



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

**PROYECTO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO ELECTROMECAÁNICO**

**TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CÁMARA DE
SIMULACIÓN DE CONDICIONES CLIMÁTICAS, PARA
DETERMINAR EL COMPORTAMIENTO DE LA RIGIDEZ
DIELÉCTRICA DE LOS AISLADORES DE SUSPENSIÓN EN
LÍNEAS DE MEDIO VOLTAJE, PARA EL LABORATORIO DE
ALTO VOLTAJE DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS
ARMADAS-ESPE SEDE LATACUNGA**

AUTORES:

SALAZAR MORALES, LUIS ORLANDO

ZURITA CAISAGUANO, JUAN SEBASTIÁN

DIRECTOR: ING. MULLO QUEVEDO, ÁLVARO SANTIAGO

LATACUNGA

2020



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CÁMARA DE SIMULACIÓN DE CONDICIONES CLIMÁTICAS, PARA DETERMINAR EL COMPORTAMIENTO DE LA RIGIDEZ DIELECTRICA DE LOS AISLADORES DE SUSPENSIÓN EN LÍNEAS DE MEDIO VOLTAJE, PARA EL LABORATORIO DE ALTO VOLTAJE DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS-ESPE SEDE LATACUNGA**” fue realizado por los señores **SALAZAR MORALES, LUIS ORLANDO Y ZURITA CAISAGUANO, JUAN SEBASTIÁN**, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para lo que sustente públicamente.

Latacunga, 10 de julio del 2020

Firma:

Ing. Álvaro Santiago Múlo Quevedo

C.C.: 0502768542

DIRECTOR



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **SALAZAR MORALES, LUIS ORLANDO**, con cédula de identidad N°1715419303, y **ZURITA CAISAGUANO, JUAN SEBASTIÁN**, con cédula de identidad N° 0401847553, declaramos que el presente trabajo de titulación “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CÁMARA DE SIMULACIÓN DE CONDICIONES CLIMÁTICAS, PARA DETERMINAR EL COMPORTAMIENTO DE LA RIGIDEZ DIELECTRICA DE LOS AISLADORES DE SUSPENSIÓN EN LÍNEAS DE MEDIO VOLTAJE, PARA EL LABORATORIO DE ALTO VOLTAJE DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS-ESPE SEDE LATACUNGA**” ha sido desarrollado considerando métodos de investigación existentes, como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas. Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Latacunga, 10 de julio del 2020

.....
Salazar Morales, Luis Orlando

C.C.: 1715419303

.....
Zurita Caisaguano, Juan Sebastián

C.C.: 0401847553



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **SALAZAR MORALES, LUIS ORLANDO**, y **ZURITA CAISAGUANO, JUAN SEBASTIÁN**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en el repositorio institucional el trabajo de titulación “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CÁMARA DE SIMULACIÓN DE CONDICIONES CLIMATICÁS, PARA DETERMINAR EL COMPORTAMIENTO DE LA RIGIDEZ DIELECTRICA DE LOS AISLADORES DE SUSPENSIÓN EN LÍNEAS DE MEDIO VOLTAJE, PARA EL LABORATORIO DE ALTO VOLTAJE DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS-ESPE SEDE LATACUNGA**” en el Repositorio Institucional, cuyo contenido con ideas y criterios que es de nuestra autoría y responsabilidad.

Latacunga, 10 de julio del 2020

.....
Salazar Morales, Luis Orlando

C.C.: 1715419303

.....
Zurita Caisaguano, Juan Sebastián

C.C.: 0401847553

DEDICATORIA

Con mucha estimación este logro alcanzado va dedicado a mi madre Hilda la cual con su ayuda y ejemplo supo brindarme las fuerzas necesarias y apoyo incondicional para poder culminar mi vida académica, ya que en los momentos más difíciles de mi carrera estuvo presente con su cariño y amor.

A mis hermanos Ismael y Jonathan, que con su experiencia y ejemplo siempre apoyaron mis decisiones y actitudes que en la vida se me han presentado.

Sebastián

Todo el esfuerzo que realiza un padre por su hijo es un logro, por ende este trabajo y logro alcanzado va de dedicado a mi hijo Derek Orlando el motor de mi vida que con su sonrisa y cariños me motivó día a día para superarme y terminar mi carrera así como también a mis padres Luis y Nelly que supieron darme fuerzas y apoyo para terminarla en los momentos más difíciles

Orlando

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Jehová Dios por darme lo más valioso que es la vida, salud y guía para ser una persona humilde y responsable en el cumplimiento de mis objetivos personales.

A mi familia y amigos al ser personas valiosas y brindarme su apoyo y paciencia en mi camino universitario.

A mis profesores universitarios que me brindaron el conocimiento necesario durante mi vida académica y a esta prestigiosa institución por abrirme las puertas para cumplir mis metas.

Sebastián

Primero doy gracias a Dios que sin él, nada sería posible.

Gracias por haber puesto en mi camino a mis padres que me han enseñado los valores éticos de una preparación universitaria.

Gracias a mi padre que me apoyo sin medida alguna sin interés alguno más que el de verme superado, gracias a mi madre que me enseñó a ser perseverante en los caminos de la vida y constante.

Doy gracias a mis hermanos que nunca dejaron de aconsejarme terminar mi carrera de igual forma a cada una de las personas y familiares que se preocuparon por mi superación y finalmente a la mujer que confió en mí y nunca me dejó de apoyar María José.

Orlando

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA

| | |
|----------------------------------|-------|
| CERTIFICACIÓN..... | i |
| AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD | ii |
| AUTORIZACIÓN | iii |
| DEDICATORIA..... | iv |
| AGRADECIMIENTO | v |
| ÍNDICE DE CONTENIDOS | vi |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | x |
| ÍNDICE DE FIGURAS | xi |
| RESUMEN | xvii |
| ABSTRACT..... | xviii |

CAPÍTULO I

PROBLEMÁTICA

| | | |
|-------|-----------------------------------|---|
| 1.1 | Antecedentes..... | 1 |
| 1.2 | Planteamiento del problema..... | 2 |
| 1.3 | Justificación e importancia | 2 |
| 1.4 | Objetivos | 3 |
| 1.4.1 | Objetivo general..... | 3 |
| 1.4.2 | Objetivos específicos..... | 3 |

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN

| | | |
|-------|---|---|
| 2.1 | Aisladores..... | 4 |
| 2.2 | Materiales empleados en los aisladores..... | 4 |
| 2.2.1 | Aisladores de porcelana | 4 |
| 2.2.2 | Aisladores de Vidrio | 6 |
| 2.2.3 | Aisladores Poliméricos | 6 |
| 2.3 | Tipos de Aisladores..... | 7 |

| | | |
|--------|--|----|
| 2.3.1 | Aisladores de Soporte | 7 |
| 2.3.2 | Aisladores de suspensión | 8 |
| 2.3.3 | Aisladores tipo Pin | 10 |
| 2.4 | Tipos de Aisladores Según las Condiciones Ambientales..... | 11 |
| 2.5 | Cadenas de Aisladores..... | 12 |
| 2.5.1 | Cálculo de dimensionamiento de cadenas de aisladores | 13 |
| 2.6 | Ambientes típicos que contaminan el aislador | 15 |
| 2.7 | Exigencias eléctricas de los Aisladores..... | 15 |
| 2.8 | Grado de Asilamiento | 16 |
| 2.8.1 | Campos eléctricos en la superficie del aislador | 17 |
| 2.9 | Grado de aislamiento del aislador en condiciones de contaminación | 17 |
| 2.10 | Proceso de la descarga por contaminación en el aislamiento. | 20 |
| 2.10.1 | Descarga tipo arco | 20 |
| 2.10.2 | Descarga incandescente | 21 |
| 2.10.3 | Descarga por efluvios | 21 |
| 2.10.4 | Conductividad superficial en los aisladores | 22 |
| 2.11 | Pérdida dieléctrica de un aislador | 23 |
| 2.11.1 | Permeabilidad..... | 23 |
| 2.11.2 | Conducción | 23 |
| 2.11.3 | Polarización..... | 24 |
| 2.11.4 | Ionización | 25 |
| 2.11.5 | Resistividad dieléctrica | 25 |
| 2.11.6 | Rigidez dieléctrica | 26 |
| 2.12 | Efecto de la contaminación natural o climática en los aisladores | 27 |
| 2.12.1 | Efecto de la severidad de la contaminación en Aisladores Cerámicos | 28 |
| 2.12.2 | Efecto de la severidad de la contaminación en Aisladores Poliméricos | 28 |
| 2.13 | Soluciones propuestas contra la contaminación de los aisladores | 29 |
| 2.14 | “FLAMEO” o Flashover | 32 |
| 2.15 | Proceso de Flashover por contaminación..... | 33 |
| 2.16 | Modelo matemático de Flashover | 35 |
| 2.17 | Fuentes de generación de alto voltaje..... | 37 |

| | | |
|--------|---|----|
| 2.17.1 | HI-POT 120 D.C..... | 38 |
| 2.18 | Cámaras de simulación de ambientes climáticos..... | 39 |
| 2.19 | Cuarto de pruebas de corriente de fuga del laboratorio CIGELE Canadá | 41 |
| 2.20 | Microcontrolador Arduino Mega 2560 | 41 |
| 2.21 | Soplador Industrial BLOWER 1/10 Hp | 42 |
| 2.22 | Validación por Software de la resistencia en los aisladores. | 43 |
| 2.22.1 | Finit Element Method Magnetics (FEMM)..... | 43 |
| 2.23 | Hipótesis | 44 |
| 2.24 | Variables de la investigación | 44 |

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

| | | |
|-------|---------------------------------------|----|
| 3.1 | Antecedentes investigativos..... | 45 |
| 3.2 | Modalidad de Investigación..... | 48 |
| 3.2.1 | Método Bibliográfico Documental | 48 |
| 3.2.2 | Método Inductivo-Deductivo..... | 49 |
| 3.3 | Tipo de Investigación..... | 49 |
| 3.3.1 | Investigación cuantitativa | 49 |
| 3.4 | Población | 49 |
| 3.5 | Muestra | 50 |
| 3.6 | Instrumentos..... | 52 |

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

| | | |
|-----|---|----|
| 4.1 | Análisis de la determinación de Cadena de Aisladores | 53 |
| 4.2 | Análisis de Voltaje de falla a frecuencia Industrial en ambientes secos sin contaminación..... | 54 |
| 4.3 | Análisis de Voltaje de falla a frecuencia Industrial en ambientes húmedos sin contaminación..... | 55 |
| 4.4 | Análisis de la perdida Dieléctrica en ambientes secos y húmedos | 56 |

| | | |
|-------|--|----|
| 4.5 | Análisis del modelamiento Computacional de la Distribución de Voltaje mediante el Software FEMM..... | 57 |
| 4.5.1 | Análisis de la influencia de la contaminación ambiental en la corriente de fuga. | 58 |

CAPÍTULO V

PROPUESTA

| | | |
|-------|---|-----|
| 5.1 | Propuesta..... | 60 |
| 5.2 | Objetivos de la Propuesta..... | 60 |
| 5.3 | Justificación de la Propuesta..... | 61 |
| 5.4 | Análisis y fundamentación de la Propuesta..... | 61 |
| 5.4.1 | Cámara de simulación climática. | 61 |
| 5.4.2 | Análisis de Conductividad (α)y Permeabilidad (ϵ) eléctrica en distintos ambientes climáticos..... | 77 |
| 5.4.3 | Pruebas Físicas Iniciales..... | 78 |
| 5.5 | Análisis de los distintos casos de condiciones ambientales..... | 113 |
| 5.6 | Comprobación de la hipótesis..... | 121 |

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

| | | |
|-----|----------------------|-----|
| 6.1 | Conclusiones..... | 122 |
| 6.2 | Recomendaciones..... | 124 |

| | |
|--|------------|
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 125 |
|--|------------|

| | |
|--------------------|------------|
| ANEXOS..... | 128 |
|--------------------|------------|

ÍNDICE DE TABLAS

| | | |
|-----------------|--|-----|
| Tabla 1 | Distancia mínima de fuga en aisladores según normas. | 19 |
| Tabla 2 | Valores de factor de pérdida para material dieléctrico. | 26 |
| Tabla 3 | Valores de tensión de ruptura en materiales dieléctricos. | 27 |
| Tabla 4 | Porcentajes de contaminación en zonas cercanas a industrias | 47 |
| Tabla 5 | Corriente de fuga de la contaminación ambiental. | 50 |
| Tabla 6 | Instrumentos a utilizar en cámara de simulación climática. | 52 |
| Tabla 7 | Conductividad en ambiente seco. | 77 |
| Tabla 8 | Conductividad en ambiente húmedo. | 78 |
| Tabla 9 | Conductividad en ambiente lluvioso. | 78 |
| Tabla 10 | Valores de corriente de fuga y rigidez dieléctrica de aislador cerámico sano en prueba de distintos ambientes climáticos. | 113 |
| Tabla 11 | Valores de corriente de fuga y rigidez dieléctrica de aislador cerámico con falla en prueba de distintos ambientes climáticos. | 116 |
| Tabla 12 | Valores de corriente de fuga y rigidez dieléctrica de aislador de suspensión polimérico en prueba de distintos ambientes climáticos. | 119 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Aislador de Porcelana..... | 5 |
| Figura 2. Aislador de Vidrio. | 6 |
| Figura 3. Aislador Polimérico..... | 7 |
| Figura 4. Aislador de Soporte..... | 8 |
| Figura 5. Aislador de suspensión de vidrio y polimérico..... | 9 |
| Figura 6. Aislador de suspensión de campana. | 9 |
| Figura 7. Aislador de suspensión pasador..... | 10 |
| Figura 8. Aislador tipo Pin..... | 10 |
| Figura 9. Aislador Normal para contaminación. | 11 |
| Figura 10. Aislador Antiniebla..... | 12 |
| Figura 11. Cadena de aisladores..... | 13 |
| Figura 12. Curva de distribución del contaminante a lo largo de la superficie de un aislador tipo neblinero. | 18 |
| Figura 13. Comportamiento de la corriente en descarga tipo arco en aislador. | 21 |
| Figura 14. Variación de la corriente superficial con la humedad..... | 22 |
| Figura 15. Circuito equivalente de un material dieléctrico ideal, ángulo de desfasamiento de corrientes y voltaje. | 25 |
| Figura 16. Aislador cerámico roto..... | 28 |
| Figura 17. Aislador polimérico trizado pero con resistencia la flameo. | 29 |
| Figura 18. Limpieza de aisladores mediante chorros de agua a presión. | 31 |
| Figura 19. Limpieza de aisladores mediante chorros de agua a presión. | 32 |
| Figura 20. Efecto Flashover en aisladores de suspensión. | 33 |
| Figura 21. Proceso de Efecto Flashover en aisladores de suspensión. | 34 |
| Figura 22. Proceso de Efecto Flashover en aisladores de suspensión visto molecularmente..... | 35 |
| Figura 23. Tablero de control de HI-120Kv..... | 39 |
| Figura 24. Especificaciones técnicas HIT-POT 8120PL..... | 39 |
| Figura 25. Cámara de ensayos de niebla y lluvia..... | 40 |
| Figura 26. Cámara de pruebas de corrientes de fuga..... | 41 |

| | |
|--|----|
| Figura 27. Arduino MEGA 2560..... | 42 |
| Figura 28. Blower ½ Hp. | 43 |
| Figura 29. Interface de FEMM el cual permitirá la comparación de datos de FlashOver obtenidos..... | 44 |
| Figura 30. Distintos problemas registrados en Sistemas Eléctricos cercaos a zonas Volcánicas. | 46 |
| Figura 31. Aislador tipo PIN de Porcelana ANSI 55-4..... | 51 |
| Figura 32. Aislador de Suspensión polimérico ANSI C29.5..... | 51 |
| Figura 33. Numero de aisladores mediante distancias de fuga en normas IEC e IEEE. | 54 |
| Figura 34. Valores de falla en ambiente seco de dos tipos de aisladores. | 55 |
| Figura 35. Valores de falla en ambiente húmedo de dos tipos de aisladores. | 55 |
| Figura 36. Medición del ángulo de pérdida dieléctrica en un aislador de porcelana en ambientes secos. | 56 |
| Figura 37. Medición del ángulo de pérdida dieléctrica en un aislador de porcelana en ambientes húmedos aun voltaje de 25Kv. | 57 |
| Figura 38. Densidad de Voltaje en un aislador..... | 58 |
| Figura 39. Curva de corriente de fuga vs Ambiente en función de contaminación..... | 59 |
| Figura 40. Cámara de simulación climática en ambientes seco, húmedo y lluvioso..... | 62 |
| Figura 41. Estructura superior (cámara de vidrio), estructura inferior para análisis de cargas..... | 63 |
| Figura 42. Análisis de Cargas según Von Mises en la estructura de la cámara. | 64 |
| Figura 43. Estructura superior (cámara de vidrio), estructura inferior para distribución de cargas. | 65 |
| Figura 44. Sistema de generación de lluvia. | 66 |
| Figura 45. Simulación en Solid Works de implementación de aire caliente en la cámara. | 68 |
| Figura 46. Velocidad del aire caliente en la cámara de simulación climática. | 69 |
| Figura 47. Sistema de generación de 120Kv DC. | 69 |

| | |
|---|----|
| Figura 48. Tablero de control de HI-POT 120Kv. | 71 |
| Figura 49. Corrientes generadas en el HI-POT 120Kv..... | 71 |
| Figura 50. Sensor de temperatura PT 100..... | 76 |
| Figura 51. Sensor de humedad DHT11..... | 76 |
| Figura 52. Aislador cerámico Tipo Pin Sencillo GAMMA CORONA ANSI-4, NBA 95Kv, 13 Kn ubicado para pruebas de simulación climática. | 80 |
| Figura 53. Valores de corriente de fuga en aislador cerámico, clima seco. | 81 |
| Figura 54. Ubicación de las propiedades de los materiales del aislador en el Software FEMM..... | 82 |
| Figura 55. Simulación de voltaje aplicado al aislador tipo pin cerámico, a distintas temperaturas: a) 20°C, b) 25°C, c) 30°C | 83 |
| Figura 56. Generación de graficas de Corriente de fuga (I_f) en FEMM al aislador tipo pin cerámico, a distintas temperaturas: a) 20°C, b) 25°C, c) 30°C..... | 84 |
| Figura 57. Aislador cerámico Tipo Pin Sencillo GAMMA CORONA ANSI-4, NBA 95Kv, 13 Kn ubicado para pruebas de simulación climática con falla en su estructura. | 85 |
| Figura 58. Valores de corriente de fuga en aislador cerámico con falla, clima seco..... | 86 |
| Figura 59. Graficacion de aisladores cerámicos con falla en su estructura Software FEMM..... | 87 |
| Figura 60. Simulación de voltaje aplicado al aislador tipo pin cerámico con falla en su estructura, a distintas temperaturas: a) 20°C, b) 25°C, c) 30°C..... | 88 |
| Figura 61. Generación de graficas de Corriente de fuga (I_f) en FEMM al aislador tipo pin cerámico con falla en su estructura, a distintas temperaturas: a) 20°C, b) 25°C, c) 30°C | 89 |
| Figura 62. Aislador Polimérico de Suspensión Clevis-Lengüeta, GAMMA ANSI C29.5 SML 70Kn, NBA 14Kv, ubicado para pruebas de simulación climática. | 91 |
| Figura 63. Valores de corriente de fuga en aislador polimérico, clima seco..... | 92 |

| | |
|--|-----|
| Figura 64. Ubicación de las propiedades de los materiales del aislador polimérico en el Software FEMM | 93 |
| Figura 65. Simulación de voltaje aplicado al aislador polimérico de suspensión, a distintas temperaturas: a) 20°C, b) 25°C, c) 30°C..... | 94 |
| Figura 66. Generación de graficas de Corriente de fuga (I_f) en FEMM al aislador polimérico de suspensión, a distintas temperaturas: a) 20°C, b) 25°C, c) 30°C..... | 95 |
| Figura 67. Valores de corriente de fuga en aislador cerámico, clima húmedo. | 97 |
| Figura 68. Simulación de voltaje aplicado al aislador tipo pin cerámico, a temperatura de 20°C y humedad de 55%..... | 98 |
| Figura 69. Generación de grafica de Corriente de fuga (I_f) en FEMM al aislador tipo pin cerámico, temperatura de 20°C y humedad de 55%. | 98 |
| Figura 70. Valores de corriente de fuga en aislador cerámico, clima húmedo..... | 100 |
| Figura 71. Simulación de voltaje aplicado al aislador tipo pin cerámico CON FALLA, a temperatura de 20°C y humedad de 55%..... | 100 |
| Figura 72. Generación de grafica de Corriente de fuga (I_f) en FEMM al aislador tipo pin cerámico, temperatura de 20°C y humedad de 55%. | 101 |
| Figura 73. Valores de corriente de fuga en aislador polimérico, clima húmedo. | 103 |
| Figura 74. Simulación de voltaje aplicado al aislador polimérico de suspensión, a una temperatura de 20°C y humedad de 55%..... | 104 |
| Figura 75. Generación de graficas de Corriente de fuga (I_f) en FEMM al aislador polimérico de suspensión, a una temperatura de 20°C y humedad de 55% | 104 |
| Figura 76. Valores de corriente de fuga en aislador cerámico, ambiente lluvioso..... | 106 |
| Figura 77. Simulación de voltaje aplicado al aislador tipo pin cerámico, a temperatura de 20°C y humedad de 86% y precipitación de lluvia de 0.1mm/hr. | 107 |

| | |
|--|-----|
| Figura 78. Generación de grafica de Corriente de fuga (<i>If</i>) en FEMM al aislador tipo pin cerámico, temperatura de 20°C y humedad de 86% y precipitación de lluvia de 0.1mm/hr. | 107 |
| Figura 79. Valores de corriente de fuga en aislador cerámico CON FALLA, ambiente lluvioso. | 108 |
| Figura 80. Simulación de voltaje aplicado al aislador tipo pin cerámico CON FALLA, a temperatura de 20°C y humedad de 86% y precipitación de lluvia de 0.1mm/hr. | 109 |
| Figura 81. Generación de grafica de Corriente de fuga (<i>If</i>) en FEMM al aislador tipo pin cerámico, temperatura de 20°C y humedad de 86% y precipitación de lluvia de 0.1mm/hr. | 109 |
| Figura 82. Valores de corriente de fuga en aislador polimérico, clima lluvioso..... | 111 |
| Figura 83. Simulación de voltaje aplicado al aislador polimérico de suspensión, a una temperatura de 20°C y humedad de 86% y precipitación de lluvia de 0.1mm/hr. | 112 |
| Figura 84. Generación de graficas de Corriente de fuga (<i>If</i>) en FEMM al aislador polimérico de suspensión, temperatura de 20°C y humedad de 86% y precipitación de lluvia de 0.1mm/hr. | 112 |
| Figura 85. Simulación de voltaje aplicado al aislador tipo pin cerámico NUEVO, a distintas ambientes: a) seco, b) húmedo, c) lluvioso | 114 |
| Figura 86. Valores de corriente de fuga en aislador cerámico tipo Pin ANSI–4 en distintos ambientes..... | 115 |
| Figura 87. Simulación de voltaje aplicado al aislador tipo pin cerámico CON FALLA, a distintas ambientes: a) seco, b) húmedo, c) lluvioso | 117 |
| Figura 88. Valores de corriente de fuga en aislador cerámico tipo Pin ANSI–4 CON FALLA en distintos ambientes..... | 118 |
| Figura 89. FLASH OVER ocurrido en la Cámara de simulación climática en el Laboratorio de Alto Voltaje de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga | 118 |

- Figura 90.** Simulación de voltaje aplicado al aislador de suspensión
polimérico, a distintas ambientes: a) seco, b) húmedo, c) lluvioso120
- Figura 91.** Valores de corriente de fuga en aislador cerámico tipo
Pin ANSI-4 CON FALLA en distintos ambientes.....120

RESUMEN

El presente trabajo muestra el análisis realizado a dos tipos de aisladores, el aislador tipo Pin sencillo cerámico marca GAMMA CORONA ANSI-4 y el aislador de suspensión Clevis-Lengüeta, GAMMA ANSI C29.5, mediante una cámara de recreación de condiciones ambientales con un controlador electrónico, en el Laboratorio de Alto Voltaje de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga, esto para tener una manera didáctica de realizar el estudio de rigidez dieléctrica como el *Flameo* o “FLASH OVER” y a su vez verificar la seguridad del estudiante al realizar las practicas con estos elementos. En esta investigación se propone el análisis de cámaras y pruebas realizadas a aisladores con el fin de buscar una manera similar a las condiciones de ambientes de climas seco, húmedo y lluvioso que debe soportar un aislador para garantizar el correcto funcionamiento del sistema eléctrico ya que estos no deben generar perdida alguna y debe brindar una confiabilidad al sistema, también se realiza el estudio de la simulación en el software FEMM en el cual se permite la comparación de resultados en criterios de corriente de fuga y rigidez dieléctrica que el aislador en operación presente, ya que en las pruebas realizadas tanto en manera física como simulación se obtiene un error aproximado del 10%. De igual manera se presenta una guía de realización de prácticas en el presente laboratorio con las medidas de seguridad pertinentes tanto para docentes como alumnos, de esta forma permitiendo así la práctica física experimental de materias eléctricas en la Ingeniería Electromecánica.

PALABRAS CLAVE:

- AISLADORES ELÉCTRICOS
- AMBIENTES CLIMÁTICOS
- RIGIDEZ DIELECTRICA
- CORRIENTE DE FUGA
- “FLASH OVER”

ABSTRACT

This work shows the analysis carried out on two types of insulators, the GAMMA CORONA ANSI – 4 brand single ceramic Pin type insulator and the Clevis-Lengüeta suspension insulator, GAMMA ANSI C29.5, using a recreation chamber for environmental conditions with a electronic controller, in the High Voltage Laboratory of the University of the Armed Forces ESPE headquarters Latacunga, this to have a didactic way of conducting the study of dielectric strength such as the Flameo or "FLASH OVER" and in turn verify the safety of the student when doing the practices with these elements. This investigation proposes the analysis of cameras and tests carried out on insulators in order to search for a similar way to the conditions of environments of dry, humid and rainy climates that an insulator must endure to guarantee the correct operation of the electrical system since these they must not generate any loss and must provide reliability to the system, the simulation study is also carried out in the FEMM software, which allows the comparison of results in criteria of leakage current and dielectric strength that the insulator in current operation, since in the tests carried out both physically and simulated, an approximate error of 10% is obtained. In the same way, a guide for carrying out practices in this laboratory with the pertinent security measures for both teachers and students is presented, thus allowing experimental physical practice of electrical subjects in Electromechanical Engineering.

KEYWORDS:

- **ELECTRICAL INSULATORS**
- **CLIMATE ENVIRONMENTS**
- **DIELECTRIC STRENGTH**
- **LEAKAGE CURRENT**
- **"FLASH OVER"**

CAPÍTULO I

1. PROBLEMÁTICA

1.1 Antecedentes

Los eventos climáticos presentados en una línea de transmisión común, representan una alteración importante en las características técnicas de los aisladores presentes en estas. Al verse expuestos a lluvia, condiciones secas de alta temperatura y por lo general humedad, se genera una gran repercusión en la confiabilidad eléctrica que deben garantizar, la cual es proporcionar separación física (distancias de seguridad) y soporte mecánico a conductores energizados.

El hecho de contar con una cámara que recree las condiciones climáticas a las cuales se están sometiendo los aisladores, inicia al analizar la seguridad que estos elementos brindan en un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP), ya que la Escuela Politécnica Nacional dispone de una de estas cámaras en la cual realiza dichas pruebas en la evaluación del impacto de ceniza volcánica en la rigidez de aisladores de suspensión en líneas de alto voltaje, por lo que su implementación esta predispuesta para futuras investigaciones ante comportamientos de estos, en el laboratorio de Alto Voltaje de la carrera de Electromecánica evidenciando así los riesgos y consideraciones que se deben tomar en cuenta para la selección adecuada de aisladores y la conformación de las cadenas que se necesite instalar en una línea de transmisión o sub estación eléctrica.

