UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

VALPARAISO - CHILE

Estudio y evaluación de un recubrimiento nano-dieléctrico para uso en aisladores

Felipe Esteban Hernández Ahumada

Memoria para optar al Título de

Ingeniero Electricista

Profesor Guía

Roger Schürch Brandt

Profesor Co-referente

Johny Montaña Chaparro

Abril 2018

A mis Padre, Madre y hermanos por todo el sacrificio, amor y apoyo incondicional.

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a mi familia, en especial a mis padres, Miguel y Adela, y a mis hermanos Miguel, Camilo y Catalina, por todo su amor y apoyo incondicional en los momentos más difíciles. A ellos dedico este trabajo.

Al Departamento de Ingeniería Eléctrica (DIE), principalmente a mis profesores guía, en especial al Dr. Roger Schürch Brandt, por su confianza, paciencia, colaboración y consejos que me ayudaron para el desarrollo de esta memoria. Además, agradecer al Dr. Johny Montaña Chaparro por su disposición a ayudar con dedicación cada vez que se solicitaba.

También agradecer a los profesores del área de Alta Tensión Javier Ríos y Juan Navarrete por estar siempre dispuesto a ayudarme con la mejor disposición, al igual que a toda la gente del Pañol de Electricidad: Don Ricardo Rosales, Cristian Andrades, Cristian Videla y Claudio Ramos.

Agradezco también a las empresas Transelec S.A que me aportó con los aisladores de vidrio templado y a Silpak por colaborar con las placas poliméricas. También le doy las gracias a Felipe Pacheco de la empresa Adrox quien fue el que motivó el estudio de su producto de nano-partículas mediante el contacto de Don Javier Ramírez del Advance Center for Electrical and Electronic Engineering AC3E-UTFSM, quien fue Él quien personalmente se acercó al Departamento de Ingeniería Eléctrica para hacer los estudios que justificaron esta memoria.

Hago un agradecimiento muy especial y cálido a mis profesores Don Ricardo Fuentes y Don Gastón Fourniés, quienes fueron en algunos momentos como unos padres para mí, ya que sin su sabiduría y consejos puede que haya dado un paso al lado en seguir en esta hermosa carrera.

Por último, a mis grandes amigos y futuros colegas con los que compartí largos años de carrera e hicieron que mi experiencia universitaria fuese hermosa.

UTFSM – 2018

Material de referencia, su uso no involucra responsabilidad del autor o de la institución.

Resumen

En este trabajo se cumplió con evaluar y analizar el comportamiento en el mediano plazo del producto de nano-recubrimiento dieléctrico llamado “Standard”, en aisladores de vidrio recubiertos y sin recubrir con este producto, basado en la prescripción del procedimiento normalizado de la norma ANSI C.29.1 y ANSI C.29.11 para la medición de tensión de contorneo en condición seca y húmeda. Para cumplir el objetivo de evaluar y analizar el recubrimiento en el mediano plazo, antes de ensayar los aisladores con y sin recubrimiento, se sometieron a distintos escenarios de degradación tales como contaminación a la intemperie, radiación UV y bajo techo.

En el Capítulo 3 se expone como se realizaron los ensayos de contorneo a aisladores de vidrio templado de clase 80 kV con y sin recubrimiento para condición seca y húmeda. Para cada condición de ensayo, los aisladores se degradaron previamente bajo tres condiciones diferentes durante tres meses: bajo techo, radiación UV y a la intemperie. Además se presentaron dos condiciones adicionales que se realizaron con el objetivo de simular un mantenimiento preventivo de lavado de aisladores posterior a la degradación a la intemperie; de esta manera se pudo obtener una noción de cómo se comportaría la superficie con el producto al ser lavado con un caudal a presión de agua desmineralizada.

En la Tabla A se pueden observar los resultados generales que se obtuvieron previo a la degradación (sin degradar) y posterior al periodo de degradación total (3 meses).

Tabla A. Comparación de resultados de ensayos en aisladores

	Condición Seca [kV]					Condición Húmeda [kV]				
	Con RN				Sin RN	Con RN				Sin RN
	BT	UV	INT	COND1	INT	BT	UV	INT	COND2	INT
Sin degradar	89,5	89,5	89,5	86,1	90,9	74,2	74,2	74,2	68,5	69,7
3 meses de degradación	80,4	78,6	78,9	78,6	87,2	58,9	56	52,8	61,6	-
Diferencia %	↓10	↓12	↓12	↓12	↓4	↓21	↓25	↓29	↓10	-

BT: degradación bajo techo / UV: degradación en radiación UV / INT: degradación a la intemperie /COND1: aisladores previamente ensayados en seco para ser lavados y ser nuevamente ensayados en seco / COND 2: aisladores previamente ensayados en condición húmeda para ser lavados y ser ensayados nuevamente en condición húmeda / RN: producto de recubrimiento.

De los resultados obtenidos para ensayos bajo condición seca, se puede decir que los aisladores recubiertos sufrieron una mayor disminución de tensión de contorneo respecto a los aisladores sin recubrir, producto de la contaminación depositada sobre su superficie. El producto tuvo un comportamiento de adhesión de la suciedad, más que repelerla. En comparación con los resultados de aisladores que no fueron recubiertos, estos presentaron un mejor desempeño respecto a la limpieza de su superficie, por lo cual se ve menos afectado el resultado de tensión de contorneo.

Para los resultados en condición húmeda se puede decir que le caso más favorable fue el de condición 2 (aislador ensayado previamente en condición húmeda para luego ser lavado y ser nuevamente ensayado bajo la misma condición), donde se observó que un lavado superficial del aislador con producto ayuda a purgar la superficie, dando como resultado un aumento en su tensión de contorneo. Además su estado hidrófobo mejoró después del lavado. Para el caso húmedo sin recubrimiento, se hizo una sola medición dado que estos aisladores (2 unidades) se reutilizaron para ser parte de los aisladores que fueron degradados a la intemperie sin RN, para luego ser nuevamente ensayados en seco como se mostrará en la Sección 3.4.2.2.

En el Capítulo 4 se analizaron los resultados de erosión y tracking del ensayo en plano inclinado aplicado a placas poliméricas y vítreas recubiertas con producto nano-dieléctrico y sin este, utilizando como guía la norma IEC 60587, cumpliendo con el objetivo propuesto de evaluar la resistencia a la degradación del recubrimiento para ambos tipos de aisladores ante descargas superficiales mediante procedimientos normalizados usando placas de material polimérico y de vidrio.

A continuación se presentan la comparación de resultados finales para cada uno de los casos estudiados para las placas de material poliméricos y de vidrio. Los casos que se estudiaron fueron degradación de placas con recubrimiento y sin este ante escenarios tales como: sin degradar, radiación UV e Intemperie.

De los resultados obtenidos (ver Tabla B) de los ensayos realizados a placas poliméricas, se puede decir que el escenario que más afectó en el deterioro de las placas fue la degradación bajo radiación UV sin recubrir, donde las placas se expusieron a una foto-degradación y termo-descomposición [1]. Sin embargo, se puede decir que el recubrimiento protege en cierta medida la superficie de la placa, debido a que las placas que se degradaron recubiertas bajo UV sufrieron menos erosión (3,12 mm) que las placas que fueron degradadas y luego recubiertas antes de ser ensayadas (5,06 mm), las que incluso perforaron la placa. A pesar de esto, tuvieron similar característica de erosión (orificios con forma similar).

Tabla B. Resultados de ensayos de tracking y erosión a placas poliméricas

Resultados placas poliméricas	
Tipo	Calificación
Sin recubrir y sin degradar	Clase 1B 3,5 – 2,8
Recubierta y sin degradar	Clase 1B 3,5 – 2,07
Recubierta y degradada en UV	Clase 1B 2,5 – 3,12
Degradadas en UV y luego recubiertas	Clase 1B 2,5 – 5,06
Sin recubrir y degradadas a la intemperie	Clase 1B 2,5 – 3,95
Recubierta y degradada a la intemperie	Clase 1B 2,5 – 4,26

Para el caso de los ensayos realizados a placas de vidrio, se hace una comparación mediante las corrientes superficiales promedio registradas para cada caso de degradación y según cada nivel de tensión ensayado. De los resultados obtenidos (ver Tabla C) se puede decir que el caso más desfavorable (el que tuvo mayor magnitud de corriente) fue el ensayo de placa de vidrio que se degradó previamente a la intemperie sin recubrir, alcanzando un valor de corriente promedio de 6,144 mA para el caso de tensión de ensayo de 2,5 kV y 8,055 mA para el caso de 3,5 kV de tensión de ensayo. Esto se debe a que se pudo observar gran cantidad de depósito de contaminación sobre su superficie. Sin embargo, se pude decir que para el mismo escenario de degradación y similares características de depósitos de contaminación, pero con su superficie recubierta, disminuye la magnitud de corriente. Esto da un indicador de que, para este caso, el producto de recubrimiento funciona (en cierta medida) como supresor de corriente superficial ante agentes contaminantes. Se dice que fue para este caso, debido a que en el mismo escenario de degradación sobre placas poliméricas tuvo un resultado adverso.

Tabla C. Resultados de ensayo de tracking y erosión para placas de vidrio

Placas de vidrio	Corriente promedio registrada [mA]	
Nivel de tensión / Tipo	2,5 [kV]	3,5 [kV]
Placa sin recubrimiento y sin degradar	5,963	5,103
Placa con recubrimiento y sin degradar	4,218	6,235
Placa con recubrimiento degrada en UV	4,267	4,944
Placa sin recubrimiento y degradada a la intemperie	6,144	8,055
Placa con recubrimiento y degradada a la intemperie	4,969	5.111

Finalmente en el Capítulo 5 se propuso una metodología de aplicación del recubrimiento en los aisladores tanto para la condición de servicio como fuera de él, cumpliendo con el objetivo propuesto.

Para aisladores que estén nuevos, instalados y a punto de operar, se recomienda el uso de la tecnología Airless, utilizando aire comprimido para obtener una película más fina y acabada en la superficie. Se necesita este tipo de tecnología de rociamiento para aisladores que estén en líneas energizadas, mediante el uso de una vara hot stick.

Contenido

Agradecimientos 3
Resumen 5
Capítulo 1. Introducción 7
Capítulo 2 Aisladores en ambientes contaminados 10
2.1 Introducción 10
2.2 Información sobre Norma IEC 60815-Parte 1 11
2.3 Mecanismos de contorneo por contaminación 21
2.3.2 Descripción del mecanismo de contorneo por contaminación Tipo B 23
2.3.3 Mecanismo de contorneo por contaminación sobre superficies hidrófobas. 23
2.4 Métodos para prevenir el contorneo en aisladores 24
Capítulo 3. Ensayos de tensión de contorneo en aisladores de vidrio 27
3.1 Introducción 27
3.2 Objeto de prueba 27
3.2 Descripción del producto bajo estudio 27
3.3 Metodología de ensayo 28
3.3.1 Plan de ensayos y distribución de probetas. 28
3.3.2 Cámara de radiación UV 32
3.3.3 Ensayos eléctricos 33
3.4 Resultados 34
3.4.1 Resultados degradación bajo techo. 35
3.4.2 Resultados de ensayos para aisladores previamente degradados a la intemperie 39
3.4.3 Resultados de ensayos para aisladores previamente degradados en radiación UV 47
3.4.3.1 Resultados de ensayos en condición seca para aisladores previamente degradados en radiación UV 48
3.4.4 Comparación de resultados según condición de ensayo 52
3.4.5 Ensayos de aisladores lavados 56
3.5 Comparación de resultados de ensayos en aisladores 61
3.6 Conclusiones 62
Capítulo 4. Estudio para evaluar la resistencia a carbonización y erosión eléctrica 67
4.1 Introducción al ensayo 67
4.1.2 Descripción y disposiciones generales de la norma IEC 60587 67
4.1.3 Procedimiento de evaluación 71
4.2 Presentación del ensayo 73

4.3 Objeto de prueba 73
4.3.1 Dimensión de las placas 73
3.4 Circuito de ensayo utilizado 73
4.5 Condiciones previas al ensayo 76
4.6 Procedimiento y método utilizado 77
4.7 Resultados placas poliméricas 78
4.7.1 Resultados placas poliméricas sin degradar 79
4.7.2 Resultados placas degradadas en radiación UV 85
4.7.3 Resultados placas degradadas a la intemperie 89
4.8 Resultados ensayos a placas de vidrio 91
4.8.1 Resultados placas de vidrio sin degradar 91
4.8.2 Resultados placas de vidrio degradadas bajo radiación UV 95
4.8.3 Resultados placas de vidrio degradadas a la intemperie 97
4.9 Comparación de resultados ensayo de tracking y erosión para placas poliméricas y vítreas. 100
4.10 Conclusiones 101
Capítulo 5. Método propuesto para recubrir aisladores 104
5.1 Espesor de la capa del recubrimiento. 104
5.2 Aplicación del producto 104
5.2.1 Aplicación desenergizado 104
5.2.2 Aplicación en red energizada 105
5.3 Re-aplicación 106
5.4 Conclusiones 106
Capítulo 6. Conclusiones generales, recomendaciones y trabajos futuros 108
6.1 Conclusiones generales 108
6.2 Recomendaciones 109
6.3 Trabajo futuro 111
Referencias 113
Anexo 1. Tablas de mediciones de ensayo de contorneo en aisladores de vidrio 115
1. Ensayo preliminar antes de degradación bajo techo 115
Anexo 2. Resultados de Laboratorio de Química UTFSM. 134

Índice de Tablas

Tabla 1. Índice de contaminación del medidor direccional del depósito de polvo en relación con la clase SPS 18
Tabla 2. Corrección de la clase de severidad de la contaminación en el sitio en función de los niveles de depósito no soluble (NSD) del DDDG 19
Tabla 3. Ejemplos de ambientes típicos 20
Tabla 4. Cantidad de aisladores con y sin recubrimiento por cada ambiente de degradación. 28
Tabla 5. Cantidad de aisladores para cada ronda de ensayos. 31
Tabla 6. Resultados ensayo de aisladores con RN en condición seca y húmeda degradados bajo techo durante 3 meses. 36
Tabla 7. Resultados de ensayo a aisladores degradados a la intemperie en condición seca. 41
Tabla 8. Resultados de ensayo a aisladores a la intemperie en condición húmeda 46
Tabla 9. Resultados de ensayo a aisladores bajo degradación UV en condición seca. 49
Tabla 10. Resultados de ensayo a aisladores bajo degradación UV en condición húmeda. 50
Tabla 11. Comparación de resultados en condición seca. 53
Tabla 12. Comparación de resultados en condición húmeda. 55
Tabla 13. Comparación de resultados entre intemperie y condición 1 59
Tabla 14. Comparación de resultados entre intemperie y condición 2 60
Tabla 15. Comparación de resultados de ensayos en aisladores 62
Tabla 16. Caudal en función de la tensión 70
Tabla 17. Registro de resistividad de la solución contaminante. 77
Tabla 18. Resultados para placas sin recubrir y sin degradar ensayadas a 2,5 kV. 81
Tabla 19. Resultados para placas sin recubrir y sin degradar ensayadas a 3,5 kV. 82
Tabla 20. Resultados para placas con recubrimiento y sin degradar ensayadas a 3,5 kV. 85
Tabla 21. Resultados para placas recubiertas y degradadas en UV ensayadas a 2,5 kV. 86
Tabla 22. Resultados para placas degradadas en UV y luego recubiertas ensayadas a 2,5 kV 88
Tabla 23. Resultados de placas recubiertas y degradadas a la intemperie ensayadas a 2,5 kV 90
Tabla 24. Resultados de placas de vidrio sin recubrir y sin degradar. 93
Tabla 25. Resultados de placas de vidrio recubiertas sin degradar. 95
Tabla 26. Resultados de placas de vidrio recubiertas y degradadas bajo UV 95
Tabla 27. Resultados placas de vidrio sin producto degradas a la intemperie 97
Tabla 28. Resultados placas de vidrio recubiertas y degradadas a la intemperie 99
Tabla 29. Resultados de placas poliméricas en Ensayo de erosión y tracking 101
Tabla 30. Resultados de placas de vidrio para ensayo de erosión y tracking 101

Índice de diagramas

Diagrama 1. Circuito de ensayo para aisladores de suspensión. 34
Diagrama 2. Modelo de montaje para ensayo de Tracking y erosión. 68
Diagrama 3. Electrodo superior de acero inoxidable. 68
Diagrama 4. Electrodo inferior de acero inoxidable..... 69
Diagrama 5. Dimensiones de Papel filtro..... 69
Diagrama 6. Dimensiones de la placa 70
Diagrama 7. Circuito de medición para ensayo de tracking y erosión. 70

Índice de fotografías

Fotografía 1. Producto y brocha 29
Fotografía 2. Aislador con producto 29
Fotografía 3. Montaje aisladores a la intemperie 30
Fotografía 4. Montaje para aisladores bajo Radiación UV 30
Fotografía 5. Montaje aisladores bajo techo 31
Fotografía 6. Cámara UV 32
Fotografía 7. Ampolletas UV 32
Fotografía 8. Montaje circuito de ensayo de aisladores 33
Fotografía 9. Ensayo húmedo 33
Fotografía 10. Tablero de control y medición 33
Fotografía 11. Estado hidrófobo aislador con RN sin degradar 35
Fotografía 12. Estado hidrófobo aislador con RN sin degradar después de ensayo húmedo 36
Fotografía 13. Aislador con RN degradado tres meses bajo techo 37
Fotografía 14. Estado hidrófobo de aislador con RN degradado tres meses bajo techo 37
Fotografía 15. Estado hidrófobo de aislador con RN degradado bajo techo luego de ensayo húmedo 38
Fotografía 16. Aislador con RN degradado durante un mes a la intemperie 39
Fotografía 17. Aislador con RN degradado durante dos meses a la intemperie 39
Fotografía 18. Aislador con RN degradado durante tres meses a la intemperie 40
Fotografía 19.Aislador sin producto degradado a la intemperie por dos meses 40
Fotografía 20. Aislador sin producto degradado a la intemperie por tres meses 40
Fotografía 21. Implementos para extraer contaminación de aislador 43
Fotografía 22. Aislador limpio y reservorio de contaminante 43
Fotografía 23. Estado hidrófobo de aislador después de estar un mes degradado a la intemperie 44
Fotografía 24. Estado hidrófobo de aislador degradado durante un mes después de ensayo húmedo 44
Fotografía 25. Estado hidrófobo de aislador degradado a la intemperie durante dos meses 45
Fotografía 26. Estado hidrófobo de aislador degradado de la intemperie durante dos meses después de ensayo húmedo 45
Fotografía 27. Estado hidrófobo de aislador con RN degradado a la intemperie durante 3 meses 45
Fotografía 28. Estado hidrófobo de aislador con RN degradado a la intemperie durante 3 meses después de ensayo húmedo 45
Fotografía 29. Superficie hidrófoba de aislador sin producto 46
Fotografía 30. Aspecto aislador recubierto y degradado un mes bajo UV 48
Fotografía 31. Estado hidrófobo aislador degradado en UV durante un mes 50
Fotografía 32. Estado hidrófobo aislador degradado en UV durante tres meses después de ensayo húmedo 50
Fotografía 33. Aspecto de aislador degradado bajo UV luego de ensayo húmedo 51
Fotografía 34. Aspecto de aisladores degradados en UV después de ensayo húmedo 52
Fotografía 35. Aspecto de superficie aisladores previamente degradados a la intemperie y luego lavados 58
Fotografía 36. Estado hidrófobo de aisladores después de lavarlos 61
Fotografía 37. Superficie de placas poliméricas de prueba 74
Fotografía 38. Superficies de placas vítreas de prueba 75
Fotografía 39. Circuito plano inclinado 76
Fotografía 40. Electrodos y plataforma de soporte 76

Fotografía 41. Montaje y caudal en Placa polimérica 79
Fotografía 42. Comienzo tracking y erosión 79
Fotografía 43. Camino dejado por tracking y erosión 79
Fotografía 44. Placas sin recubrir y sin degradar a tensión 2,5 kV 81
Fotografía 45. Descargas a 3,5 kV 83
Fotografía 46. Camino tracking y erosión 83
Fotografía 47. Placa 3.1 83
Fotografía 48. Placas sin recubrir y sin degradar a tensión 3,5 kV 83
Fotografía 49. Placa 4 84
Fotografía 50. Placas con recubrimiento y sin degradar a 3,5 kV 85
Fotografía 51. Placas Previamente degradadas en UV y luego recubiertas 87
Fotografía 52. Placas recubiertas y degradadas en UV 89
Fotografía 53. Placa a la intemperie sin recubrimiento 90
Fotografía 54. Placas a la intemperie con recubrimiento 91
Fotografía 55. Placas de prueba vítreas. 92
Fotografía 56. Rotura de placa de vidrio 93
Fotografía 57. Placa 2 sin producto y sin degradar a 2,5 kV 94
Fotografía 58. Placa recubierta sin degradar a 2,5 kV 94
Fotografía 59. Placa recubierta sin degradar a 3,5 kV 95
Fotografía 60. Placa recubierta y degrada en UV a 2,5 kV 96
Fotografía 61.Placa recubierta y degrada en UV a 3,5 kV 97
Fotografía 62. Placa sin recubrir y expuesta a la intemperie a 2,5 kV 98
Fotografía 63. Placa sin recubrir y expuesta a la intemperie a 3,5 kV 98
Fotografía 64. Placa recubierta y expuesta a la intemperie a 2,5 kV 99

Índice de figuras

Figura 1. Severidad de la contaminación en sitios Tipo A. Relación entre ESDD/NSDD y SPS para el aislador de caperuza y vástago de referencia 17
Figura 2. Severidad de la contaminación en sitios Tipo A. Relación entre ESDD/NSDD y SPS para el aislador de barra larga de referencia 18
Figura 3. Severidad de la contaminación entre sitios Tipo B. Relación entre SES y SPS para aisladores de referencia o un monitor 18

Capítulo 1. Introducción

Con el aumento progresivo de la población mundial y el acelerado desarrollo industrial, los centros de consumo de energía eléctrica se hacen cada vez más grandes. Para satisfacer esta creciente demanda energética, es necesario instalar nuevas centrales generadoras, subestaciones y líneas de alta tensión.

Dentro de los componentes estructurales de una línea de transmisión de alta tensión se encuentran los aisladores. Los aisladores cumplen con una función mecánica y eléctrica. Se utilizan fundamentalmente para sujetar los conductores de manera que no se muevan en sentido longitudinal o transversal y deben evitar la derivación de la corriente de la línea hacia tierra, ya que un aislamiento defectuoso produce fallas y consigo el aumento del gasto de explotación comercial del sistema.

Comúnmente las centrales generadoras se encuentran alejadas de los centros de consumo, por lo que las líneas de transmisión recorren, en su largo trayecto, diferentes topografías donde sus cadenas de aisladores quedan expuestas a diversos factores externos, tales como radiación, humedad y contaminación, los cuales perjudican el buen funcionamiento del sistema aislante al producir descargas superficiales y eventuales contorneos que interrumpirían el servicio eléctrico. Las descargas superficiales producen un deterioro significativo en los aisladores, y los contorneos son fallas que afectan la calidad del suministro eléctrico, por lo que las empresas eléctricas invierten recursos para prevenir estos efectos.

Si bien los problemas que se pueden generar en condiciones adversas de contaminación en redes eléctricas son conocidos y han sido estudiados, aún no se conocen soluciones satisfactorias, y tampoco existe un consenso general de opciones, ya que la problemática en sí es compleja. Las diferencias radican fundamentalmente en que sólo es posible un tratamiento indirecto del proceso de contaminación de los aisladores y sus consecuencias, además surgen discrepancias en la gran variedad de ambientes al cual se ven enfrentados los aisladores. De lo anterior se desprende que cada posible solución contra la contaminación en aisladores, depende del ambiente o región de interés al cual se exponga dicho aislamiento.

Se han desarrollado diferentes métodos para prevenir el contorneo de los aisladores mediante la disminución y retardo del efecto de la contaminación en las cadenas de aisladores. Entre éstos métodos se pueden mencionar el lavado periódico de los aisladores, aplicación de grasas, sobredimensionamiento, diseño e implementación de nuevos materiales, entre otros [2] [3].

Dentro de los materiales más utilizados en aisladores están los materiales poliméricos, que por sus características hidrofóbicas dificultan la formación de caminos conductivos en la superficie del aislador, mejorando el desempeño de los mismos. Sin embargo, algunos aisladores poliméricos, en el área de alta tensión, presentan fallas mecánicas y carbonización producto de descargas, y por esta razón algunas empresas de transmisión de energía eléctrica

no implementan su uso. En cambio los aisladores de cerámicas y vidrio templado son confiables en cuanto a su resistencia mecánica, pero sus propiedades hidrofóbicas son inferiores a los poliméricos. Se han desarrollado recubrimientos para los aisladores de cerámica y de vidrio templado, permitiendo a estos adquirir las características hidrofóbicas de los materiales poliméricos. El recubrimiento evita la necesidad de remplazar las cadenas de aisladores existentes por aisladores poliméricos para mejorar su desempeño y sin poner en riesgo la resistencia mecánica de los mismos [4].

El recubrimiento que ha tenido mayor éxito y aceptación en la actualidad es el revestimiento de silicona RTV (Room temperature Vulcanizing), donde su mayor característica es la capacidad de suprimir la corriente de fuga, y por tanto, las descargas disruptivas. Sin embargo, este producto aún sigue en proceso de prueba y estudio [5] [4].

Adrox es una empresa que se dedica a innovar en productos de nano partículas. Un par de sus productos son dos líquidos que están en proceso de prueba para ser utilizados como recubrimiento en aislantes eléctricos. Los productos son llamados como STD ("standard") y HD ("heavy duty").

La empresa Adrox se acercó, por medio del centro de investigación AC3E, al Laboratorio de Alta Tensión de la USM Casa Central, en busca de pruebas eléctricas con el fin de evaluar su producto. Se realizaron ensayos de tensión de contorneo efectuados a aisladores poliméricos tipo pin y separadores poliméricos de clase 15 kV recubiertos con productos de nano-dieléctricos. Los aisladores fueron ensayados bajo condiciones seca, húmeda y contaminada.

En base a los ensayos realizados y los resultados obtenidos de ellos, se observó que la situación base de aisladores sin recubrimiento se ve mejorada con recubrimiento STD ("standard"). Con este recubrimiento en el caso de aisladores poliméricos, la tensión de contorneo se vio aumentada en un 27% en ambiente húmedo y en un 151% en ambiente húmedo-contaminando, siendo justamente en esa condición más crítica donde más se evidenció la mejora. El recubrimiento HD ("heavy duty") produjo una mejora importante en el caso de ambiente húmedo-contaminado, pero su desempeño fue decayendo en el desarrollo del ensayo. Toda la información acerca de este estudio previo se encuentra en el Departamento de Ingeniería Eléctrica.

Los resultados de este estudio previo son preliminares y no necesariamente habilitan la aplicación de estos recubrimientos en aisladores a ser instalados o que actualmente estén en servicio en el sistema eléctrico. Es por esto que se hace necesario realizar un estudio y evaluación del recubrimiento mediante pruebas sistemáticas que permitan evaluar el comportamiento de este en el mediano plazo.

Es por esta razón que se ha planteado realizar esta memoria con el objetivo general:

- Analizar y evaluar el desempeño de recubrimientos de nano-partículas en su aplicación a aisladores poliméricos y de vidrio.

Para lograr el objetivo general, se proponen los siguientes objetivos específicos:

- Desarrollar un programa de pruebas sistemáticas que permita evaluar el desempeño del recubrimiento y su evolución a mediano plazo ante distintas condiciones medioambientales y distintos factores de degradación.
- Evaluar la resistencia a la degradación del recubrimiento para ambos tipos de aisladores ante descargas superficiales ("tracking") mediante procedimientos normalizados.
- Proponer una metodología de aplicación del recubrimiento en los aisladores tanto para la condición en servicio como fuera de él.

Para lograr los objetivos propuestos se propone realizar un conjunto de ensayos donde se evalúa la tensión de contorneo sobre aisladores, previamente degradados, con y sin recubrimiento Standard (STD) ante condición seca y húmeda. También se realizan ensayos para evaluar la erosión y carbonización en láminas poliméricas y de vidrio, con y sin recubrimiento. El procedimiento de estos ensayos junto con sus resultados y análisis se describe en el capítulo 3 y 4. Luego se presenta el capítulo 5, donde se recoge toda la información de los resultados obtenidos de los ensayos en los capítulos 3 y 4 para proponer un método para recubrir los aisladores tanto para la condición en servicio como fuera de él. Finalmente en el capítulo 6 se exponen las conclusiones generales, recomendaciones y trabajos futuros que se podrían realizar para seguir estudiando el producto.

El Capítulo 2 da una introducción al lector sobre la problemática que existe hoy en materia de aisladores bajo presencia de contaminación y como inciden estos factores en el fenómeno de contorneo eléctrico, además de presentar el estado del arte de la actual norma que usa para seleccionar y dimensionar los aisladores de alta tensión previstos para uso en condiciones de contaminación (Norma IEC 60815). Este se presenta a continuación.

Capítulo 2 Aisladores en ambientes contaminados

2.1 Introducción

Como se mencionó en el Capítulo 1, las líneas de Alta Tensión recorren extensas distancias para llevar la energía eléctrica hasta los centros de consumo, por lo que sus cadenas de aisladores se ven expuestos a diversos factores de degradación tales como radiación UV, humedad y contaminación, los cuales perjudican el buen funcionamiento del sistema aislante al producir descargas superficiales y eventuales contorneos que interrumpen el servicio eléctrico.

La contaminación se produce por un conjunto de fuerzas que permiten los depósitos de partículas en la superficie del aislador, creando una capa superficial de contaminación. Las fuerzas involucradas son:

- Fuerza gravitacional
- Fuerza electrostática
- Fuerza del viento

Las **fuerzas gravitacionales** depositan las partículas más pesadas en la superficie superior del aislador, realzándose su efecto en la medida que aumenta el tamaño de las mismas [6].

La **fuerza electrostática** sobre una partícula no cargada es proporcional a su volumen y en función de su constante dieléctrica. El efecto de esta fuerza se hace presente cuando ocurre el efecto corona, permitiendo bajo la polarización en tensión alterna un desplazamiento efectivo de la partícula hacia las zonas de mayor intensidad de campo eléctrico [6].

La **fuerza del viento** es proporcional a la velocidad, llevando las partículas contaminantes a las proximidades del aislador variando la densidad de distribución de depósitos contaminantes. Ésta última característica es enteramente predominante en importancia, donde gracias a la modificación de las características aerodinámicas en la forma del aislador pueden disminuir su efecto [6].

El problema que existe en los aisladores es que están generalmente operando con cierto grado de contaminación superficial, lo que trae consigo un deterioro progresivo al circular corrientes de fuga, las que promueven la formación de bandas secas, y en consecuencia, descargas disruptivas [3]. La consecuencia que produce la capa contaminante es aumentar el efecto de “amplificación” transversal al deformar el campo eléctrico y concentrarlo en puntos específicos. Si la contaminación se encuentra en presencia de humedad, entonces el efecto se agudiza, y la rigidez dieléctrica puede bajar a 2 [kV/cm], o menos [7].

Por lo tanto el fenómeno de contorneo no puede ocurrir si el gradiente superficial y la corriente de fuga son suficientemente bajos. Su reducción ciertamente evitará la propagación de descargas [8].

Los materiales que se utilizan para la fabricación de aisladores son: polímeros y cerámicos. Dentro de los aisladores cerámicos se encuentran los aisladores de porcelana y vidrio templado.

Tanto los aisladores de porcelana como los de vidrio, poseen características similares debido a su estructura inorgánica. Aunque la porcelana es hoy por hoy uno de los materiales de mayor uso, posee algunas desventajas. Su superficie lisa se obtiene por medio del recubrimiento de una capa muy fina de vidrio, por lo que es muy importante que tanto la capa de vidrio como la porcelana tengan el mismo coeficiente de expansión térmica, pues de lo contrario surgen tensiones internas, que transcurrido cierto tiempo se manifiestan en forma de pequeñas grietas; acortando la vida útil del aislador. Otro inconveniente que presenta la porcelana en servicio es la fragilidad ante descargas por arco [9].

Por otro lado, el vidrio posee ciertas ventajas sobre la porcelana. Posee una gran resistencia mecánica, ya que una vez moldeado el aislador tras su proceso de fabricación, queda sometido permanentemente a una tensión uniforme. Los aisladores de vidrio presentan un coeficiente de expansión térmica similar a la de los metales, lo que evita que se aflojen sus partes metálicas. Otra de las ventajas es que sufre un sobrecalentamiento menor debido a que los rayos solares pasan a través del vidrio y no son absorbidos como en el caso de la porcelana. Además, una de las propiedades de los dieléctricos de vidrio es que ante cualquier grieta o punción resulta en la fragmentación visible de todo el cuerpo, quedando, sin embargo, las piezas metálicas unidas entre sí evitando la caída del conductor; mientras que la porcelana puede perforarse internamente sin presentar indicación externa, lo que es una deficiencia operacional muy grave [9].

Si bien, ambos dieléctricos vidriosos poseen ventajas y desventajas, tienen la similitud de elevar rápidamente la conductividad eléctrica superficial con el aumento de temperatura y humedad; al igual que las tasas de falla, la que también dependen de estos factores [9].

Por otro lado los aisladores poliméricos han ido encontrando una aplicación cada vez mayor en las instalaciones de alta tensión, debido fundamentalmente a las ventajas que presentan frente a los aisladores de cerámica y vidrio. Una de estas ventajas es su bajo costo en comparación a los aisladores de cerámica, además de ser más compacto y más livianos permiten ser manipularlos con facilidad. Además, posee un revestimiento externo que impide que penetre la humedad o agentes contaminantes al alma del aislador, preservando sus propiedades mecánicas y eléctricas. El revestimiento es un elastómero de goma hecho en base de silicona, la cual le da una característica repelente a la humedad [6] (característica hidrófoba). La desventaja que posee producto de su estructura orgánica es la degradación que sufre ante la radiación solar y carbonización a causa de las descargas eléctricas.

2.2 Información sobre Norma IEC 60815-Parte 1

En el año 2008 se publicó la norma IEC 60815-1 [10] que lleva como Título “Selection and dimensioning of hig-voltage insulators intended for use in pollution condicition”, o en su traducción al español “Selección y dimensionamiento de aisladores de alta tensión previstos para uso en condiciones de contaminación” que como su propio nombre lo dice, da una guía

de como escoger el mejor aislador ante condiciones de contaminación. De la primera parte de esta norma se extraen definiciones, información y principios generales que sirven al lector como introducción al estudio que se realizó en el presente Capítulo. El objetivo de esta sección es explicar los tipos de ambientes que están definidos en la norma y cómo se puede estimar la severidad de contaminación de un sitio. La información que se presenta en los siguientes subtítulos de esta Sección, es la que se expone a continuación:

- Condiciones ambientales a las que se ven enfrentados los aisladores
- Evaluación de la severidad de la contaminación en el sitio y
- Mecanismos de contorneo por contaminación.

2.2.1Condiciones ambientales

2.2.1.1 Identificación de tipos de contaminación

Hay dos tipos básicos principales de contaminación de aisladores que pueden conducir a contorneo: La contaminación Tipo A y Tipo B. También pueden surgir combinaciones de ambas.

Contaminación Tipo A

La contaminación Tipo A, en donde hay depositada contaminación sólida con un componente no soluble sobre la superficie del aislador. Este depósito llega a ser conductor cuando se humedece. Este tipo de contaminación se puede caracterizar mejor utilizando mediciones de **Densidad equivalente a la del depósito de sal** / **Densidad del depósito no soluble** (ESDD/NSDD) e **Índice del medidor de depósito de polvo soluble** / **Índice del medidor del depósito de polvo no soluble** (DDGIS/DDGIN). La **Densidad equivalente de depósito de sal** (ESDD) de una capa de contaminación sólida también se puede evaluar mediante conductividad superficial bajo condiciones de humectación controladas. Los métodos de medición de contaminación se encuentran en los Anexos de la norma y el método que se utilizó en este estudio se explicará en la Sección 2.4.

La ESDD es la cantidad de cloruro de sodio (NaCl) que al disolverse en agua desmineralizada, produce la misma conductividad volumétrica que la del depósito natural retirado de una superficie dada del aislador, dividida por el área de esta superficie, generalmente expresada en mg/cm^2. La NSDD es la cantidad de residuo no soluble retirado de una superficie dada del aislador, divida por el área de esta superficie, generalmente expresada en mg/cm^2.

Este tipo de contaminación, la mayoría de las veces está asociada con áreas contaminadas tierra adentro, desértica o por industrias. La contaminación Tipo A también puede surgir en áreas costeras en casos donde se acumulan capas de sal seca que luego se humedecen rápidamente por el rocío, niebla, neblina o llovizna.

La contaminación Tipo A tiene dos componentes principales, a saber, la contaminación soluble que forma una capa conductora cuando se humedece, y la contaminación no soluble, que forma una capa adherente para la contaminación soluble. Se describen a continuación.

- ***Contaminación soluble***: la contaminación soluble se subdivide en sales de alta solubilidad (sales que se disuelven fácilmente en agua) y sales de baja solubilidad (sales que se disuelven con dificultad). La contaminación soluble se mide en función de la densidad equivalente a la del depósito de sal (ESDD) en mg/cm^2.
- ***Contaminación no soluble***: algunos ejemplos de contaminación no solubles son: polvo, arena, arcilla, aceite, etc. La contaminación no soluble se mide en función de la densidad del depósito no soluble (NSDD) en mg/cm^2.

Contaminación Tipo B

La contaminación Tipo B es en donde hay electrolitos líquidos depositados en el aislador con muy poco componente soluble, o ninguno. Este tipo de contaminación se puede caracterizar mejor utilizando mediciones de conductancia o corriente de fuga.

Este tipo de contaminación, en su mayoría se encuentra asociada con áreas costeras en las que se deposita agua salada o niebla conductora sobre la superficie del aislador. Otras fuentes de contaminación Tipo B son, por ejemplo, fumigación de cultivos, niebla química y lluvia ácida.

2.2.1.2 Tipos generales de ambientes

Para propósito de la norma, los ambientes se describen mediante los cinco tipos siguientes: estos tipos describen las características de contaminación típica para una región. En esta Sección se presentan ejemplos del tipo de contaminación (A o B, de acuerdo con la Sección 2.2.1.1.1). En la práctica, los ambientes más contaminados comprenden más de uno de estos tipos, por ejemplo, regiones costeras con playas de arena; en estos casos es importante determinar qué tipo de contaminación (A o B) es predominante.

Ambiente tipo "desértico"

Estas son áreas que se caracterizan por suelos arenosos con periodos prolongados de condiciones secas. Estas áreas pueden ser de gran extensión. La capa de contaminación en estas áreas normalmente comprenden sales que se disuelven lentamente en combinación con un alto nivel de NSDD (Tipo A). Los aisladores se contaminan principalmente por contaminación transportada por el aire. Puede ocurrir limpieza natural en periodos de lluvia no frecuentes, o mediante "granallado" durante condiciones de viento severas. La lluvia infrecuente, combinada con sales que se disuelven lentamente en este tipo de contaminación, hace que la limpieza natural sea menos eficaz.

