17.5	0.133	0.160	0.0239530	0.0034976	0.01772703	0.004	0.02
5	1	400	1.5	34	17.5	0.138	0.168	0.0239530	0.0036036	0.01828057	0.005	0.02
5	1	400	1.3	36.7	17.6	0.137	0.174	0.0239035	0.0038805	0.01972924	0.005	0.02
5	1	400	1.7	30	17.8	0.135	0.162	0.0238052	0.0031571	0.01595218	0.004	0.02
5	1	400	1.7	30.7	17.8	0.135	0.170	0.0238052	0.0032308	0.0163357	0.004	0.02
10	10	400	1.5	210	18.4	0.135	0.185	0.0235141	0.0217901	0.11666956	0.03	0.03
10	10	400	1.6	181	18.6	0.137	0.184	0.0234185	0.0186934	0.09963011	0.03	0.03
10	10	400	1.5	203	18.3	0.135	0.187	0.0235622	0.0211131	0.11293806	0.03	0.03
10	10	400	1.7	173.4	18.4	0.135	0.178	0.0235141	0.0179924	0.09578384	0.02	0.03
10	10	400	1.7	178.8	17.9	0.135	0.185	0.0237562	0.0187720	0.10006148	0.03	0.03
10	35	400	1.8	524	18	0.133	0.176	0.0237075	0.0548845	0.30212359	0.08	0.03
10	35	400	1.2	627	17.9	0.137	0.186	0.0237562	0.0658280	0.36434596	0.09	0.03
10	35	400	1.3	635	18.1	0.136	0.186	0.0236589	0.0663544	0.3673476	0.09	0.03
10	35	400	1.1	585	18	0.137	0.195	0.0237075	0.0612738	0.3384106	0.09	0.04
10	35	400	16	670	17.9	0.133	0.185	0.0237562	0.0703425	0.39010852	0.10	0.03
12	150	400	1.3	2170	17.2	0.132	0.186	0.0241024	0.2316446	1.3314289	0.3	0.03
12	150	400	1.6	2030	17.1	0.133	0.179	0.0241525	0.2172186	1.24610612	0.3	0.03
12	150	400	2.6	2250	17	0.133	0.183	0.0242029	0.2413369	1.38884444	0.4	0.03
12	150	400	2.2	2330	16.9	0.133	0.18	0.0242534	0.2505182	1.44329651	0.4	0.03
12	150	400	1.8	2180	16.6	0.135	0.19	0.0244059	0.2360896	1.35775165	0.3	0.03
150	10	400	1	165	17.3	0.133	1.02	0.0240524	0.0175715	0.09347707	0.02	0.5
150	10	400	1.5	160	17.4	0.136	0.956	0.0240026	0.0169985	0.09033879	0.02	0.5

Tabla 8.2: Promedio mediciones ESDD y NSDD para cada concentración de sal y caolín utilizadas.

Concentración sal [g/l]	**Concentración caolín [g/l]**	**Promedio ESSD [mg/cm^2]**	**Promedio NSDD [mg/cm^2]**
5	1	0.004	0.02
10	10	0.03	0.03
10	35	0.09	0.03
12	150	0.3	0.03
150	10	0.02	0.5

Tablas mediciones tensión de ruptura

Tabla 8.3: Mediciones tensión de ruptura en aisladores sin recubrimiento en ambiente húmedo.

	Ensayo húmedo (solo agua)		
	Tensión ruptura divisor [V]	Tensión ruptura aislador [kV]	Tensión ruptura aislador normalizada [kV]
	1.972	55.0	53.7
	1.701	47.4	46.3
	1.658	46.2	45.1
	1.504	41.9	40.9
	1.609	44.8	43.8
Promedio	**1.688**	**47.1**	**45.9**

	Ensayo húmedo E1		
	Tensión ruptura divisor [V]	Tensión ruptura aislador [kV]	Tensión ruptura aislador normalizada [kV]
	1.903	53.1	52.3
	1.545	43.1	42.4
	1.463	40.8	40.1
	1.5	41.8	41.2
	1.561	43.5	42.8
Promedio	**1.594**	**44.4**	**43.8**