1.2 Planteamiento del problema

Un sistema eléctrico de potencia está formado por numerosos componentes y su correcto funcionamiento depende del bienestar seguridad con la que cuente en donde interviene sus aisladores como principales preservadores del sistema. Es por ello que tanto los aisladores de soporte como de suspensión y los que se derivan de estos deben cumplir condiciones técnicas y garantías de calidad ya que al estar sometidos a diferentes tipos de ambientes climáticos y contaminación es necesario realizar pruebas o simulaciones que permitan abreviar el comportamiento de estos.

Al realizar prácticas de los aisladores de suspensión en el laboratorio de alto voltaje se evidencio que la manera de realizarlas involucra muchos riesgos ya que no se cuenta con una cámara de recreación de condiciones climáticas, para humedecer el aislador se utiliza un frasco rociador de agua de sin tener un control de la humedad o temperatura, para la sujeción del aislador se realiza en una base de madera no adecuada para las prácticas todo sobre una mesa, la sujeción del equipo de pruebas hi-pot para aplicar el voltaje se lo realiza sin disponer de conexiones adecuadas.

1.3 Justificación e importancia

La carrera de ingeniería electromecánica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga cuenta con un laboratorio de alto voltaje el cual proporcionaría características técnicas de voltaje y corriente, las cuales son de gran incidencia en las pruebas que se realizaran en la cámara de ensayos que se quiere implementar en el mismo laboratorio, logrando así simular los ambientes climáticos a

los cuales el aislador eléctrico está sometido y ver así su comportamiento y estado de rigidez dieléctrica.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Diseñar y construir de una cámara de simulación de condiciones climáticas en ambientes seco, húmedo y lluvia, con la implementación de dispositivos eléctricos, electrónicos y mecánicos que permitan la recreación de dichos ambientes para determinar el comportamiento de la rigidez dieléctrica en los aisladores de líneas de medio voltaje.

1.4.2 Objetivos específicos

- Investigar los ambientes a los cuales un aislador eléctrico está sometido en líneas de distribución eléctrica.
- Investigar la construcción de cámaras de recreación de condiciones ambientales.
- Diseño y construcción de la parte mecánica de la cámara de ensayos climáticos, de forma que recree los ambientes como lluvia, humedad y temperaturas de condiciones secas, permitiendo así observar el comportamiento de su rigidez dieléctrica ante estas circunstancias.
- Realizar pruebas de funcionamiento de disrupción dieléctrica en los aisladores de suspensión en la cámara de recreación de condiciones ambientales.
- Realizar un manual de puesta en marcha de la cámara así como la guía respectiva de práctica.

CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1 Aisladores

Son elementos de un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP), cuyo fin consiste en separar al conductor de la línea de apoyo que lo soporta de manera mecánica en condiciones normales de servicio, evitando así el paso de la corriente del conductor eléctrico hacia tierra.

El aislador al ser una parte vital del sistema eléctrico tiene un costo y diseño inferior a los demás elementos del mismo sistema, pero el rendimiento del mismo depende en gran medida de la correcta y eficaz operación del aislamiento que lo compone, evitando así daños permanentes al equipo y falla por largo tiempo. (Gonzalo Faraig, 2016)

2.2 Materiales empleados en los aisladores

Existen aisladores de diferentes materiales de primera calidad los cuales procuran tener una alta y gran resistencia mecánica y eléctrica, y principalmente son de porcelana vidrio y poliméricos.

2.2.1 Aisladores de porcelana

La porcelana que se mira en la Figura 1. Es el primer material utilizado para la fabricación de aisladores, pero no es una porcelana de cualquier característica, ya que

es formada por arcilla plástica, cuarzo y feldespato en polvo fino. El feldespato es el material que influye mediante su cantidad en la rigidez dieléctrica del aislador. El cuarzo además de influir en su durabilidad ayuda a la resistencia mecánica, pero la arcilla ayudada al aislador a resistir los cambios climáticos. (Villagran, 2016)

La porcelana debe cumplir con características eléctricas como las siguientes:

- Resistividad eléctrica mayor a $10^8 \Omega \cdot cm$.
- Constante dieléctrica de $\epsilon < 12$
- Rigidez dieléctrica $0.333 kv/cm$
- Dilatación Térmica $384615.384 (^{\circ}C)^{-1}$
- Módulo de elasticidad $0.875 kg/mm^2$

Estas son las condiciones que hacen que un aislador opere correctamente en corriente alterna dependiendo de la frecuencia al presentar bajas pérdidas dieléctricas y alta resistencia a la ruptura dieléctrica. (Mari, 1998)



Figura 1. Aislador de Porcelana.
Fuente: (bolivianelectric, 2016)

2.2.2 Aisladores de Vidrio

Se trata de un material superior al de la porcelana ya que su dureza, resistencia mecánica y estabilidad es superior ante los cambios de temperatura. Su costo en el mercado es inferior pero su utilización es más frecuente en Europa. (Gonzalo Faraig, 2016)

Este material está compuesto por sílice, carbonato de calcio y sodio con poca agua los cuales generan aislamiento eléctrico como se puede mirar en la Figura 2.



Figura 2. Aislador de Vidrio.

Fuente: (aluminiumalloyconductors, 2018)

2.2.3 Aisladores Poliméricos

Actualmente estos aisladores han sido más utilizados en la región de Sudamérica. Están compuestos de dos partes aislantes, un núcleo y un revestimiento externo equipado con errajes metálicos como se puede observar en la Figura 3. El material del núcleo se lo hace de fibra de vidrio con resina la cual proporciona resistencia

mecánica, y la capa externa esta hecha de material polimérico la cual proporciona una línea de fuga adecuada. (Gonzalo Faraig, 2016)

Este aislador presenta ventajas como:

- Bajo peso.
- Mayor elasticidad.
- Mayor resistencia a la contaminación.



Figura 3. Aislador Polimérico.
Fuente: (Gonzalo Faraig, 2016)

2.3 Tipos de Aisladores

La función del aislador en un sistema eléctrico de potencia tiene varias aplicaciones o funciones que considerar como:

2.3.1 Aisladores de Soporte

Como se mira en la Figura 4. Estos aisladores constan con una superficie del núcleo en dirección con las líneas de fuerza y las campanas vienen a ser perpendiculares a las mismas, que evita el intenso flujo de campo electrostático, además son de una sola pieza de porcelana. Por lo general estos aisladores se utilizan en sistema de hasta 69 kV. (Acosta Pérez, 2015)



Figura 4. *Aislador de Soporte.*

Fuente: (Acosta Pérez, 2015)

Estos aisladores de soporte se producen de dos tipos de condiciones:

- Normales
- Extremas (Mayor número de pliegues para alta contaminación)

Las ventajas de la utilización de aisladores de soporte son:

- Evita la construcción de brazos.
- Ahorro de espacios.
- Optima utilización en zonas urbanas.
- Permite su fácil mantenimiento o limpieza. (Acosta Pérez, 2015)

2.3.2 Aisladores de suspensión

Este tipo de aisladores puede ser de porcelana, vidrio o polimérico, teniendo adherido en sus extremos elementos metálicos que se pueden encajar uno con otro y

crear las cadenas de aisladores que permiten el aislamiento de mayor niveles de corriente y voltaje al adquirir mayor flexibilidad. (Acosta Pérez, 2015)



Figura 5. Aislador de suspensión de vidrio y polimérico.
Fuente: (EPRECSA, 2018)

Los aisladores de suspensión de acuerdo a su utilización se obtienen dos subtipos:

- De Campana

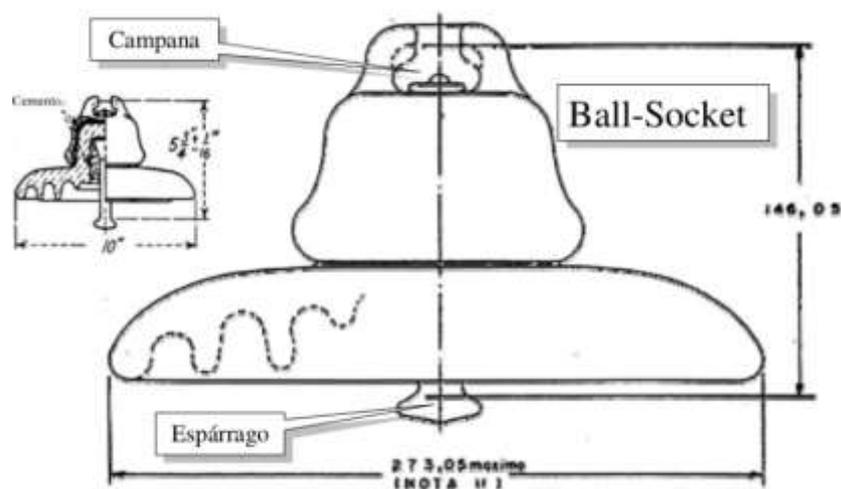


Figura 6. Aislador de suspensión de campana.
Fuente: (Acosta Pérez, 2015)

- De Pasador

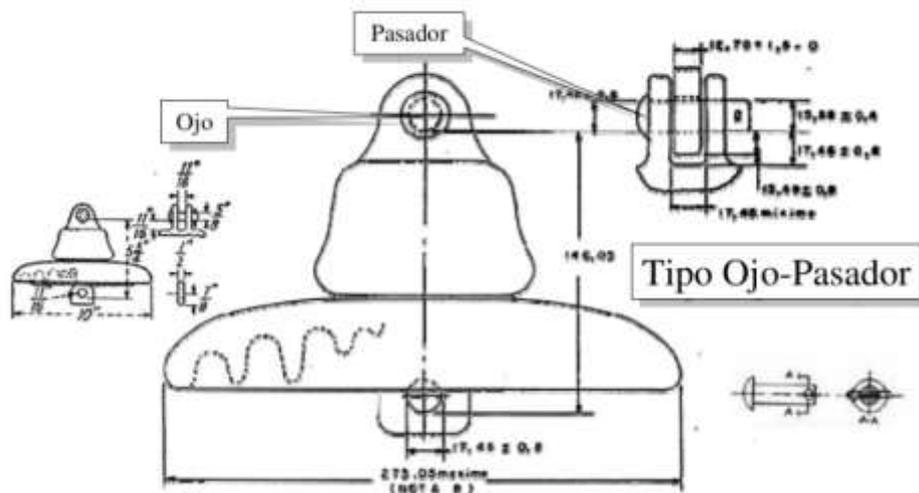


Figura 7. Aislador de suspensión pasador.
Fuente: (Acosta Pérez, 2015)

2.3.3 Aisladores tipo Pin

Esta clase de aislador es específico para la fijación del conductor de manera rígida, por lo que existen varias formas o variedades del mismo el cual depende de su función. Requieren de ligaduras o hilos del mismo material del conductor que amarran a este aislador como se mira en la Figura 8. (García Meythaler, 2019)

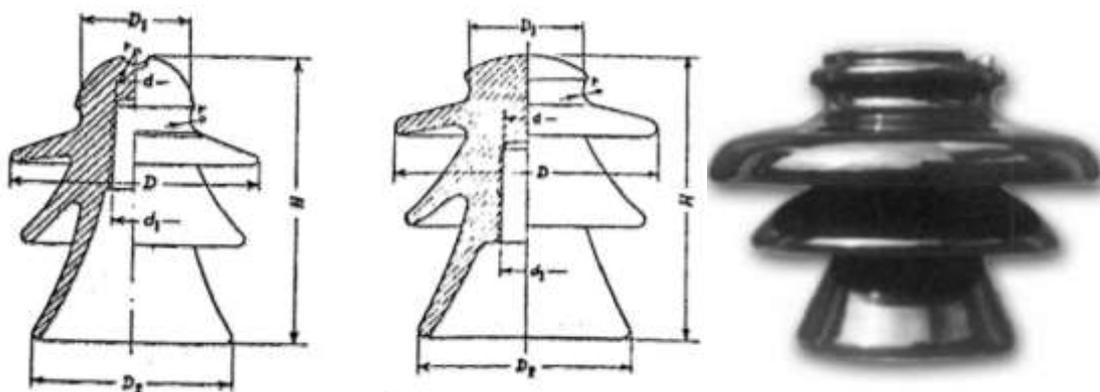


Figura 8. Aislador tipo Pin
Fuente: (Acosta Pérez, 2015)

2.4 Tipos de Aisladores Según las Condiciones Ambientales

Los aisladores son ubicados en líneas de transmisión y distribución por lo que están en contacto con diferentes tipos de clima o condiciones ambientales en los cuales se someten a exigencias mecánicas y físicas en su comportamiento, por lo que se clasifican en:

- **Standar o Normal:** Se utilizan en zonas de clima templado y razonablemente limpias sin contaminación. En este tipo de aisladores las corrugaciones no sobresalen del borde inferior. (Acosta Pérez, 2015)

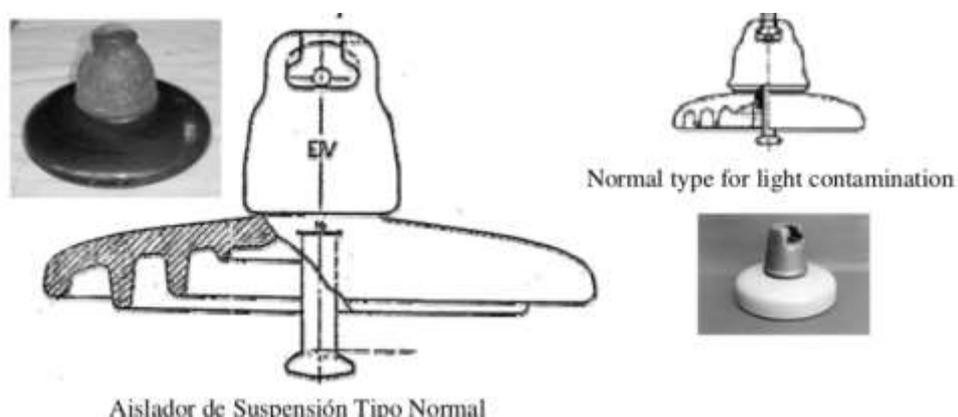


Figura 9. Aislador Normal para contaminación.
Fuente: (Acosta Pérez, 2015)

- **Anti-Fog o Antiniebla:** Estos aisladores poseen un número de ondulaciones menores pero más pronunciadas de tal forma que sobresalen del modo inferior, por lo que se utilizan en zonas altas sobre el nivel del mar donde la niebla es más pesada e influyente. (Acosta Pérez, 2015)

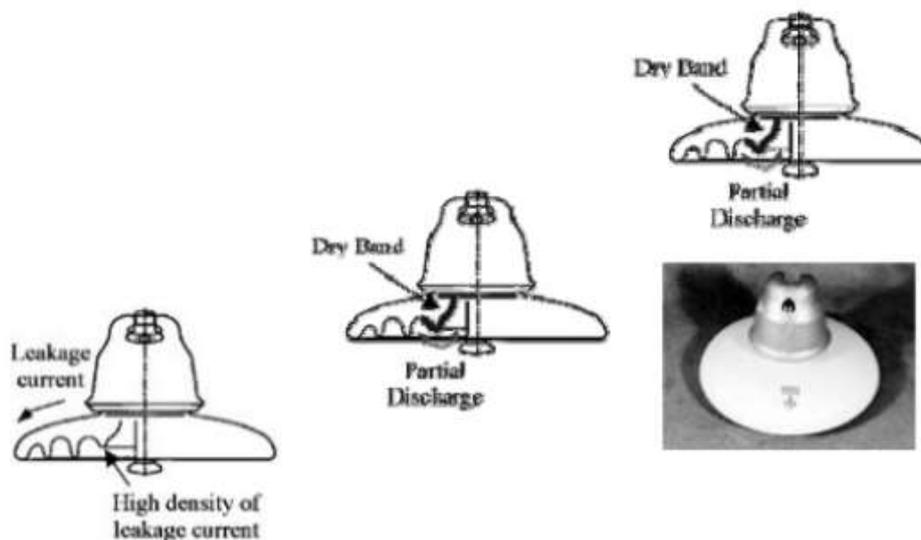


Figura 10. Aislador Antiniebla.

Fuente: (Acosta Pérez, 2015)

2.5 Cadenas de Aisladores

En un sistema eléctrico de potencia existen voltajes de grandes dimensiones en los cuales un aislador para cada línea no es suficiente, por lo que para aislar de manera eficiente estas líneas se utilizan las agrupaciones de los mismos aisladores llamándose así cadenas de aisladores constituidas por n aisladores en serie. (Acosta Pérez, 2015)

El nivel de aislamiento de la cadena es siempre menor que n veces al aislamiento de un aislador solo prefiriendo la utilización de las cadenas de aisladores como se muestra en la Figura 11.



Figura 11. Cadena de aisladores.

Fuente: (sectorelectricidad, 2017)

2.5.1 Cálculo de dimensionamiento de cadenas de aisladores

El dimensionamiento de aisladores para un Sistema Eléctrico de potencia está definido por la ecuación:

$$n_a = V_{ff} * \frac{D_f}{d_f} \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde:

V_{ff} : Voltaje de fase del Sistema Kv

D_f : Distancia mínima de fuga recomendada según la norma IEEE 1313-2 O IEC en (mm/Kv). (Tabla 1)

d_f : Distancia mínima de fuga de cada aislador (mm), está por lo general viene dada por el fabricante. (García Meythaler, 2019)

En la Tabla 1. Referenciada más adelante expresa los valores de mínimas distancias de fuga tomando en cuenta datos de altitud a nivel del mar por lo que se debe corregir este dato con la ecuación siguiente:

$$D_{fc} = \frac{D_f}{\sqrt{\delta}} \left(\frac{mm}{Kv} \right) \quad Ec. (2)$$

Donde:

D_{fc} : Distancia mínima de fuga corregida a nivel requerido

δ : Densidad relativa del aire.

La densidad del aire relativa esta expresada en relación de la presión barométrica que se presenta en el ambiente:

$$\delta = \frac{3.86+b}{273+t} \quad Ec. (3)$$

Donde:

b : Presión barométrica (cm * Hg)

t : Temperatura del ambiente (°C)

La presión barométrica se puede expresar en cualquier altura de la siguiente manera:

$$b = 10^{\log 76 \frac{h}{18336}} \quad Ec. (4)$$

Donde:

h : Altura sobre el nivel del mar

Parea mayor seguridad de diseño se debe aplicar un factor de seguridad de 10% para prevenir cualquier sobre voltaje por lo que la Ec 1 quedaría de la siguiente forma: (García Meythaler, 2019)

$$n_a = 1.1 * V_{ff} * \frac{D_f}{d_f} \quad \text{Ec. (5)}$$

2.6 Ambientes típicos que contaminan el aislador

En lo que respecta a la selección y diseño del aislador se definen tres ambientes generales en los que se trabaja que son:

- **Marino:** Áreas cercanas a las costas donde el contaminante es predominante al ser la sal pero su componente inerte es bajo.
- **Húmedo:** Estas áreas están ubicada en donde la línea de distribución y transmisión pasan por ambientes subtropicales como la amazonia ecuatoriana donde la humedad es presentes con alta incidencia, disminuyendo así la vida útil de las propiedades del aislador.
- **Desértico o Seco:** Áreas son prácticamente a nivel del mar donde existe varias cantidades de polvo y muy caliente y en la noche la humedad relativa sube a niveles de 93%, que ocasiona flameos frecuentes en las líneas. (García Meythaler, 2019)

2.7 Exigencias eléctricas de los Aisladores

Las funciones de un sistema eléctrico de potencia en una línea de distribución o transmisión están sometidos a voltajes y corrientes atípicas que se pueden presentar sin previo aviso que pueden ser:

- Voltaje entre fase y tierra del sistema
- Voltajes compuestos
- Cortos monofásicos, trifásicos etc.

Es indispensable vigilar que los voltajes mencionados anteriormente puedan ser soportados permanentemente por los aislantes, tomando en cuenta las condiciones climáticas a los cuales estén sometidos.

Por lo que para el dimensionamiento de las cadenas de aisladores en si se debe tomar en cuenta la frecuencia de tormentas en los cuales los rayos alcanzan corrientes de fuga con valor superiores a los establecidos en donde los aisladores no deben sufrir algún daño. (García Meythaler, 2019)

2.8 Grado de Asilamiento

Al estar sometidos a distintos valores de voltaje y corriente el aislador puede sufrir diferentes problemas en cuanto a su funcionamiento al momento de enfrentarse a descargas disruptivas temporales como:

- **Salto del aislante:** Se refiere a una excitación en el aire circundante entre las dos piezas conductoras en los terminales del aislador, que es provocada por la energía térmica desprendida por el arco eléctrico, de esta manera el aislante sufre daños en su estructura.
- **Perforación del aislante:** Esta descarga ocurre cuando existe una excitación a través del material dieléctrico con el que se conforma el aislante.

2.8.1 Campos eléctricos en la superficie del aislador

Estas descargas en la superficie del aislador tanto en medio y alto voltaje son causadas por el campo eléctrico local que tiene un valor más alto de ionización que el aire. Este campo eléctrico es producido por el voltaje aplicado y las condiciones ambientales, tales como la lluvia, humedad y calor existentes en el área donde los aisladores operan. (Moreno, 2015)

2.9 Grado de aislamiento del aislador en condiciones de contaminación

Los aisladores que se encuentran bajo condiciones de operación severas están sometidos a condiciones del medio en el que se encuentran situados, las cuales varían ampliamente de un lugar a otro, tomando en cuenta las características climáticas en de la zona que se encuentren.

Las características con las que cuente el aislador hacen posible que el nivel de aislamiento requerido pueda variar a lo largo de una misma línea, pues las condiciones de contaminación son diferentes a lo largo de la misma línea de distribución o transmisión eléctrica. (Pesaltae, 2005)

Así mismo la forma, la separación y material del aislado va a influir en el modo de afectación que pueda provocar el clima en el aislador al acumularse a lo largo de su superficie como se muestra en la siguiente Figura 11.

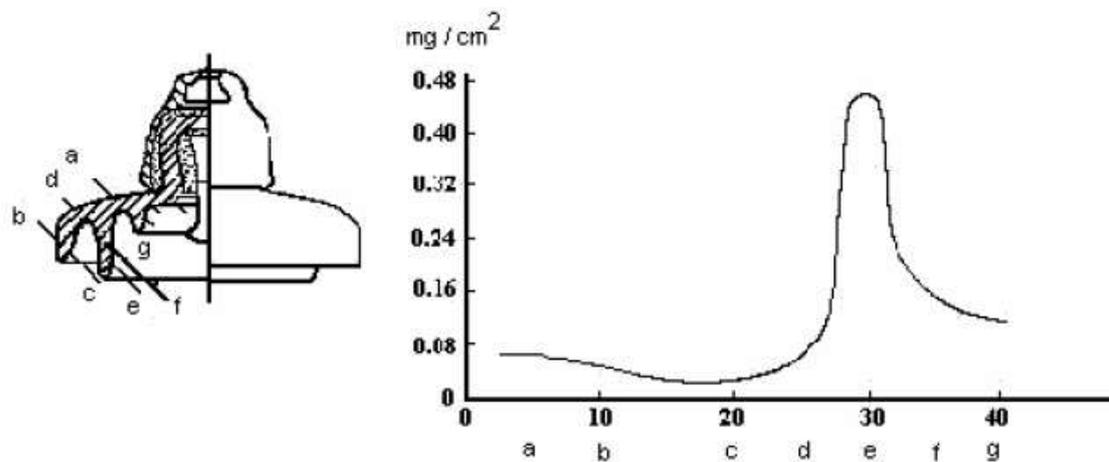


Figura 12. Curva de distribución del contaminante a lo largo de la superficie de un aislador tipo neblinero.

Fuente: (Pesaltae, 2005)

La contaminación climática presenta aspectos como la lluvia, humedad y calor que hacen que disminuya la resistencia eléctrica del aislador. Por lo que se debe tomar en cuenta aspectos primordiales al momento de escoger y calcular un aislador para evitar que una amplitud mínima de voltaje perjudique al aislador y son:

- La naturaleza, el voltaje aplicado.
- Las condiciones atmosféricas y climáticas: temperatura, densidad del aire, estado de ionización del aire.
- Estado de la superficie del aislante.

Al tomar en cuenta las consideraciones antes dichas se establece el grado de aislamiento que se define como la relación entre la longitud del camino de fuga de un aislador o cadena de estos y el voltaje de fase. Considerando la longitud de fuga a la distancia que se mide sobre la superficie del aislador para la corriente de fuga. (Pesaltae, 2005)

Para ello se utilizan diferentes valores de distancias de fuga como las expresadas en dos normas que se establecen en la IEEE 1313-2 y la IEC, como se demuestra en la Tabla 1.

Tabla 1

Distancia mínima de fuga en aisladores según normas.

| Grado de Contaminación | Tipo de Ambiente | Distancia mín de Fuga (mm/kV) IEC | Distancia mín de Fuga (mm/kV) IEEE 1313-2 |
|-------------------------------|---|--|--|
| I Bajo | <ul style="list-style-type: none"> • Áreas sin industria y con baja densidad de viviendas con plantas de calefacción. • Áreas con baja densidad de industria o casas, con frecuentes vientos o lluvias. • Todas estas zonas están situadas a una distancia de 20 Km del mar. | 27.7 | 16 |
| II Medio | <ul style="list-style-type: none"> • Áreas con alta densidad de viviendas y/o industrias, pero sujetas a vientos frecuentes y/o lluvias. • Áreas expuestas al viento desde el mar pero no demasiado cerca de las costas (al menos varios Km de distancia). | 34.6 | 20 |
| III Alto | <ul style="list-style-type: none"> • Áreas con alta densidad de industrias y suburbios de grandes ciudades con alta densidad de plantas de calefacción que producen contaminación. • Áreas cercanas al mar o en cualquier casa expuesta a vientos del mar. | 43.3 | 25 |
| IV Muy Alto | <ul style="list-style-type: none"> • Áreas generalmente de extensión moderada, sometidas a polvos conductores y al humo industrial que produce depósitos conductores particularmente gruesas. • Áreas generalmente de extensión moderada, muy cerca de la costa. | 53.7 | 31 |

Fuente: (IEEE Power Engineering Society. Technical Counsel., 1999).

2.10 Proceso de la descarga por contaminación en el aislamiento.

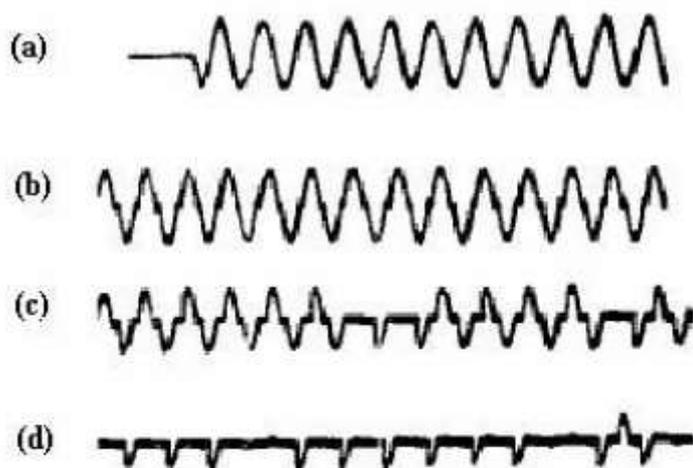
Sin importar la condición de contaminación existente, para que se produzca una descarga total en el aislador existen una serie de requisitos mínimos a cumplirse:

- Formación de la capa externa en el aislador.
- Humedecimiento de la capa externa del aislador y aumento de su conductividad y de la corriente de filtración.
- Secado de la capa externa en aislador en las regiones de mayor densidad de corriente.
- Formación de bandas secas.
- Descarga a través de las bandas ya formada.
- Descarga total.