Ambiente tipo "costero"

Estas áreas están habitualmente en cercanía directa de la costa, pero en algunos casos, dependiendo de la topografía, pueden estar hasta 50 km tierra adentro. La contaminación se deposita sobre los aisladores, principalmente mediante rociado, viento y niebla. La acumulación de contaminación generalmente es rápida, especialmente en condiciones de rociado o niebla conductora (Tipo B). También puede ocurrir acumulación durante un periodo más prolongado, por medio de un depósito de partículas transportadas por el aire, en donde una capa de contaminación sobre los aisladores consiste en sales que se disuelven

rápidamente con un componente de grado inerte (Tipo A) que depende de las características locales del sitio. La limpieza natural de los aisladores habitualmente es eficaz ya que la contaminación activa consiste principalmente en sales de disolución rápida.

Ambientes tipo "industrial"

Estas son áreas ubicadas en cercanías a una fuente de contaminación industrial, y pueden afectar solamente algunas instalaciones. La capa de contaminación puede estar compuesta de partículas conductoras como por ejemplo carbón, depósitos metálicos o gases disueltos, tales como NOx, SOx (Tipo B); o contaminación que se disuelve lentamente, como cemento o yeso (Tipo A). La capa de contaminación quede tener un componente inerte de medio a alto (NSDD medio a alto). La eficacia de la limpieza natural en áreas industriales puede variar considerablemente dependiendo del tipo de contaminación presente. La contaminación con frecuencia son partículas pesadas que se asientan sobre las superficies horizontales.

Ambientes tipo "agrícola"

Estas son áreas que están situadas en cercanías de actividad agrícola. Habitualmente estas serán áreas sometidas a arado (Tipo A) o fumigación de cosechas (Tipo B). La capa de contaminación sobre los aisladores consiste principalmente en sales de disolución lenta tales como químicos, heces de pájaros o sales presentes en el suelo. La capa de contaminación normalmente tendrá un componente inerte de medio a alto (NSDD medio a alto). La limpieza natural de los aisladores puede ser bastante eficaz, dependiendo del tipo de sal depositada. La contaminación con frecuencia son partículas pesadas que se asientan sobre superficies horizontales, pero también puede ser contaminación transportada por el aire.

Ambiente tipo "tierra adentro"

Estas son áreas con un nivel de contaminación bajo, sin fuentes de contaminación claramente identificables.

2.2.1.3 Severidad de la contaminación

Las mediciones de severidad de la contaminación en el sitio (por ejemplo, utilizando medidores, modelos de aisladores, monitores de corrientes, etc.) se expresan generalmente en términos de

- ESDD y NSDD para contaminación tipo A
- Salinidad equivalente a la del sitio (SES) para contaminación tipo B
- DDGIS y DDGIN para ambos tipos.

Las mediciones de severidad de la contaminación sobre aisladores contaminados en forma natural se expresan generalmente en términos de:

- ESDD y NSDD para contaminación tipo A
- Conductividad superficial para contaminación tipo B.

La severidad de la contaminación en ensayos de contaminación artificial sobre aisladores se especifica generalmente en términos de:

- ESDD y NSDD para métodos de capa sólida,
- Salinidad de niebla (kg/m^3) para métodos de niebla salina.

2.2.3 Evaluación de la severidad de la contaminación en el sitio (SPS)

2.2.3.1 Severidad de la contaminación del sitio

La severidad de contaminación en el sitio (SPS) es (son) el(los) valor(es) máximo(s) de ESDD y NSDD (en el caso de aisladores de caperuza y vástago, ESDD/NSDD promedio para superficies superior e inferior), o SES, o DDGIS y DDGIN, medidos de acuerdo con los métodos establecidos en los anexos de la misma norma y registrados durante un tiempo apreciable, es decir uno o más años, y con un intervalo de medición determinado. El intervalo de medición (continua, cada mes, cada tres meses, cada seis meses, cada año, etc. Véanse en los Anexos C y D de la Norma) se puede escoger de acuerdo con el conocimiento de las condiciones ambientales y climáticas locales.

Si se presenta lluvia durante este periodo de medición, las mediciones se deberían repetir a intervalos adecuados para determinar el efecto de lavado natural; la SPS es entonces el mayor valor registrado durante esta serie de mediciones.

2.2.3.2 Métodos de evaluación de la severidad de la contaminación en el sitio

La evaluación de la severidad de la contaminación se puede hacer en orden de confianza decreciente:

1) de mediciones in situ;
2) de información sobre el comportamiento de los aisladores de líneas y subestaciones que ya están en servicio en el sitio o cerca de él (véase en Anexo H de la Norma);
3) de simulacros para calcular el nivel de contaminación a partir de parámetros climáticos y otros parámetros ambientales (véase CIGRE 158 [11]);
4) si no es posible nada diferente, cualitativamente a partir de las indicaciones de la Tabla 3.

Para mediciones in situ, generalmente se usan diferentes métodos de medición. Estos son:

- ESDD y NSDD sobre la superficie de aisladores de referencia (Véase en Anexo C de Norma) para sitios de contaminación Tipo A; o SES de mediciones de corriente de fuga o de conductancia en el sitio, sobre aisladores de referencia o un monitor (Véase en Anexo D de la Norma) para sitios de contaminación Tipo B; o DDGIS, DDGIN del contaminante recolectado por medio de un DDDG (Véase en Anexo E de la Norma) para sitios de contaminación Tipo A o Tipo B,
- El número total de contorneos de aisladores de diferentes longitudes
- Corrientes de fuga o conductancia de los aisladores de las muestras.

Los primeros tres métodos de medición anteriores (ESDD, SES o DDGIS) no exigen equipos costosos y se pueden llevar a cabo fácilmente. Los métodos ESDD/NSDD y SES caracterizan la severidad de la contaminación del sitio con respecto a un aislador de referencia. El método del Medidor direccional del depósito de polvo (DDDG) da la medida de la cantidad de contaminación del ambiente.

En todos los casos, la información sobre la lluvia y la humedad se debería obtener separadamente usando el equipo meteorológico adecuado.

La exactitud de todos estos métodos depende de la frecuencia de la medición y de la duración del estudio. La exactitud se puede mejorar usando dos o más métodos combinados.

El método basado en total de contorneos requiere instalaciones de ensayos costosos. Se puede obtener información confiable a partir de aisladores de ensayo con una longitud cercana a la proyectada, y contorneo a una tensión cercana a la tensión de operación real.

Los últimos dos métodos, que necesitan una fuente de potencia y equipo de registro especial, tienen la ventaja de que los efectos de la contaminación se monitorean continuamente. Han sido desarrollados para evaluar la tasa de acumulación de contaminación. Cuando están relacionados con los datos de ensayo, se pueden usar para indicar que la contaminación está a un nivel seguro, o para indicar que se requiere lavado u otro paliativo. Estos dos métodos permiten la determinación directa de la **Distancia de fuga específica unificada** (USCD) necesaria parea aisladores ensayados en el sitio.

Cuando las mediciones se llevan a cabo en aisladores de referencia, puede ser muy útil incluir aisladores con otros perfiles y orientaciones, para estudiar los mecanismos de depósito y de auto-limpieza para el sitio. Entonces esta información se puede usar para refinar la elección de un perfil adecuado.

Los eventos de contaminación con frecuencia son estacionales y están relacionados con el clima; por tanto, es necesario un periodo de medición de un año como mínimo, para tener en cuenta los efectos estacionales. Pueden ser necesarios periodos más prolongados para tener en cuenta eventos de contaminación excepcionales o para identificar tendencia. Igualmente, pude ser necesario medir al menos durante tres años para áreas áridas (Véase la Sección 9.5.2 de la Norma).

2.2.3.3 Clases de severidad de la contaminación en el sitio (SPS)

Para fines de normalización se definen cualitativamente cinco clases de contaminación que caracterizan la severidad del sitio, desde contaminación muy leve a muy alta, como sigue:

a) Muy leve;
b) Leve;
c) Media;
d) Alta;
e) Muy alta.

Para contaminación Tipo A, las Figuras 1 y 2 muestran los rangos de los valores de ESDD/NSDD correspondientes a cada clase de SPS para aisladores de referencia tanto de tipo pin, como de barra larga. Estos valores se toman de las mediciones en campo, experiencia y ensayos de contaminación. Los valores son los máximos que se pueden encontrar de mediciones regulares tomadas durante un periodo mínimo de un año. Estas cifras son aplicables solamente a aisladores de referencia y tienen en cuenta sus propiedades de acumulación de contaminación específicas.

Si hay suficiente información local o nacional (por ejemplo, mapas de contaminación regional asociados con datos de desempeño de líneas, monitores basados en conductividad de la superficie, ESDD, DDGIS, etc.), las clases específicas adaptadas a esta información se pueden superponer en las Figuras 1 y 2.

Para severidades de contaminación extremas en el sitio, en las áreas sombreadas en la parte superior derecha de las Figuras 1 y 2, y en la parte derecha en la figura 3, no es posible usar reglas sencillas para asegurar un desempeño satisfactorio ante la contaminación. Además, para valores muy altos de NSDD relativos a la ESDD (área sombreada en la parte superior izquierda de las figuras 1 y 2), hay datos disponibles muy limitados. Estas áreas requieren un estudio muy cuidadoso y una combinación de soluciones de aislamiento y medidas paliativas (Véase la Sección 9.5.5 de la Norma).

Para contaminación Tipo B, la figura 3 muestra correspondencia entre las mediciones de SES y clase de SPS para ambos tipos de aislador de referencia.

La correspondencia entre mediciones de DDDG y la clase de SPS pertinentes a la contaminación Tipo A y B se ilustra en las Tablas 1 y 2.

Los valores de las Figuras 1 a 3 se basan en la contaminación natural depositada en los aisladores de referencia.

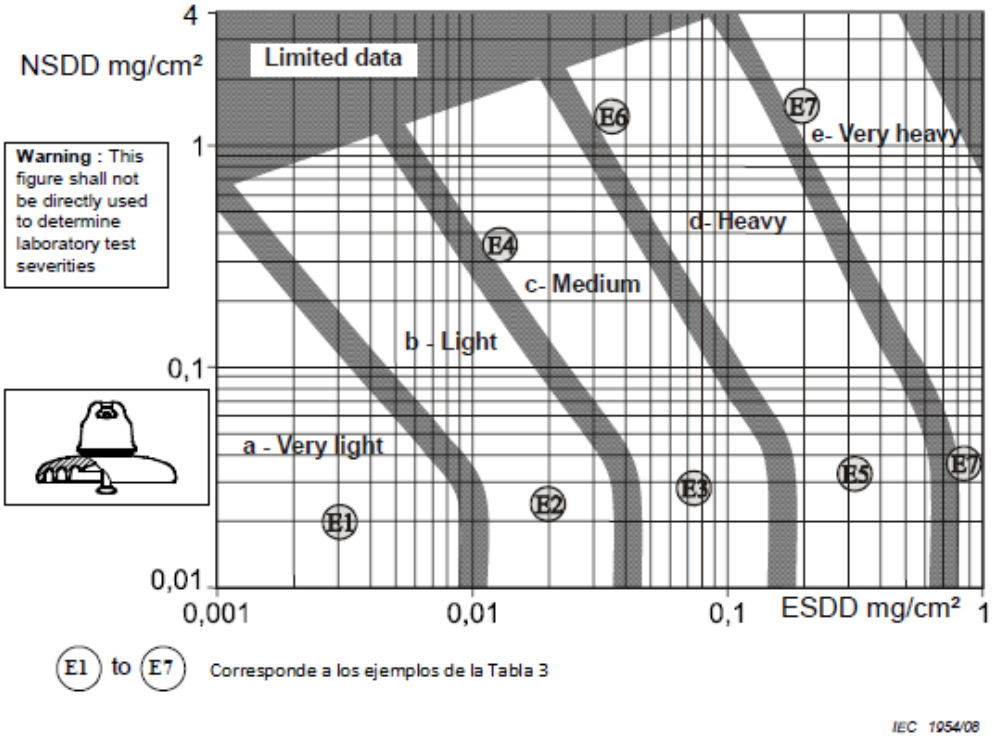


Figura 1. Severidad de la contaminación en sitios Tipo A. Relación entre ESDD/NSDD y SPS para el aislador de caperuza y vástago de referencia [10]

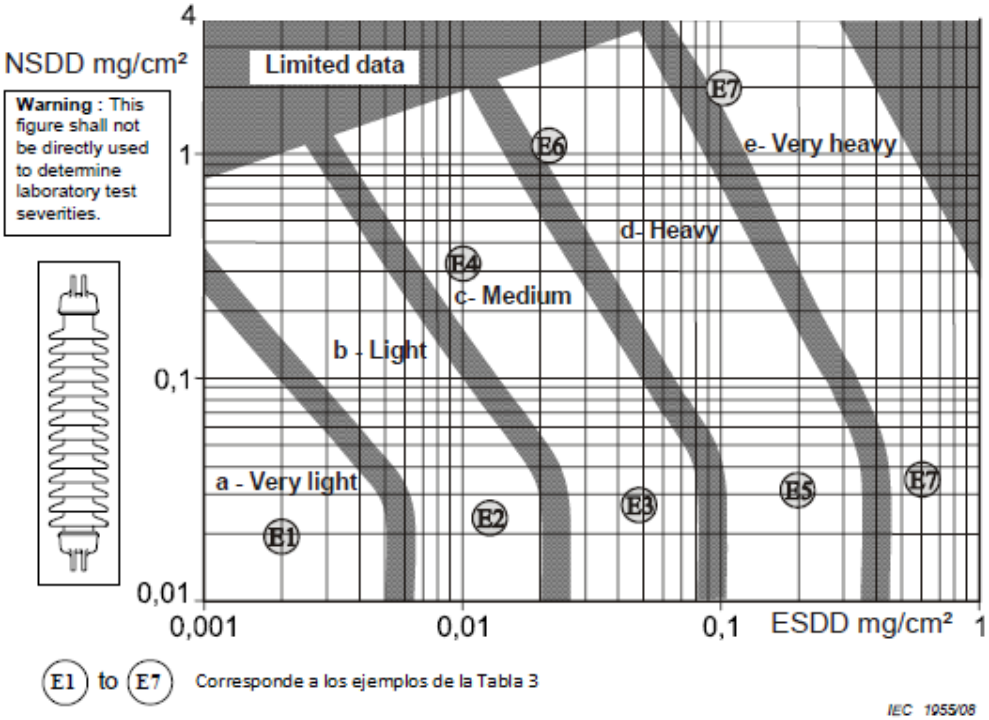


Figura 2. Severidad de la contaminación en sitios Tipo A. Relación entre ESDD/NSDD y SPS para el aislador de barra larga de referencia [10]

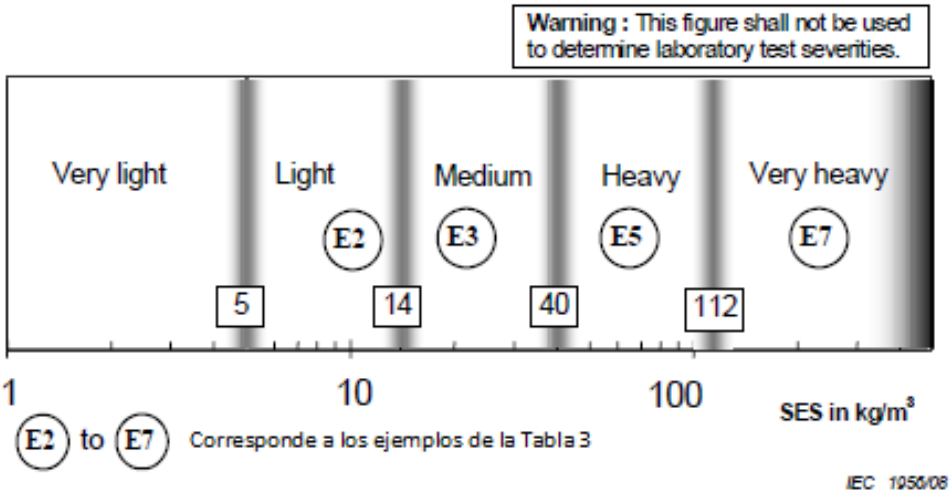


Figura 3. Severidad de la contaminación entre sitios Tipo B. Relación entre SES y SPS para aisladores de referencia o un monitor [10]

Estas figuras no se deben usar directamente para determinar la severidad de los ensayos en laboratorio. Son necesarias correcciones para la diferencia entre las condiciones naturales y

de ensayo, al igual que para la diferencia entre tipos de aisladores (Véase el Anexo F y 1 de la Norma).

La transición de una clase de SPS a otra no es abrupta; por tanto, el límite entre cada clase en las figuras 1 a 3 está sombreado.

Tabla 1. Índice de contaminación del medidor direccional del depósito de polvo en relación con la clase SPS

Índice de contaminación del medidor direccional del depósito de polvo, PI (µS/cm)(tomar el más alto[a])		Clase de severidad de contaminación en el sitio	
Valor promedio mensual durante un año	Valor máximo mensual durante un año		
<25	<50	a	Muy Leve
25 a 75	50 a 175	b	Leve
75 a 200	176 a 500	c	Media
201 a 350	501 a 850	d	Alta
>350	>850	e	Muy alta
[a] Si los datos del clima para el sitio en cuestión están disponibles, el índice de contaminación del medidor direccional del depósito de polvo se puede ajustar para tener en cuenta las influencias climáticas. Véase Anexo E			

Tabla 2. Corrección de la clase de severidad de la contaminación en el sitio en función de los niveles de depósito no soluble (NSD) del DDDG

NSD (gramos) del medidor direccional del depósito de polvo (tomar el más alto)		Valor promedio mensual durante un año
Valor máximo mensual durante un año	Corrección de la clase de severidad de la contaminación en el sitio	
<0,5	<1,5	Ninguna
0,5 a 10	1,5 a 2,5	Incremento en una clase
>1,0	>2,5	Incremento en una o dos clases, y considerar mitigación (Véase la Sección 9.5.5 de la Norma)

La Tabla 3 presenta, para cada nivel de contaminación, un ejemplo y una descripción aproximada de algunos ambientes típicos correspondientes. La lista de ambientes no es exhaustiva y preferiblemente las descripciones no se deberían usar solas para determinar la severidad de un nivel de un sitio. Los ejemplos E_1 a E_7 de la Tabla 3 se reproducen las Figuras

1,2 y 3, para ilustrar importante influencia en la cantidad de contaminación depositada en los propios aisladores; por tanto, estos valores típicos están solamente disponibles para los aisladores de referencia, tanto de caperuza y vástago, como los de barra larga.

Tabla 3. Ejemplos de ambientes típicos

Ejemplo	Descripción de los ambientes típicos
E_1	>50 km[a] de cualquier mar, desierto o tierra seca abierta >10 km de fuentes de contaminación artificiales Dentro de una distancia más corta de la mencionada arriba, en relación con las fuentes de contaminación, pero: - El viento predominante no proviene directamente de esta fuente de contaminación - y/o con lavado mensual regular por lluvia
E_2	10 -50 km[a] del mar, desierto o tierra seca abierta 5 - 10 km de fuentes de contaminación artificial Dentro de una distancia más corta de E_1 de las fuentes de contaminación, pero: - El viento predominante no proviene directamente de estas fuentes de contaminación - y/o con lavado mensual regular por lluvia
E_3	3- 10 km[c] del mar, desierto o tierra seca abierta 1-5 km de fuentes de contaminación artificial Dentro de una distancia más corta de la mencionada arriba, en relación con las fuentes de contaminación, pero: - el viento predominante no proviene de estas fuentes contaminación - y/o con lavado mensual regular por lluvia
E_4	Más lejos de las fuentes de contaminación de lo que se menciona en E_3, pero: - la niebla densa (o llovizna) ocurre con frecuencia después de una estación de acumulación de contaminación seca prolongada (varias semanas o meses) - y/u ocurre lluvia con conductividad alta y fuerte - y/o hay un nivel alto de NSDD de entre 5 y 10 veces la ESDD
E_5	A una distancia dentro de km[c] del mar, desierto o tierra seca abierta Dentro de una distancia de 1 km de fuentes de contaminación artificiales[b]
E_6	Dentro de una distancia mayor de la mencionada en E_5, en relación con las fuentes de contaminación, pero: - la niebla densa (o llovizna) ocurre con frecuencia después de una estación de acumulación de contaminación seca prolongada (varias semanas o meses) - y/o hay un nivel alto de NSDD de entre 5 y 10 veces la ESDD
E_7	Dentro de la misma distancia de las fuentes de contaminación especificadas para "áreas fuertes" y: - sometidas directamente a rociado marino o a niebla salina densa - o sometidas directamente a contaminantes con alta conductividad, o polvo tipo cemento con alta densidad, y con humectación frecuente de niebla o llovizna - áreas desérticas con una rápida acumulación de arena y sal y condensación regular
[a]: Durante una tormenta, el nivel de ESDD a tal distancia del mar puede alcanzar un nivel mucho más alto. Continúa…	

[b]: la presencia de una ciudad grande tendrá influencia sobre una distancia mayor, es decir, la distancia especificada para el mar, desierto y tierra seca.
[c]: Dependiendo de la topografía del área costera y de la intensidad del viento.

2.3 Mecanismos de contorneo por contaminación

A continuación se presenta la explicación del mecanismo de contorneo según el Anexo C de la norma IEC 60815-1 [10].

2.3.1 Descripción del mecanismo de contorneo por contaminación Tipo A

Para facilidad de comprensión, el proceso de contorneo Tipo A por contaminación previa antes del depósito se divide en seis fases que se describen a continuación. Por naturaleza, estas fases no son diferentes pero pueden tender a fusionarse.

El proceso de contorneo de aisladores por contaminación se ve afectado considerablemente por las propiedades de la superficie del aislador. Se reconocen dos condiciones de superficie: **hidrófilas** o **hidrófobas**. Una superficie hidrófila está asociada con aisladores de vidrio y porcelana, mientras que una hidrófoba está asociada generalmente con aisladores poliméricos, especialmente caucho de silicona. En condiciones de humectación, como por ejemplo, lluvia, neblina, etc., las superficies hidrófilas se humedecerán completamente de manera que una película de electrolito cubra el aislador. En contraste, sobre una superficie hidrófoba se forman gotas de agua bajo estas condiciones de humectación.

El proceso de contorneo por contaminación se ve también afectado significativamente por la forma de onda, AC o CC. Bajo AC, la propagación del arco a través de la superficie del aislador puede tomar varios ciclos, y por tanto, el arco está sujeto a un proceso de extinción y reencendido a corriente cero aproximadamente.

Una característica que complica la situación es la disrupción del aire entre puntos vecinos del perfil del aislador (por ejemplo, entre ondulaciones (rebordes) o campanas), que reduce el desempeño ante contorneo por puenteo (shorting out) de la superficie del aislador. Además, las gotas o corrientes de agua pueden facilitar esta reducción en el desempeño.

El proceso se describe a continuación como se encuentra sobre superficies hidrófilas, tales como materiales cerámicos.

Fase 1. El aislador queda cubierto con una capa de contaminación. Si la contaminación no es conductora (alta resistencia) cuando está seca, es necesario un proceso de humectación (Fase 2) antes de que ocurra contorneo.

Fase 2. La superficie del aislador contaminado se humedece. La humectación de un aislador puede ocurrir de las siguientes maneras: por absorción, condensación y precipitación de humedad. La lluvia fuerte (precipitación) puede lavar los componentes electrolíticos de parte o de la totalidad de la capa de contaminación sin iniciar otras fases de disrupción, o puede promover contorneo mediante formación de puentes entre campanas. La absorción de la humedad ocurre durante periodos de humedad relativa alta (>75%HR) cuando la temperatura del aislador y la del aire del ambiente son la misma. Ocurre condensación cuando la humedad

en el aire se condensa sobre una superficie cuya temperatura es inferior al punto de rocío. Esta condición ocurre usualmente al amanecer o inmediatamente antes.

Fase 3. Una vez que un aislador energizado esté cubierto con una capa de contaminación conductora, las corrientes de fuga de la superficie fluyen y su efecto de calentamiento comienza dentro de unos pocos ciclos de frecuencia industrial para secar partes de la capa de contaminación. Esto ocurre cuando la densidad de corriente es la más alta, es decir, en donde el aislamiento está en su punto más estrecho. Esto da como resultado la formación de lo que se conoce como **Bandas secas**.

Fase 4. La capa de contaminación nunca se seca uniformemente, y en algunos lugares la trayectoria conductora se rompe mediante bandas que interrumpen el flujo de la corriente de fuga.

Fase 5. La tensión de línea a tierra que aparece a través de múltiples bandas secas (que pueden ser solamente de algunos milímetros de ancho) ocasiona disrupción en el aire y se forman puentes en las bandas secas por arcos que están eléctricamente en serie con la resistencia de la porción conductora y todavía húmeda de la capa de contaminación.

Esto causa una sobre-corriente de fuga cada vez que las bandas secas sobre un aislador hacen una descarga disruptiva.

Fase 6. Si la resistencia de la parte conductora y todavía húmeda de la capa de contaminación es suficientemente baja, los arcos que forman un puente en las bandas secas se sostienen y finalmente continúan extendiéndose a la largo del aislador, formando cada vez más puentes sobre su superficie. Esto a su vez reduce la resistencia en serie con los arcos, incrementando la corriente y permitiéndoles formar puentes incluso más allá de la superficie de aislamiento. Finalmente, se forma un puente completamente y se establece una falla de línea a la tierra (contorneo).

La probabilidad de contorneo se incrementa con una mayor corriente de fuga, y es principalmente la resistencia de la capa superficial la que determina la magnitud de la corriente. Por tanto, se puede concluir que la resistencia de la capa superficial es el factor subyacente que determina si un aislador producirá contorneo o no, en función del modelo anterior. La resistencia de la capa de la superficie se puede calcular, suponiendo una distribución y una humectación uniforme de la contaminación, usando el factor de forma (Véase el Anexo H de la norma IEC 60815-1).

El contorneo por contaminación puede ser un problema en áreas muy secas tales como desiertos. La explicación reside con frecuencia en la “inercia térmica” a la madrugada, entre la temperatura de la superficie del aislamiento y de la temperatura del aire del ambiente, que se eleva rápidamente. Esta diferencia de la temperatura sólo necesita ser de algunos pocos grados centígrados para que ocurra una condensación considerable, incluso a valores bastante bajos de humedad relativa. La capacidad térmica y la conductividad térmica del material aislante controlan la velocidad a la cual se calienta la superficie.

En el documento CIGRE 158 [11] se incluye más información sobre procesos y modelos de contorneo por contaminación.

2.3.2 Descripción del mecanismo de contorneo por contaminación Tipo B

2.3.2.1 Niebla conductora

La "contaminación instantánea" Tipo B hace referencia a una contaminación de alta conductividad que se deposita rápidamente sobre las superficies del aislador, lo que da como resultado una condición en la que el aislador cambia de un estado de baja conductividad y limpieza aceptable, a contorneo en periodo corto (>1 Hora) y luego regresa a un estado de baja conductividad cuando el evento ha pasado.

Para facilitar la comprensión del contorneo por contaminación instantánea, se aplica el mismo proceso descrito en la Sección 2.2.2.1. Sin embargo, la contaminación instantánea se deposita normalmente como una capa altamente conductora de electrolito líquido, por ejemplo, rociado salino, niebla salina o niebla ácida industrial; entonces el proceso comienza en la Fase 3 y puede avanzar rápidamente a la Fase 6. Por naturaleza, estas fases no son diferentes pero tienden a fusionarse. Solamente hacen referencia a superficies hidrófilas. Las áreas que se encuentran con mayor riesgo son las situadas cerca de plantas químicas, o las áreas cercanas a la costa, de las que hay historia sobre inversión de temperatura.

2.3.2.2 Excremento de pájaro

Un caso particular de contaminación de Tipo B son los excrementos de pájaro. El excremento de pájaro en la superficie aislante forma un camino altamente conductivo (20-40 kΩ/m) de una longitud tal, que el espacio de aire se reduce lo suficiente como para causar contorneo. En este caso, la geometría del aislador y sus características desempeñan una función pequeña, o ninguna, y la mejor solución puede ser la colocación de dispositivos de disuasión o postes alternos adecuados a la fauna local y al diseño de la estructura.

2.3.3 Mecanismo de contorneo por contaminación sobre superficies hidrófobas.

Debido a la naturaleza dinámica de una superficie hidrófoba ya a la interacción compleja resultante con los contaminantes – tanto conductores como no conductores - y los agentes humectantes, en la actualidad no hay un modelo adoptado generalmente de contorneo por contaminación para superficies hidrófobas de aislamiento. Sin embargo, está emergiendo una imagen cualitativa del mecanismo de contorneo por contaminación que involucra elementos tales como la migración de sal a las gotas de agua, y de estabilidad de las gotas de agua, formación de filamentos de líquido en la superficie, y desarrollo de descarga entre filamentos o gotas cuando el campo eléctrico es suficientemente alto.

Sin embargo, en servicio los materiales hidrófobos se someten a un proceso dinámico de depósito de contaminación, humectación, descargas localizadas o campos eléctricos altos que se pueden combinar para hacer que toda la superficie o parte de ellas sean temporalmente más hidrófilas. Así, también se aplica gran parte de la física del proceso de contorneo de superficies hidrófilas, aunque localmente o durante periodos de tiempo limitados, a materiales o superficies nominalmente "hidrófobas".

2.4 Métodos para prevenir el contorneo en aisladores

Se han desarrollado diferentes métodos para prevenir el contorneo de los aisladores mediante la disminución y retardo del efecto de la contaminación en las cadenas de aisladores, dentro de los cuales se pueden mencionar: el lavado periódico de los aisladores, aplicación de grasas, sobredimensionamiento, diseño e implementación de nuevos materiales, entre otros [2] [3].

Los diversos métodos y sus éxitos se describen brevemente a continuación [5].

Modificación del diseño de aisladores

Desde el desarrollo de aisladores cerámicos, la técnica de diseño de aisladores para condiciones contaminadas ha implicado la modificación del tamaño, espacio y forma de los aislantes o secciones de los aisladores con el fin de obtener la mayor distancia de fuga y distancia de fuga protegida por unidad de longitud del aislador como sea posible. Este enfoque ha producido diseños tales como el aislador de cubeta de niebla para líneas de distribución, aisladores aerodinámicos y de suspensión tipo niebla para líneas de transmisión, y aisladores de poste para estaciones que tienen numerosos cobertizos.

La distancia de fuga ha sido el parámetro de diseño más importante, aunque también son importantes otros parámetros, como el espaciado entre cobertizos, la forma y el diámetro. Por otro lado, el tamaño, la forma y las características de formación de la cerámica están sujetos a limitaciones. Sin embargo, estas limitaciones se han mejorado con la adopción del uso de aisladores de vidrio templado.

Muchos diseños de aisladores se han desarrollado a lo largo de los años; sin embargo, hoy no existen estándares que cubran el diseño o el rendimiento de los aislantes para entornos contaminados, pero si se da una guía de como seleccionar y dimensionar los aisladores más adecuados para diferentes condiciones ambientales como lo es la Norma IEC 60815.

La experiencia con varios diseños ha variado mucho dependiendo de las condiciones de la aplicación. En términos generales, los aisladores aún requieren limpieza para evitar el contorneo, aunque con una frecuencia reducida. La guía principal parece ser la instalación de cadenas más largas o aisladores tipo poste más altos para ubicaciones más sucias.

Aisladores no cerámicos

Al principio, se consideró que los aislantes no cerámicos o poliméricos tenían un rendimiento de contaminación superior en comparación con sus equivalentes de cerámica aislante. Su uso temprano en áreas severamente contaminadas ha resultado con muchas fallas, pero al mismo tiempo, existen aplicaciones que han dado éxito. El uso de coberturas de silicona en este tipo de aisladores le da características hidrófobas al aislador, por lo que se ha convertido en una buena aplicación para niveles de media y baja tensión. Respecto a su rendimiento como aisladores de suspensión en líneas de alta tensión, han mostrado un bajo rendimiento mecánico, por lo que se adopta el uso de cadenas de aisladores cerámicos para esta aplicación [4].

La principal preocupación con el uso de aislantes no cerámicos en ambientes contaminados implica el desarrollo de corrientes de fuga y arcos de banda seca en la superficie de estos. El arco de banda seca, si es lo suficientemente intenso, puede destruir el material del casco y precipitar la falla del aislante mediante la carbonización del núcleo de fibra de vidrio, lo que puede provocar una descarga disruptiva y / o separación mecánica.

Limpieza de aisladores

El lavado con agua de los aisladores ha demostrado ser una forma efectiva de eliminar la contaminación suelta de las superficies del aislador. El lavado es muy efectivo para eliminar la sal y otras formas de contaminantes que no se adhieren bien a las superficies del aislador. Aunque hace algunos años el lavado con agua era un método de mantenimiento económico, este no es el caso hoy en día en muchas partes del mundo. Idealmente, los aisladores deben lavarse con agua antes de alcanzar el nivel crítico de contaminación. Como no hay medios disponibles para determinar con precisión cuándo se debe realizar el lavado, se ha utilizado la experiencia pasada en períodos entre contorneos para estimar la frecuencia del lavado. Como resultado, el lavado se realiza con demasiada frecuencia o después del contorneo.

La limpieza con un limpiador abrasivo seco, es un medio muy eficaz y eficiente para eliminar depósitos duros como el cemento. Sin embargo, el uso frecuente de un limpiador abrasivo seco elimina el esmalte de los aislantes de porcelana y no debe usarse en aislantes de vidrio. Además, el depósito de material abrasivo seco en las estaciones debe eliminarse. El proceso de eliminación es bastante tedioso y costoso.

Aplicación de grasas

Las grasas de hidrocarburo y silicona son recubrimientos protectores móviles que pueden absorber contaminantes y actúan para evitar el contorneo de dos maneras. En primer lugar, reducen la tendencia a que las gotas de agua se fusionen en una película continua. En segundo lugar, tienden a encapsular partículas de contaminación para evitar que se agreguen a la conductividad de la superficie. Ambas grasas funcionan mientras permanezcan móviles. Una vez que se pierde la movilidad debido a un exceso de contaminantes absorbidos en la capa, se rompen bajo el arco de bandas secas, formando caminos. La alta temperatura localizada que se produce durante el arco de banda seca también puede causar que el material cerámico subyacente se agriete.

Sin embargo, la mayor objeción a las grasas es el costo y el trabajo tedioso de eliminar las capas gastadas. La masa de grasa en una subestación completa puede ascender a varios kilos, lo que requiere trapos y solventes, una operación desordenada y que requiere mucho tiempo. Además, el problema de la eliminación de la grasa gastada se ha vuelto más difícil, ya que los vertederos sanitarios no aceptan la grasa gastada, y la única alternativa es la incineración a un alto costo.

Recubrimientos

En los últimos años, los revestimientos hidrófugos sólidos, particularmente del tipo de silicona, han atraído considerable interés. Una fórmula de resina de fluorouretano se ha desarrollado como una superficie antiadherente para ayudar a mantener las superficies limpias.

El revestimiento de silicona líquida RTV (vulcanización a temperatura ambiente) ha ganado considerable popularidad. Aunque se han encontrado pocos problemas con el recubrimiento de primera generación, se hizo evidente con el uso que ciertas mejoras a la tecnología eran necesarias para tener la seguridad de una vida útil más larga. Estas mejoras incluyen: adhesión mejorada a la porcelana, la capacidad de resistir durante un período de tiempo más largo el desarrollo de corriente de fuga y contorneos, inmunidad mejorada a reversión o despolimerización, aplicación de rociado más rápida y aplicación en línea del recubrimiento.

Capítulo 3. Ensayos de tensión de contorneo en aisladores de vidrio

3.1 Introducción

En el presente capítulo se busca cumplir con el objetivo de desarrollar un programa de pruebas sistemáticas que permita evaluar el desempeño del recubrimiento y su evolución en el mediano plazo sobre aisladores de vidrio ante distintas condiciones medioambientales y distintos factores de degradación.

Para cumplir con lo expuesto anteriormente, se procede a estudiar y evaluar el desempeño del recubrimiento ante ensayos de tensión de contorneo (TC) efectuado a aisladores de vidrio de suspensión clase 80 kV con producto de recubrimiento de nano-partículas (RN) y sin este, considerando las prescripciones de las normas ANSI C.29.1, ANSI C.29.11, para ser ensayados en ambiente seco y húmedo, con el propósito de evaluar y analizar su desempeño durante tres meses en diferentes ambientes de degradación: intemperie, UV y bajo techo. Esto motivado por los resultados obtenidos de las pruebas de contorneo en aisladores y separados poliméricos de clase 15 kV considerando las prescripciones mencionadas, a solicitud del *Advanced Center for Electrical and Electronic Engineering, AC3E-UTFSM* [12]. [Informe se encuentra en Departamento de Ingeniería Eléctrica].

Este capítulo se subdivide en tres partes: primero se presenta la metodología de ensayo, luego se exponen los resultados obtenidos de los ensayos realizados, para después finalizar con las conclusiones obtenidas de este Capítulo.

3.2 Objeto de prueba

Los elementos a utilizar para cumplir con la realización del programa de pruebas sistemático son 32 aisladores de vidrio templado en desuso proporcionados por la empresa de transmisión eléctrica TRANSELEC.

El tipo de probeta a ensayar son aisladores de suspensión 120 kN tipo disco estándar de caperuza y vástago de vidrio templado, clase 80 kV, fabricado por la empresa Sediver (USA, Italia y China). Estos aisladores son los más utilizados en las líneas de transmisión de TRANSELEC, validados en la medida que sea bien especificado.

El recubrimiento de nano-partículas utilizado fue el producto llamado “Standard” (STD), fabricado por la empresa Adrox.

Lugar de ensayos**:** Patio de ensayos a la intemperie del Laboratorio de Alta Tensión de la UTFSM, Casa Central, Valparaíso.

3.2 Descripción del producto bajo estudio

El recubrimiento bajo estudio tiene la facultad de dar una propiedad hidrófoba a superficies que no lo son y posee distintas características que se nombran a continuación.

- El producto llamado Standard (STD) es un transparente de tono amarillo con aroma a alcohol y su fórmula química es C_3H_8O.

- Su punto de inflamación es de 250 °C y su punto de auto ignición es de 343°C. No es soluble en agua ni tampoco en otros solventes. Tiene incompatibilidad con agentes antioxidantes, cáusticos, ácido sulfúrico y ácido nítrico, aminas e isocianatos.
- Su densidad a 20°C es de 0,79-0,85 g/cm^3.
- Se recomienda aplicar el producto en un espacio ventilado y evitar el contacto con la piel; su sobreexposición aguda puede causar irritación a la piel, irritación en los ojos y quemaduras en la cornea, por lo que se recomienda ocupar gafas protectoras y guantes resistentes a los químicos. Su inhalación puede provocar dolor de cabeza y mareos.