	Ensayo húmedo E2		
	Tensión ruptura divisor [V]	Tensión ruptura aislador [kV]	Tensión ruptura aislador normalizada [kV]
	1.925	53.7	53.2
	2.05	57.2	56.6
	1.807	50.4	49.9
	1.966	54.8	54.3
	1.919	53.5	53.0
Promedio	**1.933**	**53.9**	**53.4**

	Ensayo húmedo E3		
	Tensión ruptura divisor [V]	Tensión ruptura aislador [kV]	Tensión ruptura aislador normalizada [kV]
	2.154	60.1	59.4
	1.994	55.6	54.9
	1.889	52.7	52.0
	2.01	56.1	55.4
	1.713	47.8	47.2
Promedio	**1.952**	**54.4**	**53.8**

	Ensayo húmedo E4		
	Tensión ruptura divisor [V]	Tensión ruptura aislador [kV]	Tensión ruptura aislador normalizada [kV]
	1.976	55.1	53.8
	1.713	47.8	46.6
	1.423	39.7	38.7
	1.603	44.7	43.6
	1.511	42.1	41.1
Promedio	**1.645**	**45.9**	**44.7**

	Ensayo húmedo E5		
	Tensión ruptura divisor [V]	Tensión ruptura aislador [kV]	Tensión ruptura aislador normalizada [kV]
	1.549	43.2	42.1
	1.602	44.7	43.6
	1.741	48.5	47.3
	1.726	48.1	46.9
	1.723	48.0	46.9
Promedio	**1.668**	**46.5**	**45.4**

Tabla 8.4: Mediciones tensión de ruptura en aisladores con recubrimiento en ambiente húmedo.

	Ensayo húmedo (solo agua)		
	Tensión ruptura divisor [V]	Tensión ruptura aislador [kV]	Tensión ruptura aislador normalizada [kV]
	1.843	51.4	50.1
	1.835	51.2	49.9
	1.754	48.9	47.7
	1.864	52.0	50.7
	1.819	50.7	49.5
Promedio	**1.823**	**50.8**	**49.6**

	Ensayo húmedo E1		
	Tensión ruptura divisor [V]	Tensión ruptura aislador [kV]	Tensión ruptura aislador normalizada [kV]
	1.719	47.9	47.0
	1.659	46.2	45.4
	1.619	45.1	44.3
	1.642	45.8	44.9
	1.616	45.0	44.2
Promedio	**1.651**	**46.0**	**45.1**

	Ensayo húmedo E2		
	Tensión ruptura divisor [V]	Tensión ruptura aislador [kV]	Tensión ruptura aislador normalizada [kV]
	1.931	53.8	53.2
	1.664	46.4	45.9
	1.675	46.7	46.2
	1.654	46.1	45.6
	1.761	49.1	48.5
Promedio	**1.737**	**48.4**	**47.9**

	Ensayo húmedo E3		
	Tensión ruptura divisor [V]	Tensión ruptura aislador [kV]	Tensión ruptura aislador normalizada [kV]
	1.958	54.6	54.4
	1.726	48.1	47.9
	1.719	47.9	47.7
	1.775	49.5	49.3
	1.626	45.3	45.2
Promedio	**1.760**	**49.1**	**48.9**

	Ensayo húmedo E4		
	Tensión ruptura divisor [V]	Tensión ruptura aislador [kV]	Tensión ruptura aislador normalizada [kV]
	1.94	54.1	52.8
	1.896	52.9	51.6
	1.942	54.2	52.8
	1.973	55.0	53.7
	2.007	56.0	54.6
Promedio	**1.951**	**54.4**	**53.1**

	Ensayo húmedo E5		
	Tensión ruptura divisor [V]	Tensión ruptura aislador [kV]	Tensión ruptura aislador normalizada [kV]
	1.597	44.5	43.7
	1.431	39.9	39.2
	1.445	40.3	39.6
	1.599	44.6	43.8
	1.453	40.5	39.8
Promedio	**1.505**	**41.9**	**41.2**

Tabla 8.5: Mediciones tensión de ruptura en aisladores sin recubrimiento en ambiente seco.