Al formarse estas bandas secas en el aislador se producen diferentes tipos de descarga al depender del modo en que se transmita la corriente al ser las siguientes:

2.10.1 Descarga tipo arco

Al someterse a humedad el aislador más capaz externas que tenga en su superficie la corriente que va por el aislador antes de bandas formadas por los mismos, la corriente conserva la forma sinusoidal como se muestra en la Figura 12. Pero una vez formadas las bandas de contaminación la corriente sufre bruscas variaciones en su magnitud y en su forma de onda. (Pesaltae, 2005)



Características de la corriente para cuatro estados diferentes de secado de la capa contaminante.

- a) Antes de la formación de las bandas secas.
- b) Durante la formación de las bandas secas.
- c) Durante el aumento de amplitud de las bandas secas.
- d) Durante el proceso de secado intenso.

Figura 13. Comportamiento de la corriente en descarga tipo arco en aislador.

Fuente: (Pesaltae, 2005)

2.10.2 Descarga incandescente

Esta descarga es de muy corta duración y por producirse a los alrededores de los valores máximos de la onda de voltaje produciendo interferencias a nivel magnético. Y desaparece cuando el aislador se ha secado por completo por lo que no provocan la ionización en el aire eléctrico. (Pesaltae, 2005)

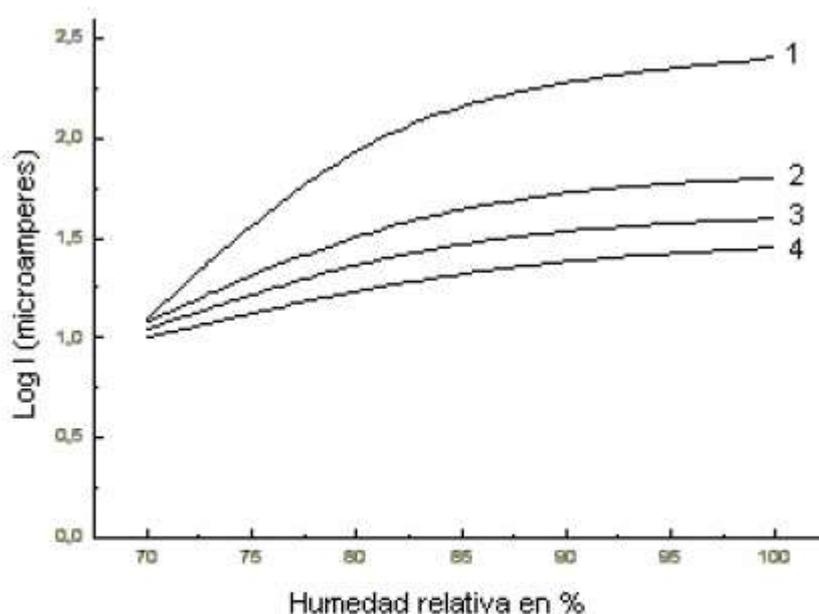
2.10.3 Descarga por efluvios

Al suceder inmediatamente después de las descargas incandescentes el aislador está sometido al proceso de humedecimiento el ancho de las bandas secas disminuye, aumentado la intensidad del campo entre ellas, por lo que hace posible

que se puedan desarrollar descargas de mucha mayor longitud y ramificadas conocidas como “FLAMEO”. (Pesaltae, 2005)

2.10.4 Conductividad superficial en los aisladores

Esta conductividad depende básicamente de las condiciones ambientales como la humedad y los parámetros propios del aislador. Los aisladores limpios y secos tienen una resistencia superficial del orden de 10^7 hasta 10^{10} ohm pero al someterse a la humedad su conductividad baja como se observa en la Figura 13.



Variación de la corriente superficial con la humedad.

- 1.- Aislador de vidrio contaminado.
- 2.- Aislador de porcelana contaminado.
- 3.- Aislador de vidrio limpio.
- 4.- Aislador de porcelana limpio.

Figura 14. Variación de la corriente superficial con la humedad.

Fuente: (Pesaltae, 2005)

2.11 Pérdida dieléctrica de un aislador

Al estar sometido a contaminación y ambientes climáticos diversos el aislador conlleva pérdidas en sus propiedades como:

- Permeabilidad
- Conducción
- Polarización
- Ionización
- Resistividad dieléctrica

2.11.1 Permeabilidad

Esta característica está dada por ε que resulta del producto de la permeabilidad relativa y su permeabilidad inicial inmiscuidas en el aislador expresadas en la Ec. 6.

$$\varepsilon = \varepsilon_0 * \varepsilon_r \quad \text{Ec. (6)}$$

El efecto de la humedad y las bandas de contaminación en la superficie del aislador genera que en el aislador la permeabilidad aumente y por ende el campo eléctrico que este se encuentre tenga mayor facilidad de expenderse. (García Meythaler, 2019)

2.11.2 Conducción

El aislador tiene un valor dieléctrico σ de conductividad el cual se ve afectado en al asociarse con la pérdida de permeabilidad en su estructura la cual se llama pérdida de conducción P_C .

a. Intervención de la temperatura en la conductividad de un material

Para encontrar la conductividad de un material a diferentes temperaturas a la que se esté trabajando es necesario obtener el valor referencial o estándar de conductividad en el caso de la porcelana se lo obtiene a 20 grados ($\alpha_{20^{\circ}\text{C}}=5.33*10^{-9}$) con la siguiente Ec. 7. (García Meythaler, 2019)

$$\alpha_{\circ\text{C}} = \frac{\alpha_{20}}{1-b(\circ\text{C}-20)} \quad \text{Ec. (6)}$$

$$b = (-3.2 * 10^{-8} * \circ\text{C}^3) + (1.032 * 10^{-5} * \circ\text{C}^2) - (8.272 * 10^{-4} * \circ\text{C}) + (3.544 * 10^{-2}) \quad \text{Ec. (7)}$$

Donde:

$\circ\text{C}$ = *Temperatura deseada en °C*

$\alpha_{\circ\text{C}}$ = *Conductividad a temperatura requerida, en (S/m)*

α_{20} = *Conductividad referencial a 20°C, en (S/m)*

b = *Es el factor que depende de la temperatura °C, y se obtiene mediante la Ec.7.*

(García Meythaler, 2019)

La conductividad en el factor de aire o material polimérico a diferentes temperaturas se lo realiza de la misma manera.

2.11.3 Polarización

Esta característica del aislador está dada en el efecto cadena específicamente en las cadenas de aisladores presentes al polarizarse cada aislador de manera distinta

se tiene la pérdida por capa o límite de orientación o polarización por deformación expresado como P_p . (García Meythaler, 2019)

2.11.4 Ionización

Al estar presente agentes externos como agua y el mismo aire las partículas del contaminante en el aislador permiten que los electrones ionizan el aire produciendo así flameo con descargas parciales en forma interna o externa y lo que provoca la pérdida de ionización expresado como P_i . (García Meythaler, 2019)

2.11.5 Resistividad dieléctrica

La resistividad dieléctrica del material del aislante y la constante dieléctrica están relacionadas con el factor de pérdidas dieléctricas ($\text{tg } \delta$), el cual permite determinar la pérdida de potencia de un dieléctrico.

$$\text{tg } \delta = \frac{W_R}{V \cdot I} = \frac{I_R}{I_C} \quad \text{Ec. (8)}$$

W_R = pérdidas de energía relacionado con un condensador.

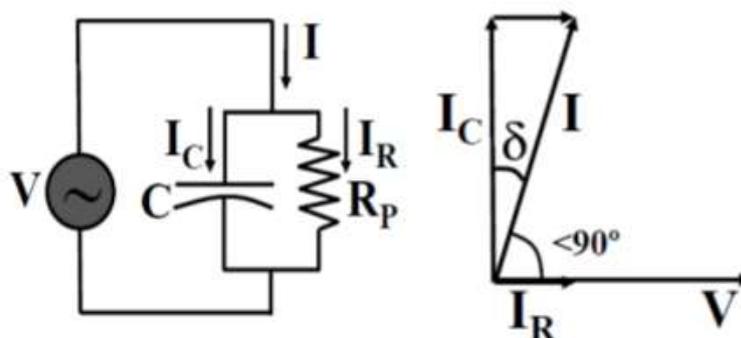


Figura 15. Circuito equivalente de un material dieléctrico ideal, ángulo de desfase de corrientes y voltaje.

Fuente: (Saguay Tacuri, 2012)

La corriente de fuga I_R del material del aislador está en fase con la tensión V , esta forma un ángulo δ con la corriente reactiva I_C desfasada 90° de la tensión. Pero al momento de perder el aislador esta propiedad sus fasores se distorsionan.

De esta manera tenemos un valor específico en el factor de pérdida dieléctrica del aislador dependiendo de la materia del cual está conformado. En la tabla 2 se puede observar los valores de factor de pérdida para distintos materiales:

Tabla 2

Valores de factor de pérdida para material dieléctrico.

| Material | Condiciones | Factor de pérdidas (tg δ) |
|-----------|-----------------------|-----------------------------------|
| Porcelana | Sólido, a 20 °C | 0.08 |
| Vidrio | Según sus variaciones | $8-20 \times 10^{-3}$ |
| Polímeros | | 0.02 |
| XLPE | Sólido, 20°C 50-60 Hz | 1×10^{-2} |

Fuente: (Saguay Tacuri, 2012)

2.11.6 Rigidez dieléctrica

Es el máximo gradiente de potencial que puede soportar el aislante, sin que llegue a producirse una corriente disruptiva, antes de que se produzca su destrucción por deformación o sin que llegue a una degradación física de sus propiedades aislantes. Su valor se expresa en (Kv/mm).

Al estar en contacto de humedad y contaminación por polvo o calor excesivo el aislador pierde propiedad de rigidez dieléctrica por lo que se estiman los valores para diferentes materiales de los cuales está conformado en la Tabla 3.

Tabla 3

Valores de tensión de ruptura en materiales dieléctricos.

| Material | Condiciones | Rigidez dieléctrica (Kv/mm) |
|------------------|-----------------------|-----------------------------|
| Porcelana | Sólido, a 20 °C | 5.7-38 |
| Vidrio | Según sus variaciones | 10-48 |
| Polímeros | | 20-30 |
| XLPE | Sólido, 20°C | 15 |

Fuente: (Saguay Tacuri, 2012)

2.12 Efecto de la contaminación natural o climática en los aisladores

Existen procedimientos que permiten monitorear la contaminación que afectan físicamente en las características del aislador y se utilizan para establecer la severidad de la contaminación en el sitio de un área determinada.

El objetivo de este monitoreo es proporcionar un parámetro de severidad que puede ser correlacionado con el comportamiento del aislador en su cubierta considerando estas características específicas:

- Resistencia a la erosión
- Resistencia a la perforación
- Resistencia a la luz ultravioleta y otros esfuerzos climáticos
- Resistencia mecánica
- Unión o sellado a otros componentes del aislador

Para examinar estas características ante la contaminación artificial (niebla salina, calor, humedad), se demuestra la habilidad del aislador ya sea de vidrio, porcelana o polímeros ante estos esfuerzos climáticos. En contraste, la prueba de contaminación natural reproduce completamente la condición de servicio en que se muestra el grado

al cual es al aislador recoge la contaminación de un cierto ambiente y la habilidad de un aislador energizado para soportar niveles de voltaje y corriente. (Moreno, 2015)

2.12.1 Efecto de la severidad de la contaminación en Aisladores Cerámicos

El efecto climático de humedad, lluvia y calor en estos aisladores generalmente afectan al Esfuerzo crítico al flameo del aislador que viene representado como $E \left(\frac{kv}{m} \right)$ y la severidad de afectación es S^{-p} , por lo que se puede expresar como:

$$E \propto S^{-p}$$

El valor de p varía entre 0.08 - 0.6 el cual representa un promedio de la superficie electrolítica del aire en donde si llegara a ser 0 el aire se ionizaría y provoca el Flameo, produciendo así la ruptura entre partes de la superficie del aislador, como se observa en la Figura 16.



Figura 16. Aislador cerámico roto.

Fuente: (srcc, 2018)

2.12.2 Efecto de la severidad de la contaminación en Aisladores Poliméricos

Estos aisladores tiene un distinto comportamiento al flameo al presentarse en su estructura el hule, etileno y polipropileno se comportan de mejor manera tanto a la humedad como a la lluvia pero su acción al calor es deficiente, por lo que se utilizan

diferentes compuestos como aisladores de hule silicón que los hacen más resistentes al calor. (Moreno, 2015)

Por lo que su valor de tensión a la ruptura o rigidez dieléctrica E varia y su severidad S^{-p} también, ya que su valor disminuye a 0.02 (Véase la Tabla 3), resultando así ser más eficientes al momento de descargas eléctricas, como se observa en la Figura 17.



Figura 17. Aislador polimérico trizado pero con resistencia la flameo.
Fuente: (Alicia, 2017)

2.13 Soluciones propuestas contra la contaminación de los aisladores

Las soluciones que se han estado experimentado frente al problema de la contaminación atmosférica son muy variadas. Pero tampoco se puede conseguir el método ideal en base a que no se controla los efectos climáticos que afectan a los

aisladores, por lo que estas soluciones tienden a conseguir que el aislador sea poco afectado en sus características eléctricas por la contaminación. (Torres Noriega, 1980)

Esta solución puede ser de medidas preventivas y de diseños de simulación de efectos climáticos que mostraran el comportamiento de aislador con un buen mantenimiento y el comportamiento puesto al trabajar en condiciones de afectación climática por lo que se puede hablar de las siguientes:

a. Medidas preventivas contra la contaminación de aisladores:

- *Limpieza manual de los aisladores:* esta solución es complicada y cara y su efecto es práctico solamente en puentes o zonas específicas, como por ejemplo en subestaciones eléctricas. Pero difícilmente se aplica de manera rigurosa en líneas de transmisión, porque en esta práctica existe una típica operación que solo es remover los depósitos de contaminación con cepillos o chorros a presión de solamente agua como se puede observar en la Figura 18. Por lo general se ejerce una presión de 800 lb/p^2 con pistolas de diámetro de pistones de $3/16$ a $1/2$ pulgada por lo que esta práctica se vuelve cara y si se lo hace por tiempos parciales se debe utilizar helicópteros dependiendo de la línea. (Torres Noriega, 1980)



Figura 18. Limpieza de aisladores mediante chorros de agua a presión.
Fuente: (sectorelectricidad, 2017)

- *Recubrimiento del aislador con sustancias especiales:* esta solución mejora notablemente el comportamiento de los aisladores ante la contaminación. Por lo general se utiliza grasa siliconadas u otros derivados del petróleo. Esta práctica llamada hidrofobicidad previene la formación de una capa húmeda continua.
- *Aumento de la aislación.* Consiste en aumentar la distancia de fuga debido a cambios climáticos tomado en cuenta las normas IEEE o IEC en el momento del diseño de la línea de distribución o transmisión.

b. Análisis de comportamiento de aisladores con simulación atmosférica

Mediante cámaras de simulación climática que se aplica a los aisladores, se observa cuán grande es su deformación dieléctrica y se prueba con distintos materiales para proporcionar su forma correcta de diseño. A estos se han diseñado varios aisladores llamados antiniebla donde sus diseños fisicos evitan la humedad debido a su distinto recorrido superficial como se puede observar en la Figura 19.

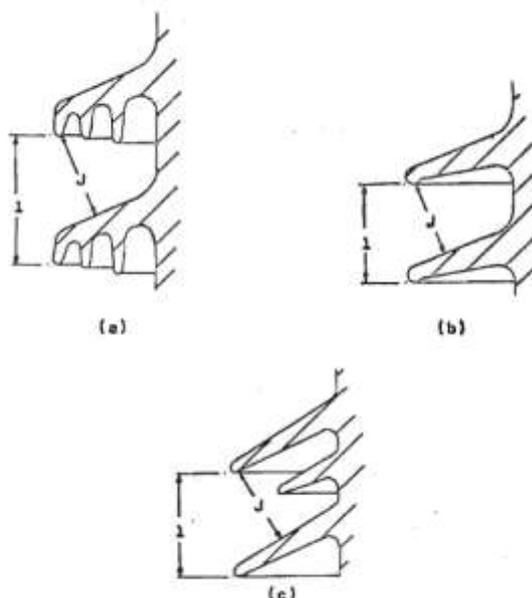


Figura 19. Limpieza de aisladores mediante chorros de agua a presión.

Fuente: (Torres Noriega, 1980)

En la figura a se observa una cubierta anti niebla con un recorrido superficial $3.54 j/1 = 0.7$. En la b se presenta una cubierta de perfil abierto con un recorrido superficial de 0.72 y en la parte c la recubierta es de longitud alterada y su recorrido superficial es de 0.725. (Torres Noriega, 1980)

2.14 “FLAMEO” o Flashover

Este fenómeno se produce por el resultado de una descarga eléctrica entre dos electrodos que están separados por un aislante, el valor depende de si la superficie del aislador pero este valor está sujeto a la condición climática que se ve afectada por la humedad o calor, por lo que también se lo llama Voltaje de chispa. (García Meythaler, 2019)

Esta descarga atraviesa un aislante que en algunos casos pueden viajar alrededor o entre el aislante, descomponiendo la permeabilidad de los aisladores subyacentes como se observa en la Figura 20.



Figura 20. Efecto Flashover en aisladores de suspensión.

Fuente: (desenchufados, 2017)

2.15 Proceso de Flashover por contaminación

Este proceso se ve afectado por las propiedades de la superficie que puede tener un aislador. En el caso del aislador cerámico y de vidrio que presentan una superficie hidrofílica que hace que al enfrentarse a la lluvia y humedad se formen capas de material electrolítico sobre el aislador. Pero en el caso de los aisladores poliméricos que presentan una superficie llamada hidrofóbica que quiere decir que la humedad

forma pequeñas gotas independientes de la superficie, evitan la aparición de una capa conductora uniforme. (PACHECO. S, 2018)

Por lo que el proceso de Flashover en los aisladores poliméricos se destaca en pequeñas descargas parciales locales que fatigan el material, y a largo plazo, generan la necesidad de cambio sin un mantenimiento previo. Pero en el caso de los cerámicos el proceso se caracteriza por tener tres etapas que se observan en la Figura 21.

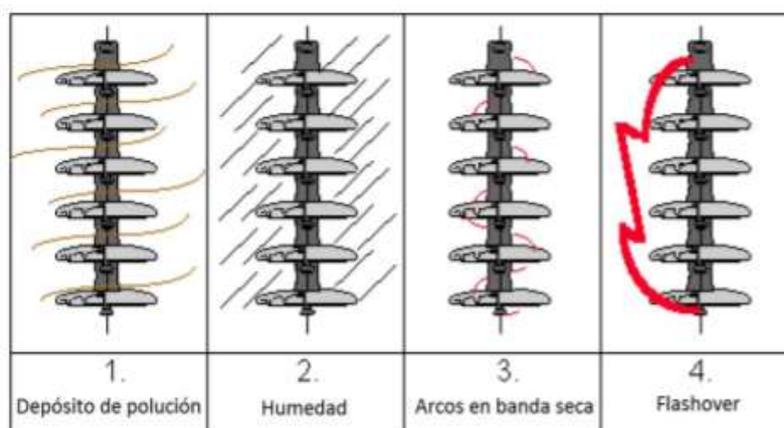


Figura 21. Proceso de Efecto Flashover en aisladores de suspensión.

Fuente: (PACHECO. S, 2018)

- El aislador se reduce con una capa de material conductor (sales, metales, ácidos, etc.). Esta etapa se da al aislador enfrentarse a lluvias, rocío, condensación, humedad ambiental, y calor.
- Una vez energizado el aislador, y en presencia de una cala conductora, una corriente de fuga superficial comienza a fluir por la superficie. El calor producido comienza a seca algunas partes de esta capa conductora.
- El secado de la etapa anterior nunca es uniforme. En algunas partes, la capa conductora se quiebra y se limita el flujo de corrientes de fuga.

- d. Los voltajes de Línea-Tierra son aplicados en estas fisuras de la capa aislante, las cuales son atravesadas por arcos de corriente que rompen el aire. Esto se produce eléctricamente en serie con la resistencia de la parte no seca de la capa de contaminación.
- e. Si la resistencia de la parte no seca de polución es lo suficientemente baja los arcos cruzando las fisuras de la capa de polución ocurren continuamente, lo que extiende estas fisuras. Esto produce la presencia de más arcos en la superficie del aislador hasta que finalmente se produce el “Flameo”. (PACHECO. S, 2018)

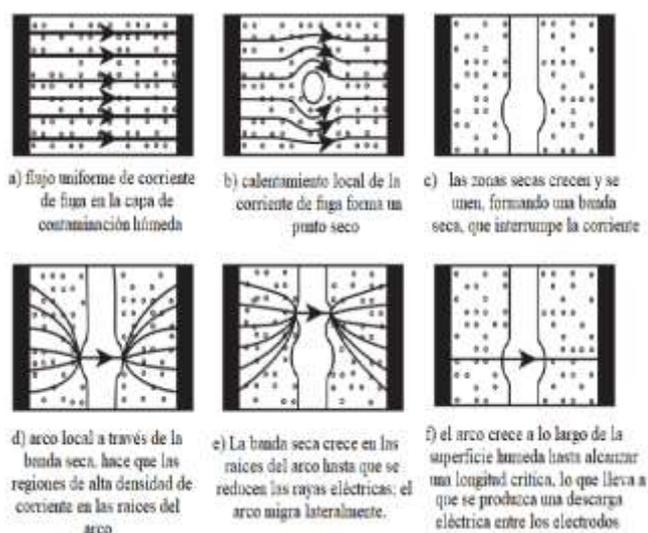


Figura 22. Proceso de Efecto Flashover en aisladores de suspensión visto molecularmente.

Fuente: (García Meythaler, 2019)

2.16 Modelo matemático de Flashover

Este proceso se reconoce generalmente como un circuito en serie formado por un arco parcial y una capa de contaminación residual por lo que a partir de la ecuación

básica para mantener el arco de corriente alterna lo largo del aislante contaminado se produce expresar así:

$$U_m = U_{arc_m} + U_{pm} = AxI_m^{-n} + r_a(L - x)I_m$$

Donde:

U_m e I_m : Son el valor máximo del voltaje aplicado y corriente de fuga.

U_{arc_m} : Es el voltaje en el arco.

U_{pm} : Es el voltaje en la resistencia a la contaminación residual.

A : y n : Son la constante de arco.

L : Es la distancia de fuga total.

x : Es la longitud del arco.

r_a : Es la resistencia a la contaminación residual por unidad de longitud.

La condición del reinicio del arco y las condiciones de propagación también deben cumplirse y se puede expresar como:

$$E_p > E_{arc}$$

Donde:

E_p : Gradiente de voltaje de las partes contaminantes contaminadas.

E_{arc} : Gradiente de arco.

$$E_p = \left(\frac{U_{pm}}{L} - x \right) = \frac{r_a(L-x)Im}{L-x} = r_a Im$$

$$E_{arc} = \left(\frac{U_{arc_m}}{x} \right) = \left(\frac{AxIm^{-n}}{x} \right) = AIm^{-n}$$

La corriente de fuga aumenta a lo largo de la superficie del aislador con el incremento de la conductividad de la capa. Por lo tanto, para un aislador de baja conductividad superficial, el criterio de propagación del arco es difícil de satisfacer, por lo que el voltaje aplicado debe incrementarse. Llegando a si a determinar que bajo diferentes materiales de contaminación, la corriente de fuga del aislador es diferente, he ahí la importancia de simular los ambiente atmosféricos para analizar y comprobar la propagación dela arco a diferentes parámetros. (García Meythaler, 2019)

2.17 Fuentes de generación de alto voltaje

El equipo de Alto Voltaje sirve fundamentalmente para la generación y medida de voltajes alternos, continuos y de choque.

Los elementos para generación están contruidos de tal manera que puedan acoplarse para formar cada uno de los circuitos de experimentación. Normalmente una instalación grande de 500 a 1.000 KVA con un millón de voltios, por ejemplo, necesita una comente de 0.5 a 1 Amp, proporcionalmente para una de 100 KV tendremos de 50 a 100 mA. En este caso particular se tiene para 60 c/s una cargabilidad de 50 mA. En 15 minutos. (KO 15) lo cual proporciona una potencia monofásica de 5 KVA durante el mismo tiempo, esto significa que el transformador

podrá ser cargado con una capacidad de prueba de hasta 1.600 pF (1.66 M-ohm), lo cual no se presenta frecuentemente.

Para la generación de altos voltajes de impulso se utiliza como alimentación la fuente de continua de 130 KV, y se usan los condensadores de 6.000 pF como capacidad de choque. Con esto se puede tener una energía de 60 W-s para una sola etapa y de 120 W-s para dos etapas, en conexión según Marx. La capacidad de carga con el objeto de tener una onda normalizada es aproximadamente la quinta parte de la de choque, o sea 1.200 pF. Utilizando resistencias adecuadas para la descarga y amortiguamiento se puede obtener las ondas de 1/50 y 1/100 micro-segundos. (Avilés Merino, 2019)

2.17.1 HI-POT 120 D.C

El HI – POT de 120 Kv CD. Es un equipo de alto voltaje en continua, para pruebas de fiabilidad del aislamiento, en máquinas rotativas y estáticas, sí como en los equipos, accesorios y materiales utilizados en un Sistema Eléctrico de Potencia, mediante la medición de la corriente de fuga, entre fase y tierra. (Lasluisa, 2014)

- Características del HI-POT 8000

El HI – POT de 120 Kv CD. Es un equipo de alto voltaje en continua, para pruebas de fiabilidad del aislamiento, en máquinas rotativas y estáticas, sí como en los equipos, accesorios y materiales utilizados en un Sistema Eléctrico de Potencia, mediante la medición de la corriente de fuga, entre fase y tierra. (Lasluisa, 2014)



Figura 23. Tablero de control de HI-120Kv.
Fuente: (Lasluisa, 2014)

- Especificaciones técnicas del HI-POT 8120PL

| | Model Number | | | | |
|-----------------|---|-----------------|--------------------|------------------|------------------|
| | 8060PL | 8120PL | 8180PL | 8240PL | 8300PL |
| Input | | | | | |
| Voltage | 120V, 60Hz, or 220V, 50/60 Hz | | | | |
| Current | 30A | | | | |
| Output | | | | | |
| Voltage (KV dc) | 60 | 120 | 180 | 240 | 300 |
| Current (mA) | 16 (20@50KV) | 8 (10@100KV) | 5.5 (7.5@150KV) | 4.1 (5@200KV) | 3.3 (4@250KV) |
| Polarity | Reversible (Manually) | | | | |
| Ripple | .15% per mA | | | | |
| Series Resistor | 250 K Ω | 250 K Ω | 500 K Ω | 500 K Ω | 750 K Ω |
| Meters | | | | | |
| Voltmeter | 0-15/37.5/75 KV (times the number of modules) | | | | |
| Current Meter | 0-5uA (with X1, X10, X100, X1K, X5K multiple controllers) | | | | |
| Accuracy | +- 2% Full Scale | | | | |

Figura 24. Especificaciones técnicas HIT-POT 8120PL
Fuente: (Lasluisa, 2014)

2.18 Cámaras de simulación de ambientes climáticos

Las cámaras climáticas suelen utilizarse muy a menudo en el ámbito de pruebas de estrés y pruebas de estabilidad. Algunas muestras o pruebas de productos

requieren que se compruebe el efecto que tendrían distintas condiciones climáticas sobre ellas. Para conseguirlo, deben variarse de forma controlada y constante las condiciones en el interior de la cámara y poner a prueba el objeto de ensayo. (Chachalo, Julián, 2018)



Figura 25. Cámara de ensayos de niebla y lluvia.