3.3 Metodología de ensayo

3.3.1 Plan de ensayos y distribución de probetas.

El plan de ensayo se basa en evaluar el desempeño del producto en la superficie de los aisladores de vidrio en el mediano plazo. Para lograr alcanzar este objetivo, se propuso realizar un estudio del efecto de exponer la superficie de aisladores de vidrio recubiertos con RN en un periodo de 3 meses, ante diferentes tipos de ambientes donde se ven comúnmente enfrentados, tales como: contaminación a la intemperie, radiación UV y bajo un lugar cerrado (ver Tabla 4); para luego ser ensayados a tensión de contorneo de 50 [Hz] bajo condición seca y húmeda. El periodo de degradación se subdivide en 3: 1, 2 y 3 meses respectivamente.

Es de importancia mencionar que los aisladores no son energizados al momento de degradar. Sólo se energiza al momento de realizar los ensayos.

Primero que todo, antes de realizar las pruebas, se tuvo que recubrir los aisladores que fueron destinados a degradar. Los elementos utilizados para recubrir los aisladores fueron con ayuda de un rociador y una brocha, los que se muestran en la Fotografía 1. Los aisladores se dejaron colgados en una estructura de metal para luego ser rociados uno por uno pero no en la totalidad del aislador, ya que con una sola aplicación del rociador sobre una porción de la superficie dejaba recubrimiento suficiente para toda la superficie; esta se esparcía en la totalidad de la superficie con ayuda de la brocha. También se usó una mascarilla y guantes como medida de protección para no inhalar ni entrar en contacto con el producto. El aspecto de la superficie recubierta se muestra en la Fotografía 2. De los 32 aisladores, sólo 28 fueron recubiertos y los 4 restantes sin recubrir fueron usados como probetas testigos en la degradación a la intemperie. Luego, los aisladores recubiertos se dividen en tres grupos: 12 unidades para degradación a la intemperie, 12 unidades para ser degradados bajo radiación UV y 4 unidades para degradarlas bajo techo (Ver Tabla 4).

Tabla 4. Cantidad de aisladores con y sin recubrimiento por cada ambiente de degradación.

Degradación	Intemperie		Radiación UV		Bajo techo	
Cantidad de aisladores	Con RN	Sin RN	Con RN	Sin RN	Con RN	Sin RN
	12	4	12	0	4	0

De los 16 aisladores que se destinaron para ser degradados a la intemperie, 12 recubiertos se subdividieron en 4 cadenas de 3 aisladores cada una, y los 4 sin recubrir se subdividieron en

dos cadenas de 2 aisladores cada una, dejándose colgados en posición vertical en las dependencias del patio de ensayos a la intemperie del Laboratorio de Alta Tensión como se muestra en la Fotografía 3. Otros 12 aisladores recubiertos, subdivididos en 4 cadenas de 3 aisladores cada una, fueron colgados de manera vertical en una estructura metálica como muestra la Fotografía 4.a y luego dentro de una cámara especial de radiación UV en las dependencias del subterráneo del Pañol de Electricidad como muestra la Fotografía 4.b (Las especificaciones de dimensiones se detallan en la Sección 3.3.2). Las 4 unidades restantes, para ser degradadas bajo techo, se subdividieron en 2 cadenas de 2 aisladores cada una y se dejaron de la misma posición que las probetas anteriores en el subterráneo del Laboratorio de Alta Tensión (Fotografía 5).Todas las dependencias mencionadas se encuentran en la UTFSM, Casa Central.

La cantidad de 4 cadenas de aisladores recubiertos con 3 unidades cada una, para el caso de degradación a la intemperie y radiación UV, se debe a dos razones. La primera, es por la cantidad de aisladores utilizados para cada condición de ensayo (seca y húmeda): se refiere a la cantidad de 4 cadenas de aisladores, ya que, terminado cada periodo de degradación, se saca cada aislador de la primera fila de cada columna (en orden ascendente); lo que resulta un total de 4 aisladores, de los cuales 2 se ensayarán en condición seca y los otros 2 en condición húmeda. La segunda razón es debido al tiempo de exposición de los aisladores a la degradación, donde la cantidad de 3 aisladores por cadena, se refiere a que cada fila de aisladores representa un periodo de degradación.

Fotografía 1. Producto y brocha

Fotografía 2. Aislador con producto

Esto se explica debido a que los ensayos se realizaron de la siguiente manera: los 4 aisladores, ya recubiertos, que se destinaron para ser degradados bajo techo, fueron previamente ensayados a tensión de contorneo en ambiente seco y húmedo. Esto con el fin de obtener datos de referencia preliminares de ruptura dieléctrica sólido-gaseosa antes que el producto fuese degradado. Luego se dejaron degradar bajo techo sin recubrir nuevamente y no fueron tocados hasta el término de la degradación (luego de 3 meses). Los aisladores expuestos a la intemperie y a la radiación UV fueron ensayados, al igual que los ensayos preliminares, en un orden específico. Este orden fue de tal manera que al paso de un mes de degradación, fueron ensayando los aisladores que estaban en la fila de más abajo en las cadenas, para luego

almacenarlos sin continuar con el proceso de degradación. Luego, al paso de otro mes, se tomaron los aisladores de la segunda fila para ser ensayados y posteriormente almacenados al igual que los aisladores ensayados anteriormente. Al paso del tercer mes, a los aisladores que restaban, se les hizo el mismo proceso. Todo esto con el propósito de hacer un seguimiento de la consecuencia de la degradación del RN en la superficie de los aisladores, tanto en el efecto de la deposición de contaminación presente en el intemperie, como la consecuencia de la radiación en la cámara UV, mediante el seguimiento de los datos de tensión de contorneo al paso de cada mes. Lo mismo se hizo con los aisladores sin recubrir que se dejaron como testigos a la intemperie, pero con la diferencia que sólo se realizaron ensayos en condición seca al paso del segundo y tercer periodo de degradación.

Fotografía 3. Montaje aisladores a la intemperie

(a) Estructura de soporte

(b) Cámara de radiación UV

Fotografía 4. Montaje para aisladores bajo Radiación UV

Fotografía 5. Montaje aisladores bajo techo

En la Tabla 5 se muestra la cantidad de aisladores que se ocuparon, con y sin RN, para cada ronda de ensayos clasificados por cada ambiente de degradación, condición seca (S) o húmeda (H) y el tiempo de degradación.

Tabla 5. Cantidad de aisladores para cada ronda de ensayos.

Degradación	Intemperie				Radiación UV				Bajo techo			
Tiempo de degradación [meses]	con RN		sin RN		con RN		sin RN		con RN		sin Rn	
	S	H	S	H	S	H	S	H	S	H	S	H
0			2	2					2	2		
1	2	2			2	2						
2	2	2	2		2	2						
3	2	2	2		2	2			2	2		

El criterio que se toma como evaluación del producto es la variación de la magnitud de tensión de contorneo y la clasificación hidrófoba (HC). Al paso de cada ensayo en las distintas probetas, se hizo una inspección visual y fotográfica del estado hidrófobo de su superficie tanto antes como después de cada ensayo; éstas fotografías se comparan con las imágenes de muestra que se presentan en la página 4 de Hidrofobicity Classification Guide, STRI guide.91/1 [13] y de esta manera se obtiene la HC para cada caso.

Uno de los aisladores recubiertos que fueron degradados durante 3 meses a la intemperie y se ensayó en seco, se dejó como testigo de la acumulación de contaminación en su superficie con el propósito de medir la gravedad de la contaminación a la cual fueron expuestos los aisladores. La contaminación se midió conforme a lo descrito en la norma IEC 60815. Para estimar su grado de contaminación se mide su densidad de depósitos solubles (ESDD) y su densidad de depósitos no solubles (NSDD). Esto se hizo con la finalidad de tener una estimación del grado de contaminación a la cual se vieron enfrentados los aisladores según el procedimiento mostrado en el Anexo C en la sección C.3.1 de la misma norma, usando la técnica del hisopo. Ésta técnica consiste en limpiar la totalidad de la superficie vítrea del aislador con la ayuda de un algodón y un recipiente de 300 ml de agua destilada. El algodón se debe sumergir en el agua para luego proceder a limpiar la superficie superior e inferior,

exceptuando cualquier parte metálica o materiales de ensamble. El algodón que se usó para limpiar se deja nuevamente dentro del recipiente y los contaminantes se disuelven en el agua agitando y exprimiendo el algodón en el agua. Se hace el mismo procedimiento hasta que no queda rastro de contaminación en la superficie del aislador. Luego de este procedimiento se procede a realizar la medición de conductividad, temperatura y sólidos insolubles de la solución contaminada junto a los algodones utilizados, el cual se encargó el Laboratorio de Química de la UTFSM, Casa central. Después de esto, se reemplazan los datos obtenidos del Laboratorio en unas expresiones matemáticas mostradas en la Sección C.4 del mismo Anexo C, para así obtener los valores ESDD y NSDD. Cabe destacar que esta medición se realiza para obtener sólo el grado de contaminación de un solo aislador con el fin de obtener un dato de referencia del ambiente al cual fue expuesto. Se eligió uno de los aisladores que estuvieron tres meses en degradación por el simple criterio de que éste se contaminó más con el paso del tiempo.

3.3.2 Cámara de radiación UV

Los aisladores recubiertos con RN se dejaron degradar en una cabina de radiación UV, diseñada y hecha en las dependencias de la UTFSM. La cabina está hecha de planchas de terciado marino de 1,20 [m] de alto por 1,55 [m] de largo y 0,85 [m] de ancho. Las paredes interiores de la cabina y la estructura que soporta los aisladores se recubren con papel aluminio el cual cumple el rol de reflectar la luz UV como se muestra en la Fotografía 6. Los aisladores recubiertos se cuelgan en una estructura de metal de 0,76 [m] de alto por 1,10 [m] de largo y 0,5 [m] de ancho como se muestra en la misma Fotografía 6. Con ayuda de 5 lámparas especiales de radiación UV, tres de 300 [W] y dos de 160 [W] (Fotografía 7) se dejan degradar los aisladores dentro de la cabina como se mostró en la Fotografía 4.b.

Fotografía 6. Cámara UV

(a) Ampolleta 300[W]

(b) Ampolleta 160 [W]

Fotografía 7. Ampolletas UV

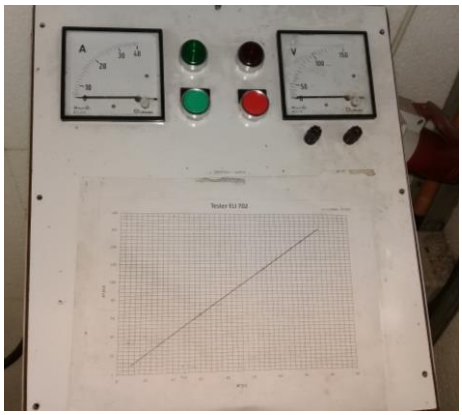
3.3.3 Ensayos eléctricos

Los ensayos se realizaron considerando las prescripciones de las normas ANSI C.29.1, ANSI C.29.11. La disposición de los elementos para el ensayo de los aisladores de vidrio en condición seca y húmeda se muestra en la Fotografías 8 y 9 respectivamente.

El circuito que se utiliza para realizar la medición se muestra en el Diagrama 1. La alimentación del circuito (VR) es la tensión de la red de 220 V (50 Hz) y el aumento progresivo de la magnitud de tensión se controla por medio de un variac (VT) ubicado en la cabina de medición. El diagrama muestra el transformador de potencial (T_1) con razón de transformación 380 /110 V, y luego está conectado un transformador elevador de potencial (T_2), con razón de transformación 110V/230 kV. El valor de magnitud de tensión y corriente se obtienen al observar el tablero mostrado en la Fotografía 10.

Fotografía 8. Montaje circuito de ensayo de aisladores

Fotografía 9. Ensayo húmedo



Fotografía 10. Tablero de control y medición

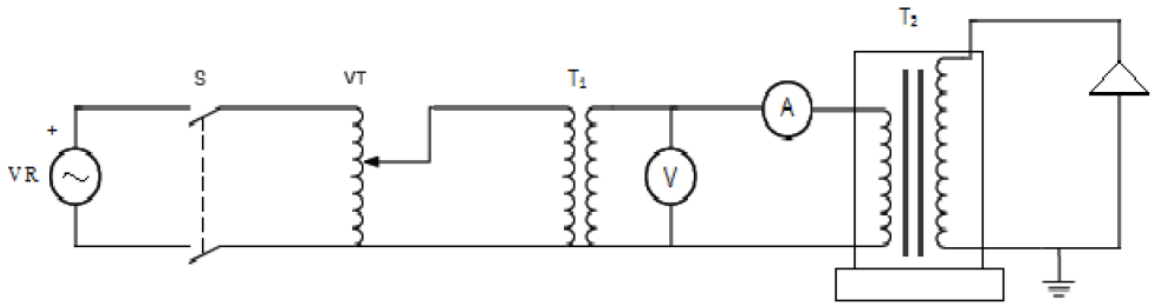


Diagrama 1. Circuito de ensayo para aisladores de suspensión.

Cada probeta fue sometida a diez solicitaciones progresivas de tensión de frecuencia industrial (50 Hz) a razón de 1kV/s app., hasta el contorneo (ruptura superficial de la frontera dieléctrica sólido-aire). Cabe destacar que la tensión que se registra como tensión de contorneo, es cuando la magnitud de corriente vista en el tablero se dispara hasta su valor máximo. Los valores de tensión de contorneo medidos son corregidos (normalizados) a 25°C, 1013 mbar (760mm Hg) y 65% de humedad relativa HR, según la norma ANSI C29.1 según:

Para todos los ensayos: $V_s = V \cdot \frac{K_h}{K_d} = V \cdot K$

Donde:

$V_s =$ Tensión normalizada o corregida

$V =$ Tensión medida en el ensayo

$K_h =$ Factor de corrección por humedad

$K_d =$ Factor de corrección por densidad del aire

$K =$ Factor de normalización.

Para el caso de condición húmeda, $K_H = 1$. Las condiciones atmosféricas (temperatura, presión y humedad relativa) se registran al inicio del ensayo de cada probeta. El valor de resistividad del agua destilada utilizada para la condición húmeda es de 1,81µs/cm.

Si bien los resultados obtenidos de los ensayos, en estricto rigor, no se pueden comparar directamente debido a que los aisladores no son nuevos, los resultados cumplen con dar una idea de la diferencia y tendencia entre los distintos escenarios de degradación.

3.4 Resultados

Los resultados expuestos se clasifican por tipo de ambiente de degradación. El resumen del promedio de los resultados obtenidos de los ensayos de tensión de contorneo a 50 Hz con sus valores normalizados a 25°C, 760 mmHg y 65% de humedad relativa, se muestran en las tablas respectivas de cada ensayo bajo condición seca y húmeda. Para información más específica de los datos obtenidos del ensayo, se pueden ver en las Tablas adjuntas en el Anexo 1.

3.4.1 Resultados degradación bajo techo.

Éste fue el primer ensayo que se realizó. El fin de esta prueba, es obtener resultados de referencia para lograr compararlos con datos extraídos de los ensayos realizados a aisladores bajo degradación a la intemperie y radiación UV.

Al ser aplicado el recubrimiento en la superficie de los aisladores, se puede observar que tiene un aspecto aceitoso de color amarillento y brillante como se pudo observar en la Fotografía 2 antes de ser ensayados. Al término del primer ensayo se puede apreciar que hay un escurrimiento del recubrimiento en la superficie del aislador producto de la acción del campo eléctrico y contorneo durante el ensayo, pero no se observó ningún tipo de carbonización o de áreas secas del producto.

Los resultados promedio de tensión de contorneo (TC) a aisladores sin degradar en condición seca fueron de 89,5 kV al inicio y 80,4 kV en el final del periodo de exposición. En condición húmeda, antes de realizar las mediciones, se hizo un chequeo visual del coeficiente hidrófobo el cual fue de HC1 (ver Fotografía 11). Luego, al hacer las pruebas en condición húmeda se obtuvo una TC de 74,2 kV para el inicio y 58,9 kV para los aisladores degradados al paso de 3 meses bajo techo.

Fotografía 11. Estado hidrófobo aislador con RN sin degradar

Comparando los resultados al inicio y al final del periodo de exposición a la degradación bajo techo durante 3 meses, se puede apreciar una disminución en la tensión de contorneo de 10,2% en condición seca y 20, 6% para condición húmeda. El resumen de resultados se expone en la Tabla 6. En la Tabla 6 se entiende como “inicio” a los ensayos que se realizaron a los aisladores recubiertos que aún no eran expuestos a la degradación bajo techo y “fin” como los ensayos que se realizaron luego de pasar 3 meses bajo techo.

Tabla 6. Resultados ensayo de aisladores con RN en condición seca y húmeda degradados bajo techo durante 3 meses.

Ensayo Aisladores con RN Bajo techo		
Tiempo exposición	Condición	
	Seca [kV]	Húmeda [kV]
Inicio	89,5	74,2
Fin	80,4	58,9
Diferencia	↓10%	↓21%

El HC antes de realizar el primer ensayo en condición húmeda a los aisladores era de HC1 como se mostró en la Fotografía 11 y luego de realizar el ensayo fue de HC2 como muestra la Fotografía 12. Después de pasar el periodo de degradación bajo techo durante 3 meses, se pudo observar un escurrimiento del material formando gotas en el borde de los aisladores como se muestra en la Fotografía 13. Esto indica que el producto no tiene la capacidad de mantener una capa uniforme sobre la superficie, debido a que es demasiado líquido. Luego se volvió hacer inspección visual de la clasificación hidrófoba antes del ensayo (Fotografía 14), mostrando un HC2 y después del ensayo era de HC3 (Fotografía 15). Esto indica claramente que el producto se ve afectado al paso de las 10 mediciones que se realizan por ensayo, y no vuelve a recuperar su estado inicial.

Fotografía 12. Estado hidrófobo aislador con RN sin degradar después de ensayo húmedo

Fotografía 13. Aislador con RN degradado tres meses bajo techo

Fotografía 14. Estado hidrófobo de aislador con RN degradado tres meses bajo techo

Viendo el Gráfico 1 se puede apreciar que ambas rectas siguen tendencias decrecientes similares. Tanto para el caso de condición seca como húmeda, la disminución de sus tensiones de contorneo se puede deber a que, a pesar de que los aisladores se mantuvieron bajo techo, igual tuvieron un grado de contaminación debido a que se dejaron colgados a poco más de un metro y medio del suelo; esto quiere decir que se pudieron contaminar al hacer aseo al laboratorio o simplemente cuando gente caminaba en los alrededores. Si bien, a simple vista no era apreciable la presencia de contaminación, pudo haber presencia de contaminantes solubles sobre el producto. La diferencia radica en que bajo condición húmeda se obtuvo resultados con diferencias mayores entre periodos de degradación, donde hubo un decaimiento de TC de un 21% mientras que para el caso en condición seca sólo fue de un 10%. Esto se puede deber en parte a la disminución de la capacidad hidrófoba del recubrimiento con el paso de los ensayos húmedos ya que pudo escurrir la capa de

Fotografía 15. Estado hidrófobo de aislador con RN degradado bajo techo luego de ensayo húmedo

recubrimiento por acción del escurrimiento del agua (más adelante, en la Sección 3.4.5 se aprecia mejor este fenómeno), y también a la presencia de agentes ionizantes que pueden estar presente en la contaminación. Cabe mencionar que mientras se hacía registro de las rupturas para ambas condiciones de ensayo, la TC no disminuye al paso de cada medición, pero si disminuye al obtener el valor promedio de las mediciones de cada ensayo después del periodo de degradación.

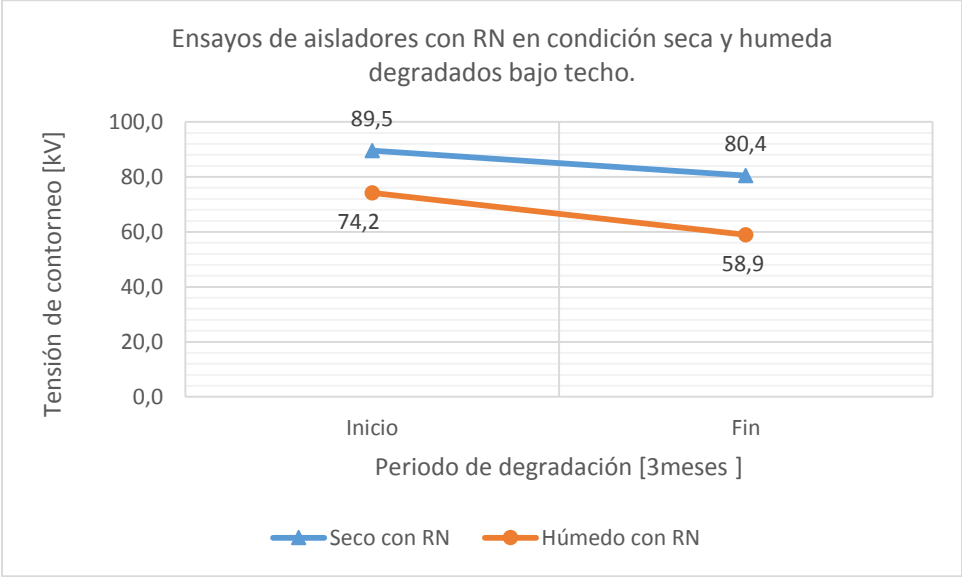


Gráfico 1. Ensayos de aisladores recubiertos en condición seca y húmeda: puntos en el inicio son sin degradar y puntos en el fin son previamente degradados bajo techo durante 3 meses.

3.4.2 Resultados de ensayos para aisladores previamente degradados a la intemperie

El propósito de éste proceso de degradación, es evaluar el comportamiento de la tensión de contorneo, ante el paso del tiempo de exposición a contaminación ambiente de aisladores recubiertos.

Para tener una medida de comparación, aparte de los datos preliminares obtenidos de la degradación bajo techo, se exponen aisladores sin recubrir, con el propósito de ser ensayados bajo condición seca y húmeda. En condición húmeda sólo se realizaron ensayos antes de la degradación y luego estos mismos aisladores se reutilizaron y se dejaron degradar para luego ser probados en condición seca. En condición seca, a los aisladores sin RN, se les hicieron pruebas sin degradar y posterior al paso del segundo y tercer periodo de degradación. Los aisladores con RN se ensayaron en todos sus periodos de degradación y condiciones.

Con el paso del tiempo, se hace una inspección visual del estado de contaminación de la superficie de los aisladores, notándose así, una mayor cantidad de residuo con el pasar de los meses. Estos aisladores fueron expuestos en el Patio de Alta Tensión de la UTFSM como se mencionó anteriormente, pero hay que destacar que hubo labores de construcción en las cercanías de donde se dejaron expuestos los aisladores y además estaban bajo unos árboles, lo que hizo depositar gran cantidad de polvo, pequeñas ramas, hojas y feca de pájaros. El resultado de la capa contaminante que se depositó en los aisladores recubiertos según el paso del tiempo de exposición, se muestran en las Fotografías 16, 17 y 18 (1 mes, 2 meses y 3 meses respectivamente). El aspecto de las superficies de los aisladores sin recubrir degradados durante 2 y 3 meses se muestra en las Fotografías 19 y 20 respectivamente.

Fotografía 16. Aislador con RN degradado durante un mes a la intemperie

Fotografía 17. Aislador con RN degradado durante dos meses a la intemperie

Fotografía 18. Aislador con RN degradado durante tres meses a la intemperie

Fotografía 19.Aislador sin producto degradado a la intemperie por dos meses

Fotografía 20. Aislador sin producto degradado a la intemperie por tres meses

A continuación se presentan el análisis de los resultados obtenidos de los ensayos de TC sobre aisladores expuestos a la intemperie.

3.4.2.1 Resultados de ensayos en condición seca para aisladores previamente degradados a la intemperie

Los resultados obtenidos del ensayo en condición seca para aisladores recubiertos y degradados a la intemperie, muestran que hay una disminución de un 7,6% de la TC entre el inicio y el primer periodo de degradación. Luego se presenta el decaimiento de un 1,6% entre el primer y segundo periodo de degradación, y un 3% entre el segundo y tercer periodo. Haciendo otra comparación, entre el resultado preliminar (sin degradar) y el del obtenido al paso del tercer mes de degradación, se observa que hay una diferencia de un 12%.

En el caso de las pruebas en aisladores degradados a la intemperie sin recubrir, no se obtiene un resultado luego del primer mes debido a que sólo se contaba con dos probetas para este proceso de degradación, las cuales se ensayaron luego del segundo y tercer mes de degradación respectivamente. Se observa que entre el periodo sin degradar y el segundo periodo de degradación, hay un cambio de TC en un 21%; resultado más holgado que en el

caso recubierto. Si se hace una comparación en el segundo periodo de degradación, se puede observar que en este caso, hay un decaimiento en la TC de un 11,5% respecto al caso con RN; mientras que en el tercer periodo hay un repunte de un 21% respecto a la TC del segundo periodo y a su vez un aumento de un 10,4% respecto al caso con RN. La causa de esto se puede deber a que entre el segundo y tercer periodo de degradación hubo precipitaciones* (entre los meses de Abril y Mayo), causando así un lavado superficial en ambas probetas, pero teniendo un resultado de lavado más significativo en la probeta sin RN. Ambas superficies se pueden comparar observando claramente una superficie bastante sucia en la Fotografía 18 y su contraste en la Fotografía 20. Finalmente, para el caso de aisladores sin RN, la diferencia que se registró entre la primera medición (sin degradar) y el último periodo de degradación fue un decaimiento de 4% en la TC.

*Nota: El periodo total de degradación que se hizo a la intemperie fue entre las fechas 21 de Enero hasta el 2 de Mayo del año 2017. Durante este periodo de tiempo, la mayor precipitación que se registró fue el día 6 de abril cerca del mediodía, donde cayó un total de 5,2 [mm] de agua. Los demás meses que fueron expuestos los aisladores no presentaron precipitaciones significativas (*Fuente: Dirección Meteorológica de Chile, Estación Rodelillo, Ad. mes de Enero, Febrero, Marzo y Abril).*

El resumen de los resultados de aisladores con y sin RN en condición seca se muestra en la Tabla 7 y en el Gráfico 2.

Graficando los puntos obtenidos de los ensayos se puede apreciar que para el caso de los aisladores con producto, a pesar de tener el declive de un 7,6% después del primer mes de degradación, los resultados del segundo y tercer mes de degradación respecto al caso sin degradar muestran que tiene una disminución de la TC de menor magnitud (2% y 3% respectivamente). En el caso de aisladores sin RN se observa que al paso de dos meses de degradación hubo una mayor disminución de la TC respecto al caso sin degradar (21%), y luego al paso del tercer mes de degradación hubo un aumento de la magnitud incluso mayor a la tensión registrada para el caso con RN debido a la limpieza de la superficie de los aisladores a causa de la precipitación.

Tabla 7. Resultados de ensayo a aisladores degradados a la intemperie en condición seca.

Ensayo Aisladores a la intemperie en condición seca		
Tiempo exposición [meses]	Con RN [kV]	Sin RN [kV]
Sin degradar	89,5	90,9
1	82,7 (↓7,6%)*	-
2	81,4 (↓9,1%) (↓2%)*	72,1 (↓21%) (↓11,5%)*
3	79 (↓12%) (↓3%)	87,2 (↓4%) (↑21%) (↑10,4%)

*Los resultados en paréntesis de color negro representan la diferencia porcentual entre los periodos en degradación y sin degradar.*Los resultados en paréntesis de color verde representa la disminución o el aumento de tensión porcentual del caso sin RN respecto al caso con RN.* Los números en paréntesis de color azul representan la diferencia porcentual entre periodos sucesivos.

Según lo expuesto anteriormente, se puede decir que el aislador con producto presenta una disminución progresiva en su TC con el paso del tiempo, donde cada vez su capa de depósito contaminante iba en aumento como se mostró en las Fotografías 16, 17 y 18. Si bien se esperaba que el producto tuviese una característica de repeler o de recubrir las partículas contaminantes con el producto de tal forma de mantener estable su superficie hidrófoba, como es en el caso de uso de grasas [2] [5] [14], mostró un comportamiento contrario. Incluso, luego de la precipitación, entre el segundo y tercer periodo de degradación, se pudo apreciar que los aisladores sin RN se limpiaron con facilidad (Fotografía 20) y tuvieron una TC de mayor magnitud respecto a los aisladores que si tenían recubrimiento luego del tercer periodo de degradación; mientras que los aisladores con RN tenían una capa importante de contaminante y su auto limpieza no fue satisfactoria.

A diferencia del caso de degradación bajo techo, el producto no escurrió. Esto debido a la contaminación del ambiente, ya que al depositarse en la superficie, creaba una capa de mayor viscosidad y compacta.

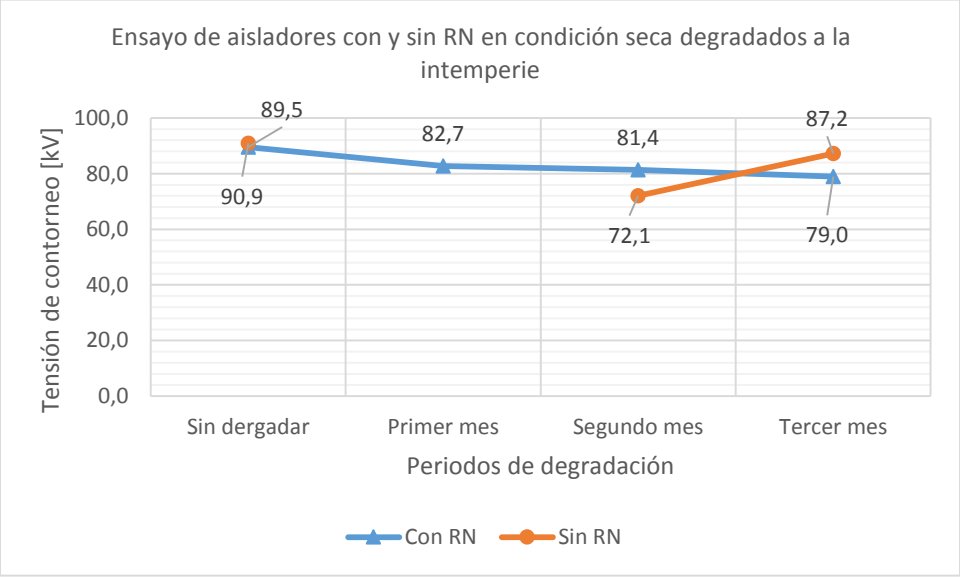


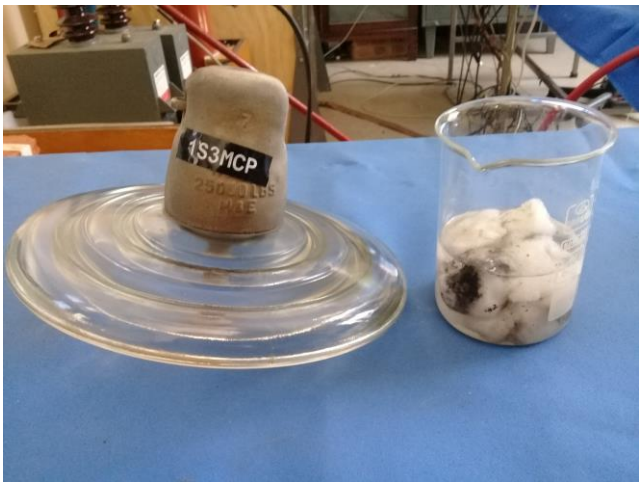
Gráfico 2. Ensayos de aisladores con y sin RN en condición seca degradados a la intemperie.

Otro aspecto importante a considerar, es que hubo fuerte presencia de corona en los ensayos en aisladores con producto cercano a la magnitud de 54 kV, mientras que en los aisladores sin producto hubo poca presencia corona antes de la ruptura abrupta entre superficie-aire. Esto se debe a la gran presencia de contaminantes no solubles los cuales retienen humedad y también la presencia de contaminantes salinos que promueven la ionización, produciendo así rupturas de baja intensidad [15].

Al final de estos ensayos, se eligió uno de los aisladores que se dejó degradando durante 3 meses en condición seca para medir su grado de contaminación según lo descrito en la norma IEC 60815 en su Anexo C, como se explicó en la Sección 3.3.1. Según esta norma, el

ambiente al cual fueron expuestos los aisladores es del tipo A, donde sus componentes principales son: la contaminación soluble que forma una capa conductora cuando se humedece, y la contaminación no soluble que forma una capa adherente para la contaminación soluble [16]. El aspecto del aislador al que se hizo esta medición, junto a los elementos utilizados para extraer la contaminación de este, se muestran en la Fotografía 21. El aspecto del aislador posterior a la limpieza y los depósitos contaminantes se muestran en la Fotografía 22. Estos depósitos se analizaron en el Laboratorio de Química de la UTFSM para medir la conductividad de la solución y su contenido de componentes no solubles (ver resultados de medición en Laboratorio en Anexo 2), los cuales arrojaron un resultado de 158,9[μS/cm] y 178,9[mg], respectivamente. Luego, usando las expresiones matemáticas mostradas en el Anexo C, en su sección C.4, da una densidad de depósitos solubles (ESDD) de 0,00778[mg/cm^2] y su densidad de depósitos no solubles (NSDD) de 0,0556[mg/cm^2]. Dado estos resultados y siguiendo con lo descrito en la Sección 8.3 de la norma, se puede decir que es una contaminación es del tipo E_3 o contaminación media.

Fotografía 21. Implementos para extraer contaminación de aislador



Fotografía 22. Aislador limpio y reservorio de contaminante

3.4.2.2 Resultados de ensayos en condición húmeda para aisladores previamente degradados a la intemperie

Como se dijo anteriormente, los aisladores fueron sometidos a una contaminación progresiva como se observó al paso del tiempo de exposición. Al paso del primer mes, ya se veía una capa de depósitos sobre la superficie de los aisladores. Los aisladores contaminados se preparan para ser ensayados en condición húmeda rociándolos con agua destilada. Al estar húmedos, se hace una inspección del estado hidrófobo de la superficie mostrando rápidamente un decaimiento abrupto de la característica hidrófoba, registrando un coeficiente de HC5 como se muestra en la Fotografía 23 para el aislador degradado durante un mes, antes de ser ensayado, y luego de realizar el ensayo húmedo, se puede observar que decae nuevamente a HC6 como muestra la Fotografía 24. Para el caso del aislador degradado dos meses que se muestra en la Fotografía 25, se puede observar que es similar al primer caso con la diferencia que en su superficie muestra sectores hidrófobos diferentes como se muestra en la Fotografía 26 posterior al ensayo. Para el caso del aislador degradado 3 meses tuvo un repunte de su estado hidrófobo, el cual se puede deber a la precipitación donde pudo haber lavado en cierta medida la superficie como se muestra en la Fotografía 27, pero luego del ensayo decae nuevamente hasta ser totalmente hidrófilo (HC6) como se muestra en la Fotografía 28.

En los ensayos de aisladores con RN para condición húmeda, luego del primer mes de degradación se aprecia una disminución de un 31,4% respecto a la medición que se hizo sin degradar. Esto es debido a la gran presencia de contaminación depositada en la superficie del aislador, produciendo un decaimiento de la capacidad hidrófoba del recubrimiento. Para la medición realizada luego del segundo periodo de degradación (2 meses), se observa que la tendencia a la disminución de la TC se mantiene, mostrando una diferencia de un 6,4% respecto a la medición de TC del aislador degradado durante un mes y un 36% respecto a la medición del aislador sin degradar. Otro resultado muestra el ensayo realizado luego del tercer periodo de degradación (3 meses), mostrando un aumento de un 11% respecto a su medición anterior y una disminución de un 29% respecto al ensayo del aislador sin degradar.

Fotografía 23. Estado hidrófobo de aislador después de estar un mes degradado a la intemperie

Fotografía 24. Estado hidrófobo de aislador degradado durante un mes después de ensayo húmedo

Fotografía 25. Estado hidrófobo de aislador degradado a la intemperie durante dos meses

Fotografía 26. Estado hidrófobo de aislador degradado de la intemperie durante dos meses después de ensayo húmedo

Fotografía 27. Estado hidrófobo de aislador con RN degradado a la intemperie durante 3 meses

Fotografía 28. Estado hidrófobo de aislador con RN degradado a la intemperie durante 3 meses después de ensayo húmedo

El resumen de los resultados de aisladores con y sin RN en condición húmeda se muestra en la Tabla 8 y en el Gráfico 3.

Respecto a la medición sin RN, sólo se obtuvo un resultado de TC de 69,8 kV, que en comparación con la probeta recubierta, su diferencia es de un 6%. Su coeficiente hidrófobo fue HC3 como se muestra en la Fotografía 29. Se hizo una sola medición dado que estos aisladores (2 unidades) se reutilizaron para ser parte de los aisladores que fueron degradados a la intemperie sin RN, para luego ser nuevamente ensayados en seco como se mostró en la Sección 3.4.2.2.

Fotografía 29. Superficie hidrófoba de aislador sin producto

Si se comparan los resultados obtenidos entre las mediciones sin degradar y las del primer mes de degradación, para ambas condiciones (seca y húmeda) en aisladores con producto, se puede apreciar que en el caso húmedo hay una mayor disminución en su tensión de contorneo. Esto se debe a que disminuye la rigidez dieléctrica de la superficie del aislador, a causa del aumento de circulación de corriente por su superficie al haber contaminación depositada en ella y al entrar en contacto con la humedad o rocío (como se hizo en el ensayo). Es por esto que la condición húmeda es más severa en comparación con la condición seca.

Tabla 8. Resultados de ensayo a aisladores a la intemperie en condición húmeda

Tiempo exposición [meses]	Con RN [kV]	Sin RN [kV]
Sin degradar	74,2	69,8 (↓6%)*
1	51 (↓31,4%)*	-
2	47,7 (↓36%) (↓6,4%)*	-
3	52,8 (↓29%) (↑11%)	-

*Los resultados en paréntesis de color negro representan la diferencia porcentual entre los periodos en degradación y sin degradar.*Los resultados en paréntesis de color verde representa la disminución o el aumento de tensión porcentual del caso sin RN respecto al caso con RN.* Los números en paréntesis de color azul representan la diferencia porcentual entre periodos sucesivos.

También se destaca el aumento de TC luego del tercer periodo de degradación, teniendo un aumento de aproximadamente un 11 % respecto a la medición anterior. Este último puede deberse a que la auto limpieza del aislador tuvo un efecto positivo, a pesar de presentar una contaminación visible. El efecto de depósitos de contaminantes salinos en la superficie de aisladores es el más perjudicial cuando estos están en servicio, debido a que facilita la conductividad eléctrica en la superficie del aislador al entrar en contacto con la humedad, promoviendo así el proceso de ruptura a una menor tensión. Esto se ve reflejado en la presencia de arcos de color naranjo (baja energía) entre el espárrago y las faldas del aislador, antes de la ruptura total por el aire al momento de hacer las mediciones. Es posible que gracias al escurrimiento de agua causada por la precipitación, se pudo limpiar o extraer el exceso de esta contaminación salina presente en la superficie, produciendo así un registro de aumento de TC en el último ensayo realizado.

Si bien los resultados obtenidos después de los periodos sucesivos de degradación presentan un declive importante respecto a la medición de referencia (sin degradar), estos muestran una tendencia a estabilizarse al igual que el caso del ensayo en condición seca.