	Ensayo seco (limpio)	
	Tensión de ruptura medida [kV]	Tensión de ruptura normalizada [kV]
	155	158.2
	155	158.2
	175	178.6
	175	178.6
	180	183.8
Promedio	**168**	**171.5**

	Ensayo seco (capa contaminación E1)	
	Tensión de ruptura medida [kV]	Tensión de ruptura normalizada [kV]
	168	172.5
	164	168.4
	168	172.5
	168	172.5
	172	176.6
Promedio	**168**	**172.5**

	Ensayo seco (capa contaminación E2)	
	Tensión de ruptura medida [kV]	Tensión de ruptura normalizada [kV]
	172	177.0
	168	172.9
	164	168.8
	164	168.8
	168	172.9
Promedio	**167.2**	**172.1**

	Ensayo seco (capa contaminación E3)	
	Tensión de ruptura medida [kV]	Tensión de ruptura normalizada [kV]
	172	176.5
	172	176.5
	168	172.4
	168	172.4
	168	172.4
Promedio	**169.6**	**174.1**

	Ensayo seco (capa contaminación E4)	
	Tensión de ruptura medida [kV]	Tensión de ruptura normalizada [kV]
	108	112.0
	112	116.1
	116	120.3
	116	120.3
	116	120.3
Promedio	**113.6**	**117.8**

	Ensayo seco (capa contaminación E5)	
	Tensión de ruptura medida [kV]	Tensión de ruptura normalizada [kV]
	156	160.2
	156	160.2
	160	164.3
	160	164.3
	160	164.3
Promedio	**158.4**	**162.7**

Tabla 8.6: Mediciones tensión de ruptura en aisladores con recubrimiento en ambiente seco.

	Ensayo seco (limpio)	
	Tensión de ruptura medida [kV]	Tensión de ruptura normalizada [kV]
	176	180.6
	172	176.5
	174	178.5
	172	176.5
	168	172.4
Promedio	**172.4**	**176.9**

	Ensayo seco (capa contaminación E1)	
	Tensión de ruptura medida [kV]	Tensión de ruptura normalizada [kV]
	160	164.2
	160	164.2
	160	164.2
	160	164.2
	160	164.2
Promedio	**160**	**164.2**

	Ensayo seco (capa contaminación E2)	
	Tensión de ruptura medida [kV]	Tensión de ruptura normalizada [kV]
	156	160.1
	158	162.2
	158	162.2
	160	164.3
	160	164.3
Promedio	**158.4**	**162.6**

	Ensayo seco (capa contaminación E3)	
	Tensión de ruptura medida [kV]	Tensión de ruptura normalizada [kV]
	156	160.1
	156	160.1
	158	162.1
	156	160.1
	152	156.0
Promedio	**155.6**	**159.7**

	Ensayo seco (capa contaminación E4)	
	Tensión de ruptura medida [kV]	Tensión de ruptura normalizada [kV]
	156	161.6
	156	161.6
	156	161.6
	156	161.6
	156	161.6
Promedio	**156**	**161.6**

	Ensayo seco (capa contaminación E5)	
	Tensión de ruptura medida [kV]	Tensión de ruptura normalizada [kV]
	172	176.5
	172	176.5
	170	174.5
	172	176.5
	172	176.5
Promedio	**171.6**	**176.1**

Tablas mediciones corrientes de fuga

Tabla 8.7: Mediciones corrientes de fuga en aisladores sin recubrimiento en ambiente húmedo.