Fuente: (Chachalo, 2018)

La cámara observada en la Figura 25 simula ensayos de niebla con ocho pares de pulverizadores (agua y aire). Los cuales permiten un ambiente húmedo o lluvioso que permite observar el comportamiento de implementos con rigidez dieléctrica ante estos climas y su afectación de los mismos. (Chachalo, 2018)

2.19 Cuarto de pruebas de corriente de fuga del laboratorio CIGELE Canadá

Este equipo de pruebas ayuda a determinar la corriente de fuga de aisladores al simular diferentes tipos de ambientes como se muestra en la Figura 26.

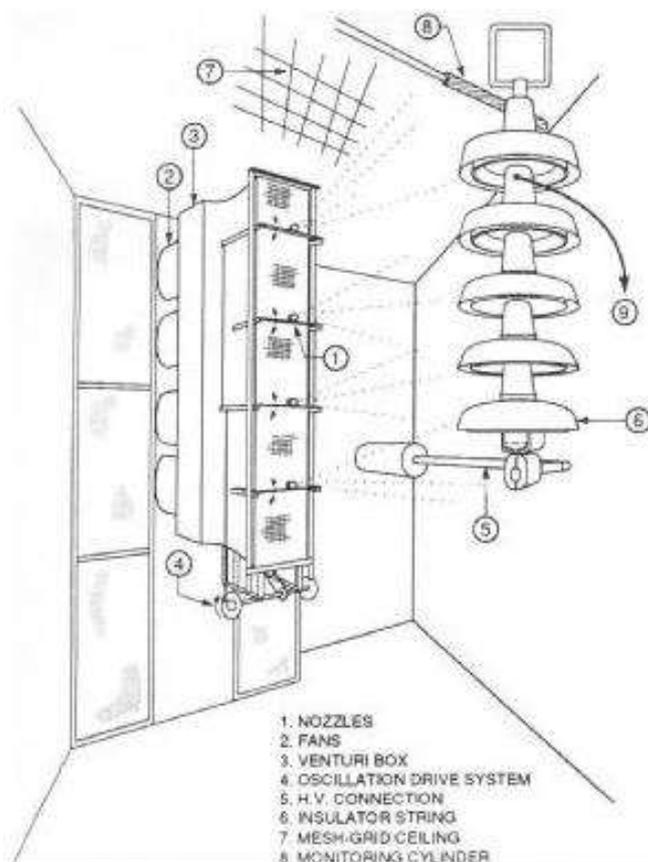


Figura 26. Cámara de pruebas de corrientes de fuga.

Fuente: (García Meythaler, 2019)

2.20 Microcontrolador Arduino Mega 2560

Para el diseño de la cámara de simulación se toma en cuenta a un microcontrolador que ponga en marcha las activaciones de los diferentes escenarios por lo que en la familia de los controladores Arduino el Mega 2560 (Vea la Figura 26) es probablemente el más capaz ya que posee 54 pines digitales que funcionan como

entrada/salida, 16 salidas analógicas, su cristal oscilador es de 16 MHz, una conexión USB y un botón de Reset con una alimentación de placa. (AGElectronica, 2016)

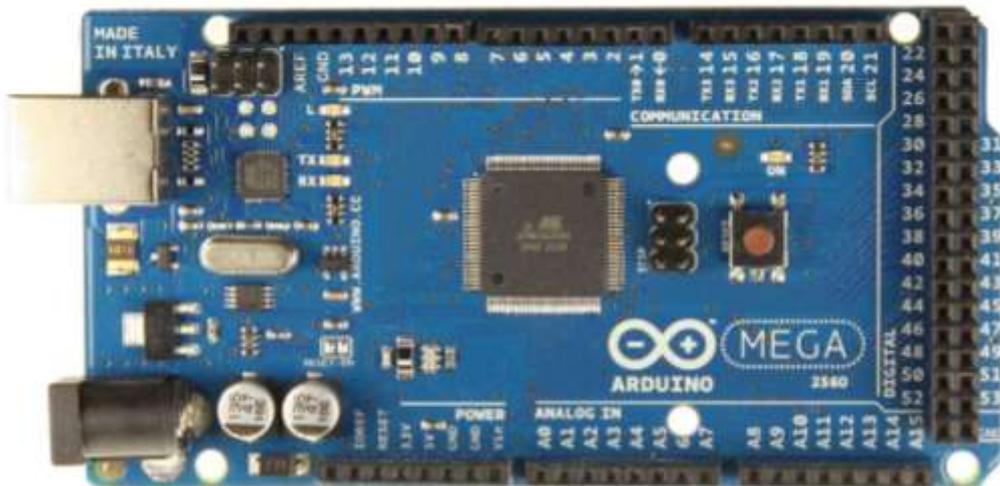


Figura 27. Arduino MEGA 2560.
Fuente: (AGElectronica, 2016)

Además este microcontrolador consta de estas características electrónicas:

- Voltaje Operativo: 5V
- Voltaje de Entrada: 7-12V
- 15 Pines Digitales con salida PWM.
- Corriente DC por cada pin: 40mA
- Memoria Flash: 256 KB (AGElectronica, 2016)

2.21 Soplador Industrial BLOWER 1/10 Hp

Para simular un ambiente seco se diseña un sistema de calor con dos resistencia conectadas a un voltaje normal y a un soplador el cual es un Blower que usa un principio bastante simple con una ventola de aspas que rueda en el interior de un estator, y la fuerza centrífuga en la rotación crea unos pequeños vórtices de aire de

aspiración que van hasta la salida del mismo, como se mira en la Figura 28. (Vimatec, 2018)



Figura 28. Blower $\frac{1}{2}$ Hp.
Fuente: (Vimatec, 2018)

2.22 Validación por Software de la resistencia en los aisladores.

Para esta validación nos serviremos del programa Finit Element Method Magnetics (FEMM) utilizado en la tesis del Ing. Garcia Meythaler Nicolás Augusto la cual trata acerca de “Modelamiento y simulación del efecto “flashover voltage” en los aisladores de suspensión de las líneas de transmisión de 500kv, ante el impacto de la caída de ceniza del volcán Cotopaxi en la zona de mayor influencia”.

2.22.1 Finit Element Method Magnetics (FEMM)

FEMM es un conjunto de programas como indica la Figura 29 para resolver problemas electromagnéticos de baja frecuencia en dominios bidimensionales plana y asimétricos. (García Meythaler, 2019)

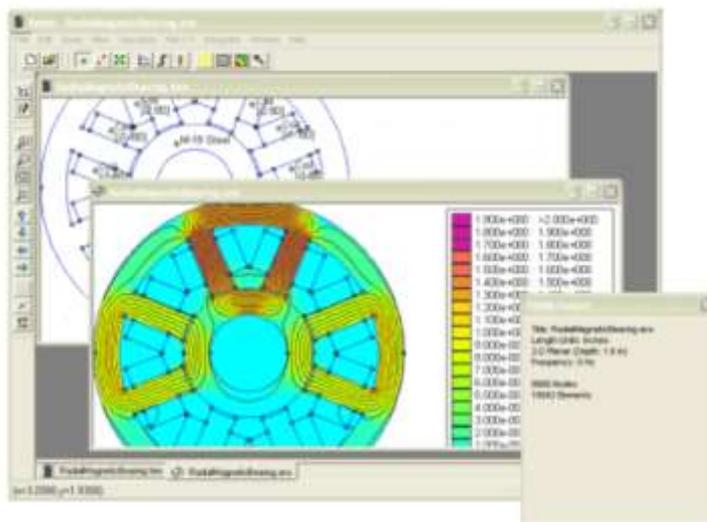


Figura 29. Interface de FEMM el cual permitirá la comparación de datos de FlashOver obtenidos.

Fuente: (García Meythaler, 2019)

2.23 Hipótesis

Mediante la implementación de una cámara de ensayos de recreación de diferentes ambientes climáticos, se permitirá determinar el comportamiento de la rigidez dieléctrica de aisladores de hasta medio voltaje sometiéndolos a dicha cámara.

2.24 Variables de la investigación

- **Variable independiente:** Cámara de ensayos de simulación de condiciones climáticas.
- **Variable dependiente:** Comportamiento de la rigidez dieléctrica de los aisladores de suspensión de hasta medio voltaje.

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

3.1 Antecedentes investigativos

En el sistema eléctrico de distribución generalmente se utilizan aisladores tipo pin de material cerámico de marca Gamma, además el uso de aisladores de suspensión son comúnmente los poliméricos de la misma marca. Estos aisladores están sujetos a normas como la ANSI 55-4 en donde se especifica los valores característicos en los cuales se deben regir dichos aisladores, como sus dimensiones de diámetro y altura, la distancia de fuga, la resistencia mecánica.

En la investigación realizada por la Escuela Politécnica Nacional por (Chachalo, 2018), se analiza el efecto de la ceniza volcánica en el comportamiento de los aisladores en la zona volcánica de Cotopaxi, pero este análisis se basa únicamente en resultados de laboratorio simulando la aplicación de sales y ceniza volcánica en los aisladores, pero no cuenta con sustentos matemáticos ni computacionales, aunque se puede decir que el análisis de laboratorio es el más importante en una investigación, ya que siempre es necesario corroborar los datos de un software con lo que quede como resultado en la realidad ya que intervienen parámetros atmosféricos y ambientales que también son de fácil aplicación, lo cual muestra la necesidad de comprobar la hipótesis que ellos plantean mediante una simulación atmosférica y comparación con los resultados en software.

de depósitos extraídos de contaminación que mediante la humedad que presentan estos han producido fallas en las en el sistema eléctrico.

Tabla 4

Porcentajes de contaminación en zonas cercanas a industrias

| Ambiente | % de Contaminación |
|--|---------------------------|
| Líneas energizadas adyacentes a industrias | |
| Materia Volátil (Azufre, aceites, etc.) | 34.23% |
| Óxidos Metálicos | 17.27% |
| Arenas (Arcilla, cerámicas) | 48.50% |
| Líneas en zona arenosa y seca | |
| Materia Volátil | 21.13% |
| Óxidos Metálicos | 22.29% |
| Arenas | 56.58% |

Fuente: (Torres Noriega, 1980)

De los componentes de la contaminación, los más peligrosos son evidentemente las sales solubles de sodio, potasio, calcio, puestas soluciones son conductoras, La cantidad de sustancias inertes (poco o nada conductoras) pero se influye como aglomerante, adherido el deposito a la superficie del aislador, impidiendo el lavado y también reteniendo la humedad que se presenta formando soluciones conductoras. (Torres Noriega, 1980)

Otro análisis realizado por (García Meythaler, 2019) en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, en donde se realiza un modelamiento y simulación del impacto de la ceniza volcánica en aisladores de suspensión muestra que el nivel de contaminación relacionado con distintos ambientes afecta e incrementa a la corriente de fuga en los aisladores que a estos se somete como se puede observar en la Tabla 6.

Tabla 6.

Corriente de fuga de la contaminación ambiental

| CASO | Corriente de Fuga (A) | | | |
|------|------------------------|--------------------|----------------------|------------------------|
| | Nivel de contaminación | Contaminación Seca | Contaminación Húmeda | Contaminación Lluviosa |
| 3 | | 0,0147977 | 0,0265229 | 0,0366639 |
| 5 | | 0,0399531 | 0,068288 | 0,101708 |
| 7 | | 0,0589042 | 0,117368 | 0,202498 |
| 9 | | 0,160911 | 0,230613 | 0,342029 |
| 11 | | 0,183862 | 0,294682 | 0,483681 |

Fuente: (García Meythaler, 2019)

3.2 Modalidad de Investigación

3.2.1 Método Bibliográfico Documental

Se plantea inicialmente para el proyecto la recolección de información mediante materiales bibliográficos, artículos científicos, páginas web, y libros de ingeniería de los cuales se obtendrá la información necesaria para la realización de la cámara de simulación de ambientes climáticos para aisladores eléctricos.

La información acerca de pérdida dieléctrica de los aisladores de tres tipos de material como porcelana, vidrio y polimérico, se proveerá a la comparación de resultados con la investigación realizada por (García Meythaler, 2019), ejecutada en

la Universidad de Las Fuerzas Armadas “ESPE” sede Latacunga, al proporcionar un modelamiento y simulación del efecto “Flash Over” en aisladores de suspensión.

3.2.2 Método Inductivo-Deductivo

Este método permitirá diseñar y construir una cámara de simulación de ambientes seco, húmedo y lluvioso, para probar la rigidez dieléctrica de los aisladores en líneas de distribución y transmisión, con resultados que permitirán ver el comportamiento de dichos aisladores ante diferentes tipos de climas y así deducir un diseño óptimo en el implemento de estos en el sistema eléctrico.

3.3 Tipo de Investigación

3.3.1 Investigación cuantitativa

Al utilizar un método cuantitativo el cual permite la recolección de datos para la posterior verificación de la hipótesis, mediante el sustento en tablas estadísticas, curvas y modelos de comportamiento de variables preestablecidas que permitirán la demostración de teorías, se utilizan resultados reales al proceso de distribución eléctrica mediante la simulación de ambientes climáticos que permiten su verificación y observación determinado así el comportamiento de los aisladores frente a estos ambientes críticos y permitiendo un aprendizaje al diseño de estos en su implementación.

3.4 Población

La población es considerada todo conjunto de personas u objetos con características en común que se requiera conocer en una investigación, por lo que en

los sistemas eléctricos de potencia tanto en distribución y transmisión y para este proyecto se considera a todos los distintos aisladores.

Tabla 5.
Corriente de fuga de la contaminación ambiental.

| Sistema | Generación | Transmisión | | Distribución | |
|-----------------|---------------|---------------|-------------|--------------|---------------|
| Aislador | Rígido | Rígidos | Suspensión | Rígidos | Suspensión |
| Material | • Porcelana | • Porcelana | • Porcelana | • Porcelana | • Porcelana |
| | • Poliméricos | • Poliméricos | • Vidrio | | • Vidrio |
| | | | | | • Poliméricos |

Fuente: (García Meythaler, 2019)

En la Tabla 5 se especifica los diez tipos de aisladores los cuales se subdividen de acuerdo a sus características en material y función.

3.5 Muestra

Es el subconjunto que representa con la mayor de las características que se requiera en base a la población elegida, esta muestra utiliza distintos tipos de muestreo que ayudan a su selección.

Para esta investigación se cuenta con una muestra de los aisladores tanto de porcelana como polimérico y son:

- Porcelana: Tipo Pin Sencillo GAMMA CORONA ANSI-4, NBA 95Kv, 13 Kn.

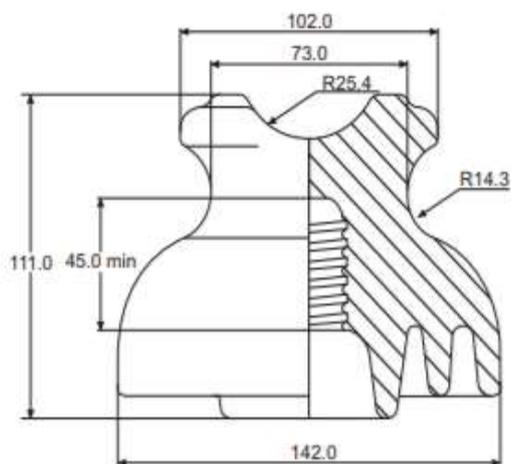


Figura 31. Aislador tipo PIN de Porcelana ANSI 55-4.

- Polimérico: Suspensión Clevis-Lengüeta, GAMMA ANSI C29.5 SML 70Kn, NBA 140Kv.

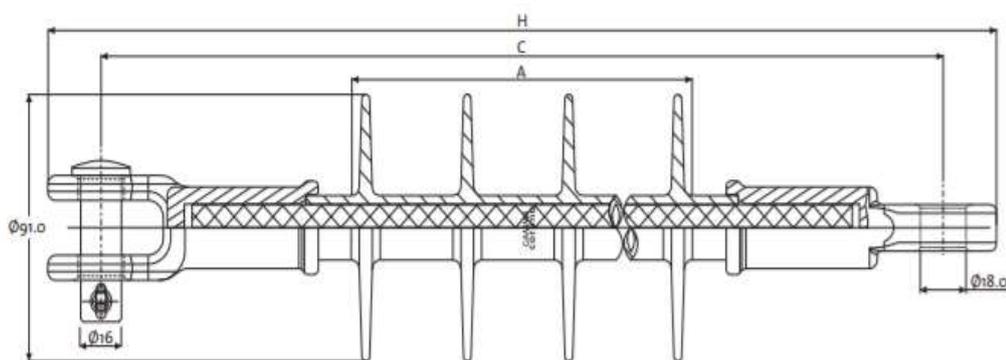


Figura 32. Aislador de Suspensión polimérico ANSI C29.5.

3.6 Instrumentos

Para desarrollar esta investigación se debe realizar la construcción de la misma por lo que se cuenta con los siguientes elementos en la Tabla 6.

Tabla 6

Instrumentos a utilizar en cámara de simulación climática.

| Elemento | Cantidad |
|---------------------------------------|-----------------|
| Estructura | 1 |
| KIT Hidroneumático | 1 |
| Microcontrolador MEGA 2560 | 1 |
| Sistema de nebulización | 1 |
| Sistema humidificador | 1 |
| Cámara de vidrio (Blindado) | 1 |
| SENSORES humedad y temperatura | 1 |
| Resistencias | 4 |
| Ventilador BLOWER | 1 |
| Cableado | ----- |
| HI-POT | 1 |

CAPÍTULO IV

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 Análisis de la determinación de Cadena de Aisladores

Para (García Meythaler, 2019) se desarrolla un cálculo en el cual interfieren tanto el nivel del mar y la temperatura a la cual el aislador está en operación y se empieza con la ecuación:

$$n_a = V_{ff} * \frac{D_f}{d_f}$$

En el caso de nuestra cámara de simulación climática y con el HIT-POT 120 KV DC el valor máximo de prueba es de 69 Kv, la distancia de fuga se puede mirar la Tabla 1. Y como el aislador se encuentra a diferentes distancias del nivel del mar se obtiene una corrección de este valor de esta forma:

$$D_{fc} = \frac{D_f}{\sqrt{\delta}} \left(\frac{mm}{Kv} \right)$$

$$\delta = \frac{3.86 + b}{273 + t}$$

Por lo que mediante remplazos matemáticos obtenemos una formula total que permite determinar el número de aisladores a utilizar mediante las Normas IEC e IEEE:

$$N_a = 1.1 * 69Kv * \frac{\frac{D_f}{\sqrt{0.9295}}}{430}$$

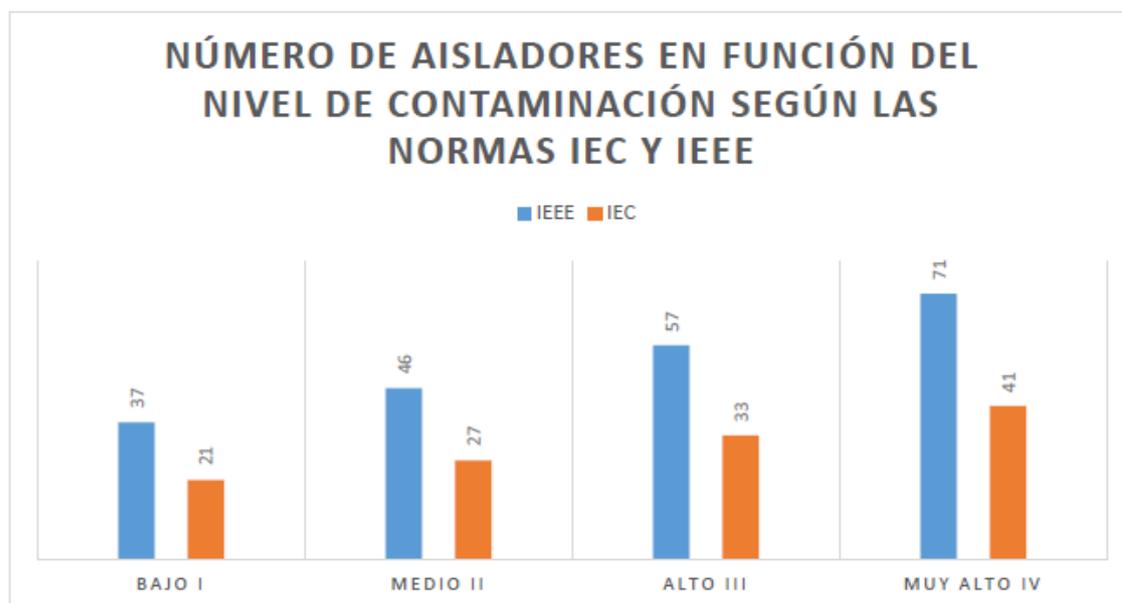


Figura 33. *Numero de aisladores mediante distancias de fuga en normas IEC e IEEE.*

Fuente: (García Meythaler, 2019)

4.2 Análisis de Voltaje de falla a frecuencia Industrial en ambientes secos sin contaminación

En el tema investigativo de (Chachalo, 2018) se realizaron pruebas de voltaje de falla a un tipo de frecuencia industrial en donde la norma ANSI/NEMA C29.1, especifica los valores corregidos en varios ambientes en este caso el ambiente seco el cual interfiere en la operación del aislador distintos valores de voltaje, de estas manera se prueba que los aisladores cumplen con las especificaciones técnicas en las condiciones atmosféricas que en el laboratorio de la Escuela Politécnica Nacional genero para estas pruebas. En la Figura 34 se muestra los resultados corregidos mediante la utilización de dicha cámara.

| PRUEBA | VALOR MEDIDO (kV) | VALOR PROMEDIO (kV) | VALOR ESPECIFICADO CORREGIDO (kV) | RESULTADO |
|------------------------------|-------------------|---------------------|-----------------------------------|---|
| AISLADOR DE PORCELANA | | | | |
| 1 | 76 | 75 | 59.7 | Cumple con las especificaciones de voltaje de falla |
| 2 | 77 | | | |
| 3 | 73 | | | |
| 4 | 74 | | | |
| 5 | 75 | | | |
| AISLADOR DE VIDRIO | | | | |
| 1 | 66 | 66 | 59.7 | Cumple con las especificaciones de voltaje de falla |
| 2 | 68 | | | |
| 3 | 65 | | | |
| 4 | 67 | | | |
| 5 | 64 | | | |

Figura 34. Valores de falla en ambiente seco de dos tipos de aisladores.

Fuente: (Chachalo, 2018)

4.3 Análisis de Voltaje de falla a frecuencia Industrial en ambientes húmedos sin contaminación

Para (Chachalo, 2018) la cámara de ambientes atmosférico en el aspecto atmosférico de tipo húmedo también puede generar el factor de correjimiento en voltajes de falla como se puede observar en la Figura 35.

| PRUEBA | VALOR MEDIDO (kV) | VALOR PROMEDIO (kV) | VALOR ESPECIFICADO CORREGIDO (kV) | RESULTADO |
|------------------------------|-------------------|---------------------|-----------------------------------|---|
| AISLADOR DE PORCELANA | | | | |
| 1 | 44 | 43 | 36 | Cumple con las especificaciones mínimas |
| 2 | 45 | | | |
| 3 | 41 | | | |
| 4 | 42 | | | |
| 5 | 43 | | | |
| AISLADOR DE VIDRIO | | | | |
| 1 | 40 | 40 | 36 | Cumple con las especificaciones mínimas |
| 2 | 42 | | | |
| 3 | 49 | | | |
| 4 | 41 | | | |
| 5 | 48 | | | |

Figura 35. Valores de falla en ambiente húmedo de dos tipos de aisladores.

Fuente: (Chachalo, 2018)

4.4 Análisis de la pérdida Dieléctrica en ambientes secos y húmedos

Además del análisis de voltajes de falla en los aisladores también se presentan las pérdidas en el aspecto dieléctrico del aislador como lo analiza (Chachalo, 2018), ya que el factor de pérdida dieléctrica $\tan \delta$ debería permanecer constante a pesar del aumento y disminución de voltaje o los distintos ambientes al que el aislador este sometido. El δ dependerá en gran medida del material que el aislador este conformado y su constancia mostraran la calidad el mismo.

Para las pruebas de (Chachalo, 2018) en ambientes seco con material de porcelana se obtuvo un ángulo δ que varía de 13° , con lo que $\tan \delta$ es igual a 0,23, esto muestra que el factor de pérdida dieléctrica en seco y sin contaminación permanece constante a pesar del voltaje aplicado como se puede observar en la Figura 36.

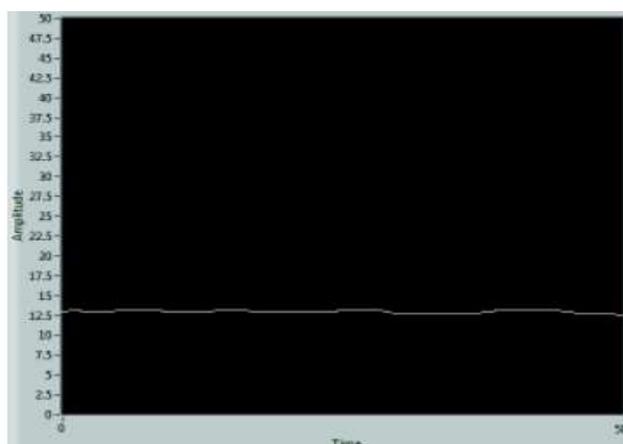


Figura 36. *Medición del ángulo de pérdida dieléctrica en un aislador de porcelana en ambientes secos.*

Fuente: (Chachalo, 2018)

Para el ambiente húmedo (Chachalo, 2018) analiza que el aislador ya no se encuentra en un sistema lineal esto puede alterar su calidad dieléctrica ya que en estas condiciones el factor de pérdida dieléctrico no solo dependerá del material del

que este hecho sino de las características de humedad y lluvia al que esté sometido. Las gráficas del comportamiento del ángulo de pérdida dieléctrica en ambiente húmedo lluvioso se muestran en la Figura 36.

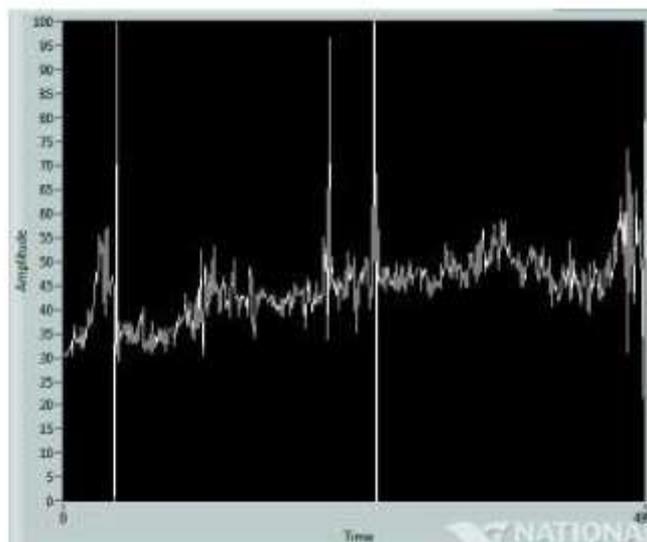


Figura 37. *Medición del ángulo de pérdida dieléctrica en un aislador de porcelana en ambientes húmedos aun voltaje de 25Kv.*

Fuente: (Chachalo, 2018)

A pesar que los aisladores están diseñados para soportar estos ambientes de lluvia y humedad, la calidad de aislamiento se ve afectada en cierta medida, por lo que se aprecian las oscilaciones en la Figura 36 y por ende su ángulo de pérdida dieléctrica.

4.5 Análisis del modelamiento Computacional de la Distribución de Voltaje mediante el Software FEMM

En el análisis de (García Meythaler, 2019) el modelamiento que se genera está enfocado a la contaminación que afecta a los aisladores más específicamente la

ceniza volcánica y para valores de líneas de distribución eléctrica de hasta 500KV lo cual nos indica los siguientes resultados.