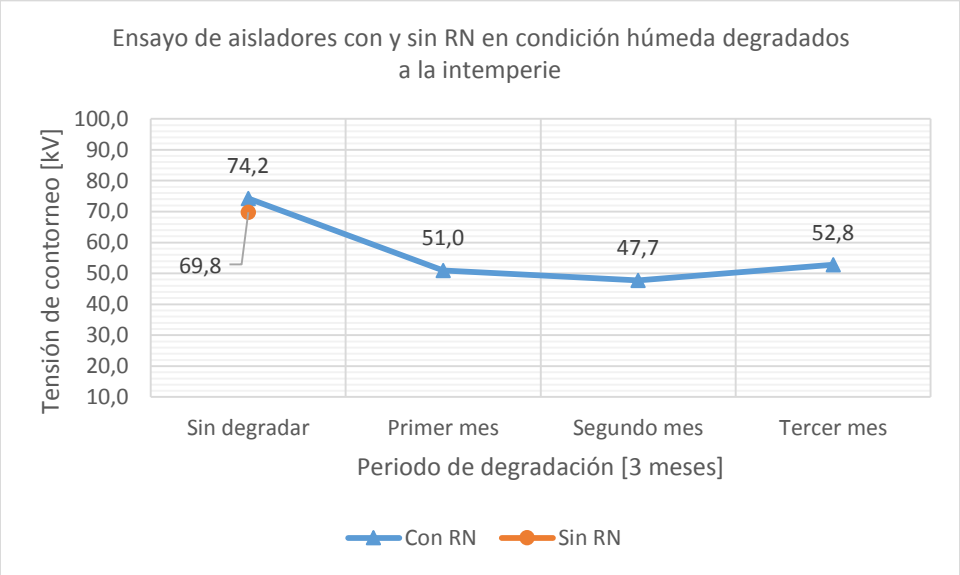


Gráfico 3. Ensayo en condición húmeda para aisladores con y sin producto bajo degradación a la intemperie.

En otro aspecto, no existe tendencia aparente de decaimiento o aumento de tensión de contorneo durante el registro de las diez rupturas consecutivas, tanto para los ensayos de aisladores con producto en condición seca y húmeda. A lo que en el caso húmedo respecta, se puede decir que para todos los casos la superficie termina siendo prácticamente hidrófila, y por lo tanto se puede decir que independiente del tiempo de exposición a la intemperie, el resultado hidrófobo superficial es el mismo. A pesar de esto, se destaca que no existe una degradación superficial sobre el vidrio ni en el recubrimiento; tampoco escurrimiento del producto a causa de los contorneos, por lo que posiblemente, el producto puede funcionar como una capa protectora para el vidrio al formar esta especie de coraza en conjunto con la contaminación.

Aunque el producto bajo este estudio, podría ser una capa que protege el vidrio bajo contaminación o sin esta, es importante que suprima las corrientes de fuga, para así no promover la formación de bandas secas y posibles contorneos que puedan afectar la calidad del suministro eléctrico. Esto se podrá corroborar en el siguiente capítulo dedicado al ensayo de plano inclinado para evaluar el efecto de tracking y erosión.

3.4.3 Resultados de ensayos para aisladores previamente degradados en radiación UV

El propósito de éste proceso de degradación, es evaluar el comportamiento de la tensión de contorneo ante el paso del tiempo de exposición de aisladores recubiertos con RN bajo radiación UV, para condición seca y húmeda.

Nota: al final del tercer periodo de degradación, se percata que uno de los focos de 300 [W] falló. Si bien esto pudo haber afectado en el proceso de degradación, los resultados muestran una tendencia de linealidad.

3.4.3.1 Resultados de ensayos en condición seca para aisladores previamente degradados en radiación UV

Los aisladores que se degradaron durante un mes se sacaron de la cámara UV para luego ser ensayados. Se puede apreciar que sobre su superficie es casi imperceptible que tiene producto, salvo la presencia de gotas del producto en las faldas del aislador como se muestra en la Fotografía 30. Esto da señal que existe escurrimiento del producto y no resulta como una capa compacta, al igual como se observó en los aisladores bajo techo que se degradaron durante tres meses. Los resultados obtenidos del ensayo en condición seca de aisladores recubiertos, muestran que hay un decaimiento del 8% de la TC al cabo del primer periodo de degradación. En el siguiente periodo se presenta el decaimiento de un 3,2% entre el primer y segundo periodo de degradación, y entre el segundo y tercer periodo prácticamente no hay variación. Haciendo otra comparación, entre el resultado preliminar (sin degradar) y el del obtenido al paso del tercer mes de degradación, se observa que hay una diferencia de un 12%. Estos resultados se pueden visualizar en la Tabla 9.

Fotografía 30. Aspecto aislador recubierto y degradado un mes bajo UV

Al observar en la Gráfica 4, después de la primera medición, los resultados de la TC sufren un decaimiento pero con tendencia a converger en un resultado de ruptura como se aprecia en la disminución de la diferencia porcentual entre resultados sucesivos. Esto puede significar que el recubrimiento al ser degradado bajo radiación UV, disminuye su capacidad de

protección ante TC pero su degradación no es progresiva, si no que tiende a frenar su degradación al paso de un tiempo o por lo menos en tres meses bajo una radiación UV.

Tabla 9. Resultados de ensayo a aisladores bajo degradación UV en condición seca.

Tiempo exposición [meses]	TC [kV]
Sin degradar	89,5
1	82,4 (↓8%)*
2	79,8 (↓11%) (↓3,20%)*
3	78,9 (↓12%) (↓0,2%)

*Los resultados en paréntesis de color negro representan la diferencia porcentual entre los periodos de degradación y sin degradar.*Los números en paréntesis de color azul representan la diferencia porcentual entre periodos sucesivos.

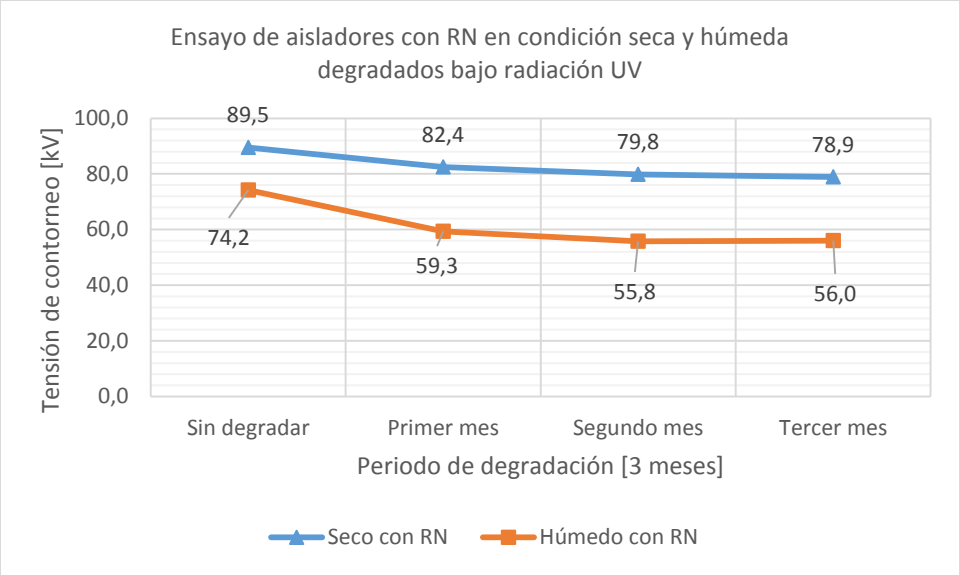


Gráfico 4. Ensayos en condición seca y húmeda para aisladores recubiertos degradados en radiación UV.

Durante el proceso de ensayo, mientras se hacían las diez mediciones, se pudo observar la presencia de arcos pequeños de color blanco antes de la ruptura total. Por otro lado, se destaca que al paso de la degradación y los ensayos, no se ve presencia de carbonización ni tampoco daños superficiales tanto en el producto como en el vidrio.

3.4.3.2 Resultados de ensayos en condición húmeda para aisladores previamente degradados en radiación UV

Al igual que en el caso del ensayo bajo condición seca, la superficie recubierta del aislador tiene un aspecto seco y opaco; muy diferente al momento en que entró el aislador.

Fotografía 31. Estado hidrófobo aislador degradado en UV durante un mes

Fotografía 32. Estado hidrófobo aislador degradado en UV durante tres meses después de ensayo húmedo

Observando los resultados obtenidos en la Tabla 10, se puede observar que el primer resultado obtenido a partir de los aisladores sin degradar es de 74,2 kV, mientras que el resultado luego de la primera degradación es de 59,3 kV, dando una diferencia del 20%. Ésta diferencia es holgada si se compara con los resultados que se obtuvieron luego del segundo y tercer periodo de degradación, alcanzando la mayor diferencia de tan sólo 6%, e incluso, en el tercer periodo de degradación hubo un pequeño aumento de la TC respecto al periodo anterior. Comparando el resultado preliminar con el último resultado del periodo de degradación se observa una diferencia de un 25% de decaimiento. Mientras se realizaba el registro de la tensión de contorneo, se pudo observar pequeños arcos blancos antes de la ruptura total entre la frontera superficie-aire.

Tabla 10. Resultados de ensayo a aisladores bajo degradación UV en condición húmeda.

Tiempo exposición [meses]	TC [kV]
Sin degradar	74,2
1	59,3 (↓20%)*
2	55,8 (↓25%) (↓6%)*
3	56,0 (↓24,6%) (↑0,4%)

*Los resultados en paréntesis de color negro representan la diferencia porcentual entre los periodos en degradación y sin degradar.*Los números en paréntesis de color azul representan la diferencia porcentual entre periodos sucesivos.

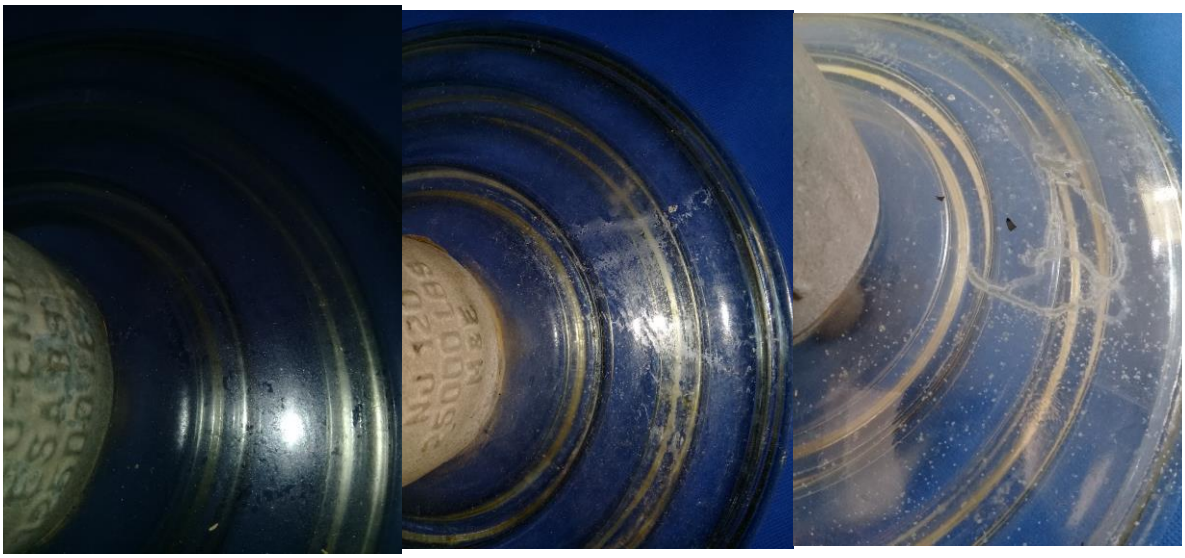
A medida que se iban realizando los ensayos, se puede decir que el producto fue perdiendo su capacidad hidrófoba, registrando un coeficiente hidrófobo de HC4 en un principio, como se muestra en la Fotografía 31, hasta decaer a un estado hidrófilo luego del ensayo efectuado al aislador degradado durante tres meses como muestra la Fotografía 32.

Es de suma importancia mencionar que después de los ensayos en condición húmeda, al ser secados los aisladores, se percata de un daño superficial del producto. El daño tiene un aspecto de resequedad que se percibe como una superficie quebradiza o escamosa del producto sobre la superficie de vidrio y con presencia de un polvillo blanco como se muestra

en la Fotografía 33. Estos defectos superficiales pueden haber producido caminos conductivos que facilitaron el proceso de ruptura. Estos daños fueron progresando conforme al periodo de degradación como se muestra en las Fotografías 34. Posiblemente se pudo deber a la pérdida de partículas del producto a causa de la exposición continua de alta temperatura y a la radiación ultra violeta en sí, produciendo una resequedad del producto y consigo una pérdida de adherencia de este al vidrio. También se pudo deber a que el vidrio sufre dilatación y/o contracción de su estructura cristalina a causa de los cambios de temperatura sufridos en la cámara UV, por lo que el efecto combinado de esta característica y la resequedad del producto pudieron haber producido pequeñas grietas del recubrimiento pero esto era imperceptible. A pesar de que el efecto de agrietamiento del producto no pudo ser observado a simple vista antes del ensayo húmedo, quedó en evidencia posterior al ensayo como se mostró en la Fotografía 33.

A pesar de esto, en la Gráfica 4 se observa que después de la caída entre el primer y segundo punto, la pequeña diferencia de tan sólo 0,4% entre el segundo y tercer periodo de degradación da luz a una tendencia a converger alrededor de una magnitud de 56 [kV] en el mediano plazo; comportamiento similar que el observado en los ensayos de condición seca.

Fotografía 33. Aspecto de aislador degradado bajo UV luego de ensayo húmedo



(a) Después de un mes (b) Después de dos meses (c) Después de tres meses

Fotografía 34. Aspecto de aisladores degradados en UV después de ensayo húmedo

3.4.4 Comparación de resultados según condición de ensayo

En esta sección se comparan los resultados obtenidos de los distintos tipos de degradación para sus respectivas condiciones, con el fin de encontrar similitudes o diferencias para los distintos casos.

En estricto rigor, los casos de degradación a la intemperie y UV se deben comparar con el caso de referencia, bajo techo. Independiente de esta premisa y según la tendencia de los resultados expuestos en las secciones anteriores, se abre la puerta a una comparación entre la degradación a la intemperie y UV.

3.4.4.1 Comparación de resultados de ensayos en condición seca

En primer lugar, se hace una comparación de lo observado al hacer las mediciones de contorneo. Para el caso de aisladores degradados bajo techo, se observa gran presencia de actividad corona sostenida o de arcos pequeños de color naranjo antes de la ruptura total. En el caso de los aisladores degradados bajo techo y bajo UV, mostraron un comportamiento similar, con la diferencia de que hubo menor presencia de arcos antes de la ruptura total, pero estos eran de color blanco y mayor amplitud de corriente.

Para lograr hacer una comparación entre los resultados de los diferentes ambientes de degradación, es necesario prestar atención a los resultados expuestos en la Tabla 11. En primer lugar, el caso de referencia de aisladores recubiertos es el mismo para todos, con excepción del caso sin producto, donde muestra un valor de tensión de contorneo levemente

mayor (1,5%). Para el primer periodo de degradación, sólo se pueden comparar los resultados obtenidos de la degradación a la intemperie con la de radiación UV, mostrando una diferencia muy leve. No sucede lo mismo en los periodos de degradación posteriores: si bien entre el ambiente contaminado, UV y bajo techo no muestran una diferencia muy significativa, el caso sin recubrir tiende a variar en mayor magnitud. Esto se ve reflejado tanto en el aumento de tensión de contorneo luego del segundo periodo de degradación (producto de las precipitaciones genera la auto limpieza efectiva de la superficie), como en la comparación entre el resultado del tercer periodo y el periodo sin degradar, mostrando tan sólo un 4,1% de diferencia. No sucede lo mismo en el caso de los aisladores recubiertos: los resultados son más homogéneos, mostrando diferencias entre los resultados del tercer periodo alrededor del 2% y de 12% de diferencia entre los resultados del tercer periodo de degradación con el caso de referencia (sin degradar).

Esto da luz de que a pesar de que los aisladores recubiertos fueron degradados ante diferentes ambientes, estos, luego del caso preliminar, tuvieron un comportamiento similar. Esto a su vez se ve reflejado en el Gráfico 5, donde las curvas se ven prácticamente sobrepuestas, y a pesar de que los valores resultantes para el caso bajo techo sólo se obtuvieron los resultados preliminares y finales, se puede decir que los resultados de tensión de contorneo tienden a un valor similar, alrededor de los 80 kV. De esta información se puede decir que: independiente de los ambientes a los cuales fueron expuestos los aisladores recubiertos, no hubo gran influencia de los distintos grados de exposición en los resultados obtenidos de tensión de contorneo al momento de ser ensayados en condición seca. Para todos los casos, parece ser que la rigidez dieléctrica del conjunto "producto-aislador", muestra una tendencia decreciente luego del caso sin degradar, pero que converge a un valor dado luego de todo el periodo de exposición a la degradación.

Tabla 11. Comparación de resultados en condición seca.

Tiempo exposición [meses]	**Bajo techo [kV]**	**Radiación UV [kV]**	**Intemperie [kV]**	
			con RN	**sin RN**
Sin degradar	89,5	89,5	89,5	91,9 (↑1,5%)
1		82,4	82,7	
2		79,8	81,4	72,1
3	80,4	78,9 (↓2%)*	79 (↓2%)	87,2 (↑8,4%)
Diferencia %	**↓10,2**	**↓12**	**↓12**	**↓4,1**

*Los números en paréntesis rojos representan la diferencia porcentual entre el resultado del respectivo ambiente de degradación respecto los resultados bajo techo.

Otra similitud, es que el producto en la superficie del aislador no mostró patrones de carbonización o resequedad producto del arco. Se dijo que en el caso preliminar se vio un escurrimiento del producto a causa de la acción del campo eléctrico y contorneo, donde se observaron caminos que dejó el arco, pero en ningún caso mostró signos de deterioro a la vista tanto en el producto mismo como en la superficie vítrea. Este punto tiene un sentido paradójico, ya que el ensayo de erosión y tracking hecho sobre placas de vidrio, que se expone en el siguiente capítulo de esta memoria, el producto mostró signos de deterioro a tensión bastante más baja (comparativamente hablando) y corrientes del orden de los mili-amperios.

Esto debido a que los eventos de contorneo, además de ser en la frontera aislador-aire, tienen una característica más aleatoria que las descargas vistas en el ensayo de tracking, donde éstas son localizadas. Más adelante se verá con más detalle este tema.

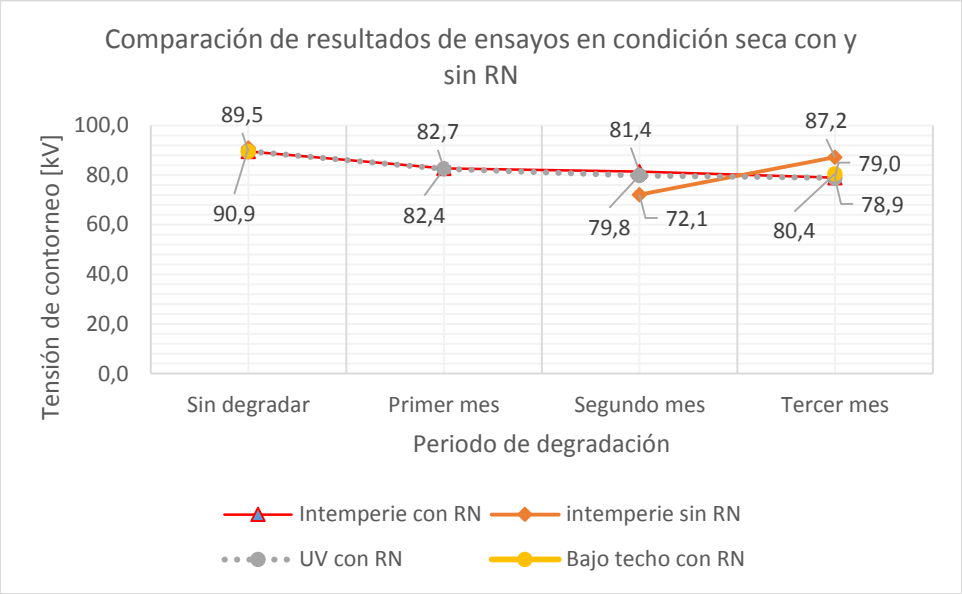


Gráfico 5. Comparación de resultados de ensayos en condición seca con y sin RN.

Claramente hay una diferencia significativa al observar las superficies de los aisladores recubiertos y expuestos a degradación. Los aisladores que se degradaron bajo techo no presentan una diferencia significativa en comparación al momento en que se dejaron degradar, sólo muestran un escurrimiento del producto al ser muy líquido; mientras que los aisladores expuestos a la intemperie muestran una superficie con depósitos de contaminación gradual conforme al tiempo de exposición y no muestra escurrimiento debido a que los mismos contaminantes hacen el trabajo de compactar el producto a la superficie; y los aisladores bajo degradación UV mostraron una resequedad gradual al paso del tiempo de exposición. Si bien se puede esperar que los resultados de tensión de contorneo para todos estos casos fuesen diferentes, la realidad es que tienden al mismo valor. Para el caso de aisladores degradados a la intemperie se esperaban valores de menor magnitud respecto a los casos de degradación caso bajo techo o UV, debido a la presencia de humedad atrapada por los componentes no solubles adheridos al producto, pero los valores fueron parecidos o levemente mayores. Esto se debe a que el fenómeno de ruptura dieléctrica superficie-aire en condición seca, pasa a ser protagonista la distancia de fuga del aislador y su forma, más que la condición de su superficie. Esto puede explicar la leve diferencia entre los resultados para esta condición.

3.4.4.2 Comparación de resultados de ensayos en condición húmeda

En esta condición, el comportamiento de los arcos vistos en los ensayos es similar a la del caso seco, con la diferencia que los arcos vistos eran más ramificados y de menor intensidad

de corriente. Esto es a causa de las “mini-cascadas” que se producen en la falda del aislador al ser mojado con niebla artificial por acción del compresor.

Al igual que el caso en condición seca, como muestra la Tabla 12, el dato preliminar para los aisladores recubiertos es el mismo, dando el valor de 74,2 kV; mientras que para el caso sin recubrimiento es de 69,8 kV, arrojando una disminución de un 6%. Como sólo se registró un valor para el caso sin recubrir en condición húmeda, se puede hacer una comparación solamente para el periodo sin degradar.

En el caso del primer y segundo proceso de degradación, donde sólo se puede comparar el caso a la intemperie y UV, muestra diferencias significativas en contraste al caso de condición seca; mostrando una disminución de un 14% de los resultados obtenidos de la degradación a la intemperie respecto al caso UV. Este fenómeno se puede atribuir a que las partículas no solubles y solubles presentes en la capa contaminante del aislador causan un mayor efecto de propagación de los arcos a menor tensión en comparación a los daños ocasionados en el recubrimiento por la exposición a la radiación UV.

Al llegar al tercer periodo de degradación, se puede observar que los resultados obtenidos tanto en el caso UV como a la intemperie son menores respecto al caso bajo techo; mostrando en el caso a la intemperie un disminución menor (10,5%) en comparación con el caso UV (5%). Y si se hace una comparación entre los resultados del tercer periodo con el preliminar para los diferentes casos, se puede ver que hay una diferencia desde un 20,6% para el caso bajo techo, hasta un 29% para el caso a la intemperie; mientras que en el caso UV queda entre estos dos resultados con un 25%.

Tabla 12. Comparación de resultados en condición húmeda.

Tiempo exposición [meses]	**Bajo techo [kV]**	**Radiación UV [kV]**	**Intemperie [kV]**	
			con RN	**sin RN**
Sin degradar	74,2	74,2	74,2	69,8 (↑6%)
1		59,3	51 (↓14%)*	
2		55,8	47,7 (↓14,6%)	
3	58,9	56,00 (↓5%)*	52,8 (↓10,5%)	
Diferencia %	↓20,6	↓25	↓29	

*Los números en paréntesis rojos representan la diferencia porcentual entre el resultado del respectivo ambiente de degradación respecto los resultados bajo techo. *Los resultados en paréntesis de color verde representa la disminución o el aumento de tensión porcentual del caso a la intemperie respecto al caso UV.

Al ver el Gráfico 6, ciertamente se puede decir que el caso que se vio más perjudicado en relación a su disminución de tensión de contorneo, fue el caso a la intemperie. Aquí se puede hacer alusión a que los resultados obtenidos a la intemperie, en relación a los demás procesos de degradación, cae bajo la “responsabilidad” de la poca o nada capacidad de retener la característica hidrófoba al estar en presencia de contaminación y así promover la formación de bandas secas; más si la capa contaminante posee componentes no solubles.

Finalmente, se puede decir que para el caso en condición húmeda existen diferencias al momento de comparar los resultados al final de todo el proceso de degradación, siendo el

caso bajo techo el de mayor registro de tensión de contorneo, seguido por el caso UV y por último el de peor rendimiento que es el caso a la intemperie. Por lo tanto, si se contrasta con el caso en condición seca, aquí si hay un orden de valor al momento de analizar los distintos procesos de degradación según sus condiciones de superficie.

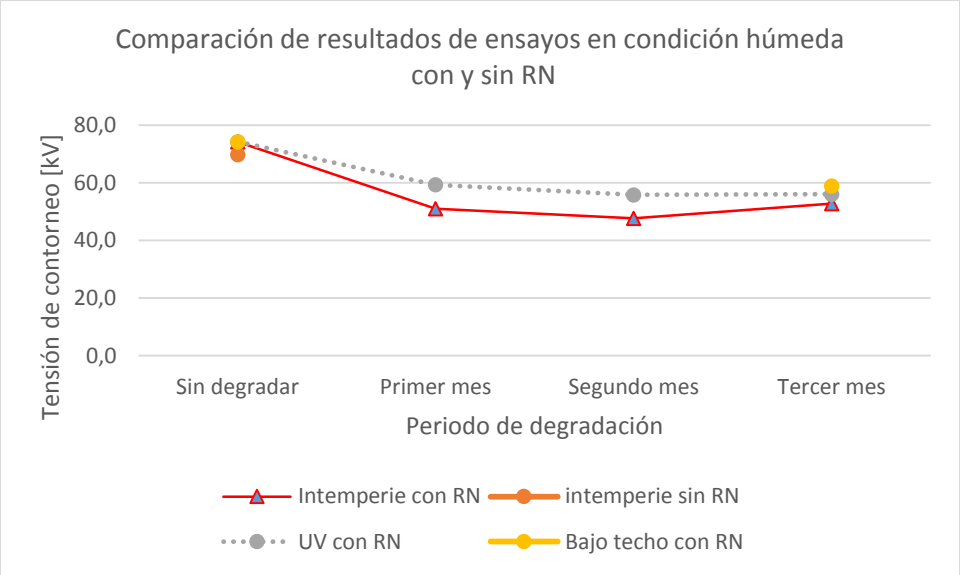


Gráfico 6. Comparación de resultados de ensayos en condición húmeda con y sin RN.

3.4.5 Ensayos de aisladores lavados.

Esta sección apunta a simular un mantenimiento preventivo de lavado superficial de aisladores. Se busca tener una noción de cómo cambiarían las condiciones superficiales de los aisladores recubiertos y degradados a la intemperie después de someterlos a un lavado superficial. Para poder cumplir esta idea, se realizaron ensayos a partir de dos condiciones previas:

- *Condición 1*: los aisladores que fueron previamente ensayados en **condición seca**, fueron lavados y se dejaron secar, para ser nuevamente ensayados en condición seca.

- *Condición 2*: los aisladores que fueron previamente ensayados en **condición húmeda**, fueron lavados y se dejaron secar, para ser nuevamente ensayados en condición húmeda.

Todos los aisladores fueron lavados con un chorro de agua destilada de conductividad 1,81µs/cm, con ayuda de un compresor que se mantuvo en una presión de 4 psi.

De los 6 aisladores que se degradaron a la intemperie, sólo se lavaron 5 debido a que uno de los aisladores que se degradaron hasta el tercer periodo, se dejó como muestra para hacer medición del grado de componentes solubles y no solubles presentes en la contaminación.

Otro aspecto a considerar, es que las probetas degradadas bajo techo también fueron sometidas a esta simulación de mantenimiento. Los resultados que se toman como preliminares (sin degradar) son los obtenidos luego del paso de todo el periodo de degradación.

Es de suma importancia mencionar que, una vez realizado el proceso de limpieza de los aisladores, las partículas contaminantes que se lograban remover, se llevaban consigo parte del recubrimiento dado que se percató en el charco de agua resultante después de lavar los aisladores, una presencia aceitosa en el agua depositada. Esto quiere decir que, al lavar el aislador, se desprende el recubrimiento; esto puede ser una ventaja, ya que se puede hacer un mantenimiento de lavado común y luego recubrir la superficie del aislador nuevamente si es que se desea, sin tener que hacer mantenimiento de limpieza en seco, los cuales son costosos y tediosos. Esto puede ser una ventaja si se compara con el producto de silicona RTV: este producto es frágil, por lo que se debe tener cuidado al momentos de hacer mantenimiento de lavado, ya que pierde su adherencia a la superficie, la que depende de los componentes que se adhieren a la formula y también al espesor del recubrimiento [4].

Aunque el producto bajo estudio pierde su adherencia al ser lavado, el ser una especie de aceite, ayuda a que su superficie mantenga su estado hidrófobo ya que no es necesario una capa de espesor fija debido a su naturaleza líquida.

(a) Bajo techo

(b) Intemperie un mes

(c) Intemperie dos meses

(d) Intemperie tres meses

Fotografía 35. Aspecto de superficie aisladores previamente degradados a la intemperie y luego lavados

3.4.5.1 Resultados de ensayos en condición seca a aisladores lavados.

Luego de ser lavados los aisladores, se puede observar una disminución de la contaminación en la superficie del vidrio, pero aún es visible una cantidad no despreciable de contaminación debido a que la presión aplicada por el compresor no fue suficiente para remover toda la contaminación presente en la superficie, a excepción del caso bajo techo. Esto se puede observar en la Fotografía 35.

En la Tabla 13 se muestran los resultados obtenidos, posterior al lavado de la superficie de los aisladores. El resultado con mayor diferencia es el obtenido para el caso sin degradar, obteniendo un aumento de tensión de ruptura de un 7,1%. Este cambio se puede deber a que el lavado de la superficie cumplió el rol esperado de limpiar residuos contaminantes de la superficie los cuales pueden haber sido en mayor medida componentes iónicos. No sucede lo mismo con las mediciones posteriores, donde las diferencias no son muy marcadas, pero sí hay una leve disminución de la tensión de contorneo posterior al lavado como se muestra en el Gráfico 7. Puede ser que esta diferencia pequeña sea causa de que el día en que se hizo el ensayo en seco, alcanzó valores de 83% de humedad. Al haber presencia de partículas no solubles, éstas al retener la humedad puede haber afectado en la medición y esto se refleja como la disminución de tensión de ruptura en la condición 1 respecto a la condición seca. Esto puede dar la idea de que el producto logra recuperar las condiciones iniciales, siempre y cuando su superficie no se encuentre con exceso de contaminación. Sin embargo, se sabe que para el caso en condición seca, es de esperar que los resultados sean parecidos, debido a que la tensión de contorneo depende más de la distancia de fuga que la superficie contaminada.

Tabla 13. Comparación de resultados entre intemperie y condición 1

Tiempo exposición [meses]	Intemperie [kV]	condición 1 [kV]
Sin degradar	80,4	86,1 (↑7,1%)
1	82,7 (↑3%)	81,6 (↓5,3%) (↓1,4%)
2	81,4 (↑1,2%) (↓2%)	80,1 (↓7%) (↓2%) (↓2%)
3	79 (↓2%) (↓3%)	78,6 (↓8,8%) (↓2%) (↓0,6%)

*Los resultados en paréntesis de color negro representan la comparación entre los periodos en degradación y sin degradar.*Los resultados en paréntesis de color verde representa la disminución o el aumento de tensión de la condición 1 respecto a la intemperie.* Los números en paréntesis de color azul representan la comparación entre periodos sucesivos.

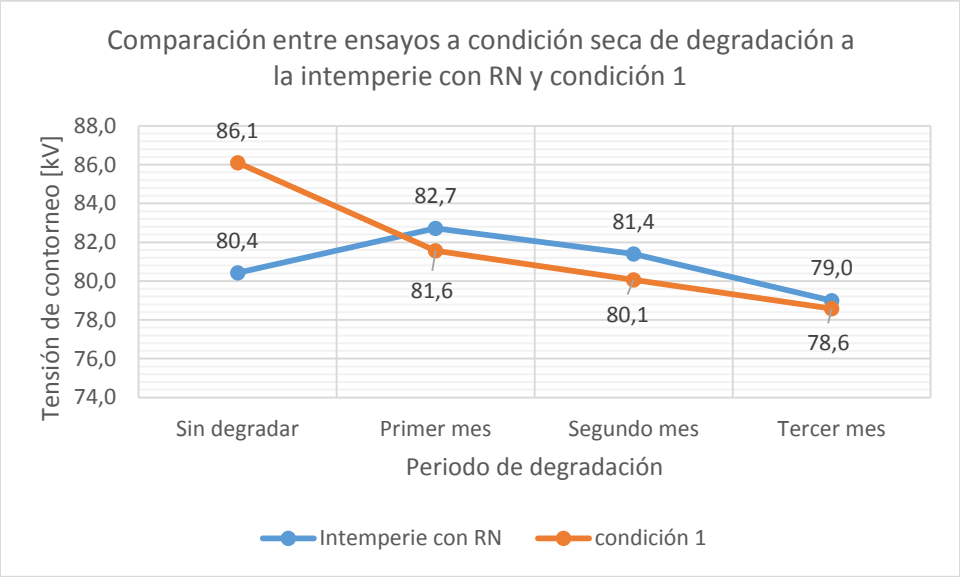


Gráfico 7. Comparación entre ensayos a condición seca de degradación a la intemperie con producto y condición 1

3.4.5.2 Resultados de ensayos a condición húmeda a aisladores lavados

Al igual que la condición seca, posterior al lavado de cada aislador se puede observar una capa no despreciable de contaminación, pero de menor medida en comparación con su estado anterior.

A diferencia del caso anterior, aquí si hubo diferencias sustanciales. Se puede observar en la Tabla 14 y el Gráfico 8 que posterior al lavado hay un aumento en la magnitud de tensión de contorneo en todos sus puntos. Esto se debe a que el lavado de los aisladores tuvo efecto para remover componentes salinos de la superficie que facilitan el proceso de contorneo y a su vez limpiar el exceso de partículas no solubles que promueven la acumulación de humedad. Esto puede reflejar que el producto tiene efecto sobre las partículas iónicas, teniendo una característica de repelencia de éstas y así, al ser lavada la superficie aislante, poder removerlas.

Tabla 14. Comparación de resultados entre intemperie y condición 2

Tiempo exposición [meses]	Intemperie	condición 2
Sin degradar	58,9	68,5 (↑16,3%)
Primer mes	51 (↓13,5%)	59,4 (↓13,3%) (↑16,5%)
Segundo mes	47,7 (↓19%) (↓6,4%)	58,3 (↓15%) (↓2%) (↑22,2%)
Tercer mes	52,8 (↓10,5%) (↑10,6%)	61,6 (↓10,1%) (↑6%) (↑17%)

*Los resultados en paréntesis de color negro representan la diferencia porcentual entre los periodos en degradación y sin degradar.*Los resultados en paréntesis de color verde representa la disminución o el aumento de tensión porcentual del caso sin RN respecto al caso con RN.* Los números en paréntesis de color azul representan la diferencia porcentual entre periodos sucesivos.

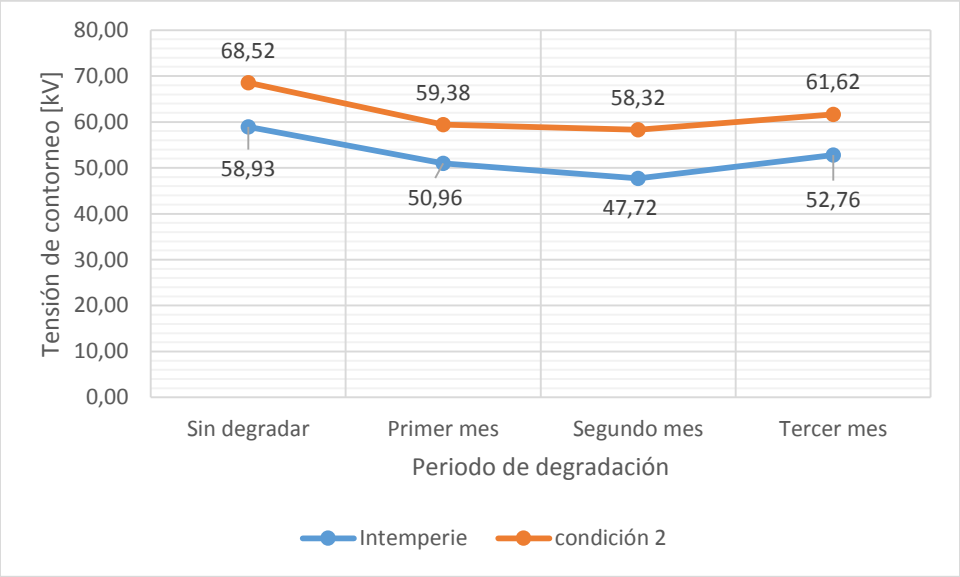


Gráfico 8. Comparación entre ensayo en condición húmeda y condición 2.

Cabe destacar que después de realizar los ensayos bajo esta condición, se pudo inspeccionar su coeficiente hidrófobo para los aisladores que estuvieron previamente a la intemperie, dando un valor aproximado de HC5. Esto indica que luego del lavado, el producto pudo recuperar o mejorar, en cierta medida, su estado característica hidrófoba, tal cual como se refleja en su aumento de tensión de contorneo. La comparación del estado hidrófobo para cada aislador que fue degradado y luego lavado se puede observar en la Fotografía 36.

(a) Bajo techo

(b) Intemperie un mes

(c) Intemperie dos meses

(d) Intemperie tres meses

Fotografía 36. Estado hidrófobo de aisladores después de lavarlos

3.5 Comparación de resultados de ensayos en aisladores

Como se expuso en las secciones precedentes del presente Capítulo, se realizaron ensayos de contorneo a aisladores de vidrio templado de clase 80 kV con y sin recubrimiento para condición seca y húmeda. Para cada condición de ensayo, los aisladores se degradaron previamente bajo tres condiciones diferentes durante tres meses: bajo techo, radiación UV y a la intemperie. Además se presentaron dos condiciones adicionales que se realizaron con el objetivo de simular un mantenimiento preventivo de lavado de aisladores posterior a la

degradación a la intemperie; de esta manera se pudo obtener una noción de cómo se comportaría la superficie con el producto al ser lavado con un torrente de agua desmineralizada.

En la Tabla 15 se pueden observar los resultados generales que se obtuvieron previo a la degradación (sin degradar) y posterior al periodo de degradación total (3 meses).