Ensayo húmedo (solo agua)	
Tensión [kV]	Corriente de fuga [µA]
5	0.535
10	0.990
15	1.46
20	2.20
25	2.90
30	4.18

Ensayo húmedo E1	
Tensión [kV]	Corriente de fuga [µA]
5	0.224
10	0.702
15	1.50
20	2.21
25	3.28
30	4.33

Ensayo húmedo E2	
Tensión [kV]	Corriente de fuga [µA]
5	2.40
10	4.09
15	6.29
20	9.63
25	11.76
30	15.88

Ensayo húmedo E3	
Tensión [kV]	Corriente de fuga [µA]
5	1.13
10	1.93
15	3.06
20	3.68
25	4.22
30	6.00

Ensayo húmedo E4	
Tensión [kV]	Corriente de fuga [µA]
5	0.230
10	0.612
15	1.01
20	1.36
25	2.39
30	3.86

Ensayo húmedo E5	
Tensión [kV]	Corriente de fuga [µA]
5	0.679
10	0.896
15	1.38
20	1.69
25	2.34
30	2.71

Tabla 8.8: Mediciones corrientes de fuga en aisladores con recubrimiento en ambiente húmedo.

Ensayo húmedo (solo agua)	
Tensión [kV]	Corriente de fuga [µA]
5	0.0473
10	0.060
15	0.0687
20	0.233
25	0.383
30	0.633

Ensayo húmedo E1	
Tensión [kV]	Corriente de fuga [µA]
5	0.0394
10	0.0528
15	0.0881
20	0.202
25	0.518
30	1.12

Ensayo húmedo E2	
Tensión [kV]	Corriente de fuga [µA]
5	0.020
10	0.050
15	0.090
20	0.120
25	0.209
30	0.872

Ensayo húmedo E3	
Tensión [kV]	Corriente de fuga [µA]
5	0.040
10	0.050
15	0.154
20	0.353
25	0.659
30	1.46

Ensayo húmedo E4	
Tensión [kV]	Corriente de fuga [µA]
5	0.152
10	0.206
15	0.301
20	0.423
25	0.648
30	1.43

Ensayo húmedo E5	
Tensión [kV]	Corriente de fuga [µA]
5	0.0870
10	0.0954
15	0.178
20	0.325
25	0.628
30	1.03

Tabla 8.9: Mediciones corrientes de fuga en aisladores sin recubrimiento en ambiente seco.

Ensayo seco (limpio)	
Tensión [kV]	Corriente de fuga [µA]
20	0.0187
40	0.0914
60	0.199
80	0.604
100	1.18

Ensayo seco (capa contaminación E1)	
Tensión [kV]	Corriente de fuga [µA]
20	0.0272
40	0.113
60	0.351
80	0.921
100	2.43

Ensayo seco (capa contaminación E2)	
Tensión [kV]	Corriente de fuga [µA]
20	0.0146
40	0.0774
60	0.181
80	0.950
100	8.24

Ensayo seco (capa contaminación E3)	
Tensión [kV]	Corriente de fuga [µA]
20	0.0177
40	0.134
60	0.329
80	1.80
100	10.33

Ensayo seco (capa contaminación E4)	
Tensión [kV]	Corriente de fuga [µA]
20	0.103
40	0.208
60	4.99
70	12.33

Ensayo seco (capa contaminación E5)	
Tensión [kV]	Corriente de fuga [µA]
20	3.28
40	4.68
60	6.26
80	7.82
100	10.74

Tabla 8.10: Mediciones corrientes de fuga en aisladores con recubrimiento en ambiente seco.

Ensayo seco (limpio)	
Tensión [kV]	Corriente de fuga [µA]
20	0.112
40	0.258
60	0.391
80	0.757
100	2.65

Ensayo seco (capa contaminación E1)	
Tensión [kV]	Corriente de fuga [µA]
20	0.0235
40	0.250
60	0.622
80	0.953
100	3.52

Ensayo seco (capa contaminación E2)	
Tensión [kV]	Corriente de fuga [µA]
20	0.0152
40	0.139
60	0.262
80	0.897
100	6.14

Ensayo seco (capa contaminación E3)	
Tensión [kV]	Corriente de fuga [µA]
20	0.0348
40	0.324
60	0.499
80	1.28
100	7.82

Ensayo seco (capa contaminación E4)	
Tensión [kV]	Corriente de fuga [µA]
20	0.0640
40	0.151
60	2.38
80	14.1
90	26.8

Ensayo seco (capa contaminación E5)	
Tensión [kV]	Corriente de fuga [µA]
20	0.0165
40	0.0254
60	0.688
80	1.92
100	11.17