4.5.1 Análisis de la influencia de la contaminación ambiental en la corriente de fuga.

Se muestra graficas que corresponde a la densidad de voltaje en el aislador contaminado de 1mm hasta 6mm de ceniza volcánica en la parte superior e inferior. Desde la parte inferior el color rosa representa el 100% de voltaje que soporta el 70Kv, seguido por una gama de colores más y más tenues hasta los 0Kv. (García Meythaler, 2019)

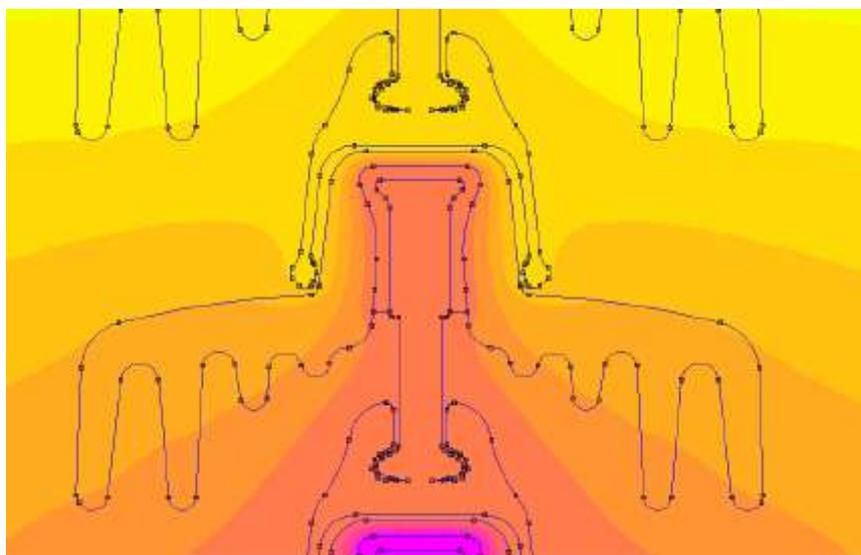


Figura 38. Densidad de Voltaje en un aislador.
Fuente: (García Meythaler, 2019)

Mediante el software en el que se aprecia la densidad de voltaje en la estructura del aislador, (García Meythaler, 2019) desarrolla curvas con 5 casos de contaminación en los que interfiere el ambiente seco, húmedo y lluvioso y se distingue un aumento considerable de corriente de fuga en los casos más fuertes pero especialmente cuando existe humedad y lluvia, como se puede observar en la Figura 39.

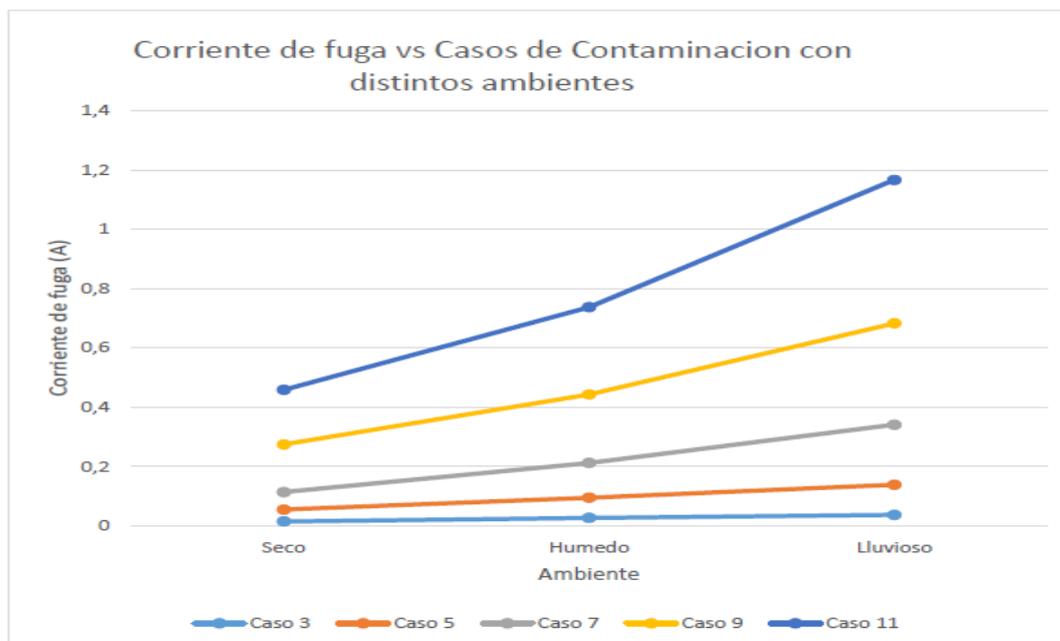


Figura 39. Curva de corriente de fuga vs Ambiente en función de contaminación.
Fuente: (García Meythaler, 2019)

Mediante los antecedentes investigativos que se obtuvo y sus análisis se rescatan los valores de pérdida dieléctrica y el diseño de cámaras de simulación climática para aisladores pero en el caso de (Chachalo, 2018), las pruebas son muy generales al no tener valor de temperatura ni % de humedad y precipitaciones a las que los aisladores están sometidos, además en el caso de pruebas de contaminación se enfocan a la contaminación con ceniza volcánica teniendo en cuenta que los aisladores de líneas de transmisión no solo son ubicados en estos sectores sino en otros que también pueden ser afectados. En el caso de (García Meythaler, 2019) las simulaciones matemáticas en los softwares de Matlab y FEMM son de forma virtual o teórica por lo que se necesita una prueba práctica para validar los valores obtenidos. En todo caso la cámara que se pretende diseñar en el Laboratorio de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga proyecta comprobar los resultados obtenidos de forma real de los antecedentes investigativos.

CAPÍTULO V

5. PROPUESTA

5.1 Propuesta

En este capítulo se presenta la siguiente propuesta que está relacionada con la simulación de ambientes húmedos, secos y lluviosos los cuales afectan en la rigidez dieléctrica de un aislador, mediante la corriente de fuga genera el apareamiento de bandas secas y la ionización del aire que les rodea, sin importar del material que estén conformados ya sea porcelana o polimérico, por lo que la cámara que se propone será capaz de presentar en forma directa el fenómeno del “flameo” en el aislador siendo sometido a los ambientes climáticos que más efecto causan y comparando su comportamiento con resultados con el Software FEMM que simula de forma virtual estos escenarios.

5.2 Objetivos de la Propuesta

- Investigar los ambientes a los cuales un aislador eléctrico está sometido en líneas de distribución eléctrica.
- Investigar la construcción de cámaras de recreación de condiciones ambientales.
- Diseño y construcción de la parte mecánica de la cámara de ensayos climáticos, de forma que recree los ambientes como lluvia, humedad y temperaturas de condiciones secas, permitiendo así observar el comportamiento de su rigidez dieléctrica ante estas circunstancias.

- Realizar pruebas de funcionamiento de disrupción dieléctrica en los aisladores de suspensión en la cámara de recreación de condiciones ambientales.
- Realizar un manual de puesta en marcha de la cámara así como la guía respectiva de práctica.

5.3 Justificación de la Propuesta

La cámara ah implementar en el Laboratorio de ALTO VOLTAJE de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga pretende determinar y representar los valores y características con los que los aisladores ya sea de porcelana o polímero los efectos de los ambientes climáticos que aun aislador interfieren, pierden para su operación eléctrica por efecto de aumento de la corriente de fuga en la formación de bandas secas, de forma práctica y académica.

5.4 Análisis y fundamentación de la Propuesta

5.4.1 Cámara de simulación climática.

Se diseñó y construyó en el Laboratorio de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga una cámara de simulación climática capaz de escenificar ambientes de humedad como niebla y lluvia y diversos ambientes secos la cual cumple con las especificaciones dadas en la norma (IEC60507, 2002), como se observa en la Figura 40.



Figura 40. *Cámara de simulación climática en ambientes seco, húmedo y lluvioso.*

a. Simulación de cargas en la estructura de la cámara

El diseño de la cámara de simulación climática empieza con la estructura, por lo que en la parte posterior se ubicará la cámara de vidrio aislado conjuntamente con el aislador y en la parte inferior se ubicara la estructura que contiene todo el sistema electromecánico y soportará el peso de la cámara como se observa en la Figura 39 por lo que se desarrolla un análisis de carga de la estructura estática (inferior), de acuerdo a la norma (IEC60815-1, 2002), el peso de la cámara de vidrio donde se realizara la simulación climática más el peso del aislador en promedio nos da 35 lb por lo que en fuerza obtenemos 154 N.

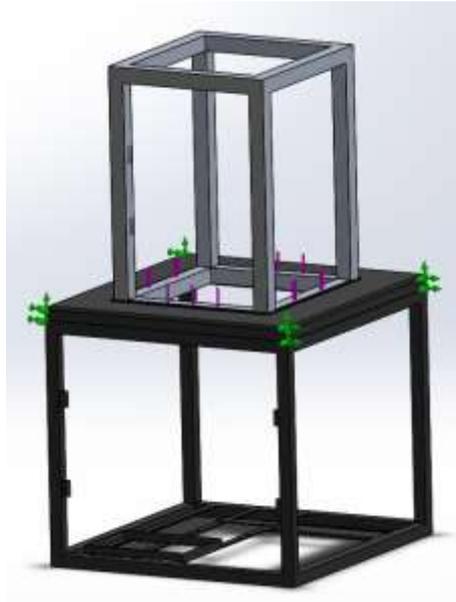


Figura 41. Estructura superior (cámara de vidrio), estructura inferior para análisis de cargas.

El análisis estructural modelo que se aplico es el de Von Mises es cual nos muestra un tensión de distorsión que se le aplica a la estructura estática donde nos muestra en magnitud cuanto este se deforma al aplicar la fuerza y como se observa en la Figura 40, la estructura inferior ante el peso de 154 N de la cámara más el aislador no muestra distorsión alguna según los colores representativos del software ya que al tener un color azul demuestra que la estructura soporta de forma correcta esta tensión.

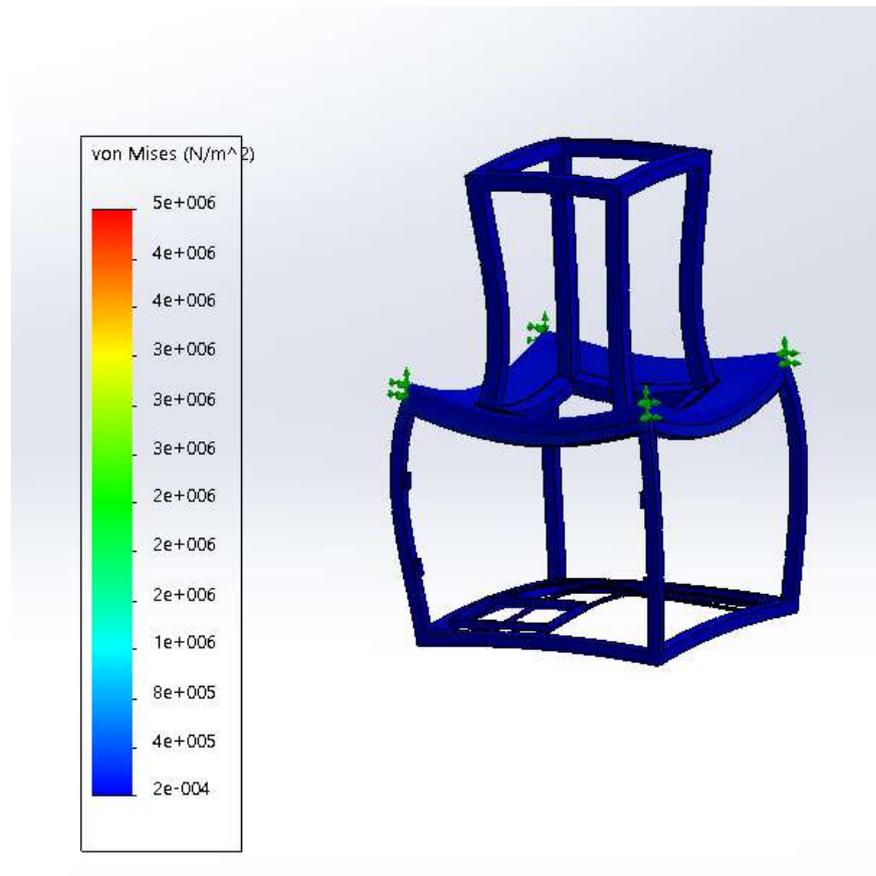


Figura 42. *Análisis de Cargas según Von Mises en la estructura de la cámara.*

Además se obtuvo el desplazamiento de las cargas en toda la estructura mostrándose las partes de mayor tensión de acuerdo a la escala de colores como se muestra en la Figura 42. Dándonos a conocer de esta manera el manejo y distribución del aislador en la cámara para una manipulación de la misma con mayor confianza y seguridad.

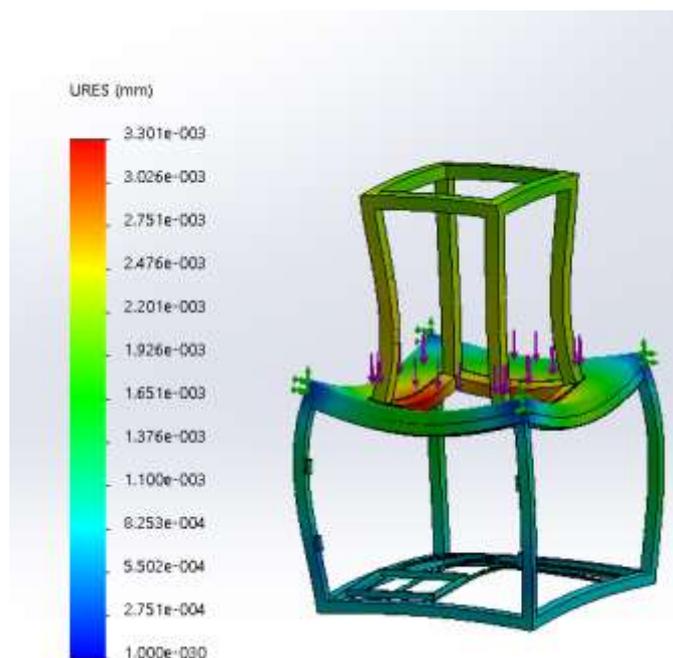


Figura 43. Estructura superior (cámara de vidrio), estructura inferior para distribución de cargas.

b. Sistema de generación de humedad

La cámara cuenta con un sistema de humidificación artificial con un porcentaje de humedad relativa del 40-95% de humedad relativa extendiéndose en la cámara y teniendo contacto con los aisladores presentes, está ubicado en la zona posterior de la cámara y su estructura en la parte interior de la mesa que soporta a la cámara de vidrio la cual hace realidad la simulación de neblina.

c. Sistema de generación de lluvia

La cámara de simulación climática que se diseñó y construyó en el Laboratorio de Alto Voltaje, cuenta con un sistema hidroneumático capaz de dar una presión de aire de 55KPa, que con la coordinación de un sistema de riego por nebulización se cuenta

con 4 aspersores de 1mm de diámetro distribuidos cuadrangularmente en la parte posterior de la cámara de vidrio.

El agua y el aire que son transportados mediante mangueras conectadas con los aspersores entre sí (vea la Figura 44), de esta manera se generan la pulverización, lo cual permite mediante su controlador generar desde paramo tenue hasta una lluvia fuerte en lapsos de tiempo de encendido y apagado según lo programe el operador.



Figura 44. Sistema de generación de lluvia.

Fuente: (Chachalo, 2018)

Para las pruebas a efectuarse en la presente cámara se recrea las condiciones de lluvia ligera (paramo) de una precipitación desde 1mm/h hasta 8mm/h. Este proceso hace posible una absorción de humedad en el aislador de una manera rápida y eficaz para que las pruebas se hagan de forma inmediata de lo contrario el proceso tomaría bastante tiempo hasta su completa absorción y complicaría su análisis.

El aire a presión que se genera del sistema hidroneumático para pulverizar el agua es obtenido a través de una bomba de $\frac{3}{4}$ HP, con un tanque de 40L dando una presión de 60PSI, con una entrega de 52 L/m. Esta bomba es capaz de mantener un flujo

constante y uniforme debido a su controlador automático lo cual es suficiente para cada sesión de pruebas.

d. Sistema de generación de Ambiente Seco.

Para controlar la variable de temperatura dependiendo de la condición en la que se encuentre el aislador, la cámara de simulación climática del Laboratorio de Alto Voltaje de la Universidad ESPE sede Latacunga, dispone de 2 resistencias de 750 W, que al conectarse en serie a la red de 127 V se genera un calor de hasta 50°C, junto con un ventilador industrial (Blower) de 0.1HP, hace posible mediante la conexión de una tubería de acero transportar el calor desde la cámara de las resistencias hasta la cámara de vidrio.

- *Simulación de Flujo de aire caliente en la cámara realizada en Solid Works*

Para una experiencia y mejoramiento de la capacidad de simulación en la cámara de ensayos climáticos se diseñó en el software Solid Works con las medidas representativas las cuales se observara el flujo de aire caliente a ciertas temperaturas y así obtener resultados más reales del ambiente al cual se enfrenta en operación los aisladores eléctricos, esta simulación se la observa en la Figura 45.

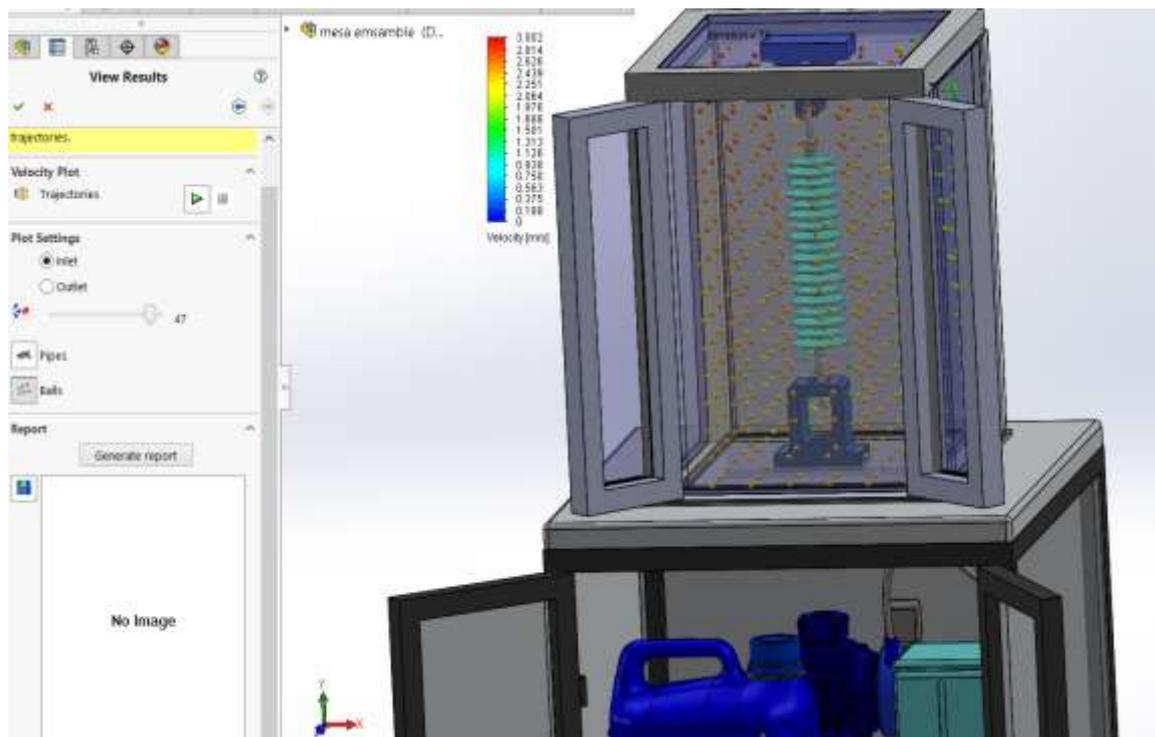


Figura 45. Simulación en Solid Works de implementación de aire caliente en la cámara.

La simulación se realizó con las condiciones atmosféricas estándar a las cuales se realizan las pruebas descritas en la norma (ANSI/IEEE, 4-1978) que son:

- Temperatura: $T^{\circ} = 20^{\circ}C$
- Presión: $P_o = 101.3 \text{ KPa (760 mmHg)}$

Obtenido las velocidades y el aumento de las temperaturas de la Figura 46 en el software a las que se enfrentan los aisladores en esa temperatura y presión por lo cual esas ayudaran a la simulación en condiciones físicamente reales.

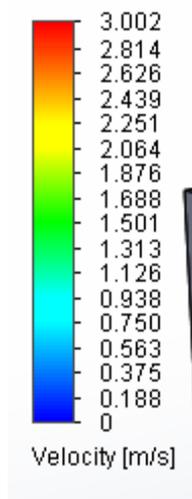


Figura 46. Velocidad del aire caliente en la cámara de simulación climática.

e. Sistema de Generación Eléctrica.

En el Laboratorio de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga se dispone de un sistema de generación de voltaje de hasta 120 Kv (HI-POT 120KV) como se analizó en el numeral 2.17.1 del capítulo 2 como se observa en la Figura 47.

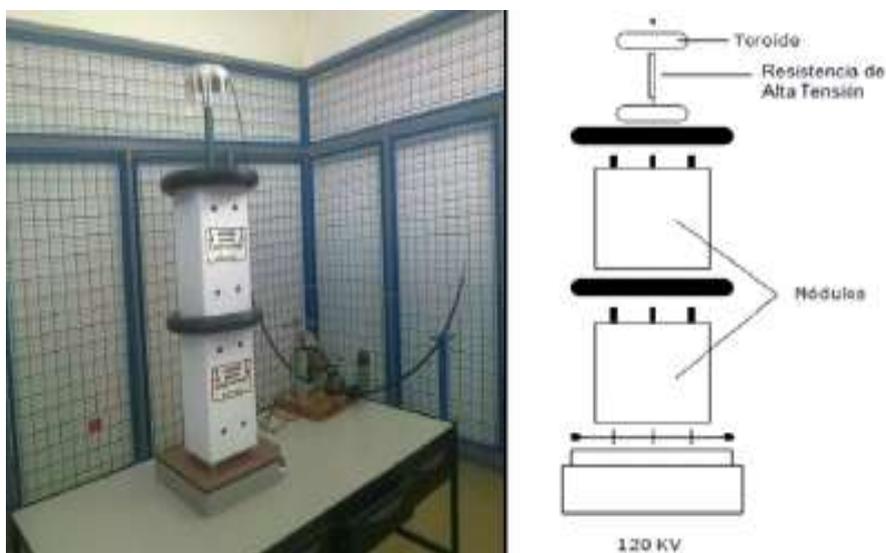


Figura 47. Sistema de generación de 120Kv DC.

Fuente: (Lasluisa, 2014)

✓ Sistema de medición de HIT-POT 120Kv

El HI – POT de 120 Kv mide una corriente compuesta como se observa en la Figura 34. Y se dispone de un proceso descrito así:

- La corriente capacitiva (I_c) carga al capacitor formado entre el conductor y la tierra, de esta manera es alta a la energización y disminuye exponencialmente.
- La polarización del aislamiento con la masa del conductor genera una carga de absorción que llega hacer la corriente de absorción (I_a), que es alta a la energización pero decrece lentamente, y en 10 minutos pro medialmente se estabiliza.
- Existe también la corriente de fuga (I_f) que es permanente indica el estado del aislador.
- Para obtener la corriente que mide el HIT-POT total se suma:

$$I_T = (I_c) + (I_a) + (I_f)$$

El esquema eléctrico que se describe anteriormente se lo gráfica de la siguiente forma en la Figura 49.



Figura 48. Tablero de control de HI-POT 120Kv.
Fuente: (Lasluisa, 2014)

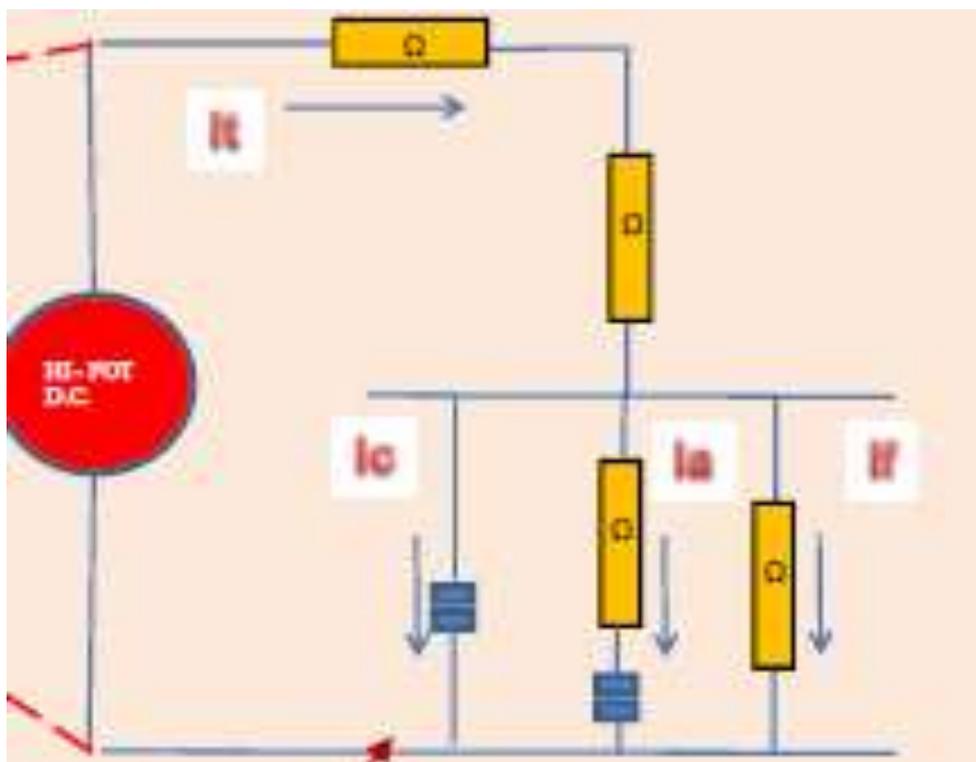


Figura 49. Corrientes generadas en el HI-POT 120Kv.
Fuente: (Lasluisa, 2014)

f. Sistema de Control de la Cámara de simulación climática

El control de cada una de los procesos de simulación climática (calor, humedad, lluvia) se lo realiza mediante la programación de un controlador ARDUINO MEGA 2560 (vea la Figura 26) el cual controla la temperatura que se presenta en la cámara y presenta el valor de humedad que contiene la misma, además controla el proceso de tiempo de encendido de la niebla y la lluvia mediante la activación de módulos de relees conectados en forma secuencial utilizando para la visualización una pantalla shield monocromática con teclado de 4x4 incluidos en la mismas para su adquisición de parámetros necesarios y se lo realiza mediante el presente código:

1. Iniciación de procesos:

```

#include <Thermocouple.h>
#include <MAX6675_Thermocouple.h>
#include <LiquidCrystal.h>
#include "DHT.h"

#define SCK_PIN 21 //48
#define CS_PIN 20 //46
#define SO_PIN 19 //44

#define DHTPIN 34
#define DHTTYPE DHT11
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);

Thermocouple* thermocouple;

const int rs = 8, en = 9, d4 = 4, d5 = 5, d6 =
6, d7 = 7;
LiquidCrystal lcd(rs, en, d4, d5, d6, d7);
int adc_value=0;
boolean right = 0, butt01 = 0,
    up = 0, butt02 = 0,
    down = 0, butt03 = 0,
    left = 0, butt04 = 0,
    select = 0, butt05 = 0;
double temperatura;
float humedad;
int sptemp=50, sphum=0;

int tiempo1=0, spt1=1, seg1=60;
int tiempo2=0, spt2=1, seg2=60;
int desp=0;
int modo_config=0;
int rep=0;
uint8_t p1, p2, p3;
uint8_t verdad=0;
int aux1=0, aux2=0;
uint8_t
degree[8]={140,146,146,140,128,128,128,128
};

void setup()
{
    lcd.begin(16, 2);
    dht.begin();
    lcd.createChar(0, degree);
    thermocouple=new
MAX6675_Thermocouple(SCK_PIN, CS_PIN,
SO_PIN);
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print(" SELECCIONE ");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print(" EL ESCENARIO ");
    pinMode(14, INPUT_PULLUP);
    pinMode(15, INPUT_PULLUP);
    pinMode(16, INPUT_PULLUP);