Tabla 15. Comparación de resultados de ensayos en aisladores

	Condición Seca [kV]					Condición Húmeda [kV]				
	Con RN				Sin RN	Con RN				Sin RN
	BT	UV	INT	COND1	INT	BT	UV	INT	COND2	INT
Sin degradar	89,5	89,5	89,5	86,1	90,9	74,2	74,2	74,2	68,5	69,7
3 meses de degradación	80,4	78,6	78,9	78,6	87,2	58,9	56	52,8	61,6	-
Diferencia %	↓10	↓12	↓12	↓12	↓4	↓21	↓25	↓29	↓10	-

BT: degradación bajo techo / UV: degradación en radiación UV / INT: degradación a la intemperie /COND1: aisladores previamente ensayados en seco para ser lavados y ser nuevamente ensayados en seco / COND 2: aisladores previamente ensayados en condición húmeda para ser lavados y ser ensayados nuevamente en condición húmeda / RN: producto de recubrimiento.

De los resultados obtenidos para ensayos bajo condición seca, se puede decir que los aisladores recubiertos sufrieron una mayor disminución de tensión de contorneo respecto a los aisladores sin recubrir, producto de la contaminación depositada sobre su superficie. El producto tuvo un comportamiento de adhesión de la suciedad, más que repelerla. En comparación con los resultados de aisladores que no fueron recubiertos, estos presentaron un mejor desempeño respecto a la limpieza de su superficie, por lo cual se ve menos afectado el resultado de tensión de contorneo.

Para los resultados en condición húmeda se puede decir que le caso más favorable fue el de condición 2 (aislador ensayado previamente en condición húmeda para luego ser lavado y ser nuevamente ensayado bajo la misma condición), donde se observó que un lavado superficial del aislador con producto ayuda a purgar la superficie, dando como resultado un aumento en su tensión de contorneo. Además su estado hidrófobo mejoró después del lavado. Para el caso húmedo sin recubrimiento, se hizo una sola medición dado que estos aisladores (2 unidades) se reutilizaron para ser parte de los aisladores que fueron degradados a la intemperie sin RN, para luego ser nuevamente ensayados en seco como se mostró en la Sección 3.4.2.2.

3.6 Conclusiones

En este capítulo se cumplió con evaluar y analizar el comportamiento en el mediano plazo del producto de nano-recubrimiento dieléctrico llamado “Standard”, en aisladores de vidrio recubiertos y sin recubrir con este producto, basado en la prescripción del procedimiento normalizado de la norma ANSI C.29.1 y ANSI C.29.11 para la medición de tensión de contorneo en condición seca y húmeda. Para cumplir el objetivo de evaluar y analizar el recubrimiento en el mediano plazo, antes de ensayar los aisladores con y sin recubrimiento,

se sometieron a distintos escenarios de degradación tales como contaminación a la intemperie, radiación UV y bajo techo.

En primer lugar, se sabe que los agentes contaminantes en conjunto con la humedad sobre una superficie aislante generan una disminución de la rigidez dieléctrica, produciendo así mayores descargas eléctricas superficiales que promueven la generación de arcos eléctricos de mayor magnitud de corriente ante el aumento de tensión eléctrica; y esto fue lo que se observó al paso de la exposición de los aisladores de vidrio ante los diferentes ambientes de degradación.

Como idea global de los resultados obtenidos a lo largo de la realización de todos los ensayos a aisladores previamente degradados a la intemperie con recubrimiento, se puede decir que la variación de la tensión de contorneo para ambas condiciones (seca y húmeda) tiene una tendencia decreciente al paso de sus respectivos periodos en distintos ambientes de degradación, con la diferencia que para el caso en condición seca, los resultados entre el primer y último periodo de degradación se mantienen en un rango de diferencia no mayor al 12% debido a que su tensión de ruptura depende más de su distancia de fuga que la superficie contaminada; mientras que en el caso de condición húmeda, sus valores de diferencia son mayores, alcanzando un 29% el cual fue el más crítico para esta condición.

Otro aspecto importante a considerar sobre los aisladores expuestos a la intemperie, es que hubo fuerte presencia corona en los ensayos en aisladores con producto cercano a la magnitud de 54 kV y fue decayendo la magnitud de la tensión de contorneo junto a la magnitud de las descargas coronas conforme pasaba el tiempo de degradación, mientras que en los aisladores sin producto hubo poca presencia corona antes de la ruptura abrupta entre superficie-aire. Esto se debe a la gran presencia de contaminantes no solubles los cuales retienen humedad y también la presencia de contaminantes salinos que promueven la ionización, produciendo así rupturas de baja intensidad [15].

En otro aspecto, no existe tendencia aparente de decaimiento o aumento de tensión de contorneo durante el registro de las diez rupturas consecutivas, tanto para los ensayos de aisladores con producto bajo degradación a la intemperie en condición seca y húmeda. Y a lo que en el caso húmedo respecta, se puede decir que para todos los casos la superficie termina siendo prácticamente hidrófila, y por lo tanto se puede decir que independiente del tiempo de exposición a la intemperie, el resultado hidrófobo superficial es el mismo.

Para el caso de los aisladores recubiertos que fueron degradados bajo techo, se esperaba que la tensión de contorneo se mantuviera después de todo el proceso de degradación con poca diferencia entre las mediciones, pero esto no fue así. Tanto para la condición seca como húmeda hubo un decaimiento de la tensión de contorneo registrada, donde fue un 10% para el caso seco entre el periodo sin degradar y los tres meses de degradación y un 21% para el caso húmedo en el mismo periodo. Esto se debe posiblemente a que a pesar de estar en un lugar cerrado, los aisladores sufrieron una adherencia de contaminación producto de la limpieza normal de las dependencias del laboratorio o simplemente por la circulación de personas que frecuentaban el lugar, al estar instalados a una altura no mayor a metro y medio desde el suelo. Después de pasar el periodo de degradación bajo techo durante tres meses, se

pudo observar un escurrimiento del material formando gotas en la falda de los aisladores. Esto indica que el producto no tiene la capacidad de mantener una capa uniforme sobre la superficie, debido a que es demasiado líquido. Independiente de estas ocurrencias, los resultados obtenidos de tensión de contorneo fueron de mayor magnitud que los demás casos de degradación con recubrimiento. Si bien no existe gran diferencia entre de magnitud en condición húmeda respecto al caso de degradación UV (diferencia de un 5%), hay una diferencia mayor respecto a los resultados obtenidos de la exposición a la intemperie (10,5%). Esto se puede explicar de la premisa que los aisladores expuestos a la intemperie sufrieron una concentración de contaminación importante (contaminación media), y era de esperarse, respecto los demás casos; por lo que la formación de bandas secas, en este caso, era más probable debido a que su estado hidrófobo decayó totalmente, promoviendo así la formación de arcos eléctricos a una tensión menor.

El caso en el cual el producto de recubrimiento fue degradado en UV, la superficie sufrió cambios, mostrando una resequedad del producto. Si bien no hubo mayor influencia en los ensayos bajo condición seca, si tuvo repercusión después del ensayo en condición húmeda, donde la superficie tenía un aspecto quebradizo y escamoso, por lo que la adherencia del producto se ve afectada luego de la degradación. Este deterioro "post-ensayo" fue aumentando con el paso de la degradación. Estos defectos superficiales pueden haber producido caminos conductivos que facilitaron el proceso de ruptura a menor tensión, como también se observó el aumento de presencia corona. Posiblemente el resultado quebradizo del producto posterior al ensayo húmedo se pudo deber a la pérdida de partículas del producto a causa de la exposición continua de alta temperatura (52°C) y a la radiación ultra violeta en sí, produciendo una resequedad del producto y consigo una pérdida de adherencia de este al vidrio. También se pudo deber a que el vidrio sufre dilatación y/o contracción de su estructura cristalina a causa de los cambios de temperatura sufridos en la cámara, por lo que el efecto combinado de esta característica y la resequedad del producto pudieron haber producido pequeñas grietas del recubrimiento. A pesar de que el efecto de agrietamiento del producto no pudo ser observado a simple vista antes de ser ensayado, después del ensayo húmedo quedó a la vista este fenómeno.

Sin duda el caso de degradación más crítico fue el de degradación bajo intemperie, donde sufrió la adherencia de la contaminación ambiental. El producto bajo estudio mostró que, en vez de repeler las partículas contaminantes o dar una característica hidrófoba a éstos mediante el empaquetamiento de estas partículas como los hacen algunas grasas que se usan como paliativos de contaminación, este facilitaba la acumulación de contaminación en la superficie. Esto trajo mayores consecuencias al momento de ser ensayado en condición húmeda, dando valores de tensión menores que los demás casos. Sin embargo, a pesar de no cumplir con repeler la contaminación y en consecuencia no ayudar a que escurra el agua sobre la superficie (lo que se espera de la superficie de un aislador), luego de los ensayos realizados, se puede decir que tanto el producto contaminado como la superficie vítrea no sufrieron daños, por lo que se puede decir que el conjunto recubrimiento-contaminación generan una especie de coraza protectora superficial ante los efectos de contorneo.

En el último ensayo, previamente se realizó una simulación de mantenimiento a los aisladores contaminados que estuvieron bajo la intemperie con el fin de verificar si existían diferencias significativas después de esta acción al momento de ser ensayados nuevamente. Para el caso en condición seca no hubo mayores variaciones, mientras que en el caso húmedo si las hubo, mostrando una recuperación de su característica hidrófoba y a su vez, o como consecuencia, el aumento de su tensión de contorneo (53 kV para aisladores sin lavar y 62 kV para aisladores lavados).

De esta información se puede decir que: independiente de los ambientes a los cuales fueron expuestos los aisladores recubiertos, no hubo gran influencia de los distintos grados de exposición en los resultados obtenidos de tensión de contorneo al momento de ser ensayados en condición seca. Para todos los casos, parece ser que la rigidez dieléctrica del conjunto "producto-aislador", muestra una tendencia decreciente luego del caso sin degradar, pero que converge a un valor dado (80 kV) luego de todo el periodo de exposición a la degradación. Otra similitud, es que el producto en la superficie del aislador no mostró patrones de carbonización o resequedad producto del arco. Se dijo que en el caso preliminar sin degradación se vio un escurrimiento del producto a causa de la acción del campo eléctrico y contorneo, donde se observaron caminos que dejó el arco, pero en ningún caso mostró signos de deterioro a la vista tanto en el producto mismo como en la superficie vítrea.

A pesar de que el método elegido, mediante aumentos cíclicos de tensión hasta causar contorneos de magnitudes por sobre las normales que se producen en servicio, se alejan objetivamente de la realidad, ha proporcionado información valiosa sobre el deterioro del producto de recubrimiento sobre aisladores de vidrio, dando así la posibilidad de realizar trabajos futuros. Los trabajos futuros pueden ser, el estudio del seguimiento de corriente superficial sobre aisladores bajo procedimientos normalizados como lo son los ensayos de niebla salina o capa sólida mencionados en la norma IEC 60507. Otro trabajo que se puede realizar, es el mismo estudio ante degradación a la intemperie, pero con la diferencia de mantener la cadena de aisladores energizada; esto con el fin de verificar cómo se desempeña el producto en esta condición, ya que existe la posibilidad de que, al estar energizado, posea una característica de repelencia efectiva de las partículas contaminantes, así como una especie de campo repelente; como también existe la posibilidad de que atraiga aún más las partículas. Si se llegase a concretar esta propuesta de estudio, se debe tener en cuenta que los aisladores deben estar posicionados lo más cercano a su altura de servicio, ya que se ha demostrado en estudios anteriores [17] que los aisladores montados a baja altura han mostrado serios daños producto de la cantidad exagerada de contaminación depositada en su superficie, mientras que los puestos en alturas realistas han presentado poco o ningún deterioro en periodos de pruebas más largos. Sería ideal realizar un seguimiento y registro a tiempo real de la corriente superficial del aislante, junto a la toma de muestras de contaminación a la cual se ve afectada.

A pesar de que el grado de deterioro fue exagerado, tanto a la intemperie como a radiación UV, y que los métodos de degradación no se realizaron en estado energizado, las pruebas cumplen con dar un panorama de cómo se podrá comportar el producto a mediano plazo.

Gracias a este procedimiento de trabajo se pudo obtener conclusiones valiosas en un tiempo razonable.

Capítulo 4. Estudio para evaluar la resistencia a carbonización y erosión eléctrica

4.1 Introducción al ensayo

Como se explicó en las secciones precedentes, los aisladores que se encuentran propensos a depositar sustancias contaminantes en su superficie, en conjunto de humedad y campo eléctrico, pueden producir descargas parciales en la superficie de la misma. El desarrollo de estas descargas originan las llamadas bandas secas, las cuales producen un deterioro progresivo en el material aislante.

En los aisladores que poseen materiales poliméricos, las descargas superficiales producen carbonización debido a la estructura molecular de los mismos. Si las descargas persisten en el tiempo, se produce un desprendimiento y pérdida de material, es decir, se produce un efecto de erosión.

Evaluar el efecto de la trayectoria de la carbonización y la erosión eléctrica de los materiales poliméricos es una tarea esencial en el desarrollo de los aisladores al aire libre. Como definición en el área eléctrica, "Tracking" es la degradación progresiva de la superficie de un material aislante sólido por descargas locales para formar trayectorias conductoras o parcialmente conductoras y "erosión" es el desgaste progresivo o pérdida de material de aislamiento por la acción de descargas eléctricas [18]. No se puede obtener una medición absoluta del Tracking y de la resistencia a la erosión; sólo se puede lograr la clasificación relativa de los materiales utilizando las pruebas estándar de Tracking y erosión. En 1961, Mathes y McGowan propusieron la prueba de contaminantes líquidos en plano inclinado [19], que se normalizó en ASTM D2303 e IEC 60587. Prescribe un control flexible pero preciso del contaminante líquido, un factor importante que conduce a resultados más reproducibles, y es aplicable en un amplio rango de voltaje [20].

La norma IEC 60587 es mejor conocida como la prueba de carbonización de plano inclinado. Este ensayo produce un efecto severo sobre la superficie de los materiales que se usan en los aisladores, siendo ideal para materiales con alta resistencia al deterioro, tales como materiales poliméricos. En esta prueba se deja deslizar una sustancia electrolítica entre dos electrodos energizados que sostienen una superficie polimérica inclinada a 45°, formando así una trayectoria de carbonización. El ensayo simula bien los fenómenos de banda seca. Con este método se clasifican los materiales principalmente por la tensión máxima aplicada entre los electrodos antes de que fallen o por longitud de la carbonización en el material. Debido a las características que presenta la norma, es la prueba más idónea para evaluar el deterioro del conjunto "superficie-recubrimiento nano-dieléctrico" [6] y además es la manera más económica de hacerlo, ya que de otra manera se tendrían que hacer pruebas con aisladores.

4.1.2 Descripción y disposiciones generales de la norma IEC 60587

La norma IEC 60587 [21] evalúa la resistencia de los materiales ante el efecto de las descargas superficiales mediante el uso del montaje de prueba mostrado en el Diagrama 2.

En esta configuración, la superficie de prueba es la cara inferior y se encuentra inclinada 45° respecto a la horizontal, en donde se colocan dos electrodos de acero inoxidable separados a una distancia de 50 mm. La forma de estos electrodos se muestra en el Diagrama 3 y 4.

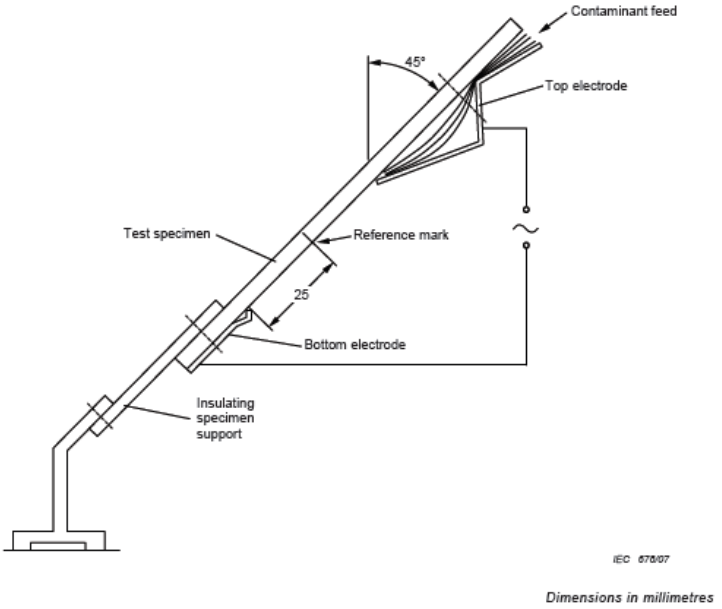


Diagrama 2. Modelo de montaje para ensayo de Tracking y erosión.

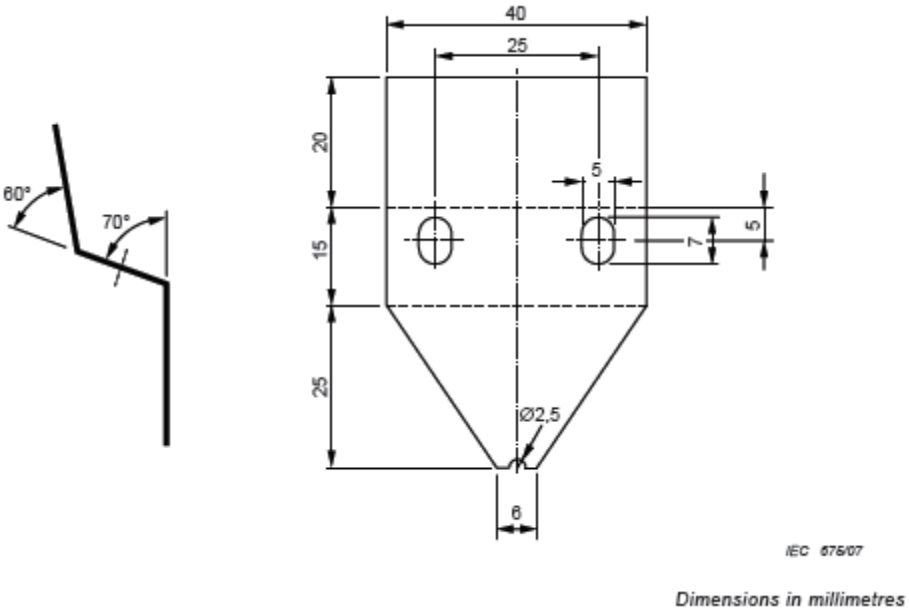


Diagrama 3. Electrodo superior de acero inoxidable.

Entre la superficie de la muestra y el electrodo superior se colocan 8 láminas de papel filtro de 0,2 mm de espesor, con las dimensiones mostradas en el Diagrama 5. Este conjunto cumple el rol de reservorio de contaminante y mantener una tasa de caudal constante, definido por el nivel de tensión de ensayo, como se muestra en la Tabla 16. El líquido contaminante utilizado está compuesto por la mezcla de 0,1% de concentración en masa de Cloruro de Amonio y 0,02% de concentración en masa de "isooctylphenoxypolyethoxyethanol" (o comúnmente conocido en el mercado como Tritón X-100) en agua destilada, y debe tener una resistividad de 3,95 Ωm ±0,05 Ωm a 23°C ± 1°C.

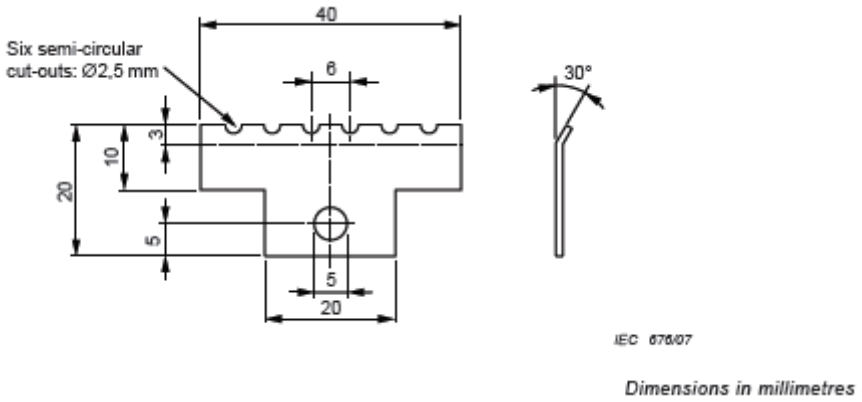


Diagrama 4. Electrodo inferior de acero inoxidable.

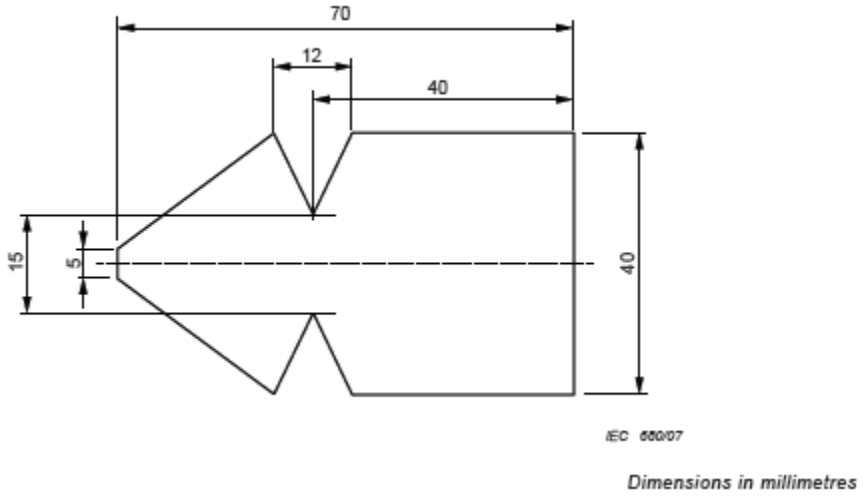


Diagrama 5. Dimensiones de Papel filtro.

La probeta debe ser de una superficie plana y las dimensiones se especifican en el Diagrama 6. El orificio que se encuentra solo en uno de los lados de la placa es para alojar el electrodo inferior, mientras que los dos orificios restantes son para el electrodo superior.

El circuito eléctrico para realizar el ensayo se muestra en el Diagrama 7, donde VR es la tensión de la red de 220 V, VT es el variac, T es el transformador, R es la resistencia

limitadora de corriente, SP la superficie de prueba, V_1 es el voltímetro que mide la tensión de salida del variac, V_2 es el voltímetro que mide la tensión de salida del transformador, V_3 es el voltímetro que mide la tensión en la placa y A es el amperímetro que mide la corriente que circula en el circuito que se registra en el computador mediante el uso de un software.

Tabla 16. Caudal en función de la tensión

Tensión de prueba kV	Tensión para prueba a tensión constante kV	Tasa de caudal del contaminante ml/min
1,0 a 1,75	-	0,075
2,0 a 2,75	2,5	0,15
3,0 a 3,75	3,5	0,30
4,0 a 4,75	4,5	0,60
5,0 a 6,0	-	0,90

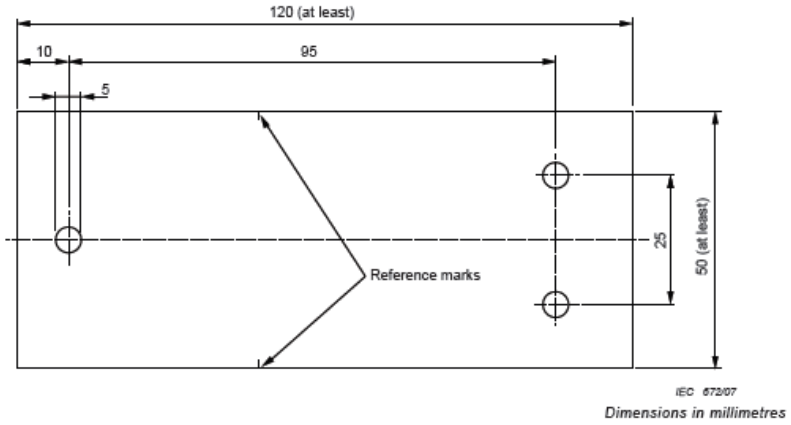


Diagrama 6. Dimensiones de la placa

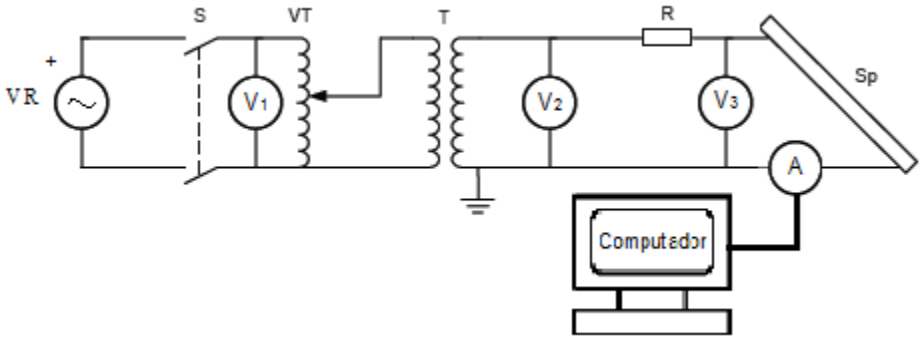


Diagrama 7. Circuito de medición para ensayo de tracking y erosión.

En la sección 4.4 se entrega más detalle acerca del circuito de medición utilizado.

La resistencia que limita la corriente debe aguantar al menos 0,1 A y su valor depende del nivel de tensión aplicada como se muestra en el Tabla 16.

La norma también plantea que se deben ensayar 5 placas del mismo tipo y si es posible, de manera simultánea.

4.1.3 Procedimiento de evaluación.

Existen dos procedimientos para producir el efecto de carbonización y erosión en la superficie de ensayo: el primero se utiliza la tensión constante y el segundo aumenta la tensión en forma de escalón. Los dos procedimientos se describen a continuación:

4.1.3.1 Prueba a tensión constante

Con el contaminante fluyendo por la superficie a una tasa de caudal constante, determinada por la Tabla 16, se energiza el circuito y se eleva la tensión hasta uno de los prefijados. Se deben alcanzar las tensiones de prueba en un tiempo máximo de 10 segundos; luego de alcanzar la tensión de ensayo, se inicia el conteo de duración del ensayo. La tensión se debe mantener constante durante 6 horas.

Si la prueba tiene que ser repetida a mayor o menor tensión, se debe realizar en 5 muestras nuevas.

La tensión constante de tracking es la máxima tensión sostenida de las 5 placas durante 6 horas sin falla.

La clasificación del material se realiza de la siguiente manera:

Clase 1A0 y 1B0

Si alguna de las muestras falla antes de los 2,5 kV antes de las 6 horas, según los criterios de evaluación A o B de la sección 4.1.3.3.

Clase 1A2,5 y 1B2,5

Si las muestras soportan por 6 horas 2,5 kV, pero si alguna muestra falla a los 3,5 kV antes de las 6 horas, según los criterios de evaluación A o B de la sección 4.1.3.3.

Clase 1A3,5 y 1B3,5

Si las muestras soportan durante 6 horas 3,5 kV, pero si alguna muestra falla a los 4,5 kV antes de las 6 horas, según los criterios de evaluación A o B de la sección 4.1.3.3.

Clase 1A4,5 y 1B4,5

Si todas las muestras soportan 4,5 kV durante 6 horas, según los criterios de evaluación A o B de la sección 4.1.3.3.

En cada caso, se debe reportar la máxima profundidad de erosión. La medición se midió mediante el uso de un pie de metro electrónico.

4.1.3.2 Prueba aumentando la tensión en forma de escalón

Se selecciona una tensión de inicio, siendo un múltiplo de 250 V, de modo que la falla según el criterio A de la sección 4.1.3.3 (corriente superior a 60 mA) no ocurra antes del tercer paso de tensión (puede ser necesario un ensayo preliminar). Con el contaminante fluyendo uniformemente a la tasa especificada, se energiza y eleva la tensión al valor seleccionado. Se mantiene esta tensión durante 1 hora y se aumenta la tensión por escalones de 250 V por cada hora subsiguiente hasta que se registre la falla por el criterio A. A medida que se incrementa el voltaje, el caudal de contaminante y el valor de resistencia en serie se aumentan de acuerdo con la Tabla 16.

En este método se toma en consideración la tensión más alta que hayan soportado las 5 muestras.

La clasificación del material se designa mediante la notación **Clase2Ax** o **Clase2Bx**, donde x es el nivel de tensión en kV que soporta la muestra bajo prueba.

4.1.3.3 Criterios de evaluación

Existen dos criterios para considerar el ensayo culminado:

Criterio A

Cuando la corriente superficial sea mayor a 60 mA en el lado de alta tensión. También cuando exista una cavidad producto de la erosión excesiva o cuando la muestra se encienda en fuego.

Criterio B

Cuando la trayectoria de carbonización o Tracking formada por la corriente superficial alcance 25 mm de largo, desde el electrodo inferior. También cuando exista un hueco producto de la erosión excesiva o cuando la muestra se encienda en fuego.

4.1.3.4 Reportes de ensayo

Independiente del proceso y criterio de evaluación, se debe reportar:

a) Tipo y uso del material ensayado
b) Detalle de fabricación, dimensiones, proceso de limpieza y solvente utilizado en la muestra
c) Orientación del acabado o de las fibras de la superficie en la muestra con respecto a los electrodos
d) Procedimiento y criterio de evaluación
e) La máxima profundidad ocasionada por la erosión debe ser reportada en la clasificación. Por ejemplo: si la máxima erosión es de 0,5 mm y falla por el criterio A a 3,5 kV, la clasificación sería 1 A 3,5 – 0,5.

4.2 Presentación del ensayo

Se informa los resultados de erosión máxima, tiempo de duración de cada ensayo, corriente superficial máxima y promedio de placas poliméricas y de vidrio con producto de recubrimiento de nano-partículas y sin este, considerando las prescripciones de la norma IEC 60587, donde se aplica el método de plano inclinado, con el propósito de evaluar y analizar su desempeño ante erosión y carbonización (o tracking) para diferentes ambientes de degradación tales como radiación UV e intemperie.

4.3 Objeto de prueba

Las probetas ensayadas son placas con y sin recubrimiento de material polimérico y de vidrio (según sea el caso, se explica en las secciones siguientes). La presencia de carbonización sólo rige para placas de material polimérico, ya que estos materiales son los que sufren este tipo de degradación debido a su estructura molecular. Las placas de vidrio serán evaluadas de igual manera, con el fin de visualizar cuales son los efectos de este ensayo en este tipo de material y también para complementar con las pruebas hechas a aisladores de vidrio templado vistas en el Capítulo 3.

4.3.1 Dimensión de las placas

Las dimensiones de las placas poliméricas son las que se establecen en la norma, como se mencionó en la sección 4.1.2. Son planas y de una superficie de 50 mm x 120 mm. El espesor que recomienda la norma es de 6 mm pero en este caso se usaron de 5,06 mm dado que éste espesor fue el que dispuso el fabricante Silpak, quienes muy gentilmente donaron estas placas para llevar a cabo este estudio. Las probetas fueron perforadas con las dimensiones mostradas en el Diagrama 4 y su aspecto físico antes de ser ensayadas para cada condición se muestra en la Fotografía 37.

Para el caso de las placas de vidrio, se tuvo que sobredimensionar la superficie debido a que las perforaciones que se hicieron debían tener una distancia de al menos 25 mm desde el centro de la perforación a cada lado de la placa para no sufrir algún agrietamiento. Finalmente las dimensiones quedaron en 70 mm x 145 mm, y el espesor del vidrio es de 4,72 mm. Su aspecto físico antes de ser ensayadas para cada condición se muestra en la Fotografía 38.

El vidrio utilizado para la confección de las probetas es de vidrio normal. En estricto rigor, debía ser de vidrio templado como lo es el material de los aisladores, pero por razones económicas no se pudo hacer de ese material. Por otro lado, consultando a un experto del área del vidrio del Departamento de Química de la UTFSM de la Casa central, Sr Antonio Rubilar, afirmó que ambas superficies son de características similares, por lo que cumple con la condición para probar el recubrimiento en estas placas.

3.4 Circuito de ensayo utilizado

El circuito de ensayo se muestra en la Fotografía 39. Consta de una fuente variable de 50 Hz que se conecta a un transformador monofásico de 5 kVA que eleva la tensión en la placa a voltajes de en los rangos establecidos en la Tabla 16. Por la placa no puede circular más de 100 mA, por lo que se conectaron dos resistencias en serie al circuito, pero en paralelo entre ellas, para limitar la corriente; sus valores son de 31,2 kΩ y 16,5 kΩ, donde cada resistencia

puede soportar una corriente máxima de 0,1 A. luego de las resistencias, la conexión llega hacia la placa a ensayar por medio de electrodos hechos de acero tipo 302; los electrodos hechos en el Pañol de Electricidad de la UTFSM, Casa Central, se muestran en la fotografía 40.a. Las placas se sujetan por una estructura de soporte hecha de polietileno junto con una unión de teflón y su base es de una estructura de acero inoxidable inclinada en 45° como se muestra en la Fotografía 40 b y c.

(a) Placa sin recubrir sin degradar

(b) Placa recubierta sin degradar

(c) Placa degradada en UV y luego recubierta

(d) Placa recubierta y degradada en UV

(e) Placa recubierta a la intemperie

(f) Placa sin recubrimiento a la intemperie

Fotografía 37. Superficie de placas poliméricas de prueba

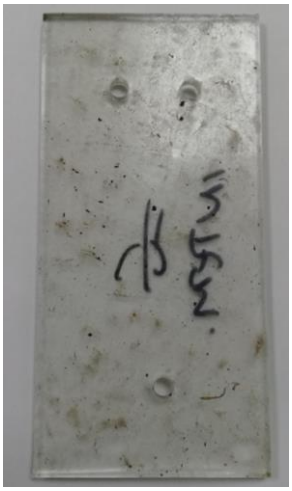
Se monitorean valores de tensión entre línea y neutro en tres puntos del circuito: tensión de salida del variac, tensión de salida del transformador y tensión que cae entre los electrodos de la placa ensayada. La tensión de salida del variac se mide directamente mediante la utilización de un multitester, mientras que la tensión de salida del transformador y la tensión en la placa se miden por medio de unas puntas de tensión con razón de transformación

1:1000*; cada punta de tensión se conecta a un multitester diferente para monitorear la medición. Por último, se conecta en serie otro multitester para medir la corriente que circula por el circuito en el lado de alta tensión, donde se hace registro cada segundo de la medición gracias al software integrado en el dispositivo de medición llamado UT71C/D/E Interface Program. Gracias a este registro de corriente a cada segundo, se puede hacer un conteo de cuánto tiempo demora cada ensayo y la corriente que alcanza en cada caso, para dar como finalizado el ensayo según los criterios establecidos en la sección 4.1.3.3.

(a) Placa sin recubrir sin degradar

(b) Placa recubierta sin degradar

(c) Placa recubierta en UV



(d) Placa recubierta a la intemperie

(e) Placa sin recubrir a la intemperie

Fotografía 38. Superficies de placas vítreas de prueba

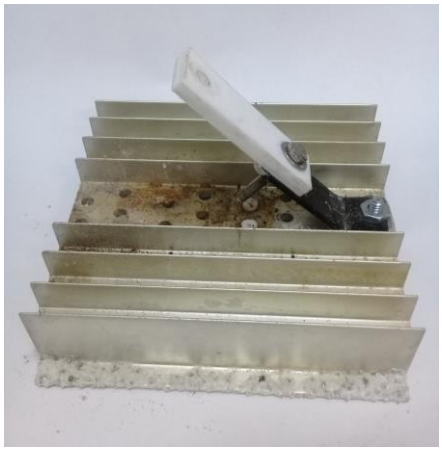
Para mantener el caudal del líquido contaminante según el nivel de tensión que establece la norma en la tabla 16, se hace mediante un sistema de goteo utilizando una bureta análoga de 50 ml. El caudal que circula por la superficie de la placa y que no se alcanza a evaporar durante el ensayo, cae a una bandeja de reservorio de desechos, donde sobre ésta, se posa la estructura de soporte de la placa a ensayar.

Tanto el montaje en la bandeja como las resistencias utilizadas se posan sobre aisladores que a su vez están sobre una mesa; esto con el fin de aislar de tierra todos los dispositivos utilizados. También se monta una barrera en la periferia del circuito para velar por la seguridad del operario y otras personas que se encuentren trabajando en el laboratorio cuando el circuito está energizado.

*Nota: Las puntas de tensión del Laboratorio de Alta Tensión utilizadas para medir la tensión de salida del transformador y la tensión en la placa tienen número de serie LAT-1031 y LAT-1030 respectivamente. Los multitester utilizados para medir tensión son marca UNI-T modelo UT50A, mientras que el multitester utilizado para medir la corriente es de marca UNI-T modelo UT71E.

Fotografía 39. Circuito plano inclinado

(a) Electrodos



(b) Plataforma

(c) Soporte

Fotografía 40. Electrodos y plataforma de soporte

4.5 Condiciones previas al ensayo

Como se dijo anteriormente, se probarán placas poliméricas y vítreas para evaluar el desempeño del recubrimiento en su superficie. Para esto, se evalúa visualmente el grado de erosión de la superficie a causa de la corriente superficial circulante, para diferentes

magnitudes de tensión eléctrica, sobre el producto de recubrimiento y sin este ante distintos escenarios tales como: sin degradar, degradación UV e intemperie. Se usaron 16 placas poliméricas y 10 placas de vidrio para realizar los ensayos. De las placas poliméricas, 6 se degradaron bajo radiación UV, 6 sin degradar y 4 a la intemperie; de las placas de vidrio, 2 fueron degradadas bajo radiación UV, 4 a la intemperie y 4 sin degradar.

Para comparar los resultados, se ensayan probetas con y sin recubrimiento. Las probetas poliméricas que no llevan producto son: 3 sin degradar y 1 degradada a la intemperie, mientras que en el caso del vidrio, sólo 4 no llevan producto: 2 para el caso sin degradar y 2 para el caso a la intemperie.

La degradación UV se realizó en la misma cámara que se utilizó para degradar los aisladores, descrita en la Sección 3.3.2.

Todos los aspectos de superficies a ensayar, tanto poliméricas como vítreas, como ya se mencionó, se mostraron en las Fotografías 37 y 38.

Si bien la norma dice que debe ser una cantidad de 5 probetas por cada ensayo y además ser probadas simultáneamente, no se realizó de esta manera. La razón se debe a que no se cuenta con todos los recursos necesarios.

Para cada caso, tanto el número de probetas utilizadas y el tiempo de exposición en cada escenario, se explica con mayor detalle en las secciones siguientes. De los resultados obtenidos y comparaciones para cada escenario, se presentan las conclusiones pertinentes.

4.6 Procedimiento y método utilizado

Previo al recubrimiento y a cada exposición de las probetas en los distintos ambientes, sus superficies fueron limpiadas con alcohol. La aplicación del recubrimiento sobre la superficie de las probetas fue con ayuda de una brocha, y el relieve superficial resultante fue en dirección perpendicular a la orientación de los electrodos. Donde mejor se aprecia este efecto, es sobre la placa polimérica sin degradar en la Fotografía 37.b.

Respecto a la aplicación del contaminante sobre la superficie de prueba, se utilizó una solución contaminante de cloruro de amonio al 0.1 % y Tritón x- 100 al 0,02% de concentración en masa en agua destilada. Su resistividad llegó a 3, 82 ohm*m a 23°C, pero al momento de ensayar la primera placa, se obtuvo una resistividad de 3,78 ohm*m a 16,8 °C. Se hizo registro de la resistividad de la solución contaminante cada cierto tiempo. Los resultados de resistividad se muestran en la Tabla 17. Estos resultados fueron obtenidos en el Laboratorio del Departamento de química de la UTFSM, Casa central.

Tabla 17. Registro de resistividad de la solución contaminante.

fecha	Resistividad [Ωm]	T [°C]
20-jun	3,78	16,3
28-jun	3,8	17,9
14-jul	3,81	18,7
02-ago	3,79	18

El método elegido para realizar los ensayos es el *método a tensión constante*. El ensayo se realiza mediante este método, ya que éste se recomienda en trabajos anteriores [22, 20] para evaluar la erosión. Si bien la erosión es pérdida de material producto de las descargas eléctricas, según lo que indica la Norma IEC 60587 respecto al registro de datos al término de cada ensayo, erosión se entiende como la profundidad máxima de la o las cavidades producidas por la acción de las descargas. En los ensayos realizados a las placas poliméricas se obtuvo resultados de falla por erosión y también por tracking, según los criterios de evaluación, para el mismo método utilizado. Para el caso del vidrio, no sufre carbonización o tracking debido a su estructura molecular inorgánica, pero si presentó daños superficiales. Se hicieron pruebas para ambos materiales a niveles de tensión de 2,5 kV y 3,5 kV, donde este último nivel de tensión fue el máximo soportado por ambos materiales.

En las siguientes secciones se informan los resultados obtenidos de los ensayos realizados a placas poliméricas y vítreas para cada uno de los escenarios expuestos con anterioridad.

4.7 Resultados placas poliméricas

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de las pruebas realizadas a las placas poliméricas. Se presentan tablas donde se expone: corriente superficial máxima y promedio, erosión máxima y tiempo que dura cada ensayo. En la presentación de los resultados, como se dijo en la Sección 4.6, máxima erosión se entiende como el registro de medición de la máxima profundidad de la o las cavidades producidas por las descargas. Cabe destacar que todos los resultados obtenidos de los ensayos son analizados como un conjunto, más que sólo centrarse en el dato obtenido de la erosión máxima.

Antes de exponer los resultados, se presenta algunos alcances para realizar el ensayo y el fenómeno observado durante el desarrollo de la prueba en general.

Previo a energizar el circuito, se debe dejar circular el caudal de contaminante sobre la superficie y cerciorarse que el “hilo de caudal” sea continuo entre los dos electrodos como se muestra en la Fotografía 41. Es vital inspeccionar visualmente que el hilo de contaminante que baja por el electrodo superior sea por el orificio de este, ya que de otro modo, se dan patrones de erosión no deseados. Es muy difícil mantener constante el caudal exigido para cada nivel de tensión, ya que al disminuir la altura del líquido en la bureta, este ejerce menos presión sobre el mismo líquido, haciendo que no se produzca un caudal constante. Es por esto que se detiene el ensayo cada cierto tiempo, para modificar manualmente la posición de la manilla de paso del caudal cuando visualmente se percata que no caen gotas.

Con el caudal contaminante fluyendo sobre la superficie inferior de la placa, se procede a energizar el circuito. Una vez energizado, se observa que rápidamente se comienzan a ver descargas parciales o mini arcos que comienzan a extenderse desde y entre los “dientes” del electrodo inferior hacia el resto de toda la superficie de la placa, provocando la evaporación del líquido y dando la forma de banda seca. A medida que se va evaporando el líquido, deja residuos sólidos en forma de polvillo de color blanquecino (ver video 1 en Anexo: Videos). A pesar de que se produce una evaporación del líquido, ésta deja áreas parciales que permanecen húmedas; es por esto que no necesariamente los dientes del electrodo inferior

quedan totalmente secos, produciendo así concentraciones de campo de baja corriente sobre los dientes del electrodo inferior, lo que provoca un deterioro local progresivo sobre el contacto de los dientes y la superficie como se muestra en la Fotografía 42. Estos puntos de intensidades de campo localizados (punta de dientes de electrodo inferior) y a bajas corrientes [7], es donde comienza el proceso de carbonización y erosión. Al ser cada vez más persistente en el área local de la descarga, ésta toma camino hacia el electrodo superior, produciendo el fenómeno de tracking como se muestra en la Fotografía 43. Dependiendo del estado superficial de la placa, este produce tracking o erosión local: donde se forman grandes orificios sin necesariamente seguir el camino hasta el electrodo superior como se observó y explicará en la Sección 4.7.1.1.

Fotografía 41. Montaje y caudal en Placa polimérica

Fotografía 42. Comienzo tracking y erosión

Fotografía 43. Camino dejado por tracking y erosión

4.7.1 Resultados placas poliméricas sin degradar

En la siguiente sección se exponen los resultados de las placas poliméricas sin y con recubrimiento bajo ningún tipo de degradación. Estas placas servirán como muestras testigos para comparar sus resultados con los obtenidos en los casos bajo degradación UV e intemperie.

4.7.1.1 Resultados placas poliméricas sin degradar y sin recubrir

Antes de montar la probeta, la superficie de ensayo se limpió con alcohol y se le hicieron marcas a 25 mm del electrodo inferior para constatar si el camino de tracking alcanza esta distancia y de esta manera saber si la placa falla por el criterio B. Por otro lado, se monitorea la magnitud de la corriente superficial, para ver si la probeta falla por el criterio A alcanzando los 60 mA.

Previo a comenzar el ensayo, se verifica que el flujo contaminante sea continuo desde el electrodo superior al inferior, para luego energizar a la tensión de ensayo. Como se dijo

anteriormente, es muy difícil ajustar el caudal mediante el uso de la bureta. Cuando se modifica la posición de la manilla de paso de la bureta para mantener el caudal, a veces arrojaba un caudal mucho mayor debido a que no se tenía la práctica y el pulso para regularla; esto provocaba que las descargas aumentaran abruptamente**.** Donde se aprecia mejor este fenómeno, es en el disparo de corriente debido al exceso de caudal como se muestra en el Gráfico 10, donde se puede observar que cerca del segundo 1718, se hizo una modificación de caudal provocando así el aumento de corriente. Debido al exceso de caudal o disminución de este, el punto de deterioro local puede ser aleatorio e intermitente, por lo que no necesariamente el tracking comienza desde el centro del electrodo, provocando así varios caminos de carbonización en algunos casos. Para evitar en alguna medida este efecto, se detenía el ensayo por unos momentos para dejar circular el exceso de caudal y así la placa no tuviese una degradación excesiva.

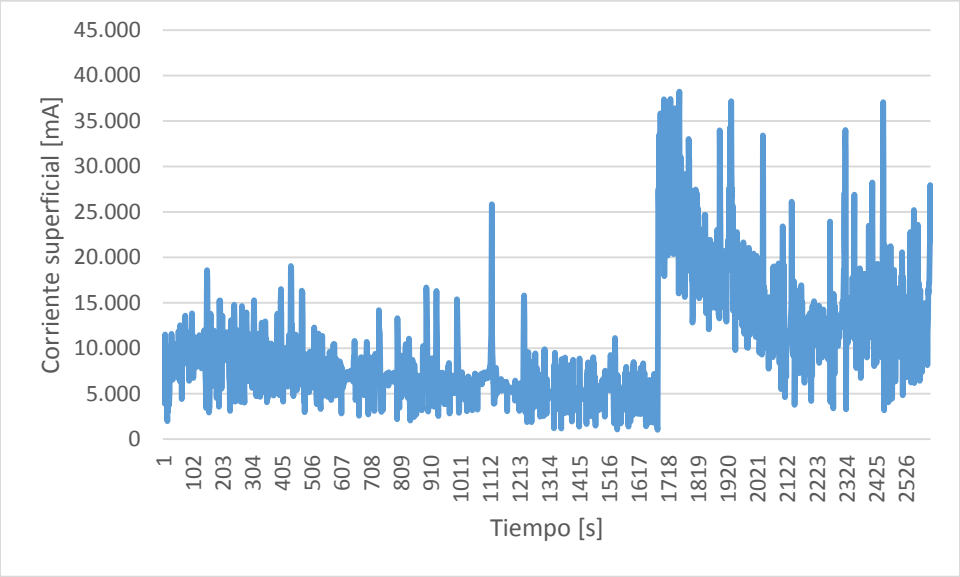


Gráfico 5. Variación corriente superficial con el aumento abrupto de caudal.

Las primeras placas que se ensayaron, fue a una tensión de 2.5 kV. La primera placa no alcanzó a finalizar su ensayo, ya que se veía un deterioro localizado de erosión más que de tracking (ver Fotografía 44.a), debido a que el sistema de soporte no era el adecuado (acumulaba muchas gotas en su superficie producto de la evaporación del líquido, por lo que se tuvo que cambiar). Luego se llegó al diseño de soporte final, mostrado anteriormente en la Fotografía 40.c. Después se probó la segunda placa durante más de 6 horas y se obtuvo un resultado similar de degradación como se muestra en la Fotografía 44.b pero con un mayor tiempo de exposición. Después de obtener estos resultados, se percató que no fue producto de que la superficie haya estado en mal estado, si no que el electrodo inferior estaba demasiado apretado para poder sostener las placas sin que éstas se movieran. Esto producía que los dientes del electrodo inferior se incrustaran en la superficie provocando así un deterioro más acelerado y severo. Este problema se solucionó colocando un pedazo de goma eva entre la superficie de soporte y la superficie superior de la placa; de esta manera no era necesario apretar demasiado los tornillos de fijación para que la probeta no se moviera.

Luego de solucionar este imprevisto, se ensayan dos probetas durante más de 6 horas, dando como resultado una erosión muy pequeña comparada con el deterioro excesivo de las placas anteriores y permitiendo que éstas no fallaran bajo ninguno de los dos criterios como se muestra en la Fotografía 44.c y 49.a. Éstas últimas figuras muestran una superficie rugosa la cual, en estudios anteriores a materiales poliméricos [23], afecta de manera directa a la capacidad hidrófoba del material.

(a) Placa 1

(b) Placa 2

(c) Placa 3

Fotografía 44. Placas sin recubrir y sin degradar a tensión 2,5 kV

El resumen de los resultados para el ensayo a 2,5 kV se muestra en la Tabla 18. Aquí se puede apreciar que en las primeras dos placas tienen una profundidad de erosión muy por sobre de la tercer y cuarta placa a ensayar. Esto a su vez se puede apreciar en el registro de sus corrientes promedio y máximas, en donde los dos primeros casos son mayor. Es por esto que el registro de referencia para este caso es el de las placas 3 y 4.

Tabla 18. Resultados para placas sin recubrir y sin degradar ensayadas a 2,5 kV.

n	I_p[mA]	I_max [mA]	Erosión_max [mm]	Tiempo [horas:minutos]
1	3.618	31.035	3,89	2:46
2	3.447	35.058	3,39	7:50
3	3.255	25.356	0,09	7:43
4	2.978	24.801	0,08	7:25

De los resultados expuestos en la Tabla 18, se puede apreciar cierta relación entre las intensidades de corriente y su nivel de erosión. A pesar de no ser una relación lineal, se puede decir que a medida que la corriente promedio es mayor, existe una mayor erosión. No necesariamente el registro de corriente máxima da luz a un mayor o menor deterioro debido a la aleatoriedad del ensayo, pero sirve como referencia de niveles de corrientes alcanzados para cada uno de los casos.

Cabe destacar que los electrodos inferiores se tuvieron que cambiar para todos los casos, debido a que al ocupar electrodos “reciclados” afectan la medición. Las mediciones se ven

afectadas ya que, al finalizar cada ensayo, los dientes del electrodo inferior se desgastan, por lo que no se da la misma condición de ensayo para cada caso si es que estos electrodos se reciclan [24].

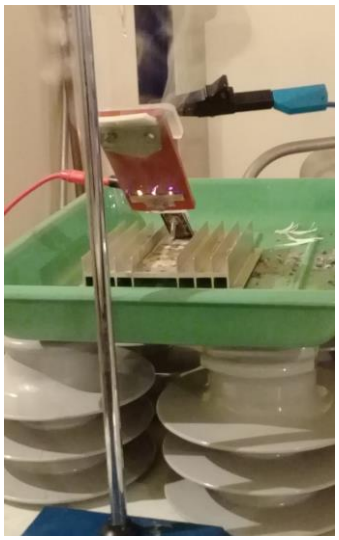
Para el caso de ensayo a 3,5 kV, se procede a ensayar las mismas placas anteriores pero por el reverso de su superficie ya dañada para economizar material. Se ajusta nuevamente el caudal a uno mayor de 0,3 ml/min (ver Tabla 16) y al momento de energizar el circuito, se visualizan descargas parciales de mayor magnitud como se refleja en las corrientes superficiales registradas (ver Tabla 19). Este fenómeno era de esperarse, debido a que el caudal que circula por la superficie es mayor al igual que su magnitud de tensión. Al ensayar a mayor tensión y caudal, la medición y concentraciones de campo sobre el electrodo inferior se hacen aún más aleatoria, debido a que al momento de producirse las descargas, el líquido contaminante se evapora más rápido en comparación con el ensayo a 2,5 kV, provocando así, depósitos de gotas sobre el electrodo superior: estas gotas caían nuevamente sobre la superficie de la placa, pero no lo hacían necesariamente por el orificio del electrodo superior, provocando de esta manera caminos diferentes de propagación de descargas. Se puede apreciar este efecto en la Fotografía 45.

La placa 3 al no presentar deterioro significativo sobre su superficie en el caso de ser energizada a 2,5 kV, se realizó el ensayo de 3,5 kV por el mismo lado de la superficie ya deteriorada (caso 3.1). Se aprecia que de la pequeña erosión que fue causada en el ensayo anterior, al momento de aumentar a 3,5 kV y a un mayor caudal de contaminante, el tracking y la erosión atacan el mismo sitio dañado provocando una gran orificio antes que se produzca la trayectoria continua de carbonización (ver Fotografía 47). Por esta razón se probó nuevamente por el reverso de su superficie dañada, con el fin de realizar el ensayo bajo las mismas condiciones iniciales (caso 3.2). La trayectoria de carbonización de la muestra 3.2 se muestra en la Fotografía 46 y su resultado de erosión se muestra en la Fotografía 48.c.

De los resultados expuestos en la Tabla 19 se puede observar que la placa 4 fue la probeta que tuvo el menor tiempo de duración. Si bien no fue la probeta que tuvo la mayor erosión, diferenciándose en 0,01 mm en comparación con la placa 3.2, es la que registró mayor corriente promedio y no necesariamente el caso de mayor corriente máxima en comparación con las demás placas. Esto quiere decir que, a pesar de no alcanzar niveles de corriente máxima como los otros casos, sostuvo una intensidad de corriente de mayor magnitud durante todo el proceso. El tracking resultante se muestra en la Fotografía 49.b.

Tabla 19. Resultados para placas sin recubrir y sin degradar ensayadas a 3,5 kV.

n	I_p[mA]	I_max [mA]	Erosión_max [mm]	Tiempo [horas:minutos]
1	8.803	30.989	1,89	0:44
2	6.877	37.223	2,11	0:28
3.1	7.012	37.585	2,72	1:18
3.2	10.120	38.252	2,8	0:45
4	11.438	33.953	2,79	0:15



Fotografía 45. Descargas a 3,5 kV

Fotografía 46. Camino tracking y erosión

Fotografía 47. Placa 3.1

(a) Placa 1

(b) Placa 2

(c) Placa 3

Fotografía 48. Placas sin recubrir y sin degradar a tensión 3,5 kV

A diferencia de las placas ensayadas a 2,5 kV, todas las placas ensayadas a 3,5 kV fallaron por el criterio B, vale decir, alcanzaron la marca de los 25 mm. La diferencia radica en que algunas placas duraron más tiempo que otras al momento de producirse la carbonización localizada, pero al momento de producirse, el camino de carbonización avanzaba rápidamente hacia el electrodo superior. Por ejemplo, en el caso de la placa 2, duró 3 minutos con 28 segundos desde que empezó a producirse el tracking desde el electrodo inferior hasta el electrodo superior. Por lo tanto, es importante mencionar que la combinación entre el aumento de caudal y tensión, es determinante y muy destructivo, ya que una vez que alcanza el lugar de deterioro localizado, el camino de carbonización avanza rápidamente. Es por esto

que algunos casos, se tuvo que detener súbitamente el ensayo para evitar que el tracking llegase hasta el electrodo superior como se mostró en la Fotografía 46.

Por lo comentado anteriormente, las placas poliméricas sin recubrimiento y sin degradar tienen una clasificación **Clase 1B 3,5 – 2,8**.

(a) Placa 2,5 kV (b) Placa 3,5 kV

Fotografía 49. Placa 4

4.7.1.2 Resultados placas poliméricas sin degradar y con recubrimiento

Para este caso, se mide solamente desde los 3,5 kV ya que en 2,5 kV no hay gran daño en las primeras probetas. Al momento de aplicar el producto, tiene un aspecto brillante como se muestra en la Fotografía 37.b y se aplica en sentido perpendicular al de los electrodos. Cabe destacar que las placas se dejaron curar en la sala de alta tensión y al paso de una semana de curado, quedó con un aspecto seco parecido al de la Fotografía 37.c.

A diferencia con las placas sin producto, al momento de comenzar el tracking en uno de los dientes del electrodo inferior, el tracking se extingue y no continúa su camino continuo. Al no avanzar en la trayectoria continua de carbonización, se esperaba que la erosión produjera un gran orificio, ya que al no avanzar el tracking, impedido por el producto, este iba a tender a avanzar debajo de la superficie recubierta. Finalmente esto no fue así. Los caminos de carbonización fueron muy definidos a diferencia con el caso sin recubrir (ver Fotografía 50) y presentaron menor grado de erosión como se muestra en la Tabla 20. Otra diferencia importante, son los resultados de corriente promedio, donde la corriente promedio más baja para este caso fue de 5,472 mA, mientras que en el caso sin recubrir su corriente promedio mínima fue de 6,877 mA. Esto quiere decir que, al igual que el recubrimiento RTV, cumple con suprimir la corriente superficial [5]. Sin embargo, a pesar que las placas recubiertas tuvieron un periodo de duración mayor de ensayo, todas las placas fallaron por el criterio B, al igual que en el caso anterior.

Tabla 20. Resultados para placas con recubrimiento y sin degradar ensayadas a 3,5 kV.

n	I_p[mA]	I_max [mA]	Erosión_max [mm]	Tiempo [horas:minutos]
1	3.339	32.646	1,6	2:58
2	5.066	34.972	2,02	1:20
3	5.472	38.350	2,07	0:45

Por lo comentado anteriormente, las placas poliméricas con recubrimiento y sin degradar tienen una clasificación **Clase 1B 3,5 – 2,07**.

(a) Placa 1 (b) Placa 2 (c) Placa 3

Fotografía 50. Placas con recubrimiento y sin degradar a 3,5 kV

4.7.2 Resultados placas degradadas en radiación UV

En esta sección se muestran los resultados obtenidos de las placas poliméricas con y sin recubrimiento expuestas a radiación UV. En el primer caso son placas nuevas recubiertas y expuestas a la degradación. El segundo caso, son placas nuevas que se expusieron a degradar sin recubrimiento para luego ser recubiertas antes de ser ensayadas. Este último caso busca simular, en cierta medida, el posible evento de recubrir aisladores poliméricos que ya han estado degradados en servicio.

En esta sección no sólo se degrada ante el efecto de la luz UV, sino que también debido al calor disipado por las lámparas que se mantenía en la cámara a una temperatura promedio de 52°C. Estos fenómenos de degradación son conocidos como foto-degradación y termo-descomposición [1].

Cabe destacar que no se ensayaron placas sin recubrimiento debido a que se busca analizar el comportamiento del producto ante estas dos condiciones de superficie y no el grado de

degradación del polímero, pero se obtendrán conclusiones a partir de la forma y grado de erosión presente en cada caso.

4.7.2.1 Resultados placas recubiertas y degrada en UV

Estas probetas se recubrieron con producto y se degradaron bajo radiación UV durante 3 meses. Al final de la degradación el producto era casi imperceptible a simple vista, como muestra la Fotografía 37.d. Los resultados mostrados en la Tabla 21 son analizados a continuación y los patrones de erosión y tracking se muestran en la Fotografía 51.

A partir de los resultados de corriente promedio, se puede observar que no hubo gran variación. Sin embargo, los valores de corriente máxima, erosión y tiempo de duración de ensayo muestran una tendencia de magnitud decreciente según el orden ensayado. Si bien la primera placa obtiene los mayores valores de corriente máxima y erosión, se esperaría que fuese la placa con menor tiempo de duración de ensayo según el criterio B, pero esto no fue así: esto se debe a que la probeta tiende a erosionar más que avanzar en su trayectoria de carbonización. Este fenómeno se puede deber a dos causas conjuntas: la primera es que el producto, al sufrir la degradación debido a la radiación, este se transforma en un capa fina pero compacta y en conjunto con la degradación del material polimérico, las descargas tienden a conducir por el camino más conductor el cual es por el material polimérico que está débil y/o carbonizado.

Tabla 21. Resultados para placas recubiertas y degradadas en UV ensayadas a 2,5 kV.

n	I_p[mA]	I_max [mA]	Erosión_max [mm]	Tiempo [horas:minutos]
1	4.348	39.883	3.12	7:21
2	4.937	36.657	2,96	6:58
3	4.473	26.730	1,73	3:13

Tanto la primera placa como la segunda, obtienen patrones similares de erosión, donde ambas probetas presentaron dos caminos de tracking, mientras que la tercera probeta se caracteriza por una trayectoria fija, de poca duración y erosión. Llama la atención las características de erosión y tiempos de duración de cada ensayo, ya que se esperaban resultados similares en magnitud, y claramente esto no fue así. Esto se puede deber a que las probetas no recibieron la misma degradación durante el proceso de exposición, donde pudo haber afectado tanto la cercanía al foco de luz como el ángulo incidencia de exposición hacia las lámparas. No obstante, hay una similitud entre el patrón de degradación de las placas, debido a la degradación misma, donde los bordes del orificio que se va formando a causa de la erosión, muestran una forma de “acantilado” si se le ve de perfil. Pero este patrón se hace menor en la tercera probeta con menor magnitud de erosión donde termina su camino de tracking con bordes suaves o con forma de “duna”. Esto puede reafirmar la tesis de que las placas no se degradaron de igual forma.

Si estos resultados de degradación se comparan con los patrones de erosión de las placas sin degradar, se puede decir que éstas últimas resultaron con bordes suaves. Esta comparación

se puede entender de mejor manera mirando el Diagrama 8. Este último punto muestra la diferencia que se puede obtener, si se refiere a la forma de erosión, de dos superficies en condiciones diferentes: la superficie sin degradar muestra un patrón de degradación donde el tracking avanza hacia el electrodo superior y con bordes de erosión suaves, mientras que la superficie degradada bajo radiación UV tiende a formar un orificio de mayor profundidad y con bordes abruptos más que mostrar una tendencia de tracking hacia el electrodo superior.

(a) Placa 1 (b) Placa 2 (c) Placa 3

Fotografía 51. Placas Previamente degradadas en UV y luego recubiertas

Diagrama 8. Comparación bordes suaves vs bordes abruptos

Estas tres probetas se ensayaron sólo a 2,5 kV ya que al ver la forma de degradación de la primera placa, era de esperarse de que a un nivel mayor de tensión fallaran de igual o peor manera como se vio en el caso anterior.

Finalmente las placas poliméricas con recubrimiento y degradadas bajo UV obtienen una clasificación **Clase 1B 2,5 – 3,12.**

4.7.2.2 Resultados placa degradada en UV y luego recubierta

Aquí se espera observar el efecto de cómo actúa el producto después de haber degradado la placa durante 2 meses en luz UV. Una vez que se recubre la placa, se deja curando durante 3 días. Luego de este periodo, el recubrimiento tiene un aspecto opaco y seco como muestra la Fotografía 37.c.

Se degradaron sólo dos meses (en vez de 3 meses como el caso anterior) debido a que, mientras ya estaba en desarrollo la degradación de placas recubiertas bajo radiación UV (al

cabo de un mes), surgió la idea de analizar el comportamiento del polímero degradado y luego recubierto para tener una idea de cómo sería recubrir aisladores que hayan estado en servicio durante un tiempo. Esto se hace con el fin de saber, en cierto modo, cómo se comportaría el producto o como ayuda el producto a los aisladores poliméricos que ya han estado en servicio. Los resultados se exponen en la Tabla 22 y los patrones de erosión se muestran en la Fotografía 52.

Tabla 22. Resultados para placas degradadas en UV y luego recubiertas ensayadas a 2,5 kV

n	I_p [mA]	I_max [mA]	Erosión_max [mm]	Tiempo [horas:minutos]
1	6.162	38.702	5,06	6:58
2	5.544	32.380	4,82	6:38
3	4.579	37.589	4,28	4:35

De la experiencia de resultados anteriores, las placas se proceden a ensayar a un nivel de 2,5 kV. Al término de cada ensayo se percata que el tracking tuvo dos caminos que finalmente se unen en un solo orificio y un avance por debajo de la línea de la superficie, obteniendo un patrón de erosión similar al caso anterior. Esto se puede deber a que, como la superficie estaba recubierta y el material fue previamente degradado en UV, el tracking avanzó por el camino donde el material estaba más débil. Otro aspecto importante, fue que como no avanzaba en tracking, pero continuaba localmente, llegó a perforar la placa haciendo un pequeño orificio en la cara posterior de la placa, siendo esta placa la que más sufrió por erosión.

Al igual que la placa 3 degradada con producto, la placa 3 de ésta sección no se comportó al igual que las anteriores. Presentó un camino de tracking singular y poca erosión. En vez de seguir degradando de manera de generar un hoyo, el tracking se perfiló en línea hacia su límite. Esto puede deberse a la tesis mencionada anteriormente, donde el ángulo de incidencia de la luz pudo no degradar de manera significativa el material, como lo hizo con las otras dos placas. Sin embargo, si tomamos el resultado de la primera placa y la comparamos con la segunda, el daño es progresivamente menor, hasta llegar a esta instancia donde no hubo gran daño. El ángulo de incidencia de la luz UV pudo haber afectado en esta medición, pero lo que sí es claro, es que la luz UV afecta en los resultados anteriores de profundidad de erosión (5,06 mm la máxima), siendo comparable con las probetas nuevas que se ensayaron anteriormente, donde presentaron magnitudes de erosión menores (3,89 mm la máxima) . Como las probetas se pusieron juntas, se asumió que el ángulo de incidencia podría no afectar en la medición, pero sí pudo haberlo hecho.

(a) Placa 1 (b) Placa 2 (c) Placa 3

Fotografía 52. Placas recubiertas y degradadas en UV

Al comparar los patrones y magnitudes de erosión para este escenario, se puede decir que las placas que fueron recubiertas antes de ser degradas a radiación UV presentaron un menor deterioro que las placas que se degradaron y luego fueron recubiertas antes de ensayar. Por lo tanto se puede decir que el recubrimiento protege, en cierta medida, la superficie polimérica ante la acción del deterioro de la luz UV; se dice que en "cierta medida" debido a que tuvo el mismo patrón de erosión pero con menor magnitud de profundidad.

Finalmente las placas poliméricas degradadas bajo UV y luego recubiertas obtienen una clasificación **Clase 1B 2,5 – 5,06**

4.7.3 Resultados placas degradadas a la intemperie

Las placas se degradaron durante 2 semanas sobre la cabina de medición del patio de alta tensión de la UTFSM, Casa Central. El aspecto de la superficie para las placas con recubrimiento y sin este se muestra en la Fotografía 37.e y f respectivamente.

4.7.3.1 Resultados placas sin recubrimiento degradadas a la intemperie

Como se dijo al comienzo, sólo se ensayó una placa para el caso sin recubrir. Llegó a las 6 horas de duración de ensayo, el tracking tuvo dos caminos pero muy aleatorios y fue intermitente. El término de cada agujero no es suave como las placas sin degradar y sin producto, y hay secciones de la erosión donde se ve una degradación de forma granular (como si tuviese la forma de un grano de arena). Esto se puede deber a que sobre la superficie había tierra y los gránulos de ésta contribuyó a tal forma. Finalmente, el tracking termina abruptamente en orificio. En la Fotografía 53 se muestra la forma de erosión.

Cabe destacar que al inicio del ensayo la corriente aumentó rápidamente, donde se alcanzaron corrientes de hasta 70 mA. Esto se destaca porque fue la única probeta que llegó a tal magnitud y llamó mucho la atención este punto. Esto se debe al contenido salino que presenta la contaminación en la superficie y también al contenido no soluble que se puede apreciar a la vista. Lamentablemente hubo un problema al guardar los datos registrados y no se pudo

recuperar la carpeta de información de registro de corriente. Su erosión máxima fue de 3,95 mm.

Por lo anterior mencionado la placa sin recubrir y degradada a la intemperie obtienen una clasificación **Clase 1B 2,5 – 3,95.**

Fotografía 53. Placa a la intemperie sin recubrimiento

4.7.3.2 Resultados placas con recubrimiento y degradadas a la intemperie

Al ensayar esta probeta, el tracking comienza más temprano que el caso sin recubrir y los caminos son más definidos pero con avances intermitentes. Ninguna de las placas alcanza a estar las 6 horas y fallan por criterio B. Los resultados obtenidos son los mostrados en la Tabla 23.

Tabla 23. Resultados de placas recubiertas y degradadas a la intemperie ensayadas a 2,5 kV

n	I_p[mA]	I_max [mA]	Erosión_max [mm]	Tiempo [horas:minutos]
1	6.448	36.921	4,26	2:52
2	6.036	38.234	4,07	3:31
3	9.212	39.765	3,31	4:06

Cabe destacar que en este caso de degradación es donde se alcanza los mayores valores de corriente promedio y esto se debe al grado de contaminación que tenía la superficie, más el agente contaminante, por lo que era una contaminación exagerada respecto a los otros casos. Si bien no alcanzaron a obtener profundidades de erosión como en el caso UV, debido a que las placas estaban relativamente nuevas, son las placas que soportan menos tiempo de ensayo y las que sufren más daño. El aspecto del camino de tracking dejado en este caso se muestra en la Fotografía 54, donde tiene secciones de bordes suaves y abruptos producto de las descargas y el tipo de contaminantes presentes en la superficie.

Otro aspecto importante, es que en el ensayo previo de tensión de contorneo a 50 Hz que se realizó sobre aisladores poliméricos bajo condición de contaminación salina, el producto tuvo un buen rendimiento frente a esta condición. Sin embargo, dada esta información frente al ensayo de tracking bajo contaminación a la intemperie, se puede decir que el producto no es capaz de repeler o suprimir las cargas libres que son responsables de la circulación de corriente superficial, y no puede empaquetar las partículas más grandes como granos de arena.

Por lo comentado anteriormente, estas placas caen en la clasificación **Clase 1B 2,5 – 4,26.**

(a) Placa 1 (b) Placa 2 (c) Placa 3

Fotografía 54. Placas a la intemperie con recubrimiento

4.8 Resultados ensayos a placas de vidrio

En esta sección se busca el efecto que tiene la circulación de corriente superficial sobre la superficie del vidrio a partir de distintos escenarios de degradación tales como: sin degradar, radiación UV e intemperie. Mediante estos experimentos se puede observar si el producto contribuye a proteger o dañar la superficie vítrea bajo la acción de circulación de corriente superficial.

El criterio de término del ensayo se tomará como el Criterio A (alcanzar 60 mA) o simplemente cuando el tiempo transcurrido supere las 6 horas, pero la importancia de estos ensayos es visualizar el daño ocasionado en la superficie del vidrio. Por otro lado, no se espera tener un resultado de carbonización como lo fueron las placas poliméricas, debido a que el vidrio es de estructura molecular inorgánica.

El análisis de los resultados obtenidos se presenta a continuación.

4.8.1 Resultados placas de vidrio sin degradar

En la siguiente sección se exponen los resultados de las placas de vidrio sin y con recubrimiento bajo ningún tipo de degradación. Estas placas servirán como muestras testigos para comparar sus resultados con los obtenidos en los casos bajo degradación UV e intemperie.

El aspecto de las superficies sin degradar para la placa sin recubrimiento y con recubrimiento se muestra en las Fotografías 38.a y b respectivamente.

4.8.1.1 Resultados placas de vidrio sin recubrir y sin degradar

La primera placa sin recubrir se somete a prueba es a 2,5 kV. La idea de esta prueba es verificar si hay daño significativo a este nivel de tensión. De no ser así se procederá a aumentar la tensión y el caudal respectivo según la prescripción de la Tabla 16.

Al iniciar el ensayo la corriente aumentó rápidamente en los primeros segundos, llegando a los 20 mA y registrando una corriente promedio de 5,963 mA. El ensayo se dividió en dos partes debido a que no se alcanzó a terminar en el primer día. Se finalizó el ensayo sin llegar a los 60 mA y se limpió los restos que quedaron en la superficie para inspeccionar los daños ocasionados. Después de limpiar la placa, se aprecia al tacto una superficie rugosa. Si bien no se ve una erosión en profundidad, si se ve un daño superficial. Esta característica de degradación se puede observar en la Fotografía 55.a.

(a) Placa 1 a 2,5 kV (b) Placa 1 a 3,5 kV

Fotografía 55. Placas de prueba vítreas.

Luego del ensayo de la primera placa a 2,5 kV, se utiliza el reverso de esta para realizar la prueba a 3,5 kV. No alcanzó a estar más de 4 horas de exposición debido a que el vidrio se partió en dos como se aprecia en la Fotografía 55.b. Se destaca que en el lugar donde se rompió el vidrio, se vio con anterioridad una pequeña línea de color naranja, parecida a una astilla, sobre uno de los dientes del electrodo inferior (ver Fotografía 56.a) por lo cual se afirma que esta pequeña línea resultó ser la detonante de la rotura del vidrio. Unos milímetros más arriba de esta pequeña línea, se aprecia una chispa de color amarillo muy parecida al caso donde comienza el tracking en el caso polimérico; esta última da forma a una especie de “costra” sólida de color negro sobre la superficie del vidrio a causa de la acción de las descargas sobre el líquido contaminante y sobre el mismo electrodo. Al momento de revisar la placa ya rota y limpia, se percata que tiene un pequeño orificio de 0,46 mm, y donde estaba

la posición de los dientes del electrodo inferior se formó una línea de relieve de color negro (la llamada “costra”) como se muestra en la Figura 56.b. Su superficie no resultó tener tantas líneas de rugosidad como se pudo ver en la placa ensayada a 2,5 kV. Esto se debe a que el primer ensayo se hizo en dos etapas: al iniciar la segunda etapa de degradación, la superficie ya contenía residuos secos de la primera prueba. Estos residuos secos influyeron en el resultado de rugosidad de la placa dando un resultado de rugosidad mayor que el caso de 3,5 kV, aunque también depende del tiempo de exposición en el ensayo. Dada la situación anterior, y con motivo de comprobación de esta, se sometió otra placa nueva para repetir el ensayo a 2,5 kV.

(a) Falla antes de romper vidrio

(b) Orificio de vidrio roto

Fotografía 56. Rotura de placa de vidrio

Los resultados obtenidos de corrientes y tiempo de duración del ensayo tanto a nivel de tensión de 2,5 kV como 3,5 kV se exponen en la Tabla 24.

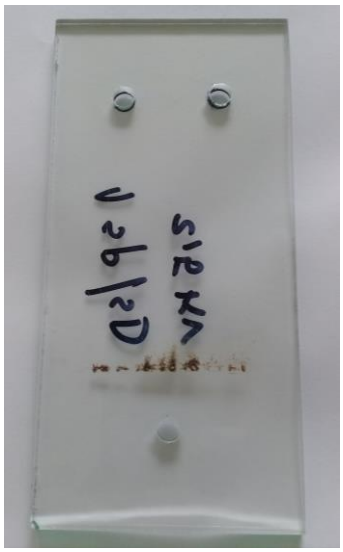
Tabla 24. Resultados de placas de vidrio sin recubrir y sin degradar.

Tensión kV	Sin degradar	I_p[mA]	I_max [mA]	Tiempo [horas:minutos]
2,5	PLACA 1 SIN RECUBRIMIENTO	5.963	37.423	8:10
	PLACA 2 SIN RECUBRIMIENTO	4.380	29.910	7:37
3,5	PLACA 1 SIN RECUBRIMIENTO	5.103	37.925	3:19

Se procede a realizar el ensayo a 2,5 kV a una segunda placa con el fin de corroborar el ensayo anterior. Este ensayo se realizó durante 6 horas continuadas. Al término del ensayo, no presenta tanta rugosidad como era esperado. Al ser un ensayo continuo, no quedó sedimento seco sobre la superficie, por lo que no dejó una capa de rugosidad tan significativa

como el caso anterior, pero si quedaron marcados los dientes del electrodo inferior como se muestra en la Fotografía 57.

Al diferenciar el rastro de carbonización dejado por ambos niveles de tensión, se puede decir que en el caso de 3,5 kV se observa mayor presencia de rastro carbonoso dejado sobre los dientes del electrodo inferior que en el caso de 2,5 kV. A pesar de que tuvieron magnitudes de corrientes similares, el ensayo a 3,5 kV fue más destructivo en un periodo de tiempo más corto, debido a la mayor magnitud de tensión.



Fotografía 57. Placa 2 sin producto y sin degradar a 2,5 kV

(a) Camino tracking

(b) Efecto electrodo inferior

Fotografía 58. Placa recubierta sin degradar a 2,5 kV

4.8.1.2 Resultados placas de vidrio recubiertas y sin degradar

Estas placas se recubrieron con producto y se dejaron curar durante 3 días. El aspecto de esta superficie recubierta se mostró en la Fotografía 38.b.

Hubo diferencias respecto a la placa de vidrio sin producto en el ensayo a 2,5 kV. La primera diferencia es la corriente, donde presentó menor valor de promedio y máxima, presentando esta última una diferencia mayor. La segunda diferencia es que la placa presenta menos marcas de los dientes del electrodo inferior y menos rugosidad, debido a que las gotas caen siempre en el mismo lugar (se forma un canal) y no es de manera aleatoria sobre el electrodo como el caso sin producto, formando así un sitio de descarga localizada desde el electrodo inferior al superior, dejando un camino visible de tracking (se llama tracking al camino de carbonización dejado por la degradación del producto por las descargas). El resultado visual sobre la placa se muestra en la Fotografía 58.a y b.

Luego se procede a realizar el ensayo a 3,5 kV. A diferencia de la placa sin producto, esta tardó más en romper y la rugosidad es menor, como se muestra en la Fotografía 59.b. Cabe destacar el comportamiento de las descargas sobre la superficie: al aumentar la tensión a 3,5 kV, las descargas se hacen más extensas y se producen entre los bordes del canal que deja la

gota en el producto, dejando una huella más ancha que el caso a 2,5 kV como se muestra en la Fotografía 59.a. Este es el resultado de la carbonización del contaminante en conjunto con el producto. Puede que la película del recubrimiento y su comportamiento de carbonización combata la erosión sobre el vidrio con estas "costras de carbonización", ya que las descargas se producen sobre esta en vez de la superficie del vidrio. Sin embargo, este relieve puede ser un "arma de doble filo" debido a que, al quitar la aleatoriedad de las descargas, en vez de degradar la superficie en general, éstas degradan un lugar específico que puede promover finalmente a la rotura del material.