```

```

pinMode(22, OUTPUT);
pinMode(23, OUTPUT);
pinMode(24, OUTPUT);
pinMode(25, OUTPUT);
pinMode(26, OUTPUT);
pinMode(28, OUTPUT);
pinMode(29, OUTPUT);
pinMode(50, OUTPUT); //VCC
pinMode(52, OUTPUT); //GND
digitalWrite(22, HIGH);

digitalWrite(23, HIGH);
digitalWrite(24, HIGH);
digitalWrite(25, HIGH);
digitalWrite(26, HIGH);
digitalWrite(28, HIGH);
digitalWrite(29, HIGH);
digitalWrite(50, HIGH); //VCC
digitalWrite(52, HIGH); //GND
}

```

2. Configuración y activación de escenarios de escenarios mediante los relés (calor, humedad, lluvia).

```

void loop()
{
  keyboardRead();

  if(modo_config==1)
  {
    if(rep==0)
    {
      lcd.setCursor(0,0);
      lcd.print(" CONFIGURANDO ");
      lcd.setCursor(0,1);
      lcd.print(" PARAMETROS ");
      rep=1;
      _delay_ms(1500);
    }
    if(desp==0)
    {
      float h = dht.readHumidity();
      lcd.setCursor(0,0);
      lcd.print(" TEMPERATURA: ");
      lcd.setCursor(0,1);
      lcd.print(" ");
      if(sptemp<10) lcd.print("0");
      lcd.print(sptemp);
      lcd.print(" ");
      lcd.write((byte)0);
      lcd.print("C ");
    }

    if(desp==1)
    {
      lcd.setCursor(0,0);
      lcd.print("TIEMPO PROCESO1:");
      lcd.setCursor(0,1);
      lcd.print(" ");
    }

    if(desp==2)
    {
      lcd.setCursor(0,0);
      lcd.print("TIEMPO PROCESO2:");
      lcd.setCursor(0,1);
      lcd.print(" ");
      if(spt2<10) lcd.print("0");
      lcd.print(spt2);
      lcd.print(" min ");
    }

    if(desp==3)
    {
      humedad=dht.readHumidity();
      lcd.setCursor(0,0);
      lcd.print(" HUMEDAD: ");
      lcd.setCursor(0,1);
      lcd.print(" ");
      //if(sphum<10) lcd.print("0");
      lcd.print(humedad);
      lcd.print(" % ");
    }

    if(right==0x01)
    {
      desp++;
      if(desp>3) desp=0;
      right=0x00;
    }
  }
}

```

```

}
if(up==0x01)
{
  if(desp==0) sptemp++;
  if(desp==1) spt1++;
  if(desp==2) spt2++;
  if(desp==3) sphum++;
  if(sptemp>150) sptemp=150;
  if(sphum>100) sphum=100;
  if(spt1>59) spt1=59;
  if(spt2>59) spt2=59;
  up=0x00;
}

if(down==0x01)
{
  if(desp==0) sptemp--;
  if(desp==1) spt1--;

```

```

  if(desp==2) spt2--;
  if(desp==3) sphum--;
  if(sptemp<=0) sptemp=0;
  if(sphum<=0) sphum=0;
  if(spt1<0) spt1=0;
  if(spt2<0) spt2=0;
  down=0x00;
}

if(left==0x01)
{
  desp--;
  if(desp<0) desp=3;
  left=0x00;
}
}

```

3. Lectura de sensores

```

void escenario1()
{
  digitalWrite(22, LOW);
  digitalWrite(23, LOW);
  digitalWrite(26, HIGH);
  while(temperatura<sptemp)
  {
    temperatura=thermocouple->readCelsius();
    lectura_sensores();
  }
  /* lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print(" TEMPERATURA: ");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print(" ");
  if(temperatura<10) lcd.print("0");
  lcd.print(temperatura);
  lcd.print(" ");
  lcd.write((byte)0);
  lcd.print("C ");*/
  _delay_ms(500);
}
lectura_sensores();
/* lcd.setCursor(0,0);
lcd.print(" TEMPERATURA: ");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print(" ");
if(temperatura<10) lcd.print("0");
lcd.print(temperatura);

```

```

lcd.print(" ");
lcd.write((byte)0);
lcd.print("C ");*/
_delay_ms(500);
digitalWrite(22, HIGH);
digitalWrite(23, HIGH);
digitalWrite(26, LOW);
}

void escenario2()
{
  if(aux1==0) {tiempo1=spt1-1; aux1=1;}
  else tiempo1=spt1;
  digitalWrite(24, LOW);
  digitalWrite(28, HIGH);
  while(verdad==0)
  {
    _delay_ms(999);
    seg1--;
    if(seg1<0) {seg1=59; tiempo1--;}
  }
  /* lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("TIEMPO PROCESO1:");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print(" ");
  if(tiempo1<10) lcd.print("0");
  lcd.print(tiempo1);
  lcd.print(":");

```

```

if(seg1<10) lcd.print("0");
lcd.print(seg1);
lcd.print("  ");*/
lectura_sensores();
if(tiempo1==0 && seg1==0) verdad=1;
}
_delay_ms(500);
digitalWrite(24, HIGH);
digitalWrite(28, LOW);
verdad=0;
}

void escenario3()
{
if(aux2==0) {tiempo2=spt2-1; aux2=1;}
else tiempo2=spt2;
digitalWrite(25, LOW);
digitalWrite(29, HIGH);
while(verdad==0)
{
_delay_ms(999);
seg2--;
if(seg2<0) {seg2=59; tiempo2--;}
/* lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("TIEMPO PROCESO2:");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("  ");
if(tiempo2<10) lcd.print("0");
lcd.print(tiempo2);
lcd.print(":");
if(seg2<10) lcd.print("0");
lcd.print(seg2);
lcd.print("  ");*/
lectura_sensores();
if(tiempo2==0 && seg2==0) verdad=1;
}
_delay_ms(500);
digitalWrite(25, HIGH);
digitalWrite(29, LOW);
verdad=0;
}

```

g. Lectura de datos de temperatura y humedad

La cámara de simulación climática genera ambientes en los que la corrosión se hace visible, por lo que el controlador Arduino Mega 2560, es ubicado en la estructura inferior de toda la cámara donde no le afectan estos climas para su operación, pero los sensores obligatoriamente deben ir en el interior de esta por lo que se escoge sensores con características que permiten su conservación a pesar de la humedad y agua, con los que se tenga contacto tengan contacto.

- ✓ Temperatura: Para una observación y control de la temperatura al que se esté operando en la simulación climática se utilizó el sensor compatible con el controlador Arduino Mega 2560 que es un detector de temperatura por resistencia (RTD). Está fabricado de platino con una resistencia eléctrica de

100 Ω a una temperatura de 0°C, que con estas características es resistente al ambiente donde opera. (Labfacility, 2019).



Figura 50. Sensor de temperatura PT 100.
Fuente: (Labfacility, 2019)

- ✓ Humedad: Para la visualización de la humedad solo se acopla el sensor de Arduino DHT11, el cual integra un sensor capacitivo de humedad y un termistor para medir el aire circulante dándonos una lectura de humedad relativa mediante una señal digital en el pin de datos. El rango de medición de humedad es del 20-90% con una precisión del 5% RH en 1 seg. (Robotics, 2010)

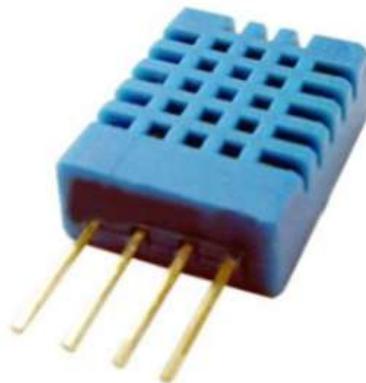


Figura 51. Sensor de humedad DHT11.
Fuente: (Labfacility, 2019)

5.4.2 Análisis de Conductividad (α) y Permeabilidad (ϵ) eléctrica en distintos ambientes climáticos

La conductividad y la permeabilidad son propiedades eléctricas que posee un material, estas influyen en la rigidez dieléctrica que este tiene, en el cual al verse afectado con ambientes climáticos como seco, lluvioso y húmedo, las propiedades ya mencionadas cambian una indistintamente de la otra dando como resultado una rigidez dieléctrica del material diferente en cada uno de estos climas.

Para realizar la comparación física mediante el Software FEMM, debemos determinar valores de acuerdo a la norma (IEC60507, 2002) de propiedades climáticas en ambientes seco (20°C) húmedo (36%) y lluvioso (0.1 a 40 mm/hr de precipitación y con agua de conductividad de aproximadamente 200 $\mu\text{S/cm}$) que se debe ubicar en las propiedades de los materiales a utilizar en el ambiente seco, tomando en cuenta las distintas temperaturas que serán sometidas con la Ec. 7. Del capítulo 2, por lo que en las Tablas 7.8.9. Se observa diferentes valores de conductividad en materiales cerámicos, polimérico y aire.

A. En ambiente seco

Tabla 7.
Conductividad en ambiente seco.

| $^{\circ}\text{C}$ | α (Cerámico Seco S/m) | α (Polimérico Seco S/m) | α (Aire Seco S/m) |
|--------------------|------------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| 20 | $5.330 * 10^{-9}$ | $2 * 10^{-9}$ | $1 * 10^{-14}$ |
| 25 | $5.946 * 10^{-9}$ | $2.2310 * 10^{-9}$ | $1.1155 * 10^{-14}$ |
| 30 | $6.584 * 10^{-9}$ | $2.4710 * 10^{-9}$ | $1.2353 * 10^{-14}$ |

B. En ambiente húmedo

Tabla 8.

Conductividad en ambiente húmedo.

| $^{\circ}\text{C}$ | α (Cerámico Húmedo S/m) | α (Polimérico Húmedo S/m) | α (Aire Húmedo S/m) |
|--------------------|--------------------------------|----------------------------------|----------------------------|
| 20 | $5.330 * 10^{-9}$ | $2 * 10^{-9}$ | $1.5 * 10^{-8}$ |
| 25 | $5.946 * 10^{-9}$ | $2.2310 * 10^{-9}$ | $1.673 * 10^{-14}$ |
| 30 | $6.584 * 10^{-9}$ | $2.4710 * 10^{-9}$ | $1.853 * 10^{-14}$ |

C. En ambiente lluvioso

Tabla 9.

Conductividad en ambiente lluvioso.

| $^{\circ}\text{C}$ | α (Cerámico Lluvioso S/m) | α (Polimérico Lluvioso S/m) | α (Aire Lluvioso S/m) |
|--------------------|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------|
| 20 | $5.330 * 10^{-9}$ | $2 * 10^{-9}$ | $1 * 10^{-14}$ |
| 25 | $5.946 * 10^{-9}$ | $2.2310 * 10^{-9}$ | $1.1155 * 10^{-14}$ |
| 30 | $6.584 * 10^{-9}$ | $2.4710 * 10^{-9}$ | $1.2353 * 10^{-14}$ |

5.4.3 Pruebas Físicas Iniciales

Mediante los procedimientos descritos en la norma (IEC60507, 2002) se realizan las pruebas en aisladores sin contaminación en ambientes seco y húmedo. Si dichas pruebas se desarrollan en condiciones atmosféricas estándar de referencia se obtienen resultados de forma directa.

Las condiciones atmosféricas estándar a las cuales se realizan las pruebas son descritas en la norma (IEC60507, 2002) que son:

- Presión: $P_o = 101.3 \text{ KPa}$ (760 mmHg)
- Humedad: $H_o = 9 \text{ g/m}^3$ (50 %) (IEC60507, 2002)

Hay que especificar que no se realizan factores de corrección debido al control de temperatura en el que se trabaja y conocimiento previo de humedad relativa en la que trabaja la cámara de simulación climática.

a. *Procedimiento de prueba física*

1. Una vez ya colocado el aislador cerámico en el soporte de la cámara de simulación climática, y conectado el mismo a los conductores que provienen del HIT-POT 120DC.
2. Se cierran todas las puertas de seguridad y se verifica la conexión a tierra de la jaula de pruebas eléctricas de alto voltaje
3. Para empezar a climatizar los valores de temperatura deseados se los realizan desde afuera de la jaula mediante el controlador de la cámara de simulación (para la manipulación del controlador de la cámara de simulación climática se debe revisar previamente la guía de operación se presenta en el Anexo...
4. Al momento de llegar a la temperatura deseada se inhabilita el controlador de la cámara de simulación y se enciende el HIT-POT 120DC, ya una vez encendido el generador de voltaje se realiza la prueba, incrementado el valor de voltaje en escala de 1000 voltios hasta llegar al valor máximo u observar y escuchar el flameo (ruptura de la rigidez dieléctrica).

b. *Pruebas físicas y virtuales en ambiente seco*

a) Aislador Cerámico Tipo Pin Sencillo GAMMA CORONA ANSI-4, NBA 95Kv, 13 Kn (sano en ambiente seco)

Las pruebas en físicas de este aislador se las realizaron de acuerdo las condiciones atmosféricas ya descritas anteriormente en la norma (ANSI/IEEE, 4-1978) y los valores de conductividad y permeabilidad calculados de acuerdo a la temperatura y la humedad presentes en las Tablas 7. 8. 9.

Para obtener los valores de intensidad de fuga, el cual permitirá observar la rotura de la rigidez dieléctrica de forma físicamente experimental se debe realizar el procedimiento de pruebas en físico descrito en el literal 5.4.3.1 de este capítulo , el valor de voltaje máximo aplicado al aislador es el doble del normal más 1000v por ser un prueba en corriente directa, en este caso el aislador cerámico tiene un voltaje típico de operación recomendado en su catálogo de 13 Kv, por lo que se aplicara un voltaje máximo de 27Kv DC. Como se puede observar en la Figura 52 (Chachalo, 2018)



Figura 52. Aislador cerámico Tipo Pin Sencillo GAMMA CORONA ANSI-4, NBA 95Kv, 13 Kn ubicado para pruebas de simulación climática.

Las pruebas en ambiente seco para el aislador cerámico se las realiza en las temperaturas habituales del país en donde se encuentre, en el caso de Ecuador, las

temperaturas son de 20°C, 25°C y 30°C en la zona costa sierra y oriente. Ya realizados las pruebas en estas temperaturas se obtienen los valores de corriente de fuga y se los ubica en una gráfica de acuerdo a sus temperaturas y corriente observada en el amperímetro analógico y voltajes aplicados como se observa en Figura 53.

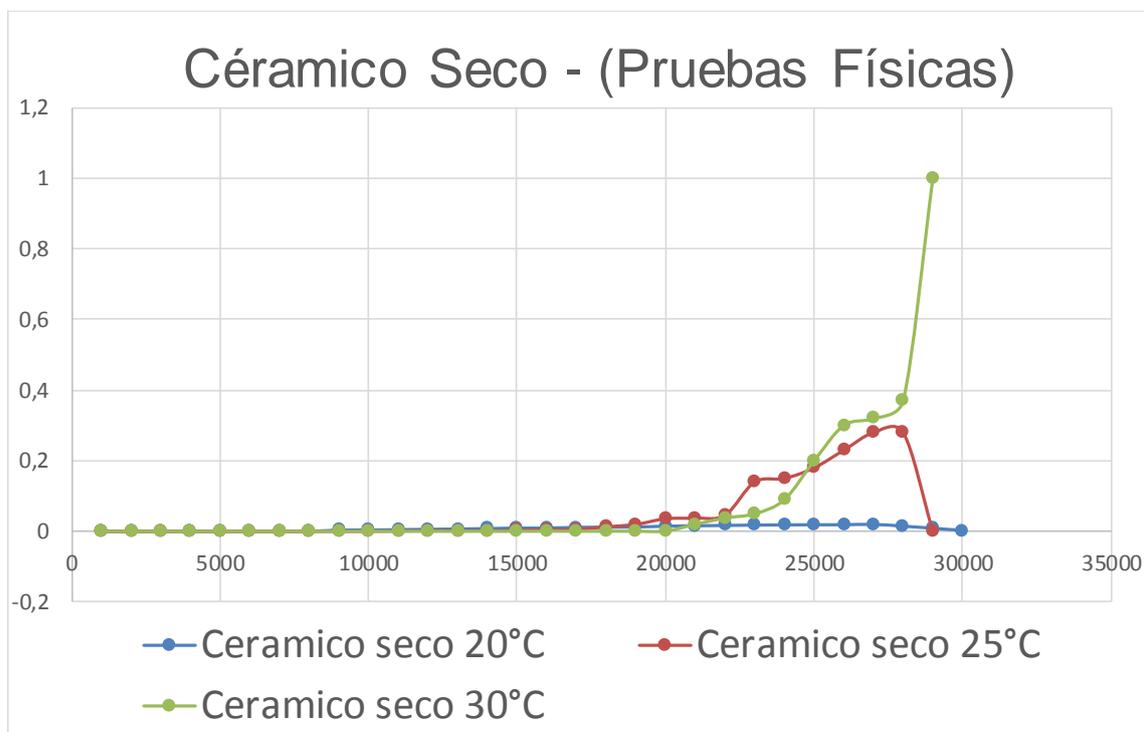


Figura 53. Valores de corriente de fuga en aislador cerámico, clima seco.

Estas pruebas de simulación climática en forma física se pueden comparar mediante el Software Finit Method Magnetics (FEMM) descrito en el literal 2.22 de este documento, claro está ubicando las características de conductividad y permeabilidad eléctrica que cada material que contiene el aislador y la atmosfera donde este se encuentre, como lo podemos ver en la Figura 54.

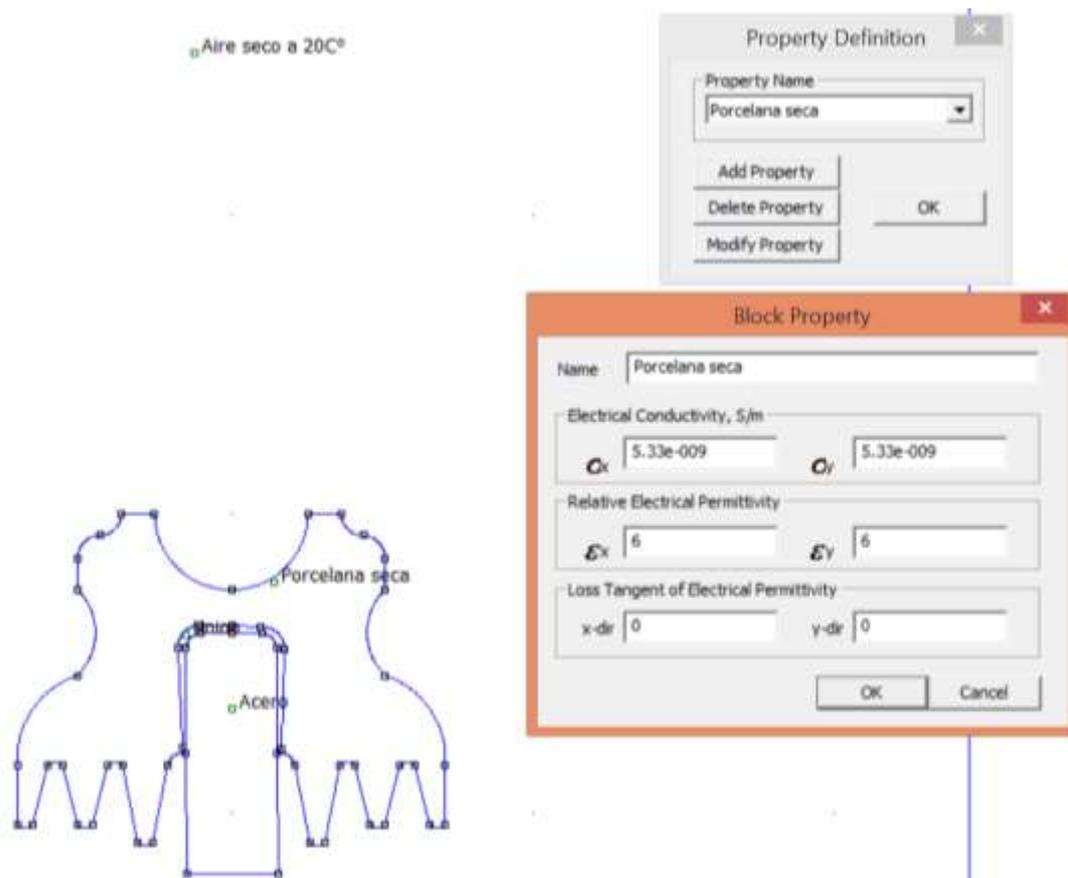


Figura 54. Ubicación de las propiedades de los materiales del aislador en el Software FEMM

Ya realizados los cambios respectivos en las propiedades de los materiales en ambiente seco el Software grafica el paso del voltaje aplicado en el aislador y calcula la corriente de fuga que emerge de esta simulación como se puede observar en las siguientes Figuras 55 y 56, para cada temperatura aplicada.

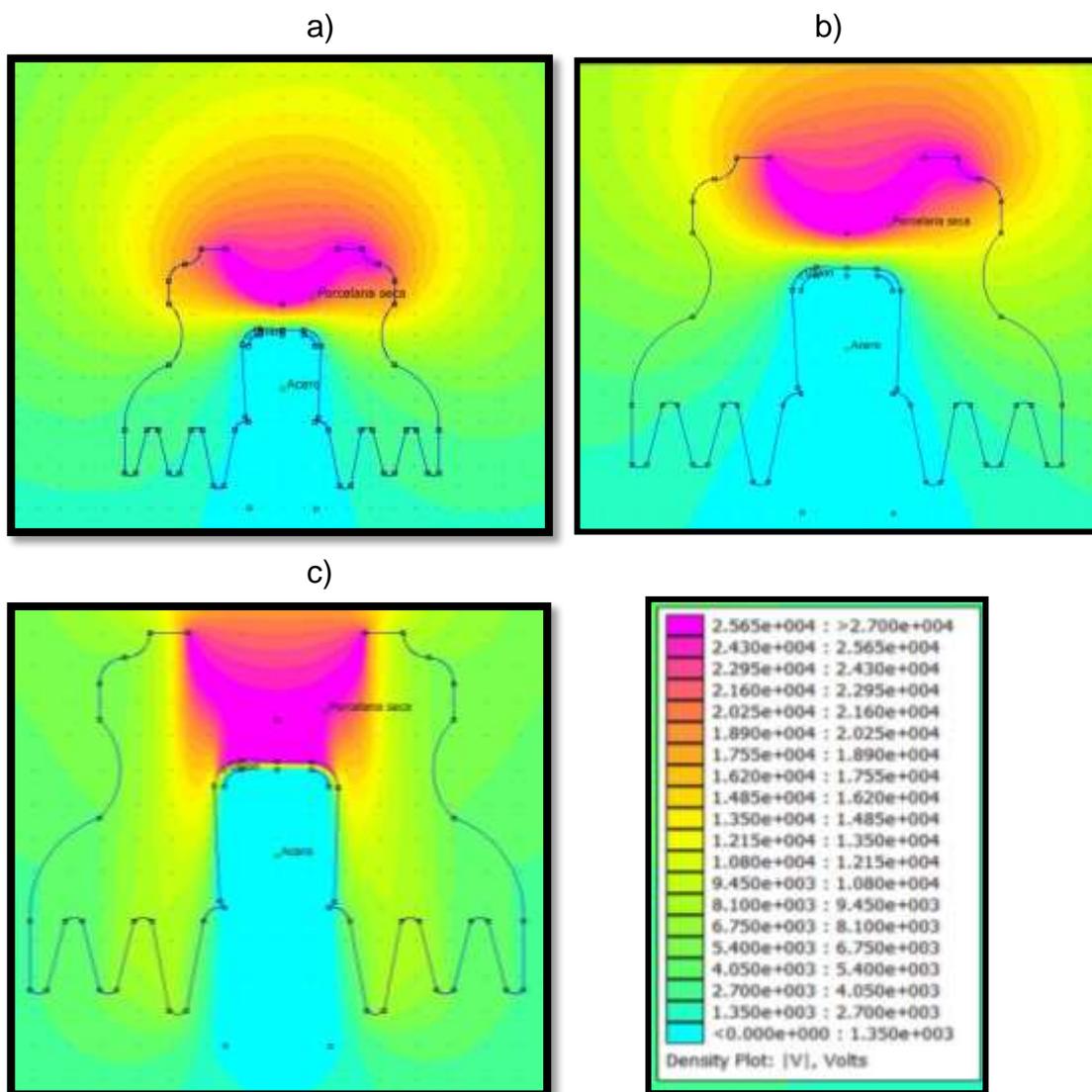
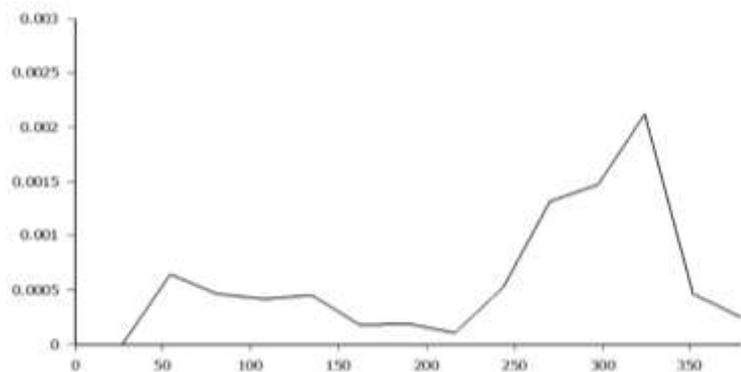


Figura 55. Simulación de voltaje aplicado al aislador tipo pin cerámico, a distintas temperaturas: a) 20°C, b) 25°C, c) 30°C



b) $T^\circ = 25^\circ C, I_f = 0.3 A/m$

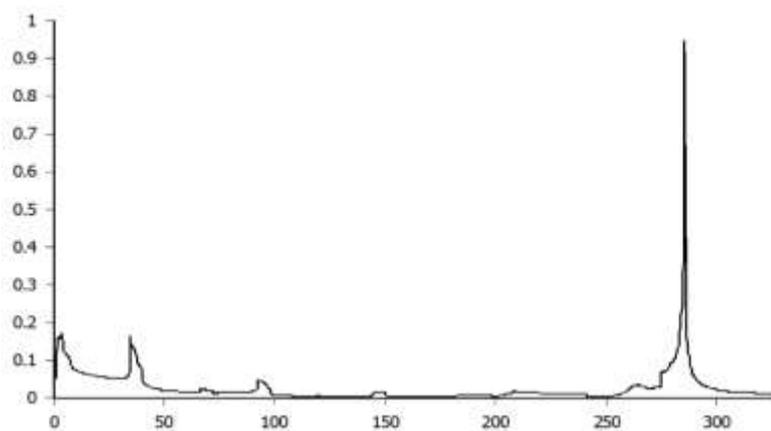
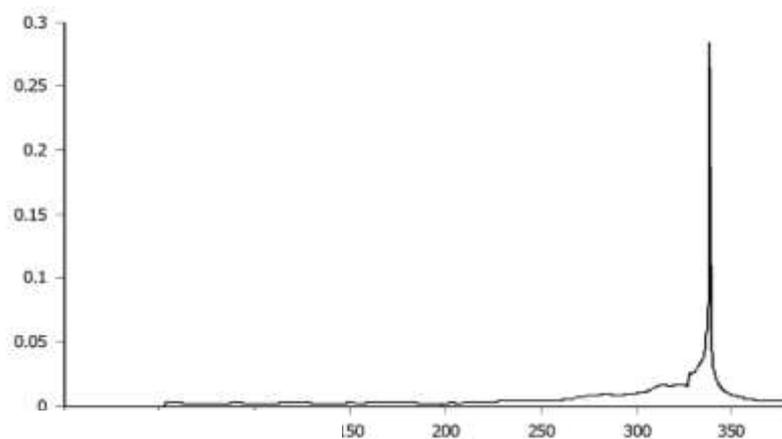


Figura 56. Generación de graficas de Corriente de fuga (I_f) en FEMM al aislador tipo pin cerámico, a distintas temperaturas: a) $20^\circ C$, b) $25^\circ C$, c) $30^\circ C$

Mediante la observación de las gráficas que genera el Software FEMM se puede observar que el incremento de corriente de fuga mostrado en la Figura 56 De acuerdo al cambio climático en el aspecto seco considerando la temperatura y relacionando con la Figura 55 que nos muestra la rigidez dieléctrica, el aumento de la temperatura si afecta el incremento de la corriente de fuga pero no de manera significativa y por ende la disminución de su rigidez sufre una pequeña disminución del material en este caso el cerámico.

b) Aislador Cerámico Tipo Pin Sencillo GAMMA CORONA ANSI-4, NBA 95Kv, 13 Kn (con falla en ambiente seco)

Las pruebas en físicas de este aislador se realizaron con las mismas especificaciones técnicas y procedimiento que en el literal a) ya que se dispone del mismo aislador pero con un falla en su estructura ya sea de un golpe donde se perdió un fragmento de material el cual nos mostrara el daño que provoca en la operación del mismo la falla se observa en la Figura 57.