(a) Tracking vidrio

(b) Efecto electrodo inferior

Fotografía 59. Placa recubierta sin degradar a 3,5 kV

Los resultados de corrientes y tiempo de duración de ensayos a diferente nivel de tensión se presentan en la Tabla 25.

Tabla 25. Resultados de placas de vidrio recubiertas sin degradar.

Tensión kV	Sin degradar	I_p[mA]	I_max [mA]	Tiempo [horas:minutos]
2,5	PLACA 1 CON RECUBRIMIENTO	4.218	22.772	7:34
3,5	PLACA 1 CON RECUBRIMIENTO	6.235	39.232	6:09

4.8.2 Resultados placas de vidrio degradadas bajo radiación UV

Para este ensayo las probetas se recubrieron y se dejaron degradar en la misma cámara de radiación UV durante 3 meses. La superficie de estas tenían un aspecto reseco como se mostró en la Fotografía 38.c. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 26.

Tabla 26. Resultados de placas de vidrio recubiertas y degradadas bajo UV

Tensión kV	Radiación UV	I_p[mA]	I_max [mA]	Tiempo [horas:minutos]

2,5	PLACA 1 CON RECUBRIMIENTO	4.267	32.394	7:54
3,5	PLACA 1 CON RECUBRIMIENTO	4.944	37.367	5:52

Para ambos niveles de tensión, los resultados de degradación fueron similares, presentando mayor grado de rugosidad y mayores valores de corrientes respecto a las placas con producto y sin degradar. De igual manera, la placa a 3,5 kV se terminó partiendo al igual que el caso anterior y mostrando mayor deterioro a este nivel de tensión. Además, el relieve de carbonización en los dientes del electrodo inferior es más pronunciado. Esta última se debe a que al estar degradado el producto, este es más propenso a perder su adherencia a la superficie y mientras avanza el ensayo, el producto degradado que pierde su adherencia se aloja en los dientes del electrodo inferior, formando así una costra de aspecto carbonoso tras sufrir las descargas. Además, la trayectoria de carbonización del producto no deja la huella en forma de canal como se vio en el caso sin degradar (ver Fotografía 60.a y 61.a), por lo que se producen descargas aleatorias sobre el electrodo inferior.

(a) Tracking vidrio

(b) Efecto electrodo inferior

Fotografía 60. Placa recubierta y degrada en UV a 2,5 kV

(a) Tracking vidrio

(b) Efecto electrodo inferior

Fotografía 61.Placa recubierta y degrada en UV a 3,5 kV

4.8.3 Resultados placas de vidrio degradadas a la intemperie

En esta sección se muestra los resultados de los ensayos realizados a placas de vidrio degradadas a la intemperie sin y con producto. El aspecto de las superficies se presenta en la Fotografía 38.e y d, donde se puede ver que están cubiertas por una capa de tierra. El análisis de los resultados se presenta a continuación.

4.8.3.1 Resultados placas de vidrio sin recubrir y degradadas a la intemperie

Se procede a ensayar a 2,5 kV, registrando una corriente máxima de 36,3 mA y su tiempo de duración fue de 6 horas. La degradación en esta probeta es visiblemente mayor que el caso sin recubrir y sin degradar e incluso estuvo a punto de sufrir una rotura como se muestra en la Fotografía 62. Al igual que los demás casos sin recubrir, las descargas sobre el electrodo inferior son de carácter aleatorio, dejando una huella carbónica importante. En la Tabla 27 se exponen los resultados obtenidos.

Tabla 27. Resultados placas de vidrio sin producto degradas a la intemperie

Tensión kV	Intemperie	I_p[mA]	I_max [mA]	Tiempo [horas:minutos]
2,5	PLACA 1 SIN RECUBRIMIENTO	6.144	36.300	8:06
3,5	PLACA 1 SIN RECUBRIMIENTO	8.055	39.352	1:32

Para el caso a 3,5 kV el ensayo empieza con gran actividad de descargas, mayores a todos los casos anteriores, alcanzando corrientes superiores a 60 mA. Una vez que la superficie está un "poco más limpia", debido a la circulación del caudal, la corriente tiende a disminuir. Finalmente el ensayo no duró más de hora y media, donde la placa se terminó rompiendo como se muestra en la Fotografía 63.

(a) Tracking vidrio

(b) Efecto electrodo inferior

Fotografía 62. Placa sin recubrir y expuesta a la intemperie a 2,5 kV

Si se comparan los resultados de rugosidad en ambas placas expuestas a la intemperie y sin recubrimiento, se puede decir que la placa ensayada a 2,5 kV sufrió mayor daño que en el caso de mayor tensión. Sin embargo, esto se debe a que la placa expuesta a 3,5 kV estuvo muy poco tiempo durante el ensayo por lo que, de haber estado un par de horas más, posiblemente haya sufrido un deterioro igual o mayor que el expuesto a 2,5 kV.

(a) Tracking vidrio

(b) Efecto electrodo inferior

Fotografía 63. Placa sin recubrir y expuesta a la intemperie a 3,5 kV

4.8.3.2 Resultados placas de vidrio recubiertas y degradadas a la intemperie

El ensayo a 2,5 kV duró más de 6 horas. En este caso se formó un camino de descargas más ancho que los casos anteriores y claramente visible, como se muestra en la fotografía 64.a. Al momento de limpiar la muestra, se pudo ver que los bordes del camino de tracking era

una especie de costra pero no sólida como las que se producen en el electrodo inferior en otros casos, por lo que se pudo remover. Al remover toda la suciedad, se revela la sorpresa de que en el electrodo inferior casi no hay daños, teniendo una degradación leve en la superficie del vidrio que se encuentra entre los límites de estas costras acuosas. Posee una rugosidad notoriamente menor a la vista y al tacto en comparación con todos los casos anteriores. Esto se debe posiblemente a la combinación de aleatoriedad de las descargas sobre el electrodo inferior y a la ayuda del producto, donde en conjunto con la capa sucia, hace un papel de capa protectora compacta. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 28.

Tabla 28. Resultados placas de vidrio recubiertas y degradadas a la intemperie

Tensión kV	Intemperie	I_p[mA]	I_max [mA]	Tiempo [horas:minutos]
2,5	PLACA 1 CON RECUBRIMIENTO	4.969	31.327	7:48
3,5	PLACA 1 CON RECUBRIMIENTO	5.111	35.044	2:17

En el caso de ensayo a 3,5 kV, a diferencia con la probeta sin producto en este mismo nivel de tensión, se pudo apreciar una baja en la corriente de inicio del ensayo. La prueba duró 2 hora 17 min antes de romper y al igual que en el caso de 2,5 kV con recubrimiento, se hizo un camino de tracking notorio; la diferencia radica en que sí presenta una “costra dura” en la localización del electrodo inferior, pero de menor área en comparación con los casos anteriores como se muestra en la Fotografía 65. A diferencia con el caso a 2,5 kV y con producto, es que la costra que se formó en los bordes del camino de tracking era dura y difícil de remover.

(a) Tracking vidrio (b) Efecto electrodo inferior

Fotografía 64. Placa recubierta y expuesta a la intemperie a 2,5 kV

(a) Tracking vidrio (b) Residuo en placa (c) Efecto electrodo

Fotografía 65. Placa recubierta y expuesta a la intemperie a 3,5 kV

Comparando estos resultados con las placas sin producto bajo el mismo escenario de degradación, se puede decir que las placas recubiertas sufren un deterioro notoriamente menor. Incluso, si se comparan las placas con recubrimiento ensayadas a 2,5 kV, se puede decir que en este escenario es donde existe menor deterioro.

4.9 Comparación de resultados ensayo de tracking y erosión para placas poliméricas y vítreas.

En esta sección se presentan la comparación de resultados finales para cada uno de los casos estudiados para las placas de material poliméricos y de vidrio. Los casos que se estudiaron fueron degradación de placas con recubrimiento y sin este ante escenarios tales como: sin degradar, radiación UV e Intemperie.

De los resultados obtenidos (ver Tabla 29) de los ensayos realizados a placas poliméricas, se puede decir que el escenario que más afectó en el deterioro de las placas fue la degradación bajo radiación UV sin recubrir, donde las placas se expusieron a una foto-degradación y termo-descomposición [1]. Sin embargo, se puede decir que el recubrimiento protege en cierta medida la superficie de la placa, debido a que las placas que se degradaron recubiertas bajo UV sufrieron menos erosión (3,12 mm) que las placas que fueron degradadas y luego recubiertas antes de ser ensayadas (5,06 mm), las que incluso perforaron la placa. A pesar de esto, tuvieron similar característica de erosión (orificios con forma similar).

Para el caso de los ensayos realizados a placas de vidrio, se hace una comparación mediante las corrientes superficiales promedio registradas para cada caso de degradación y según cada nivel de tensión ensayado. De los resultados obtenidos (ver Tabla 30) se puede decir que el caso más desfavorable (el que tuvo mayor magnitud de corriente) fue el ensayo de placa de vidrio que se degradó previamente a la intemperie sin recubrir, alcanzando un valor de corriente promedio de 6,144 mA para el caso de tensión de ensayo de 2,5 kV y 8,055 mA para el caso de 3,5 kV de tensión de ensayo. Esto se debe a que se pudo observar gran

cantidad de depósito de contaminación sobre su superficie. Sin embargo, se puede decir que para el mismo escenario de degradación y similares características de depósitos de contaminación, pero con su superficie recubierta, disminuye la magnitud de corriente. Esto da un indicador de que, para este caso, el producto de recubrimiento funciona (en cierta medida) como supresor de corriente superficial ante agentes contaminantes. Se dice que fue para este caso, debido a que en el mismo escenario de degradación sobre placas poliméricas tuvo un resultado adverso.

Tabla 29. Resultados de placas poliméricas en Ensayo de erosión y tracking

Resultados placas poliméricas	
Tipo	Calificación
Sin recubrir y sin degradar	Clase 1B 3,5 – 2,8
Recubierta y sin degradar	Clase 1B 3,5 – 2,07
Recubierta y degradada en UV	Clase 1B 2,5 – 3,12
Degradadas en UV y luego recubiertas	Clase 1B 2,5 – 5,06
Sin recubrir y degradadas a la intemperie	Clase 1B 2,5 – 3,95
Recubierta y degradada a la intemperie	Clase 1B 2,5 – 4,26

Tabla 30. Resultados de placas de vidrio para ensayo de erosión y tracking

Placas de vidrio	Corriente promedio registrada [mA]	
Nivel de tensión / Tipo	2,5 [kV]	3,5 [kV]
Placa sin recubrimiento y sin degradar	5,963	5,103
Placa con recubrimiento y sin degradar	4,218	6,235
Placa con recubrimiento degrada en UV	4,267	4,944
Placa sin recubrimiento y degradada a la intemperie	6,144	8,055
Placa con recubrimiento y degradada a la intemperie	4,969	5.111

4.10 Conclusiones

En este capítulo se analizaron los resultados de erosión y tracking del ensayo en plano inclinado aplicado a placas poliméricas y vítreas recubiertas con producto nano-dieléctrico y sin este utilizando como guía la norma IEC 60587, cumpliendo con el objetivo propuesto de evaluar la resistencia a la degradación del recubrimiento para ambos tipos de aisladores ante descargas superficiales mediante procedimientos normalizados usando placas de material polimérico y de vidrio.

De los resultados obtenidos en las pruebas realizadas a las placas poliméricas, sólo las placas sin degradar llegaron a ser ensayadas a un nivel de tensión de 3,5 kV, ya que todas las otras placas degradadas no alcanzaron a pasar el nivel de 2,5 kV. Independiente del nivel de tensión

aplicado, todas las probetas finalizaron su ensayo cuando su trayectoria de carbonización llegó a los 25 mm desde el electrodo inferior, esto quiere decir, que todas fallaron según el criterio B, en vez de alcanzar 60 mA durante el ensayo según el criterio A.

La mayor diferencia obtenida después de los ensayos a las placas poliméricas, es la forma en cómo se erosionan las placas tanto en el proceso mismo de erosión como el relieve final. Las placas que no tuvieron ningún tipo de degradación, con y sin recubrimiento, presentan un tracking continuo y definido hacia el electrodo superior sin presentar gran profundidad de erosión, pero lo que marca la diferencia en el desarrollo del ensayo es que, al estar las placas recubiertas, presentan un camino de tracking con avance intermitente, por lo que se puede decir que el producto tiende a mitigar las descargas y, por lo tanto, frenar la trayectoria de tracking. En el caso de las placas degradadas en UV se desarrolla más de un camino de carbonización y presentan una erosión más profunda (5,06 mm) que el caso sin degradar y recubierto (2,07 mm) debido a que la trayectoria de carbonización, en vez de avanzar continuamente hacia el electrodo superior, iba degradando el material en el mismo lugar. Esto se debe al efecto combinado del recubrimiento y la degradación: el producto de recubrimiento frena el avance del tracking, y al estar degradado el material, la erosión se localiza en el mismo lugar en vez de avanzar. Es por esto que en el caso UV se produce un efecto de erosión mayor que en el caso sin degradar. Este último punto muestra la diferencia que se puede obtener, si se refiere a la forma de erosión, de dos superficies en condiciones diferentes: la superficie sin degradar muestra un patrón de degradación donde el tracking avanza hacia el electrodo superior y con bordes de erosión suaves, mientras que la superficie degradada bajo radiación UV tiende a formar un orificio de mayor profundidad y con bordes abruptos más que mostrar una tendencia de tracking hacia el electrodo superior.

Por otra parte, el caso de degradación a la intemperie es donde se alcanza la mayor magnitud de corriente (9,212 mA a 2,5 kV) debido al grado de contaminación presente en la superficie a pesar de estar con recubrimiento; aunque no se alcanza profundidades de erosión como en el caso UV, ya que el material en sí no se encuentra degradado, son las probetas que menos tiempo demoraron en fallar.

Por otro lado para el caso de degradación UV, a pesar de que el patrón de trayectoria de carbonización es similar en todas las probetas degradadas bajo esta condición, hubo variabilidad en los resultados de profundidad de erosión. Esto se debe posiblemente a que el ángulo de incidencia de la luz sobre las placas no era el mismo, por lo que se recomienda tomar en cuenta este factor para trabajos futuros.

Para el caso de las placas de vidrio, los resultados son diferentes a los de las placas poliméricas debido a la naturaleza misma del material. Las placas vítreas ensayadas, con y sin recubrimiento, presentan diferencias importantes en el aspecto final de sus superficies, donde, según el caso, presentan más o menos degradación al percibir, tanto visual y táctil, su estado de rugosidad. Se puede decir que la superficie sin recubrir y sometida a degradación a la intemperie fue la que presentó mayores daños, presentando gran rugosidad y material carbonoso pegado a su superficie, pero la superficie recubierta y bajo el mismo escenario de degradación, presenta un total contraste, donde la superficie no presenta mayor daño. Esto se

debe a que el recubrimiento protege la superficie, pero además, la misma capa contaminante de tierra crea una aleatoriedad en las descargas producidas en el electrodo inferior; no así para el caso con recubrimiento y sin degradar, donde las gotas del contaminante se depositaban en un lugar específico de los dientes del electrodo y creaba a su paso un deterioro local. Sin embargo, en el último caso mencionado fue el que presentó la menor magnitud de corriente.

En el caso de las placas degradadas a la intemperie y ensayadas a 3,5 kV, las costras que se formaban en los bordes del camino de descarga, a causa de los mismos residuos y recubrimiento, quedaban adheridas a la superficie. Esto puede conducir en la realidad, a no poder remover esta capa con un simple chorro de agua a gran presión como se hace en los mantenimientos comunes de lavado de líneas, por lo que se requeriría una limpieza a mano. Esto traería consigo altos costos y un tedioso trabajo por parte de los operarios.

Cabe destacar que todos los ensayos realizados en el vidrio al nivel de 3,5 kV terminaron con la rotura del vidrio, sin embargo las placas recubiertas aguantaron más tiempo que las placas sin recubrir. Otro aspecto importante que se observó en los ensayos, fue la rugosidad que presentó la primera placa (sin degradar y sin recubrimiento) al ser ensayada con residuos secos de solución contaminante sobre su superficie; esta situación puede suceder en servicio y se podría evaluar este escenario en futuros trabajos para ver sus efectos en una superficie con recubrimiento.

Un punto a considerar es cómo regular el caudal del contaminante, ya que al hacerlo manual, este provoca aleatoriedad sobre el ensayo. Pese a que no afecta en los resultados generales, si afecta para el desarrollo mismo del ensayo. Es por esta razón que se recomienda realizar la regulación del caudal mediante un procedimiento automático-neumático que sea preciso y continuo.

Finalmente se puede decir que el producto de recubrimiento, para el caso de placas poliméricas, retarda el avance de tracking y erosión sobre su superficie y la protege, en cierta medida, ante la exposición de radiación UV. Y respecto a los resultados del desempeño del producto sobre la superficie de las placas de vidrio, se puede decir que también mitiga las descargas y protege su superficie ante la acción de éstas, mostrando menor rugosidad y presencia carbonosa respecto a las placas sin recubrir.

Capítulo 5. Método propuesto para recubrir aisladores

Los aspectos importantes a considerar para recubrir un aislador con un revestimiento, basado en revestimientos actuales tales como el revestimiento de silicona RTV, son el espesor de la capa sobre la superficie del aislador y la aplicación del recubrimiento.

5.1 Espesor de la capa del recubrimiento.

El espesor de la capa del revestimiento ha tomado importancia en los materiales de silicona RTV [4], ya que su correcto funcionamiento depende de este factor, y a su vez es de suma importancia la adherencia del producto a la superficie. El producto RTV, al ser aplicado, resulta una capa compacta. Para el caso del producto bajo estudio en esta memoria, llamado Standard (STD), por sus características físicas de aspecto líquido y aceitoso, ésta puede operar con una fina película sobre la superficie aislante, que cumple con dar la característica hidrófoba a la superficie para suprimir las corrientes de fuga y formación de bandas secas que promueven los contorneos, como se mostró en el capítulo 3 sobre los aisladores de vidrio, y además protege la superficie vítrea ante la erosión como resultó en el capítulo 4.

Se recomienda al fabricante modificar la fórmula del recubrimiento de tal forma que, al ser aplicado, tenga una mayor consistencia para que la capa de revestimiento sea más compacto y no escurra por la superficie. También, para trabajos futuros, poder medir el espesor óptimo de la capa aplicada, mediante el uso de un medidor de película húmeda y un medidor de espesor ultrasónico.

5.2 Aplicación del producto

La facilidad de la aplicación es de suma importancia. Las consideraciones de la aplicación incluyen la preparación del aislador, la preparación del material, el equipo a utilizar y la manera de aplicar el producto tanto en aisladores nuevos como aisladores que están en servicio.

Primero que todo, la superficie de los aisladores tienen que estar limpios y secos. El fabricante recomienda limpiar la superficie con un solvente, por ejemplo alcohol, para obtener una mayor adherencia del producto. Una vez limpia la superficie, se debe preparar el producto para recubrir. El fabricante entrega el producto en una lata de aerosol como se mostró en la Fotografía 1. Antes de aplicar el producto se debe batir varias veces para que tenga la homogeneidad necesaria. Es de suma importancia destacar que el operario debe utilizar un traje que cubra su cuerpo y cabeza, mascarilla de seguridad, lentes y guantes, para no tener contacto alguno con el producto.

5.2.1 Aplicación desenergizado

Dado el actual sistema de almacenamiento del producto, resulta poco práctico para su aplicación en terreno debido a que se necesitarían muchas latas individuales. Es por esto que se recomienda diseñar un sistema de almacenamiento de mayor tamaño, de tal manera que se pueda utilizar en un equipo convencional de rociamiento de aire o sin aire.

Se recomienda usar un sistema de rociamiento "Airless" que se ocupa para la aplicación de pintura. La tecnología airless permite la aplicación de pintura y otros materiales a alta presión. Se recomienda esta tecnología, dado que la textura del recubrimiento es similar a la de pintura. Aunque la maquinaria airless genera la fuerza con aire, la diferencia con otros métodos radica en que permite la atomización (fragmentación de materiales en partes muy pequeñas) de pintura sin aire ya que ambos componentes no se mezclan en ningún momento del proceso. Al entrar en contacto el material con el aire, los equipos tradicionales fragmentan las partículas más de lo necesario, provocando la denominada sobre pulverización (o rociamiento excesivo). Esto genera una nube de material sobrante, que no se adhiere a la superficie donde se desea aplicar y por tanto un mayor coste de material [25].

Los equipos airless son accionados eléctricamente, neumáticamente (aire comprimido, mediante compresor) o con un motor de combustión interna. La acumulación de presión se lleva a cabo mediante un pistón o una membrana. El flujo de material es controlado por una válvula de entrada y otra de salida. La regulación de la fuerza se efectúa por medio de la válvula de compresión y la válvula de descarga. Un manómetro indica la presión. El material se recibe en el equipo airless mediante el sistema de succión, que puede ser flexible o rígido, o un embudo. El pistón o diafragma transportan el material a través de la válvula de salida, conectada a la manguera. Ésta a su vez transporta el producto hasta el aplicador, el cual al apretar el gatillo expulsa la pintura por medio de la boquilla a la superficie de aplicación [25].

El material se filtra tanto en el filtro principal en el propio dispositivo como en el filtro de la pistola airless. Esto permite que la boquilla no se obstruya durante el pintado [25].

El rociamiento se debe regular de tal manera que no se rocíe exceso de material, ya que dada sus características, este se escurre por la superficie, formando gotas en las faldas de los aisladores. Si se rocían las partes metálicas, puede ayudar a combatir la corrosión el cual es un gran problema de ferretería actual. Sin embargo, si se recubre todo el aislador, incluyendo sus partes metálicas, puede quedar producto entre las fronteras de metal y vidrio, lo que con el tiempo se podría producir descargas localizadas en estas junturas, las que formaría una costra difícil de remover producto de la carbonización del producto, tal como se vio en ensayo de erosión sobre placas de vidrio en el capítulo 4. Esto puede ser un proceso tedioso de purga para los operarios encargados de mantenimiento. Es por esta razón que se debe evitar llegar a este punto de descargas para no lamentar un mantenimiento engorroso.

Es relevante destacar que, dada la característica líquida y aceitosa del producto de recubrimiento, este debe ser aplicado en los aisladores una vez que éstos ya están instalados en la línea para su pronta operación. Esto se debe a que no se pueden transportar los aisladores pre-aplicados, dado que se pueden contaminar fácilmente antes de ser instalados. Además, al manipular la superficie aislante con el producto aplicado, este puede manchar cualquier objeto que tenga contacto con él, dado que no es compacto. Esto trae consigo una pérdida de material y por otro lado un trabajo poco ameno para el operador.

5.2.2 Aplicación en red energizada

Para poder aplicar el recubrimiento en líneas energizadas, primero que todo se debe saber a qué nivel de tensión se realizará el procedimiento, ya que, al igual que el procedimiento de lavado de líneas energizadas, se deben seguir procedimientos y protocolos de seguridad.

Antes de aplicar el recubrimiento, se debe lavar los aisladores. El producto se puede aplicar al equipo energizado usando un sistema de rociado airless y un hot stick. El hot stick es una vara aislada generalmente de fibra de vidrio, utilizada por los trabajadores de servicios eléctricos cuando trabajan en líneas energizadas para protegerlos de alguna posible descarga eléctrica. Este trabajo debe hacerse bajo estricta supervisión y realizarse solo por equipos experimentados en el trabajo de líneas.

Cabe señalar que la aplicación energizada no permite la medición del espesor y la pérdida de material es mucho más alta que con la aplicación convencional.

5.3 Re-aplicación.

La re-aplicación se debe realizar cuando el estado hidrófobo de la superficie es baja o prácticamente hidrófila, según la severidad del ambiente. Esto se puede dar, ya sea, por la ausencia del producto debido a la abrasión progresiva de lluvias, si es que está en un ambiente muy lluvioso, o por exceso de contaminación en su superficie, si está entre un ambiente de contaminación media o severa. A su vez, se puede percatar que el producto ya ha cumplido su vida útil al tener presencia de descargas en los aisladores.

En la sección 3.4.5 se mostró que por acción del lavado del aislador, el producto se escurría junto con las partículas contaminantes. Esto quiere decir que con un lavado adecuado a alta presión, se puede remover toda la suciedad, para ser nuevamente recubierto por el procedimiento propuesto en la sección 5.2.2.

En estricto rigor, no se sabe con exactitud el tiempo que demora para dar por terminada la vida útil del recubrimiento, ya que no se ha probado en servicio, por lo que se recomienda hacer un estudio donde se haga un seguimiento del comportamiento y desempeño del producto en el campo para tener una estimación de cuando realizar el mantenimiento y por consiguiente la re-aplicación. Sin embargo, se sabe que el producto pierde su buen funcionamiento cuando está en presencia de un ambiente muy contaminado, ya que se adhieren las partículas contaminantes a la superficie, promoviendo así la pérdida de su característica hidrófoba.

5.4 Conclusiones

En este Capítulo se propuso una metodología de aplicación del recubrimiento en los aisladores tanto para la condición de servicio como fuera de él, cumpliendo con el objetivo propuesto.

Se recomendó un método para rociar el recubrimiento sobre aislamientos que estén a punto de operar, que estén limpios y secos, o que ya han estado en funcionamiento, con la condición de hacer un mantenimiento de lavado previo.

El espesor de la capa de revestimiento para el caso del producto STD puede ser muy fina, y aun así cumplirá con dar la característica hidrófoba al aislador vítreo.

Para aisladores que estén nuevos, instalados y a punto de operar, se recomienda el uso de la tecnología Airless, utilizando aire comprimido para obtener una película más fina y acabada

en la superficie. Se necesita este tipo de tecnología de rociamiento para aisladores que estén en líneas energizadas, mediante el uso de una vara hot stick. Para la aplicación del producto STD en líneas energizadas, debe hacerse bajo estricta supervisión y realizarse solo por equipos experimentados en el trabajo de líneas.

Para aisladores que ya han estado recubiertos y han estado durante un tiempo en servicio, se pueden volver a recubrir, siempre y cuando su superficie esté limpia y seca para conseguir una mejor adherencia del producto. El momento indicado para hacer la re-aplicación del producto, es cuando el aislador haya perdido su estado hidrófobo sobre su superficie; dada esta premisa, se puede decir que el producto ha cumplido su vida útil. No se sabe actualmente con exactitud cuándo se da por terminada la vida útil del recubrimiento, ya que no se ha probado en servicio, por lo que se recomienda hacer un estudio futuro donde se haga un seguimiento del comportamiento y desempeño del producto en el campo.

Capítulo 6. Conclusiones generales, recomendaciones y trabajos futuros

6.1 Conclusiones generales

En el Capítulo 3 se cumplió con evaluar y analizar el comportamiento en el mediano plazo del producto de nano-recubrimiento dieléctrico llamado "Standard", en aisladores de vidrio recubiertos y sin recubrir con este producto, basado en la prescripción del procedimiento normalizado de la norma ANSI C.29.1 y ANSI C.29.11 para la medición de tensión de contorneo en condición seca y húmeda. Para cumplir el objetivo de evaluar y analizar el recubrimiento en el mediano plazo, antes de ensayar los aisladores con y sin recubrimiento, se sometieron a distintos escenarios de degradación tales como contaminación a la intemperie, radiación UV y bajo techo.

Como idea global de los resultados obtenidos a lo largo de la realización de todos los ensayos a aisladores previamente degradados a la intemperie con recubrimiento, se puede decir que la variación de la tensión de contorneo para ambas condiciones (seca y húmeda) tiene una tendencia decreciente al paso de sus respectivos periodos en distintos ambientes de degradación, con la diferencia que para el caso en condición seca, los resultados entre el primer y último periodo de degradación se mantienen en un rango de diferencia no mayor al 12% debido a que su tensión de ruptura depende más de su distancia de fuga que la superficie contaminada; mientras que en el caso de condición húmeda, sus valores de diferencia son mayores, alcanzando un 29% el cual fue el más crítico para esta condición.

El caso en el cual el producto de recubrimiento fue degradado en UV, la superficie sufrió cambios, mostrando una resequedad del producto. Si bien no hubo mayor influencia en los ensayos bajo condición seca, si tuvo repercusión después del ensayo en condición húmeda, donde la superficie tenía un aspecto quebradizo y escamoso, por lo que la adherencia del producto se ve afectada luego de la degradación. Este deterioro "post-ensayo" fue aumentando con el paso de la degradación.

Sin duda el caso de degradación más crítico fue el de degradación bajo intemperie, donde sufrió la adherencia de la contaminación ambiental. El producto bajo estudio mostró que, en vez de repeler las partículas contaminantes o dar una característica hidrófoba a éstos mediante el empaquetamiento de estas partículas como los hacen algunas grasas que se usan como paliativos de contaminación, este facilitaba la acumulación de contaminación en la superficie.

En el último ensayo de tensión de contorneo a aisladores de vidrio, previamente se realizó una simulación de mantenimiento a los aisladores contaminados que estuvieron bajo la intemperie con el fin de verificar si existían diferencias significativas después de esta acción al momento de ser ensayados nuevamente. Para el caso en condición seca no hubo mayores variaciones, mientras que en el caso húmedo si las hubo, mostrando una recuperación de su característica hidrófoba y a su vez, o como consecuencia, el aumento de su tensión de contorneo (53 kV para aisladores sin lavar y 62 kV para aisladores lavados).

En el Capítulo 4 se analizaron los resultados de erosión y tracking del ensayo en plano inclinado aplicado a placas poliméricas y vítreas recubiertas con producto nano-dieléctrico y sin este utilizando como guía la norma IEC 60587, cumpliendo con el objetivo propuesto de evaluar la resistencia a la degradación del recubrimiento para ambos tipos de aisladores ante descargas superficiales mediante procedimientos normalizados usando placas de material polimérico y de vidrio.

De los resultados obtenidos en las pruebas realizadas a las placas poliméricas, sólo las placas sin degradar llegaron a ser ensayadas a un nivel de tensión de 3,5 kV, ya que todas las otras placas degradadas no alcanzaron a pasar el nivel de 2,5 kV. Independiente del nivel de tensión aplicado, todas las probetas finalizaron su ensayo cuando su trayectoria de carbonización llegó a los 25 mm desde el electrodo inferior, esto quiere decir, que todas fallaron según el criterio B, en vez de alcanzar 60 mA durante el ensayo según el criterio A.

Finalmente se puede decir, de los resultados del método de plano inclinado, que el producto de recubrimiento, para el caso de placas poliméricas, retarda el avance de tracking y erosión sobre su superficie y la protege, en cierta medida, ante la exposición de radiación UV. Y respecto a los resultados del desempeño del producto sobre la superficie de las placas de vidrio, se puede decir que también mitiga las descargas y protege su superficie ante la acción de éstas, mostrando menor rugosidad y presencia carbonosa respecto a las placas sin recubrir.

Finalmente en el Capítulo 5 se propuso una metodología de aplicación del recubrimiento en los aisladores tanto para la condición de servicio como fuera de él, cumpliendo con el objetivo propuesto.

Para aisladores que estén nuevos, instalados y a punto de operar, se recomienda el uso de la tecnología Airless, utilizando aire comprimido para obtener una película más fina y acabada en la superficie. Se necesita este tipo de tecnología de rociamiento para aisladores que estén en líneas energizadas, mediante el uso de una vara hot stick.

6.2 Recomendaciones

En la esta sección se entregan recomendaciones al lector a partir de la experiencia en el ámbito de trabajo realizado.

Las recomendaciones que se pueden dar respecto a la realización de ensayos de contorneo bajo ambientes contaminados son los siguientes:

- Para el caso de ensayo en condición húmeda se recomienda planificar las pruebas en días donde no haya viento. Esta información se puede obtener mediante sitios web de pronósticos meteorológicos. Esto se advierte con el fin de no tener problemas de desvío del caudal de agua, que sale a presión por la boquilla del rociador, hacia objeto de prueba o aislador para efectos de este estudio. En el mejor de los casos se recomienda realizar el ensayo en un lugar cerrado, a temperatura y caudal de agua controlada.
- En el caso de hacer un estudio de contaminación de aisladores de forma natural, se recomienda dejar estos a una altura similar o igual a la de su funcionamiento. Esto

debido a que las probetas que se dejan cerca del suelo presentan una contaminación excesiva, por lo que no contempla un escenario realista a las condiciones de operación del aislador.

Con respecto a las recomendaciones que se pueden entregar sobre la realización del ensayo de tracking y erosión, se pueden tomar en cuenta las siguientes aseveraciones:

- Un punto a considerar es regular el caudal del contaminante de alguna forma automática (puede ser de manera neumática), ya que al hacerlo manual provoca cambios bruscos de caudal lo que trae como consecuencia aumentos de corriente, y por lo tanto aleatoriedad sobre el ensayo. Pese a que no afecta en los resultados generales, si afecta para el desarrollo mismo del ensayo. Es por esta razón que se recomienda realizar la regulación del caudal mediante un procedimiento automático-neumático que sea preciso y continuo.
- Planificar los días de prueba de tal manera que el ensayo no se interrumpa, ya que también provoca aleatoriedad sobre los resultados.
- Tener la cantidad de probetas que menciona la norma o más unidades, ya que con más probetas ensayadas, se puede obtener una mejor estadística de las probetas bajo estudio. Esto va acompañado de poder construir un pedestal que pueda ensayar todas probetas de una sola vez, dado que de esta manera se ahorra tiempo y se pueden ensayar todas las probetas bajo las mismas condiciones. Si se quieren realizar ensayos de un mismo tipo de probeta, pero bajo distintos escenarios, se puede diseñar una cámara hermética para controlar índices de humedad, temperatura y hasta presión.
- Además, es importante destacar que todos los electrodos y placas que se utilicen en ensayos deber ser nuevos, dado que se ve afectada la medición al usar elementos "reciclados".
- Por lo expuesto anteriormente, se recomienda conseguir recursos con empresas del rubro, con el fin de abaratar los costos de las pruebas y así poder tener estudios más acabados sobre esta materia.

Y a lo que respecta a la aplicación del recubrimiento, se recomienda al fabricante modificar la fórmula del recubrimiento de tal forma que, al ser aplicado, tenga una mayor consistencia para que la capa de revestimiento sea más compacta y no escurra por la superficie. También, para trabajos futuros, poder medir el espesor óptimo de la capa aplicada, mediante el uso de un medidor de película húmeda y un medidor de espesor ultrasónico. Independiente del método de rociamiento que se utilice para recubrir los aisladores energizados, se recomienda tomar todas las medidas de precaución necesarias que puedan ser entregadas por un experto en materia de alta tensión.

A pesar de que actualmente existen normas que abordan los temas expuestos en este trabajo, no se pueden cumplir a cabalidad debido a que las exigencias son muchas y los recursos son limitados. A pesar de este impedimento, se demostró que se pueden obtener resultados satisfactorios a partir de la creación de montajes propios sin la necesidad de altos costos, lo que demuestra que la falta de recursos no es un impedimento para realizar experimentos

propios (orientados por Normas) para sacar conclusiones de estos; solo se necesita un poco de creatividad y ganas de hacer las cosas.

6.3 Trabajo futuro.

A continuación se muestran los posibles trabajos que se pueden desarrollar en un futuro próximo.

Los trabajos futuros que se pueden realizar a aisladores bajo ambientes contaminados pueden ser:

- El estudio del seguimiento de corriente superficial sobre aisladores bajo procedimientos normalizados como lo son los ensayos de niebla salina o capa sólida mencionados en la norma IEC 60507.
- Otro trabajo que se puede realizar, es el mismo estudio ante degradación a la intemperie, pero con la diferencia de mantener la cadena de aisladores energizada; esto con el fin de verificar cómo se desempeña el producto en esta condición, ya que existe la posibilidad de que, al estar energizado, posea una característica de repelencia efectiva de las partículas contaminantes, así como una especie de campo repelente; como también existe la posibilidad de que atraiga aún más las partículas. Si se llegase a concretar esta propuesta de estudio, se debe tener en cuenta que los aisladores deben estar posicionados lo más cercano a su altura de servicio, ya que se ha demostrado en estudios anteriores [17] que los aisladores montados a baja altura han mostrado serios daños producto de la cantidad exagerada de contaminación depositada en su superficie, mientras que los puestos en alturas realistas han presentado poco o ningún deterioro en periodos de pruebas más largos. Sería ideal realizar un seguimiento y registro a tiempo real de la corriente superficial del aislante, junto a la toma de muestras de contaminación a la cual se ve afectada.

Los trabajos futuros que se pueden realizar respecto al ensayo de tracking y erosión son:

- Realizar el ensayo bajo tensión continua y con distinta polaridad, ya que se obtienen resultados diferentes como se ha estudiado en trabajos precedentes [26] .
- Cabe destacar que todos los ensayos realizados de plano inclinado en placas de vidrio al nivel de 3,5 kV terminaron con la rotura del vidrio, sin embargo las placas recubiertas aguantaron más tiempo que las placas sin recubrir. Otro aspecto importante que se observó en los ensayos, fue la rugosidad que presentó la primera placa (sin degradar y sin recubrimiento) al ser ensayada con residuos secos de solución contaminante sobre su superficie; esta situación puede suceder en servicio y se podría evaluar este escenario en futuros trabajos para ver sus efectos en una superficie con recubrimiento.
- Verificar los cambios superficiales a medida que va progresando la degradación bajo microscopio, en especial para el caso bajo degradación UV.

Y respecto a la aplicación del producto para aisladores que ya han estado recubiertos y han estado durante un tiempo en servicio, se pueden volver a recubrir, siempre y cuando su

superficie esté limpia y seca para conseguir una mejor adherencia del producto. El momento indicado para hacer la re-aplicación del producto, es cuando el aislador haya perdido su estado hidrófobo sobre su superficie; dada esta premisa, se puede decir que el producto ha cumplido su vida útil. No se sabe actualmente con exactitud cuándo se da por terminada la vida útil del recubrimiento, ya que no se ha probado en servicio, por lo que se recomienda hacer un estudio futuro donde se haga un seguimiento del comportamiento y desempeño del producto en el campo.

Un trabajo futuro y ambicioso que se puede llevar a cabo, es el diseño de una cámara de envejecimiento acelerado para aisladores o materiales en general, que cuente con un sistema de estrés eléctrico y ambiental. Esta máquina debería ser capaz de poder simular diferentes tipos de ambientes con ayuda de distintos sistemas acoplados (compresor, lámparas UV, regulador de humedad, regulador de contaminación, etc.) y a su vez monitorear las magnitudes de interés tales como: humedad, temperatura, presión, radiación, grado de contaminación, corrientes de fuga, etc. en tiempo real. Además, acoplar una cámara de video que pueda grabar todo el proceso en detalle; así se podría observar de manera dinámica los efectos de estrés externo sobre una probeta. Esta máquina sería de gran utilidad para estudios de vida útil de los materiales.

Referencias

[1] M. San Andrés , R. Chércoles, J. M. De la roja y M. Gómez, «Factores responsables de la degradación química de los polímeros. Efectos provocados por la radiación lumínica sobre algunos materiales utilizados en conservación: primeros resultados.,» pp. 289-293, 2010.

[2] D. Swift, «Chapter 6. Insulators for outdoor applications, section 6.8: Suplements, palliatives and other mitigating measures.,» de *Advances in high voltage engineering*, 2004, pp. 296-299.

[3] J. Looms, de *Insulators for high voltages*, 1988, pp. 14-15.

[4] E.A Cherney, A. El.hag, S. Li, R.S Gorur y L. Meyer, «RTV Silicone Rubber Pre-coated Ceramic Insulators for Transmission Lines,» *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,* vol. Vol. 20, nº No. 1, pp. 237-244, February 2013.

[5] E. CHERNEY, «RTV Silicone- A High Tech Solution for a Dirty Insulators Problems,» *IEEE Electrical Insulation Magazine,* vol. 11, nº 6, pp. 8-14, November/Dicember 1995.

[6] O. A. Moreno Quiróz, Estudio y evaluación de recubrimiento polimérico para aisladores de suspensión, Sartenejas, 2008.

[7] J. L. Dinamarca, «Fundamentos teórios de la ruptura dieléctrica,» de *Técnicas de Alta Tensión. Teoría y Aplicaciones*, Valparaíso, Chile, p. 24.

[8] J. Looms, «Cap 11: Physics of Pollution Flashover, Section 11.2.1: Electrolytic Layers under Electrical Stress,» de *Insulators for High Volatages*, 1988, p. 137.

[9] F. L. U. Gonzalez-Longatt, *Capítulo 1: Elementos de Líneas de Transmisión Aéreas,* 2016.

[10] N. I. 60815, *Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in pollutes condition,* 2008.

[11] CIGRE Taskforce 33.04.01, «Polluted insulators: Areview of Current Knowledge,» *CIGRE brochure N° 158-2000.*

[12] «http://dgiip.usm.cl/direccion-centros-e-institutos-investigacion-e-innovacion/ac3e/,» [En línea].

[13] *Hidrophobicity Classification Guide. Guide 1, 92/1.*

[14] J. Looms, «Remedies for Flashover,» de *Insulators for high voltages*, 1988, pp. 195-230.

[15] D. Swift, «Insulators for outdoor applications. Section 6.6: Electrical characteristics,» de *Advances in high voltage engineering*, 2004, p. 280.

[16] «Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions –Part 1: Definitions, information and general principles,» *IEC/TS 60815-1*, vol. 1, p. 13, 2008-10.

[17] J. Looms, « Cap 13: Conclusion from Pollution Tests on Insulators, Section 13.2.1.2: Deterioration of Glass,» de *Insulators for High Voltages*, 1998, pp. 189-190.

[18] ASTM, International, *D2303*, 2013.

[19] McGoman E, Mathes K, «Surface electrical failure in the presence of contaminants: the inclined-plane liquid-contaminant test,» *Trans. Am. Electr. Eng., Part I (Commun. Electron)*, vol. 80, pp. 281-289, July 1961.

[20] R. A. Ghunem, «Usign the Inclined-Plane Test to Evaluate the Resistance of Outdoor Plymer Insulating Materials to Electrical Tracking and Erosion,» *IEEE Electrical Insulation Magazine*, pp. 16-22, 2015.

[21] I. 60587, Electrical insulating materials used under severe ambient conditions- Test methods for evaluating resistance to tracking and erosion, 2007.

[22] *Standard Test Method for Liquid-Contaminant, Inclined-Plane Tracking and Erosion of insulating Materials, ASTM D2303-13*, 2013.

[23] A. Mohammad, A. Mohammad y A. Salma, «HYDROPHOBICITY OF SILICONE RUBBER USED FOR OUTDOOR INSULATION (AN OVERVIEW),» *REVIEWS ON ADVANCED MATERIALS SCIENCE*, vol. 16, pp. 10-26, 2007.

[24] A. Krivda, L. E. Schmidt, X. Kornmann, H. Ghorbani y A. Ghorbanda, «Inclined-Plane Tracking and Erosion Test According to the IEC 60587 Standard,» *IEEE ELectrical Insulation Magazine*, pp. 14-22, 2009.

[25] «https://www.airless-discounter.de/Que-es-airless-y-como-funciona,» [En línea].

[26] E. Cherney, I. Ramirez, R. Gorur, A. Krivda, R. Ghunem y M. Marzinotto, «DC Inclined-Plane Tracking and Erosion Test of Insulating Materials,» *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 22, nº 1, pp. 211-217, 2015.

Anexo 1. Tablas de mediciones de ensayo de contorneo en aisladores de vidrio

Los valores de tensión de contorneo expuestos en las siguientes tablas son los obtenidos a partir de la medición en la cabina, donde luego este valor se modifica mediante el uso de la ecuación de la recta:

$V = 2{,}0964 * V_{cabina} - 0{,}7302\ [kV]$

Donde:

$V_{cabina}: Medición\ en\ cabina\ [kV]$

$V: Medición\ [kV]$

Finalmente los valores de tensión de contorneo medidos son corregidos (normalizados) a 25°C, 1013 mbar (760mm Hg) y 65% de humedad relativa HR, según la norma ANSI C29.1 según:

Para todos los ensayos: $V_s = V \cdot \frac{K_h}{K_d} = V \cdot K$

Donde:

$V_s =$ Tensión normalizada o corregida

$V =$ Tensión medida en el ensayo

$K_h =$ Factor de corrección por humedad

$K_d =$ Factor de corrección por densidad del aire

$K =$ Factor de normalización.

A continuación se exponen los resultados obtenidos.

1. Ensayo preliminar antes de degradación bajo techo

Ensayo en seco con producto sin degradar					
	Medición cabina		Medición		Normalizado
n	Probeta N° 1	Probeta N°2	Probeta N° 1	Probeta N°2	
1	40	40	83,1258	83,1258	
2	40	40	83,1258	83,1258	
3	40	40	83,1258	83,1258	
4	40	40	83,1258	83,1258	
5	42	40	87,3186	83,1258	
6	40	40	83,1258	83,1258	
7	42	42	87,3186	87,3186	
8	42	42	87,3186	87,3186	

9	40	40	83,1258	83,1258	
10	42	40	87,3186	83,1258	
		Promedio=	84,80292	83,96436	84,38364
				valor corregido=	89,5289839

condiciones ambientales		Pv [inchHg]=	0,3480315
T[°C]=	21	Kh=	1,073
P[mm Hg]=	758,5	Kd=	1,01133333
H[%]=	65	Kh/Kd=	1,06097561

Ensayo en seco sin producto					
	Medición Cabina		Medición		Normalizado
n	Probeta N° 1	Probeta N°2	Probeta N° 1	Probeta N°2	
1	42	42	87,3186	87,3186	
2	40	42	83,1258	87,3186	
3	42	44	87,3186	91,5114	
4	42	44	87,3186	91,5114	
5	42	44	87,3186	91,5114	
6	40	44	83,1258	91,5114	
7	40	44	83,1258	91,5114	
8	42	46	87,3186	95,7042	
9	42	44	87,3186	91,5114	
10	40	44	83,1258	91,5114	
		Promedio=	85,64148	91,09212	88,3668
				valor corregido=	90,89150627

condiciones ambientales		Pv [inchHg]=	0,46675197
T[°C]=	20,5	Kh=	1,042
P[mm Hg]=	758,5	Kd=	1,01305622
H[%]=	65,5	Kh/Kd=	1,02857076

Ensayo húmedo con producto					
	Medición Cabina		Medición		Normalizado
n	Probeta N° 1	Probeta N°2	Probeta N° 1	Probeta N°2	
1	34	36	70,5474	74,7402	
2	36	36	74,7402	74,7402	
3	38	36	78,933	74,7402	
4	34	36	70,5474	74,7402	
5	36	36	74,7402	74,7402	
6	36	36	74,7402	74,7402	

7	36	38	74,7402	78,933	
8	36	38	74,7402	78,933	
9	36	36	74,7402	74,7402	
10	36	36	74,7402	74,7402	
		Promedio=	74,32092	75,57876	74,94984
				valor corregido=	74,23596478

condiciones ambientales		Pv [inchHg]=	0,50019685
T[°C]=	21,5	Kh=	1
P[mm Hg]=	758,5	Kd=	1,0096163
H[%]=	66	Kh/Kd=	0,99047529

Ensayo húmedo sin producto					
	Medición Cabina		Medición		Normalizado
n	Probeta N° 1	Probeta N°2	Probeta N° 1	Probeta N°2	
1	38	34	78,933	70,5474	
2	36	32	74,7402	66,3546	
3	34	32	70,5474	66,3546	
4	32	32	66,3546	66,3546	
5	34	34	70,5474	70,5474	
6	32	36	66,3546	74,7402	
7	34	36	70,5474	74,7402	
8	36	34	74,7402	70,5474	
9	34	34	70,5474	70,5474	
10	34	32	70,5474	66,3546	
		Promedio=	71,38596	69,70884	70,5474
				valor corregido=	69,75682268

condiciones ambientales		Pv [inchHg]=	0,48958661
T[°C]=	21	Kh=	1
P[mm Hg]=	758,5	Kd=	1,01133333
H[%]=	66,5	Kh/Kd=	0,98879367

Ensayo luego de 3 meses de estar bajo techo.

Ensayo en seco con producto					
	Medición cabina		Medición		Normalizado
n	Probeta N°1	Probeta N°2	Probeta N°1	Probeta N°2	
1	37,6	36,2	78,09444	75,15948	
2	37,2	37,4	77,25588	77,67516	

3	37	36,3	76,8366	75,36912	
4	38,3	36,9	79,56192	76,62696	
5	37,6	36,3	78,09444	75,36912	
6	37,3	37,4	77,46552	77,67516	
7	38,4	37,6	79,77156	78,09444	
8	37,7	37,1	78,30408	77,04624	
9	37,6	37,8	78,09444	78,51372	
10	38,2	37,6	79,35228	78,09444	
		Promedio=	78,283116	76,962384	77,62275
			81,74677543	79,10892818	80,4278518
				valor corregido=	80,4278518

condiciones ambientales 1		Pv [inchHg]=	0,35606299
T[°C]=	16	Kh=	1,082
P[mm Hg]=	763,9	Kd=	1,03615502
H[%]=	66,5	Kh/Kd=	1,04424529
condiciones ambientales 2		Pv [inchHg]=	0,38917323
T[°C]=	17,5	Kh=	1,059
P[mm Hg]=	763,5	Kd=	1,03026506
H[%]=	65,9	Kh/Kd=	1,02789082

Ensayo húmedo con producto					
	Medición cabina		Medición		Normalizado
n	Probeta N°1	Probeta N°2	Probeta N°1	Probeta N°2	
1	28,5	31,5	59,0172	65,3064	
2	27,7	31,8	57,34008	65,93532	
3	27,9	28,2	57,75936	58,38828	
4	30,3	27,3	62,79072	56,50152	
5	29,9	29,7	61,95216	61,53288	
6	29,6	28,5	61,32324	59,0172	
7	32,3	30,3	66,98352	62,79072	
8	29,8	27,5	61,74252	56,9208	
9	28,6	31,3	59,22684	64,88712	
10	30	29,4	62,1618	60,90396	
		Promedio=	61,029744	61,21842	61,124082
			58,4341247	59,42006806	58,9270964
				valor corregido=	58,9270964

condiciones ambientales 1		Pv [inchHg]=	0,30822047
T[°C]=	13	Kh=	1
P[mm Hg]=	762	Kd=	1,04441958
H[%]=	69,9	Kh/Kd=	0,9574696
condiciones ambientales 2		Pv [inchHg]=	0,38917323
T[°C]=	17,5	Kh=	1
P[mm Hg]=	763,5	Kd=	1,03026506
H[%]=	65,9	Kh/Kd=	0,97062401

2. Ensayos después de degradación a la intemperie

Primer periodo de degradación.

ensayo en seco con producto					
n	Probeta N°1	Probeta N°2	Probeta N°1	Probeta N°2	
1	38	42	78,933	87,3186	
2	35	40	72,6438	83,1258	
3	38	40	78,933	83,1258	
4	37	40	76,8366	83,1258	
5	38	39	78,933	81,0294	
6	38	39	78,933	81,0294	
7	38	37	78,933	76,8366	
8	38	37,5	78,933	77,8848	
9	38	38	78,933	78,933	
10	37	38	76,8366	78,933	
		Promedio=	77,8848	81,13422	79,50951
				Valor corregido=	82,7243142

condiciones ambientales		Pv [inchHg]=	0,38566929
T[°C]=	14,5	Kh=	1,078
P[mm Hg]=	759,9	Kd=	1,03610713
H[%]=	79	Kh/Kd=	1,04043295

	Ensayo húmedo con producto				
	Medición Cabina		Medición		Normalizado
n	Probeta N°1	Probeta N°2	Probeta N°1	Probeta N°2	
1	26	26,5	53,7762	54,8244	
2	24	26	49,5834	53,7762	
3	25,6	24,5	52,93764	50,6316	

4	25	24,5	51,6798	50,6316	
5	26	25	53,7762	51,6798	
6	26	25,3	53,7762	52,30872	
7	25,6	25,5	52,93764	52,728	
8	25,6	25,6	52,93764	52,93764	
9	25,7	25,9	53,14728	53,56656	
10	25,9	25,8	53,56656	53,35692	
		Promedio=	52,811856	52,644144	52,728
				Valor corregido=	50,9612946

condiciones ambientales		Pv [inchHg]=	0,39006299
T[°C]=	14,9	Kh=	1
P[mm Hg]=	759,9	Kd=	1,03466759
H[%]=	79,9	Kh/Kd=	0,96649398

Segundo periodo de degradación.

ensayo en seco con producto					
	Medición cabina		Medición		Normalizado
n	Probeta N°1	Probeta N°2	Probeta N°1	Probeta N°2	
1	38	39,6	78,933	82,28724	
2	39	40	81,0294	83,1258	
3	39,8	38	82,70652	78,933	
4	40,7	37,2	84,59328	77,25588	
5	38,6	36,9	80,19084	76,62696	
6	38,4	35,1	79,77156	72,85344	
7	38	35,7	78,933	74,11128	
8	37,1	36,8	77,04624	76,41732	
9	39	37	81,0294	76,8366	
10	38,2	36,1	79,35228	74,94984	
		Promedio=	80,358552	77,339736	78,849144
				Valor corregido=	81,4068713

condiciones ambientales		Pv [inchHg]=	0,36787402
T[°C]=	15	Kh=	1,068
P[mm Hg]=	760	Kd=	1,03444444
H[%]=	73	Kh/Kd=	1,03243824

Ensayo en seco sin producto					
	Medición cabina		Medición		Normalizado
n	Probeta N°1	Probeta N°2	Probeta N°1	Probeta N°2	
1	36,8	32,8	76,41732	68,03172	
2	34,2	32,1	70,96668	66,56424	
3	33,7	32,8	69,91848	68,03172	
4	34,3	33,9	71,17632	70,33776	
5	34,1	32,7	70,75704	67,82208	
6	33,4	32	69,28956	66,3546	
7	34,3	33,1	71,17632	68,66064	
8	33,3	33	69,07992	68,451	
9	34,4	33,8	71,38596	70,12812	
10	35,7	32,6	74,11128	67,61244	
		Promedio=	71,427888	68,199432	69,81366
				Valor corregido=	72,0782922

condiciones ambientales		Pv [inchHg]=	0,36787402
T[°C]=	15	Kh=	1,068
P[mm Hg]=	760	Kd=	1,03444444
H[%]=	73	Kh/Kd=	1,03243824

Ensayo húmedo con producto					
	Medición cabina		Medición		Normalizado
n	Probeta N°1	Probeta N°2	Probeta N°1	Probeta N°2	
1	19	26,2	39,1014	54,19548	
2	24	23,9	49,5834	49,37376	
3	24,1	23,6	49,79304	48,74484	
4	23,6	24,3	48,74484	50,21232	
5	23,7	23,7	48,95448	48,95448	
6	24	23,6	49,5834	48,74484	
7	22,4	24,4	46,22916	50,42196	
8	23,9	24,2	49,37376	50,00268	
9	24,2	25,4	50,00268	52,51836	
10	24	25,2	49,5834	52,09908	
		Promedio=	48,094956	50,52678	49,310868
				Valor corregido=	47,7220078

condiciones ambientales		Pv [inchHg]=	0,37417323
T[°C]=	15,7	Kh=	1
P[mm Hg]=	761	Kd=	1,03329408
H[%]=	72	Kh/Kd=	0,9677787

Tercer periodo de degradación.

Ensayo en seco sin producto					
	Medición cabina		Medición		Normalizado
n	Probeta N°1	Probeta N°2	Probeta N°1	Probeta N°2	
1	40,3	44,5	83,75472	92,5596	
2	39,7	41,5	82,49688	86,2704	
3	39,6	41,8	82,28724	86,89932	
4	40,3	43,2	83,75472	89,83428	
5	39,2	41,6	81,44868	86,48004	
6	40,4	41,1	83,96436	85,43184	
7	37,8	41,2	78,51372	85,64148	
8	41,4	41,8	86,06076	86,89932	
9	40,1	40,7	83,33544	84,59328	
10	38,9	40,2	80,81976	83,54508	
		Promedio=	82,643628	86,815464	84,729546
			85,0912636	89,2592371	87,1752503
			Valor corregido=	87,1752503	

condiciones ambientales 1		Pv [inchHg]=	0,37061024
T[°C]=	16,5	Kh=	1,065
P[mm Hg]=	763,9	Kd=	1,03436546
H[%]=	67	Kh/Kd=	1,02961675
condiciones ambientales 2		Pv [inchHg]=	0,39665354
T[°C]=	18	Kh=	1,058
P[mm Hg]=	763,9	Kd=	1,02903368
H[%]=	65	Kh/Kd=	1,02814905

Ensayo en seco con producto					
	Medición cabina		Medición		Normalizado
n	Probeta N°1	Probeta N°2	Probeta N°1	Probeta N°2	
1	37,5	36,9	77,8848	76,62696	
2	37,6	36,1	78,09444	74,94984	
3	38	36,2	78,933	75,15948	
4	38,1	35,7	79,14264	74,11128	
5	37,3	35,7	77,46552	74,11128	
6	37,3	36,6	77,46552	75,99804	
7	37	36,3	76,8366	75,36912	
8	38,3	36,4	79,56192	75,57876	
9	37,1	36,2	77,04624	75,15948	
10	37,5	36,8	77,8848	76,41732	
		Promedio=	78,031548	75,348156	76,689852
			80,34258878	77,6203677	78,9814782
			Valor corregido=	78,9814782	

condiciones ambientales 1		Pv [inchHg]=	0,37061024
T[°C]=	16,5	Kh=	1,065
P[mm Hg]=	763,9	Kd=	1,03436546
H[%]=	67	Kh/Kd=	1,02961675
condiciones ambientales 2		Pv [inchHg]=	0,36784449
T[°C]=	16,5	Kh=	1,065
P[mm Hg]=	763,5	Kd=	1,03382383
H[%]=	66,5	Kh/Kd=	1,03015617

Ensayo húmedo con producto					
	Medición cabina		Medición		Normalizado
n	Probeta N°1	Probeta N°2	Probeta N°1	Probeta N°2	
1	28,1	27,5	58,17864	56,9208	
2	26,6	26,9	55,03404	55,66296	
3	26,5	26	54,8244	53,7762	
4	27	26,6	55,8726	55,03404	
5	26,6	26,6	55,03404	55,03404	
6	26,7	25,8	55,24368	53,35692	
7	26,3	27,1	54,40512	56,08224	
8	26,4	28,3	54,61476	58,59792	
9	25,2	26,7	52,09908	55,24368	
10	25,2	26,8	52,09908	55,45332	
		Promedio=	54,740544	55,516212	55,128378

			52,38952946	53,1318838	52,7607066
			valor corregido=	52,7607066	

condiciones ambientales 1		Pv [inchHg]=	
T[°C]=	12,5	Kh=	1
P[mm Hg]=	761	Kd=	1,04487566
H[%]=	77	Kh/Kd=	0,95705168
condiciones ambientales 2		Pv [inchHg]=	
T[°C]=	12,5	Kh=	1
P[mm Hg]=	761	Kd=	1,04487566
H[%]=	77	Kh/Kd=	0,95705168

Ensayos de aisladores previamente degradados en UV

Ensayo luego de degradación en cámara UV.

Ensayo en seco con producto					
	Medición cabina		Medición		Normalizado
n	Probeta N°1	Probeta N°2	Probeta N°1	Probeta N°2	
1	38,8	37,8	80,61012	78,51372	
2	38,4	38,5	79,77156	79,9812	
3	37,4	37,6	77,67516	78,09444	
4	38,1	39,1	79,14264	81,23904	
5	38,6	38,8	80,19084	80,61012	
6	37,9	38,5	78,72336	79,9812	
7	36,9	38,4	76,62696	79,77156	
8	38,7	38	80,40048	78,933	
9	37,4	38	77,67516	78,933	
10	38,5	38,2	79,9812	79,35228	
		promedio=	79,079748	79,540956	79,310352
				valor corregido=	82,4408835

condiciones ambientales		Pv [inchHg]=	0,37937008
T[°C]=	15,5	Kh=	1,072
P[mm Hg]=	759	Kd=	1,03129289
H[%]=	73	Kh/Kd=	1,03947192

Ensayo húmedo con producto					
	Medición cabina		Medición		Normalizado
n	Probeta N°1	Probeta N°2	Probeta N°1	Probeta N°2	
1	27,6	28,7	57,13044	59,43648	
2	28	29,4	57,969	60,90396	
3	30	28,6	62,1618	59,22684	
4	29,6	30,2	61,32324	62,58108	
5	29,9	28,6	61,95216	59,22684	
6	30	28,7	62,1618	59,43648	
7	29,6	28,4	61,32324	58,80756	
8	30,1	30,3	62,37144	62,79072	
9	30,4	29,6	63,00036	61,32324	
10	31,6	29,5	65,51604	61,1136	
		promedio=	61,490952	60,48468	60,987816
				valor corregido=	59,2884853

condiciones ambientales		Pv [inchHg]=	0,41673228
T[°C]=	17	Kh=	1
P[mm Hg]=	761	Kd=	1,02866207
H[%]=	73	Kh/Kd=	0,97213656

Ensayo luego de segundo periodo de degradación

Ensayo en seco					
	Medición cabina		Medición		Normalizado
n	Probeta N°1	Probeta N°2	Probeta N°1	Probeta N°2	
1	37,3	38,4	77,46552	79,77156	
2	36,8	38,3	76,41732	79,56192	
3	36,3	36,9	75,36912	76,62696	
4	37,3	37,9	77,46552	78,72336	
5	36,2	37,5	75,15948	77,8848	
6	36,8	38,2	76,41732	79,35228	
7	36,3	36,8	75,36912	76,41732	
8	36,6	37,3	75,99804	77,46552	
9	36,9	37,5	76,62696	77,8848	
10	37,3	38,1	77,46552	79,14264	
		promedio=	76,375392	78,283116	77,329254
			78,81446821	80,7831161	79,7987921
			valor corregido=	79,7987921	

condiciones ambientales 1	Pv [inchHg]=	0,38248031

T[°C]=	17	Kh=	1,065
P[mm Hg]=	763,5	Kd=	1,03204138
H[%]=	67	Kh/Kd=	1,03193537
condiciones ambientales 2		Pv [inchHg]=	0,38248031
T[°C]=	17	Kh=	1,065
P[mm Hg]=	763,5	Kd=	1,03204138
H[%]=	67	Kh/Kd=	1,03193537

Ensayo húmedo					
	Medición cabina		Medición		Normalizado
n	Probeta N°1	Probeta N°2	Probeta N°1	Probeta N°2	
1	28,5	29,8	59,0172	61,74252	
2	30,2	28,2	62,58108	58,38828	
3	27,3	28,9	56,50152	59,85576	
4	28,2	30,1	58,38828	62,37144	
5	26,6	27,7	55,03404	57,34008	
6	27,3	28,2	56,50152	58,38828	
7	26,9	26,8	55,66296	55,45332	
8	26,7	29,2	55,24368	60,48468	
9	27,2	28,4	56,29188	58,80756	
10	27,2	30,5	56,29188	63,21	
		promedio=	57,151404	59,604192	58,377798
			54,5795395	56,9843505	55,781945
			valor corregido=	55,781945	

condiciones ambientales 1		Pv [inchHg]=	
T[°C]=	12	Kh=	1
P[mm Hg]=	761,3	Kd=	1,0471214
H[%]=	75,5	Kh/Kd=	0,9549991
condiciones ambientales 2		Pv [inchHg]=	
T[°C]=	12,2	Kh=	1
P[mm Hg]=	761	Kd=	1,04597475
H[%]=	74,9	Kh/Kd=	0,95604602

Ensayo luego de tercer periodo de degradación.

Ensayo en seco					
	Medición cabina		Medición		Normalizado
n	Probeta N°1	Probeta N°2	Probeta N°1	Probeta N°2	
1	37,3	36	77,46552	74,7402	
2	35,3	36,2	73,27272	75,15948	
3	36,7	36	76,20768	74,7402	
4	37,9	36,8	78,72336	76,41732	
5	38,5	36,9	79,9812	76,62696	
6	36,7	36,1	76,20768	74,94984	
7	35,1	36,2	72,85344	75,15948	
8	36,7	37	76,20768	76,8366	
9	36,3	35,5	75,36912	73,692	
10	36,4	36,1	75,57876	74,94984	
		promedio=	76,186716	75,327192	75,756954
			79,29944259	78,4048014	78,852122
			valor corregido=	78,852122	

condiciones ambientales 1		Pv [inchHg]=	0,3319685
T[°C]=	14,5	Kh=	1,08
P[mm Hg]=	761	Kd=	1,03760696
H[%]=	68	Kh/Kd=	1,04085655
condiciones ambientales 2		Pv [inchHg]=	0,3319685
T[°C]=	14,5	Kh=	1,08
P[mm Hg]=	761	Kd=	1,03760696
H[%]=	68	Kh/Kd=	1,04085655

Ensayo en húmedo					
	Medición cabina		Medición		Normalizado
n	Probeta N°1	Probeta N°2	Probeta N°1	Probeta N°2	
1	26	28	53,7762	57,969	
2	28	28,6	57,969	59,22684	
3	25,2	29,3	52,09908	60,69432	
4	26,7	29,7	55,24368	61,53288	
5	27,9	29,2	57,75936	60,48468	
6	27,1	27,4	56,08224	56,71116	
7	28	28,2	57,969	58,38828	
8	27	29,2	55,8726	60,48468	

9	26,8	30,2	55,45332	62,58108	
10	27,2	29,9	56,29188	61,95216	
		promedio=	55,851636	60,002508	57,927072
			53,9919145	58,0045727	55,9982436
			valor corregido=	55,9982436	

condiciones ambientales 1		Pv [inchHg]=	
T[°C]=	15	Kh=	1
P[mm Hg]=	760	Kd=	1,03444444
H[%]=	70	Kh/Kd=	0,96670247
condiciones ambientales 2		Pv [inchHg]=	
T[°C]=	15	Kh=	1
P[mm Hg]=	760	Kd=	1,03444444
H[%]=	72	Kh/Kd=	0,96670247

Ensayo después de lavar aisladores

Medición a aisladores previamente ensayados en seco y luego lavados para ser nuevamente ensayados en seco.

Bajo techo					
	Medición cabina		Medición		Normalizado
n	Probeta N°1	Probeta N°2	Probeta N°1	Probeta N°2	
1	40,1	39,9	83,33544	82,91616	
2	39,8	41,5	82,70652	86,2704	
3	39,7	39,7	82,49688	82,49688	
4	39,1	40,5	81,23904	84,174	
5	38,9	39,4	80,81976	81,86796	
6	40,8	38,6	84,80292	80,19084	
7	39,3	39,4	81,65832	81,86796	
8	39,5	40,7	82,0776	84,59328	
9	40,1	38,8	83,33544	80,61012	
10	40,3	40,5	83,75472	84,174	
		promedio=	82,622664	82,91616	82,769412
			86,0503021	86,1424762	86,0963892
				valor corregido=	86,0963892

condiciones ambientales 1		Pv [inchHg]=	0,27889764
T[°C]=	10	Kh=	1,1
P[mm Hg]=	762,5	Kd=	1,05618375

H[%]=	77	Kh/Kd=	1,04148545
condiciones ambientales 2		Pv [inchHg]=	0,28614173
T[°C]=	10	Kh=	1,098
P[mm Hg]=	763	Kd=	1,05687633
H[%]=	79	Kh/Kd=	1,03891058

Degradados 1 mes					
	Medición cabina		Medición		Normalizado
n	Probeta N°1	Probeta N°2	Probeta N°1	Probeta N°2	
1	37,9	37,9	78,72336	78,72336	
2	37,6	39,4	78,09444	81,86796	
3	38,1	37,7	79,14264	78,30408	
4	38,6	38,5	80,19084	79,9812	
5	37,7	38	78,30408	78,933	
6	37,5	37,4	77,8848	77,67516	
7	40	37,6	83,1258	78,09444	
8	38,5	37,6	79,9812	78,09444	
9	37,4	37,6	77,67516	78,09444	
10	38,2	38	79,35228	78,933	
		promedio=	79,24746	78,870108	79,058784
			81,7847082	81,34198456	81,5633464
				valor corregido=	81,5633464

condiciones ambientales 1		Pv [inchHg]=	0,29338583
T[°C]=	10	Kh=	1,091
P[mm Hg]=	763,2	Kd=	1,05715336
H[%]=	81	Kh/Kd=	1,03201678
condiciones ambientales 2		Pv [inchHg]=	0,30062992
T[°C]=	10	Kh=	1,09
P[mm Hg]=	763	Kd=	1,05687633
H[%]=	83	Kh/Kd=	1,03134111

Degradación 2 meses					
	Medición cabina		Medición		Normalizado
n	Probeta N°1	Probeta N°2	Probeta N°1	Probeta N°2	
1	38	37,1	78,933	77,04624	
2	36,4	37	75,57876	76,8366	
3	37	37	76,8366	76,8366	
4	36,6	37,3	75,99804	77,46552	
5	38,1	37,1	79,14264	77,04624	
6	38,4	37,8	79,77156	78,51372	
7	38,5	37,2	79,9812	77,25588	
8	37,5	36,9	77,8848	76,62696	
9	38	37,4	78,933	77,67516	
10	37	37,7	76,8366	78,30408	
		promedio=	77,98962	77,3607	77,67516
			80,4339011	79,68083906	80,0573701
				valor corregido=	80,0573701

condiciones ambientales 1		Pv [inchHg]=	0,30062992
T[°C]=	10	Kh=	1,09
P[mm Hg]=	763	Kd=	1,05687633
H[%]=	83	Kh/Kd=	1,03134111
condiciones ambientales 2		Pv [inchHg]=	0,30425197
T[°C]=	10	Kh=	1,09
P[mm Hg]=	764	Kd=	1,05826148
H[%]=	84	Kh/Kd=	1,02999118

Degradado 3 meses					
	Medición cabina		Medición		Normalizado
n	Probeta N°1	Probeta N°2	Probeta N°1	Probeta N°2	
1		36,3		75,36912	
2		38,2		79,35228	
3		37,3		77,46552	
4		36,9		76,62696	
5		36,7		76,20768	
6		37		76,8366	
7		36,8		76,41732	
8		36,3		75,36912	
9		36,1		74,94984	
10		36,1		74,94984	
			promedio=	76,354428	76,354428

				78,57223696	78,572237
				valor corregido=	78,572237

condiciones ambientales 1		Pv [inchHg]=	0,30606299
T[°C]=	10	Kh=	1,089
P[mm Hg]=	764	Kd=	1,05826148
H[%]=	84,5	Kh/Kd=	1,02904624

Tercera medición de aisladores previamente ensayados en condición húmeda para luego ser ensayados en condición húmeda

Bajo techo					
	Medición cabina		Medición		Normalizado
n	Probeta N°1	Probeta N°2	Probeta N°1	Probeta N°2	
1	31,5	31,7	65,3064	65,72568	
2	32,8	31,3	68,03172	64,88712	
3	32,4	31,3	67,19316	64,88712	
4	35,2	32,4	73,06308	67,19316	
5	36,3	34,1	75,36912	70,75704	
6	36	34,3	74,7402	71,17632	
7	37,4	34,8	77,67516	72,22452	
8	37,9	35,8	78,72336	74,32092	
9	36,3	33,4	75,36912	69,28956	
10	39,1	37,5	81,23904	77,8848	
		promedio=	73,671036	69,834624	71,75283
			70,3531237	66,68949161	68,5213076
				valor corregido=	68,5213076

condiciones ambientales 1		Pv [inchHg]=	
T[°C]=	13	Kh=	1
P[mm Hg]=	764	Kd=	1,04716084
H[%]=	72	Kh/Kd=	0,95496314
condiciones ambientales 2		Pv [inchHg]=	
T[°C]=	13	Kh=	1
P[mm Hg]=	764	Kd=	1,04716084
H[%]=	72	Kh/Kd=	0,95496314

Degradado 1 mes					
	Medición cabina		Medición		Normalizado
n	Probeta N°1	Probeta N°2	Probeta N°1	Probeta N°2	
1	28,8	29,3	59,64612	60,69432	
2	28,6	30,6	59,22684	63,41964	
3	29,3	30,5	60,69432	63,21	
4	27,9	28,9	57,75936	59,85576	
5	29,3	30,6	60,69432	63,41964	
6	28,8	31,8	59,64612	65,93532	
7	28,5	31,7	59,0172	65,72568	
8	29,3	32,5	60,69432	67,4028	
9	29,1	32,4	60,27504	67,19316	
10	29,3	33	60,69432	68,451	
		promedio=	59,834796	64,530732	62,182764
			57,1400245	61,62447027	59,3822474
				valor corregido=	59,3822474

condiciones ambientales 1		Pv [inchHg]=	
T[°C]=	13	Kh=	1
P[mm Hg]=	764	Kd=	1,04716084
H[%]=	65	Kh/Kd=	0,95496314
condiciones ambientales 2		Pv [inchHg]=	
T[°C]=	13	Kh=	1
P[mm Hg]=	764	Kd=	1,04716084
H[%]=	69	Kh/Kd=	0,95496314

Degradación 2 meses					
	Medición cabina		Medición		Normalizado
n	Probeta N°1	Probeta N°2	Probeta N°1	Probeta N°2	
1	30,3	27,5	62,79072	56,9208	
2	28,9	26,6	59,85576	55,03404	
3	29,9	26	61,95216	53,7762	
4	29,1	29,1	60,27504	60,27504	
5	29,2	29,2	60,48468	60,48468	
6	30,2	30,2	62,58108	62,58108	
7	30,8	30,8	63,83892	63,83892	
8	28,6	28,6	59,22684	59,22684	
9	31	31	64,2582	64,2582	
10	31,3	31,3	64,88712	64,88712	

		promedio=	62,015052	60,128292	61,071672
			59,2220886	57,42030236	58,3211955
				valor corregido=	58,3211955

condiciones ambientales 1		Pv [inchHg]=	
T[°C]=	13	Kh=	1
P[mm Hg]=	764	Kd=	1,04716084
H[%]=	64	Kh/Kd=	0,95496314
condiciones ambientales 2		Pv [inchHg]=	
T[°C]=	13	Kh=	1
P[mm Hg]=	764	Kd=	1,04716084
H[%]=	65	Kh/Kd=	0,95496314

Degradado 3 meses					
	Medición cabina		Medición		Normalizado
n	Probeta N°1	Probeta N°2	Probeta N°1	Probeta N°2	
1	28,9	28,3	59,85576	58,59792	
2	28,8	28,5	59,64612	59,0172	
3	32,7	27,4	67,82208	56,71116	
4	32,2	28,5	66,77388	59,0172	
5	32,7	28,6	67,82208	59,22684	
6	33,4	28,6	69,28956	59,22684	
7	32,5	30,2	67,4028	62,58108	
8	35,7	30,2	74,11128	62,58108	
9	35,3	31,1	73,27272	64,46784	
10	36,1	31,6	74,94984	65,51604	
		promedio=	68,094612	60,69432	64,394466
			65,2808482	57,96083823	61,6208432
				valor corregido=	61,6208432

condiciones ambientales 1		Pv [inchHg]=	
T[°C]=	14	Kh=	1
P[mm Hg]=	763,7	Kd=	1,04310244
H[%]=	64,5	Kh/Kd=	0,95867861
condiciones ambientales 2		Pv [inchHg]=	
T[°C]=	13	Kh=	1
P[mm Hg]=	764	Kd=	1,04716084
H[%]=	64,5	Kh/Kd=	0,95496314

Anexo 2. Resultados de Laboratorio de Química UTFSM.

UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE QUIMICA

LabQI
Laboratorio de Análisis
Químico e Instrumental

INFORME DE ANÁLISIS
N° QUI-160-17

Fecha emisión:
27.09.2017

Información del cliente	
Nombre de la empresa	
Solicitante	Felipe Hernández.
Dirección	Departamento de Electricidad. Universidad Técnica Federico Santa María

Información del análisis y muestra		
Análisis solicitado	Conductividad, Sólidos Insolubles.	
Tipo de muestra	Solución acuosa proveniente de lavado de elementos aislantes.	
Identificación de Muestra	Solución acuosa	CI 447
Fecha de recepción	20 de septiembre de 2017	
Método utilizado	Conductividad: Medición directa con conductivímetro WTW Multi 350i Sólidos Insolubles: Filtración y Determinación gravimétrica.	
Responsable muestreo	Felipe Hernández	

RESULTADOS:

		Resultados		
Análisis	Unidades	Blanco	Solución con algodón	Solución de limpieza del algodón
1.- Conductividad	[µS/cm]	9,3	158,9	39,9
2.- Temperatura de medición	[°C]	23,6	20,4	26
3.- Volumen usado para limpiar el algodón	[mL]	90	-	90
4.- Sólidos Insolubles	[mg]	0,1	138	41

Observaciones:

La medición de conductividad del agua, usada para la limpieza de los aisladores, es 0,9 [µS/cm] a 19,7 [°C].

Se utilizaron unidades de [µS/cm] para expresar conductividad y [mg] para masa, debido al rango de las mediciones. La fórmulas de la Norma DD IEC/TS 60815-1:2008 indican [S/m] para conductividad y [g] para masa.

Fin del documento

LABORATORIO DE ANÁLISIS QUÍMICO E INSTRUMENTAL
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA UTFSM
VALPARAÍSO

Verónica Saavedra
Químico analista

María Elena Ortiz
Jefe de Laboratorio

Av. España 1680, Valparaíso
www.labqi.cl
servicios.analiticos@usm.cl
32 2 654219

Los resultados entregados en este Informe solo se refieren a los ítemes ensayados.
Este Informe no debe ser reproducido parcial o totalmente sin la aprobación escrita de este Laboratorio.

QUI-160-17
Versión 01
Página 1 de 1