Figura 57. Aislador cerámico Tipo Pin Sencillo GAMMA CORONA ANSI-4, NBA 95Kv, 13 Kn ubicado para pruebas de simulación climática con falla en su estructura.

Las pruebas en ambiente seco para el aislador cerámico con falla se las realiza en las temperaturas habituales del país en donde se encuentre, en el caso de Ecuador, las temperaturas son de 20°C, 25°C y 30°C en la zona costa sierra y oriente. Ya realizados las pruebas en estas temperaturas se obtienen los valores de corriente de fuga y se los ubica en una gráfica de acuerdo a sus temperaturas y corriente observada en el amperímetro analógico y voltajes aplicados como se observa en Figura 58.

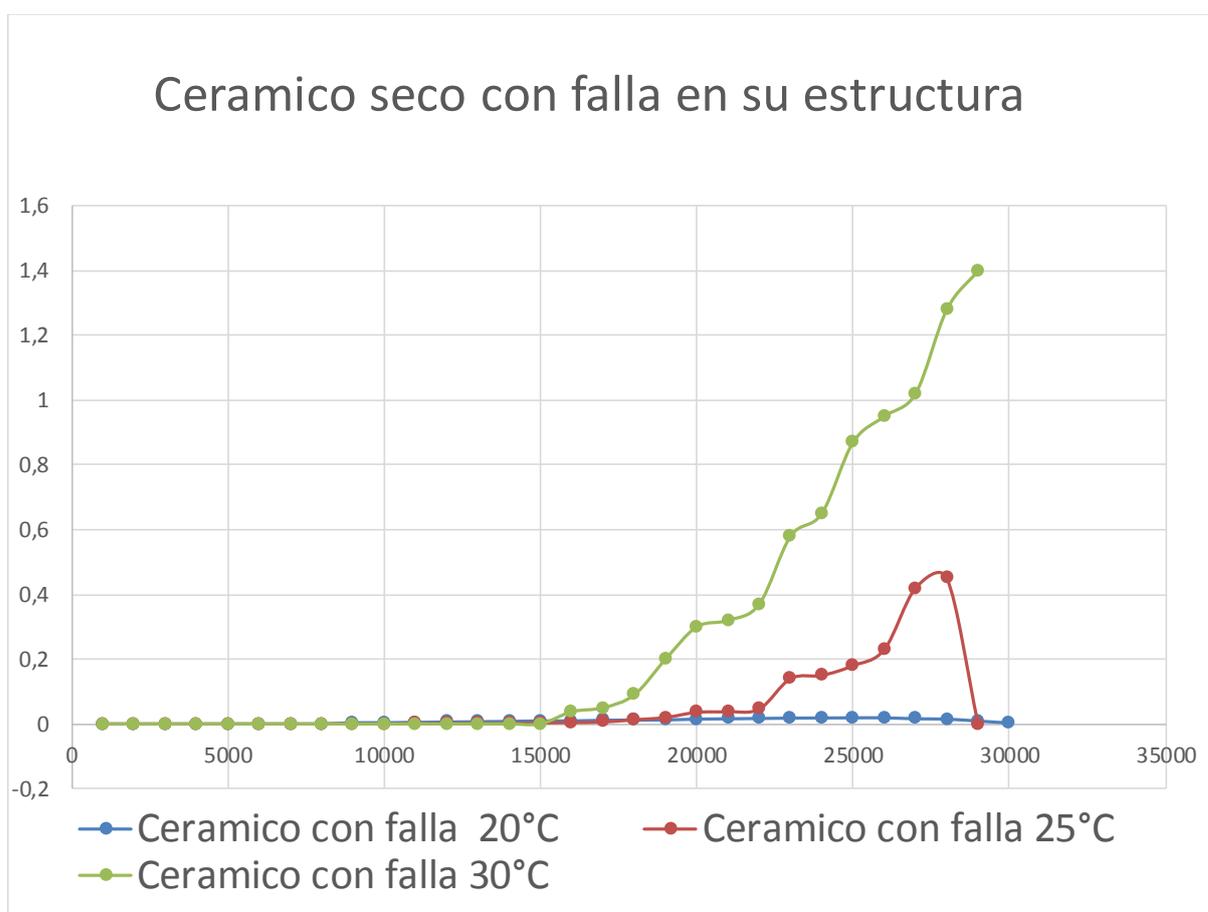


Figura 58. Valores de corriente de fuga en aislador cerámico con falla, clima seco.

Para la comparación del aislador cerámico sin falla estructural se realizan los cambios mediante el Software Finit Method Magnetics (FEMM) descrito en el literal 2.22 de este documento esta grafica con falla del aislador se observa en la Figura 59.

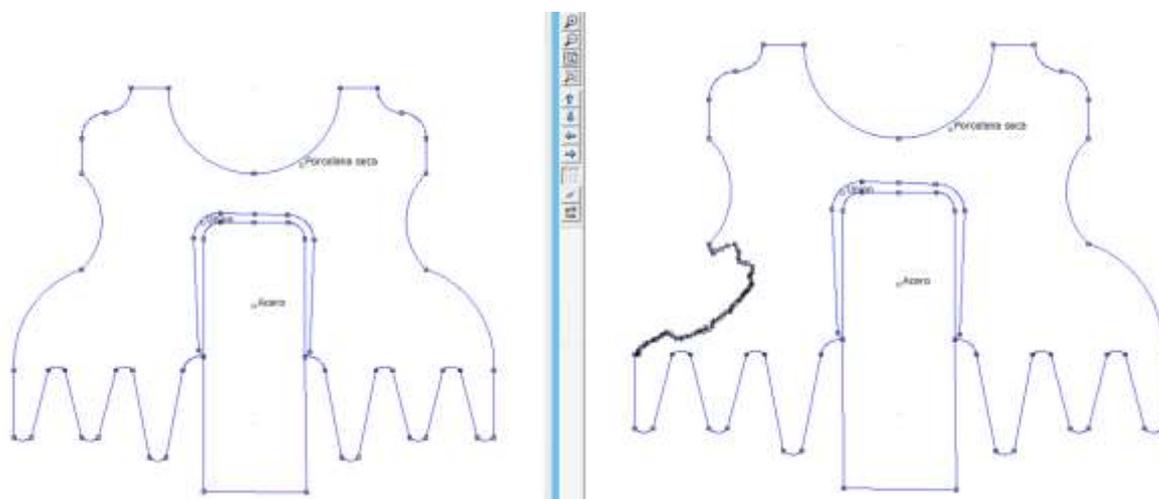


Figura 59. Graficacion de aisladores cerámicos con falla en su estructura Software FEMM

Ya realizados los cambios respectivos en las propiedades de los materiales en ambiente seco el Software grafica el paso del voltaje aplicado en el aislador y calcula la corriente de fuga que emerge de esta simulación como se puede observar en las siguientes Figuras 60 y 61, para cada temperatura aplicada.

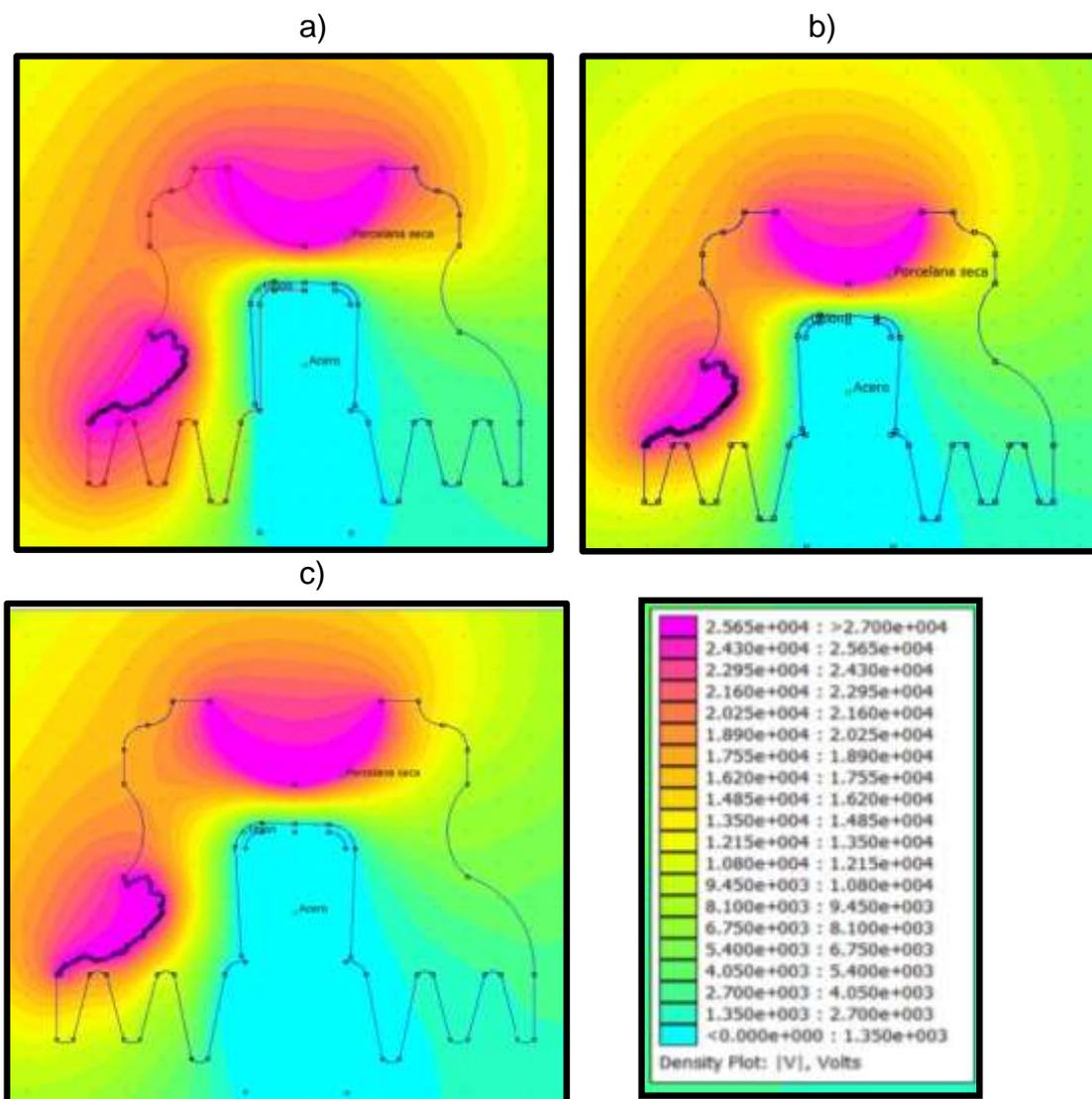
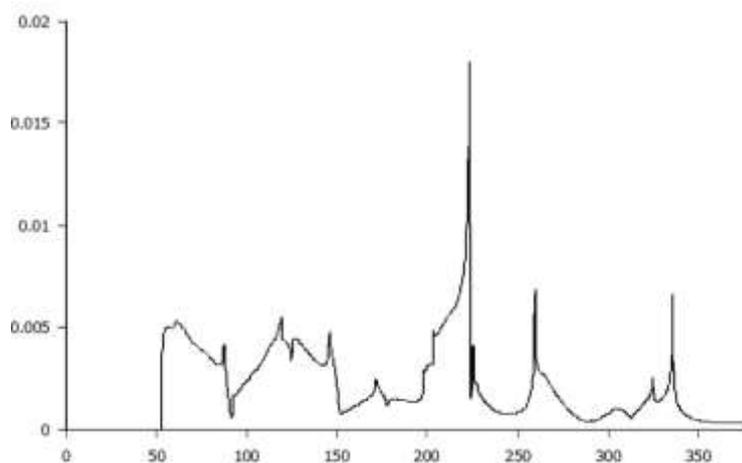
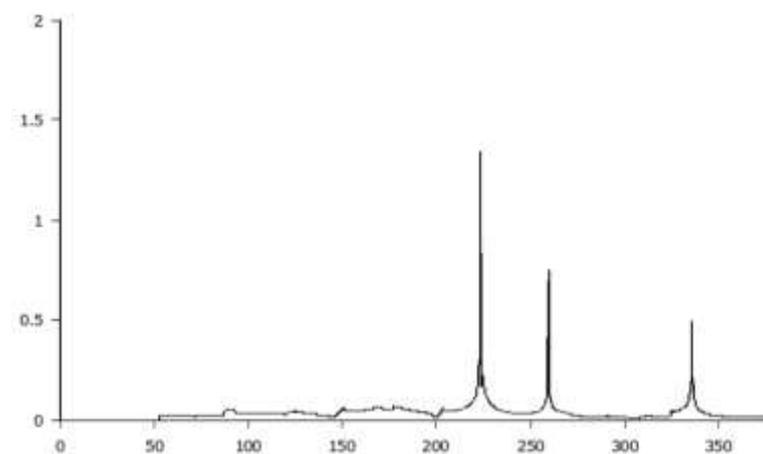
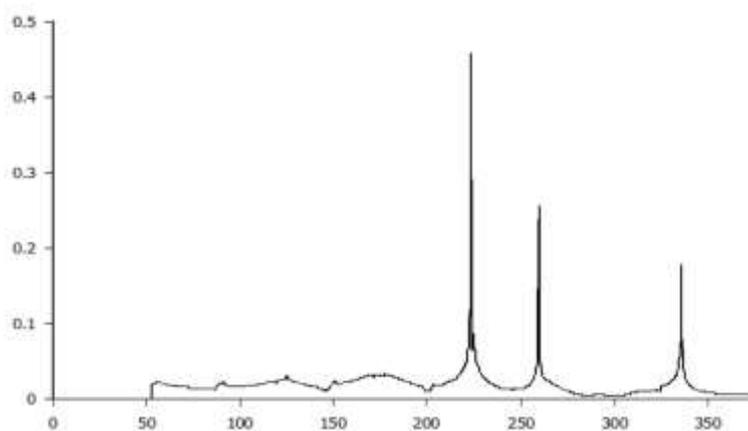


Figura 60. Simulación de voltaje aplicado al aislador tipo pin cerámico con falla en su estructura, a distintas temperaturas: a) 20°C, b) 25°C, c) 30°C



a) $T^\circ = 20^\circ\text{C}, I_f = 0.025 \text{ A/m}$

b) $T^\circ = 25^\circ\text{C}, I_f = 0.5 \text{ A/m}$



c) $T^\circ = 30^\circ\text{C}, I_f = 1,5 \text{ A/m}$

Figura 61. Generación de graficas de Corriente de fuga (I_f) en FEMM al aislador tipo pin cerámico con falla en su estructura, a distintas temperaturas: a) 20°C , b) 25°C , c) 30°C

Mediante la observación de las gráficas que genera el Software FEMM se puede observar que el incremento de corriente de fuga a diferencia de los valores en el aislador cerámico nuevo este aislador con falla estructural presenta aumento mayor con una corriente de fuga próxima al a de 1.5 a que permite el Flash Over en el ambiente en donde se está operando de acuerdo a la Figura 61. De acuerdo al cambio climático en el aspecto seco y la que este aislador tiene con las consideraciones de la temperatura y relacionando con la Figura 60. que nos muestra la rigidez dieléctrica, el aumento de la temperatura si afecta el incremento de la corriente de fuga pero de una manera significativa debido a la falla estructural y por ende la disminución de su rigidez sufre una pequeña disminución del material en este caso el cerámico.

c) Aislador Polimérico de Suspensión Clevis-Lengüeta, GAMMA ANSI C29.5 SML 70Kn, NBA 14Kv. (clima seco)

Las pruebas en físico de este aislador se las realizaron de acuerdo las condiciones atmosféricas en el literal 5.4.3 y los valores de conductividad y permeabilidad calculados de acuerdo a la temperatura y la humedad presentes en las Tablas 8. 9. 10.

Para obtener los valores de intensidad de fuga, el cual permitirá observar la rotura de la rigidez dieléctrica de forma físicamente experimental se debe realizar el procedimiento de pruebas en físico descrito en el literal 5.4.3.1 de este capítulo , el valor de voltaje máximo aplicado al aislador es el doble del normal más 1000v por ser un prueba en corriente directa, en este caso el aislador cerámico tiene un voltaje típico de operación recomendado en su catálogo de 14 Kv, por lo que se aplicara un voltaje máximo de 30Kv DC. Como se puede observar en la Figura 61. (Chachalo, 2018)

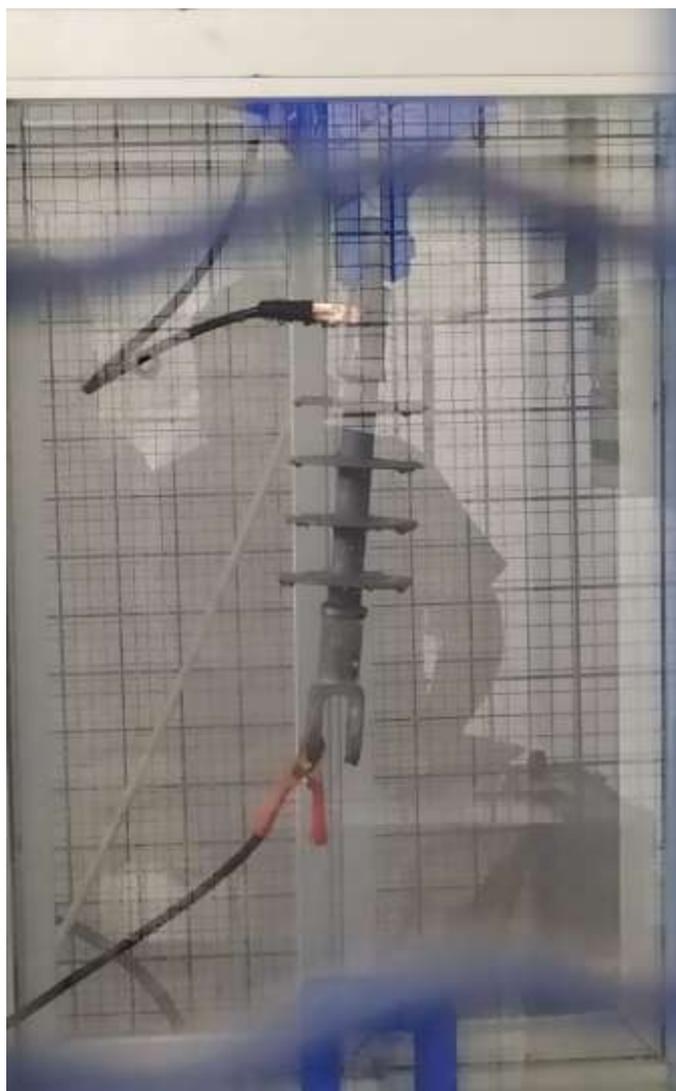


Figura 62. *Aislador Polimérico de Suspensión Clevis-Lengüeta, GAMMA ANSI C29.5 SML 70Kn, NBA 14Kv, ubicado para pruebas de simulación climática.*

Las pruebas en ambiente seco para el aislador polimérico se las realiza en las temperaturas similares ya realizadas en el aislador cerámico de 20°C, 25°C y 30°C. Ya realizados las pruebas en estas temperaturas se obtienen los valores de corriente de fuga y se los ubica en una gráfica de acuerdo a sus temperaturas y corriente

observada en el amperímetro analógico y voltajes aplicados como se observa en Figura 62.

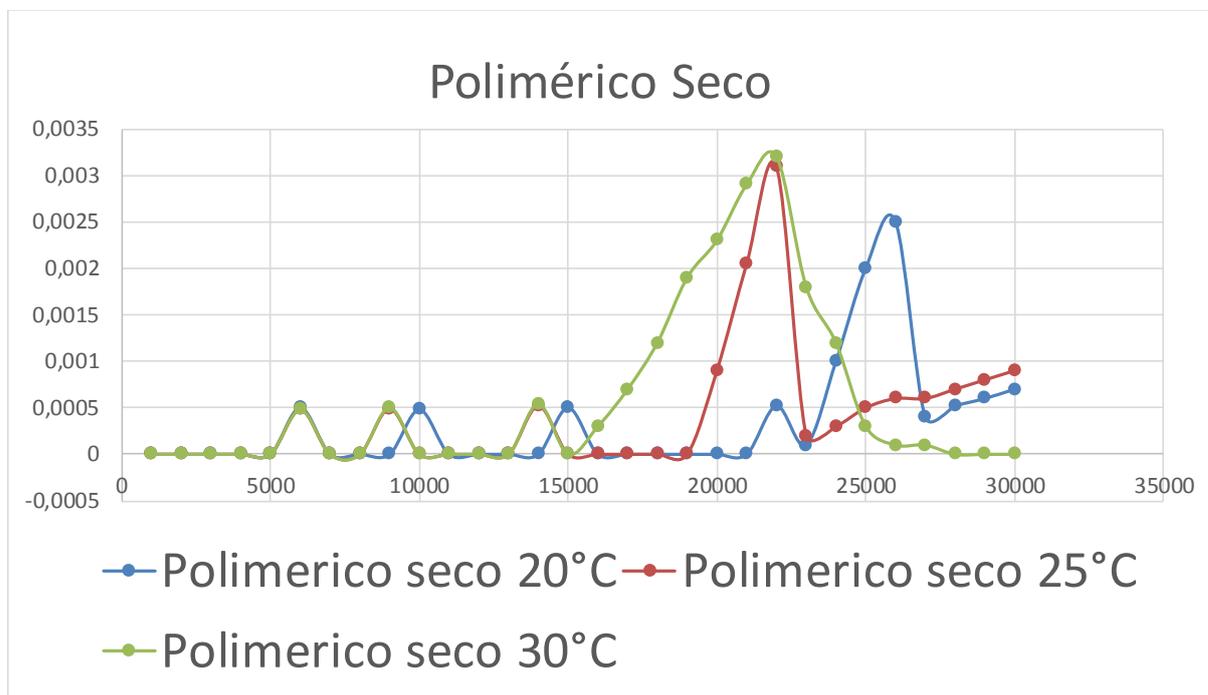


Figura 63. Valores de corriente de fuga en aislador polimérico, clima seco.

Se ubica los cambios de propiedades eléctricas de los materiales en el caso del polímero y su núcleo además de la distinción de las partes en donde este tiene contacto con la línea eléctrica el cual tiene distinta composición, estos cambios se los observa en la Figura 63.

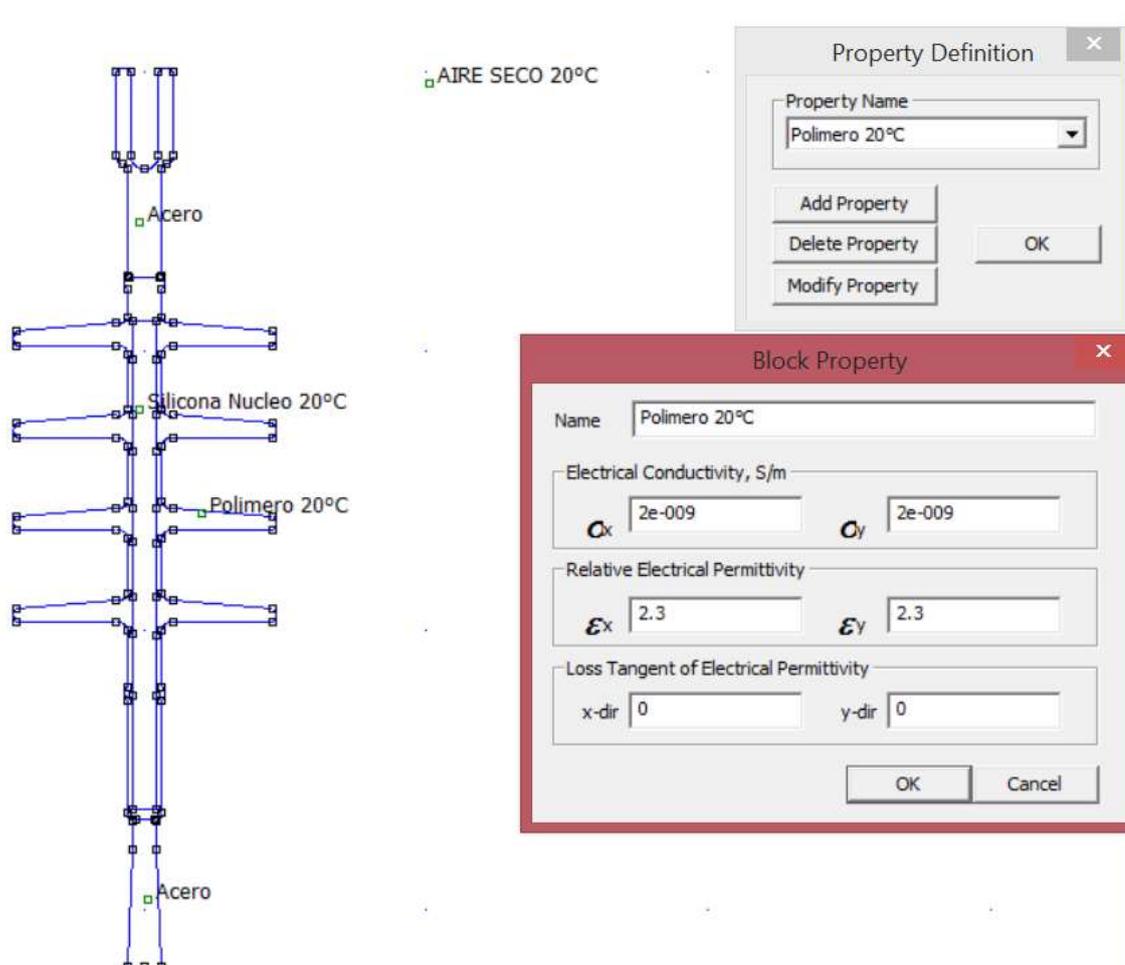


Figura 64. Ubicación de las propiedades de los materiales del aislador polimérico en el Software FEMM

Ya realizados los cambios respectivos en las propiedades de los materiales del aislador polimérico en ambiente seco el Software grafica el paso del voltaje aplicado en el aislador y calcula la corriente de fuga que emerge de esta simulación como se puede observar en las siguientes Figuras 65 y 66, para cada temperatura aplicada.

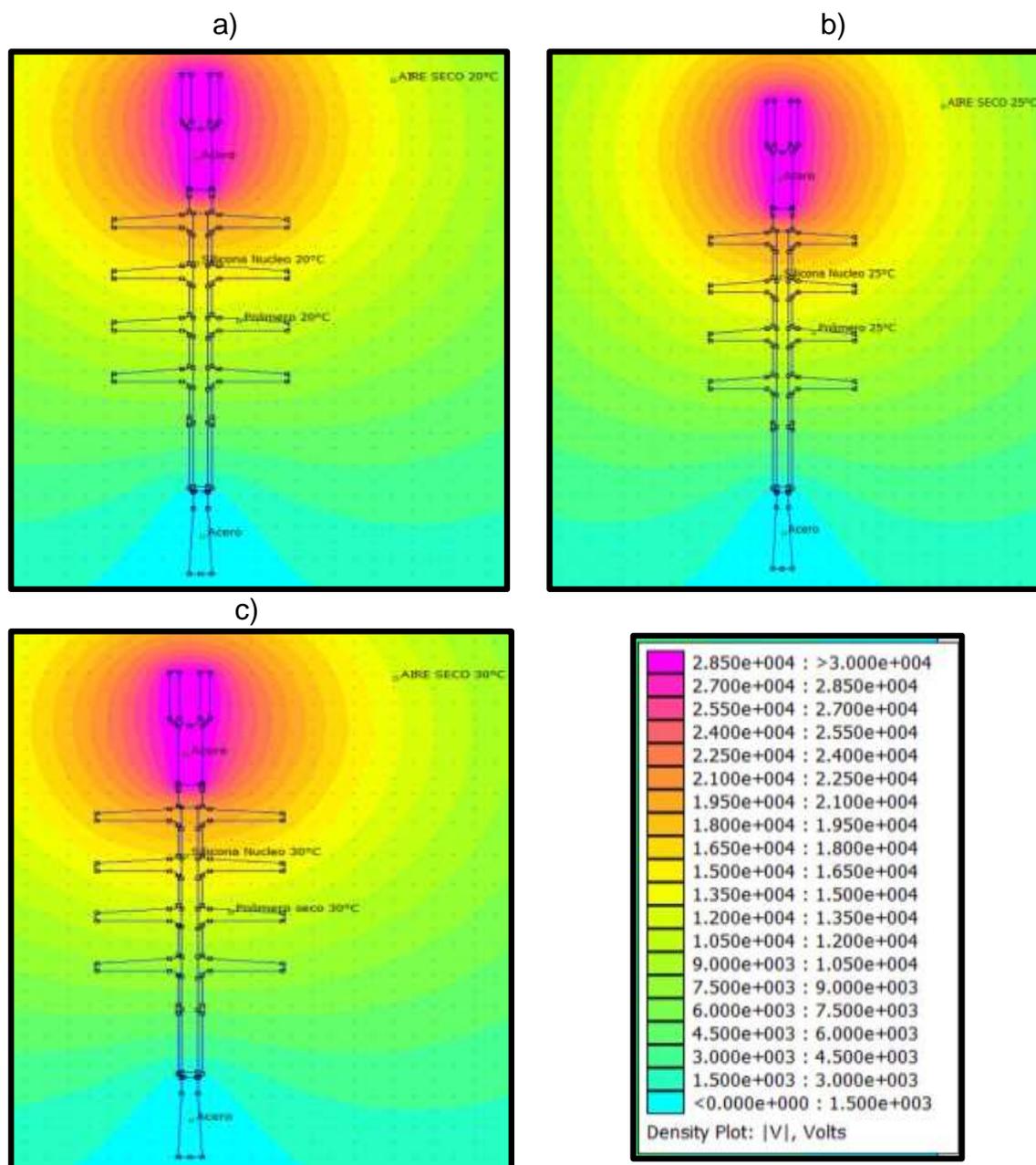
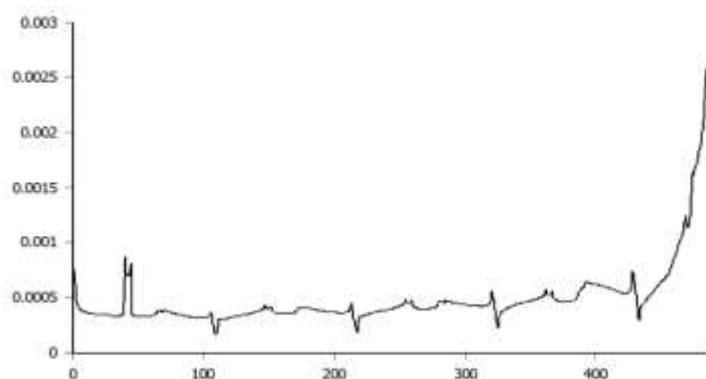


Figura 65. Simulación de voltaje aplicado al aislador polimérico de suspensión, a distintas temperaturas: a) 20°C, b) 25°C, c) 30°C



b) $T^\circ = 25^\circ\text{C}, I_f = 0.004 \text{ A/m}$

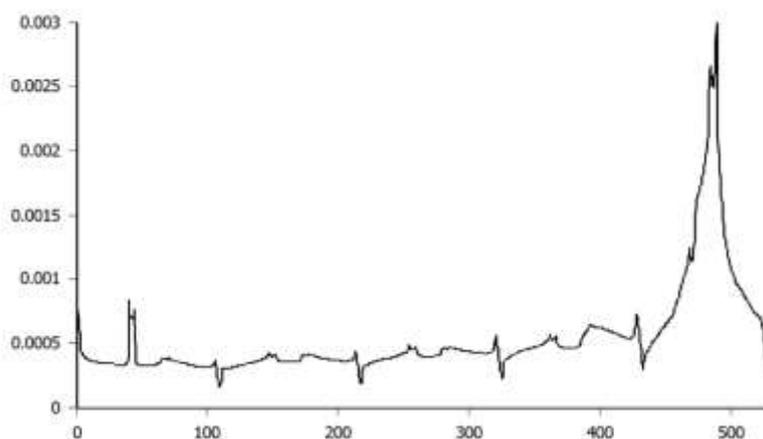
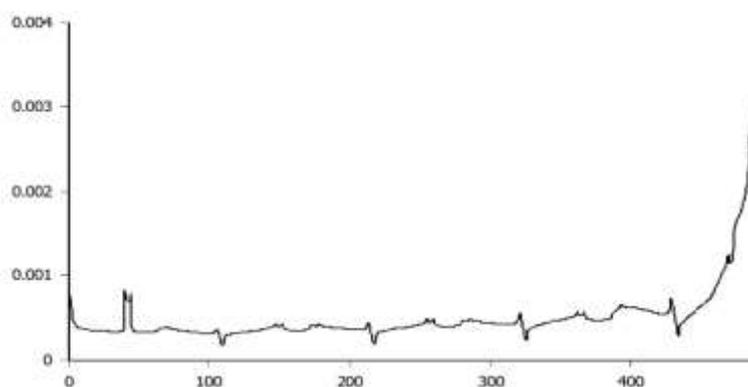


Figura 66. Generación de graficas de Corriente de fuga (I_f) en FEMM al aislador polimérico de suspensión, a distintas temperaturas: a) 20°C , b) 25°C , c) 30°C

El aumento de la temperatura en el caso de aislador polimérico debido a las propiedades que en sus materiales presenta, muestra que el incremento de la corriente de fuga en este aislador no es muy representativo ya que su máximo llegó a 0.003 A/mm como se muestra en la Figura 65, esta cifra muestra una mejor eficiencia al momento de presentar variaciones en temperatura del ambiente en donde se encuentra el aislador por lo que se podría decir que el material de silicona que cubre el aislador en sí y su núcleo de resina epoxi presentan una mejor confiabilidad en el aspecto ambiental seco.

c. *Pruebas físicas y virtuales en ambiente húmedo*

Para realizar pruebas físicas en un ambiente húmedo tomamos en cuenta los valores de conductividad de la atmósfera en forma primordial ya que al tener un ambiente de este tipo el aire se ioniza fácilmente y permite la ozonificación del mismo dejando así mayores probabilidades de que la rigidez dieléctrica del aislador disminuya por lo que en esta prueba se aplicará el mismo procedimiento a los aisladores pero teniendo en cuenta que aunque no se llegue al máximo voltaje permitido ya tendremos flameos pequeños en el interior de la cámara.

a) Aislador Cerámico Tipo Pin Sencillo GAMMA CORONA ANSI-4, NBA 95Kv, 13 Kn (Ambiente húmedo)

En el aspecto de un clima húmedo el aislador cerámico requiere que este a una humedad relativa del rango de 36-55% y con la misma presión atmosférica descrita en la norma (IEC60507, 2002) de conductividad y permeabilidad que ya fueron

calculadas de acuerdo a la temperatura y la humedad presentes en las Tablas 8. 9. 10.

Las pruebas en ambiente húmedo guiándonos en el procedimientos ya descrito para estas pruebas en el literal 5.4.3.1 para el aislador cerámico se las realiza en las a una sola temperatura de 20°C y a 55% de humedad relativa debido a que en esta prueba la ionización de aire es más fuerte y los arcos eléctricos resultan ser destructivos para el aislador, ya realizados las pruebas en estas temperaturas se obtienen los valores de corriente de fuga y se los ubica en una gráfica de acuerdo a la corriente observada en el amperímetro analógico y voltajes aplicados como se observa en Figura 66.

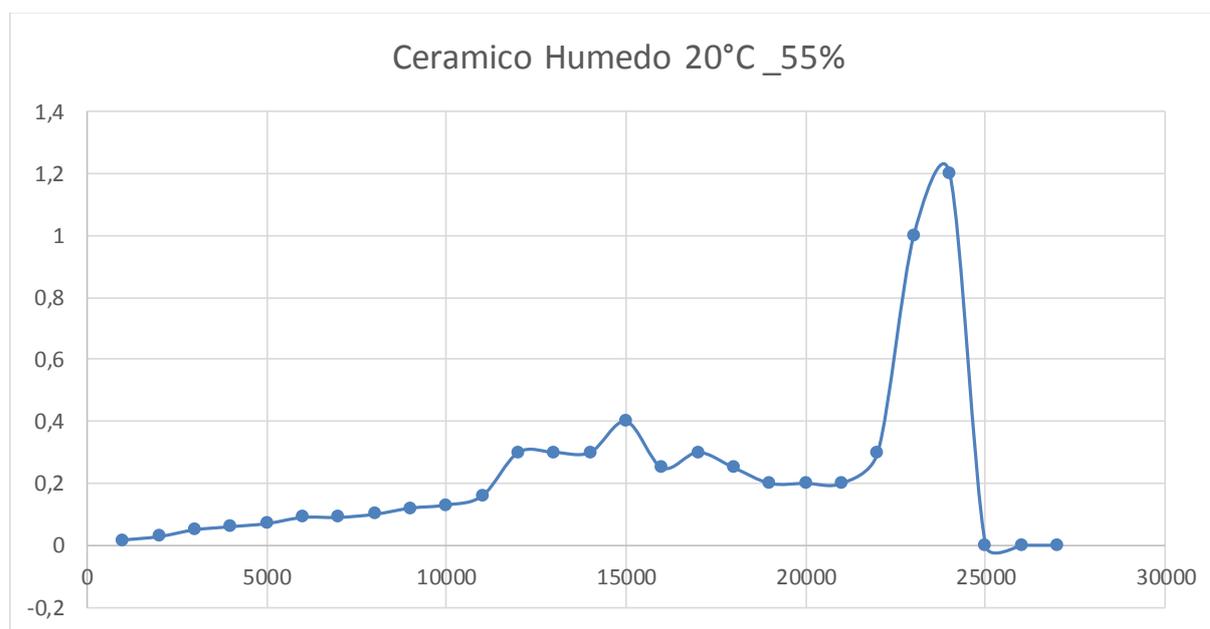


Figura 67. Valores de corriente de fuga en aislador cerámico, clima húmedo.

Ya realizados los cambios respectivos en las propiedades de los materiales en ambiente húmedo del aislador cerámico, el Software grafica el paso del voltaje

aplicado en el aislador y calcula la corriente de fuga que emerge de esta simulación como se puede observar en las siguientes Figuras 67 y 68, para la humedad aplicada

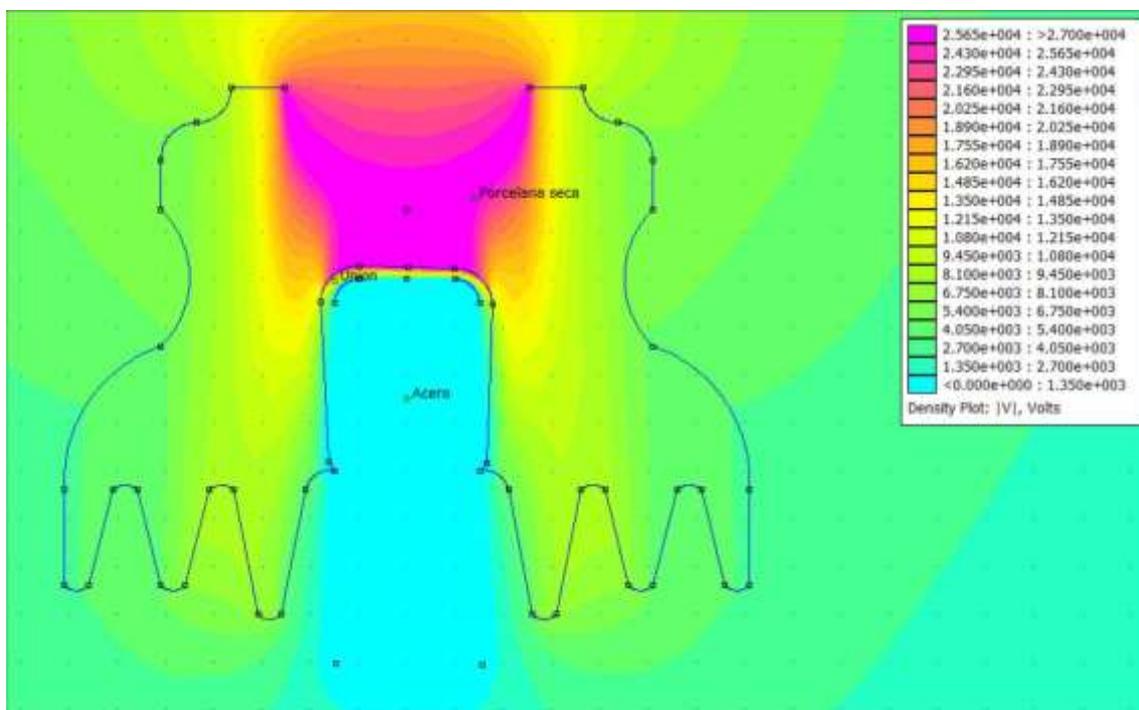


Figura 68. Simulación de voltaje aplicado al aislador tipo pin cerámico, a temperatura de 20°C y humedad de 55%.

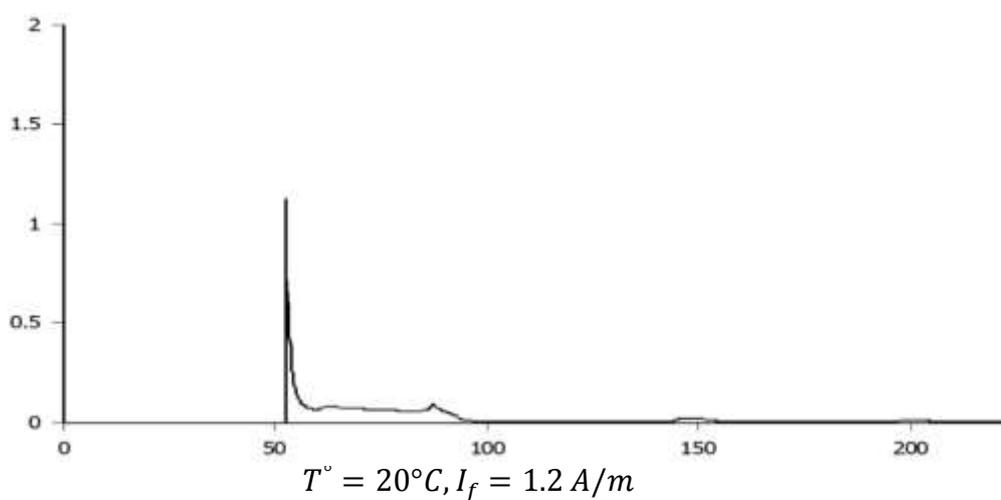


Figura 69. Generación de grafica de Corriente de fuga (I_f) en FEMM al aislador tipo pin cerámico, temperatura de 20°C y humedad de 55%.

La grafica de corriente de fuga generada en la cámara de simulación climática nos muestra en la Figura 66 que la corriente de fuga sube bruscamente hasta 1.2 A/m del aislador inclusive antes de llegar al voltaje máximo de aplicación de 27 Kv, esto se contrasta con la gráfica del software FEMM que con las características programadas (ambiente húmedo), de la Figura 69 se observa el mismo comportamiento de la corriente. Esto muestra que al momento de que el aire se llega a ionizar por el aumento de la humedad en la cámara que contiene al aislador afecta de forma brusca el comportamiento de este y su rigidez dieléctrica se ve afectada del mismo modo como se puede observar en la Figura 69.

b) Aislador Cerámico Tipo Pin Sencillo GAMMA CORONA ANSI-4, NBA 95Kv, 13 Kn (con falla en clima húmedo)

Guiándonos en los mismos procedimientos de prueba al aislador cerámico en ambiente húmedo se realizan en el aislador con falla estructural, los valores de cambio en permeabilidad y conductividad de sus materiales se conservan para su posterior comparación con los valores de corriente de fuga que obtengamos de este aislador con falla y con el aislador nuevo. Las pruebas en ambiente húmedo arrojan una corriente de fuga de 4.5 A/m que permite perfectamente el Flash Over como se lo puede observar en la Figura 70.

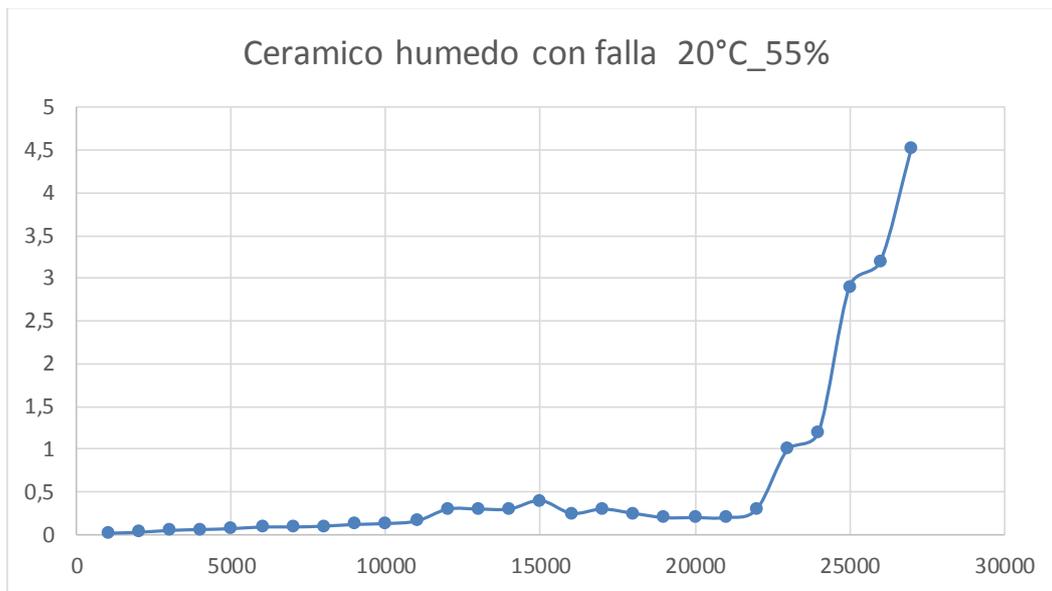


Figura 70. Valores de corriente de fuga en aislador cerámico, clima húmedo.

Ya realizados los cambios respectivos en las propiedades de los materiales en ambiente húmedo del aislador cerámico, el Software FEMM grafica el paso del voltaje aplicado en el aislador y calcula la corriente de fuga que emerge de esta simulación como se puede observar en las siguientes Figuras 71 y 72, para la humedad aplicada

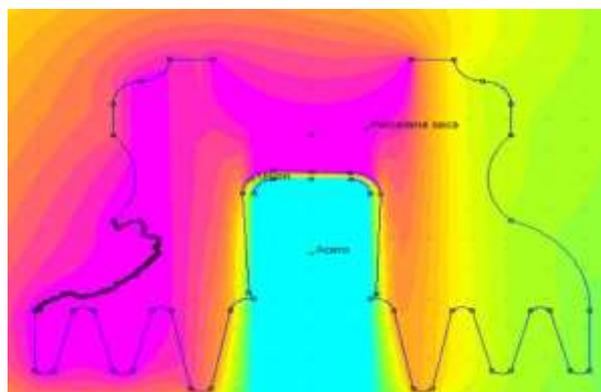


Figura 71. Simulación de voltaje aplicado al aislador tipo pin cerámico CON FALLA, a temperatura de 20°C y humedad de 55%.

$$T^{\circ} = 20^{\circ}\text{C}, I_f = 4.2 \text{ A/m}$$

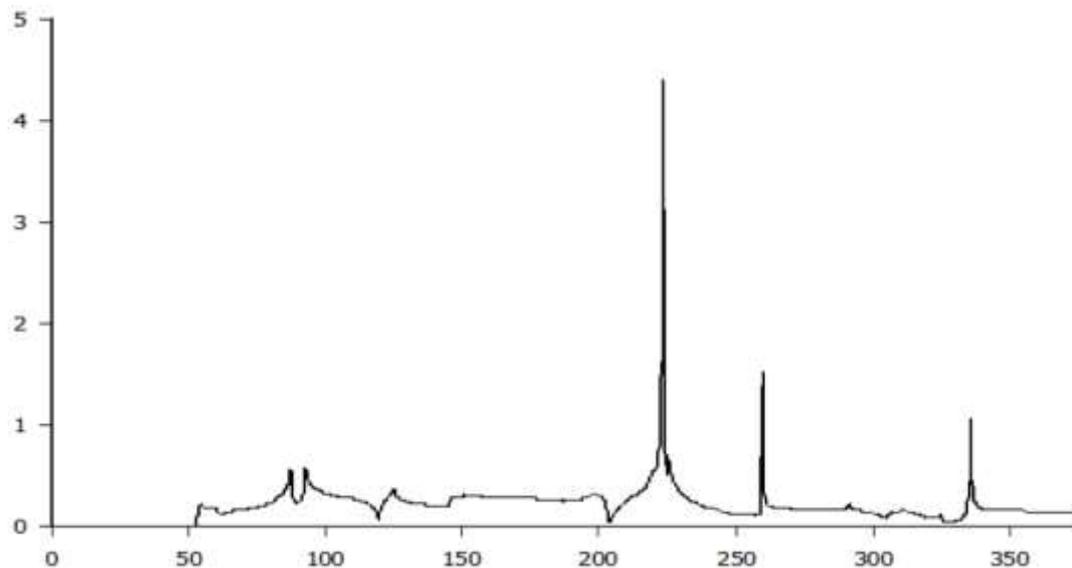


Figura 72. Generación de grafica de Corriente de fuga (I_f) en FEMM al aislador tipo pin cerámico, temperatura de 20°C y humedad de 55%.

La grafica de corriente de fuga generada en la cámara de simulación climática nos muestra en la Figura 70 que la corriente de fuga sube bruscamente hasta 4.2 A/m del aislador inclusive antes de llegar al voltaje máximo de aplicación de 27 Kv , esto se contrasta con la gráfica del software FEMM que con las características programadas (ambiente húmedo), de la Figura 72 se observa el mismo comportamiento de la corriente. Esto muestra que al momento de que el aire se llega a ionizar por el aumento de la humedad en la cámara que contiene al aislador y la falla estructural que tiene el aislador cerámico afecta de forma brusca el comportamiento de este y su rigidez dieléctrica se ve afectada del mismo modo como se puede observar en la Figura 71.

**c) Aislador Polimérico de Suspensión Clevis-Lengüeta, GAMMA ANSI
C29.5 SML 70Kn, NBA 14Kv (clima húmedo)**

En el ambiente húmedo este aislador polimérico también sufre cambios de conductividad y permeabilidad que se encuentra en las Tablas del literal 5.4.2 y se utilizan los aspectos de presión y humedad iguales a los utilizados en el aislador cerámico en ambiente húmedo basados en los parámetros de la norma (IEC60507, 2002)

Para obtener los valores de intensidad de fuga se sigue el procedimiento del literal 5.4.3.1, el cual permitirá observar la rotura de la rigidez dieléctrica de forma físicamente experimental

Las pruebas en ambiente húmedo para el aislador polimérico se las realiza en una temperatura de 20°C y humedad relativa de 55%, ya realizados las pruebas en estas temperaturas se obtienen los valores de corriente de fuga y se los ubica en una gráfica de acuerdo a sus temperaturas y corriente observada en el amperímetro analógico y voltajes aplicados como se observa en Figura 73.

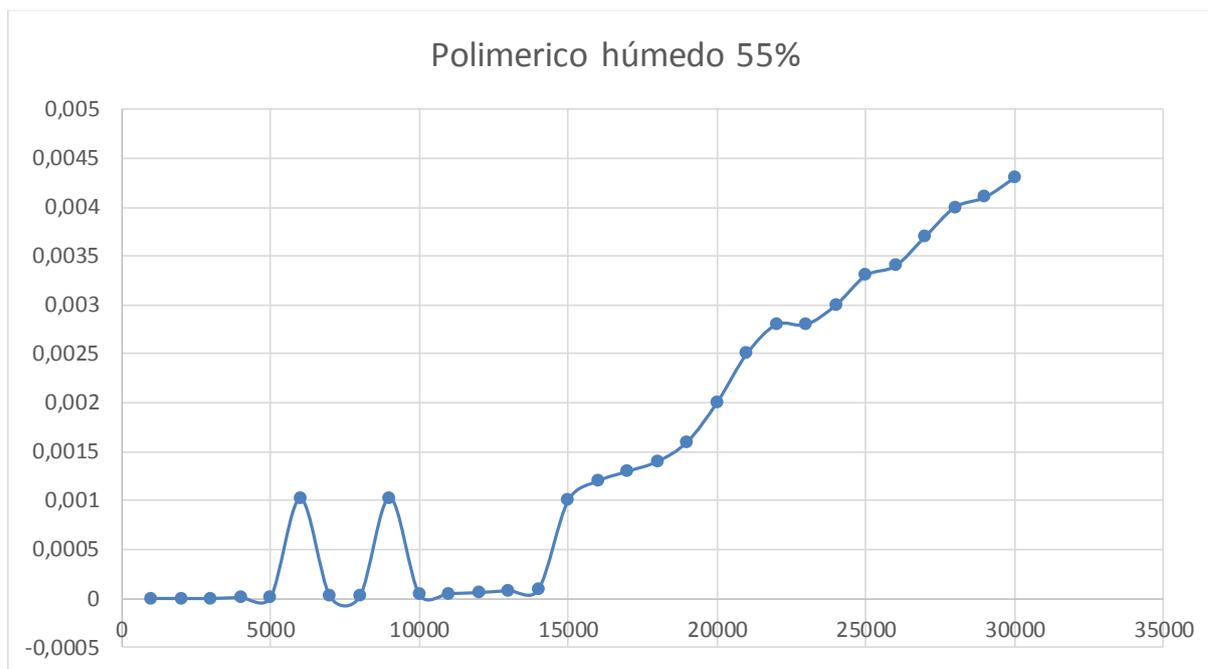


Figura 73. Valores de corriente de fuga en aislador polimérico, clima húmedo.

Se ubica los cambios de propiedades eléctricas de los materiales en el caso del polímero y su núcleo en ambiente húmedo el Software FEMM grafica el paso del voltaje aplicado en el aislador y calcula la corriente de fuga que emerge de esta simulación como se puede observar en las siguientes Figuras 74 y 75, para humedad aplicada.

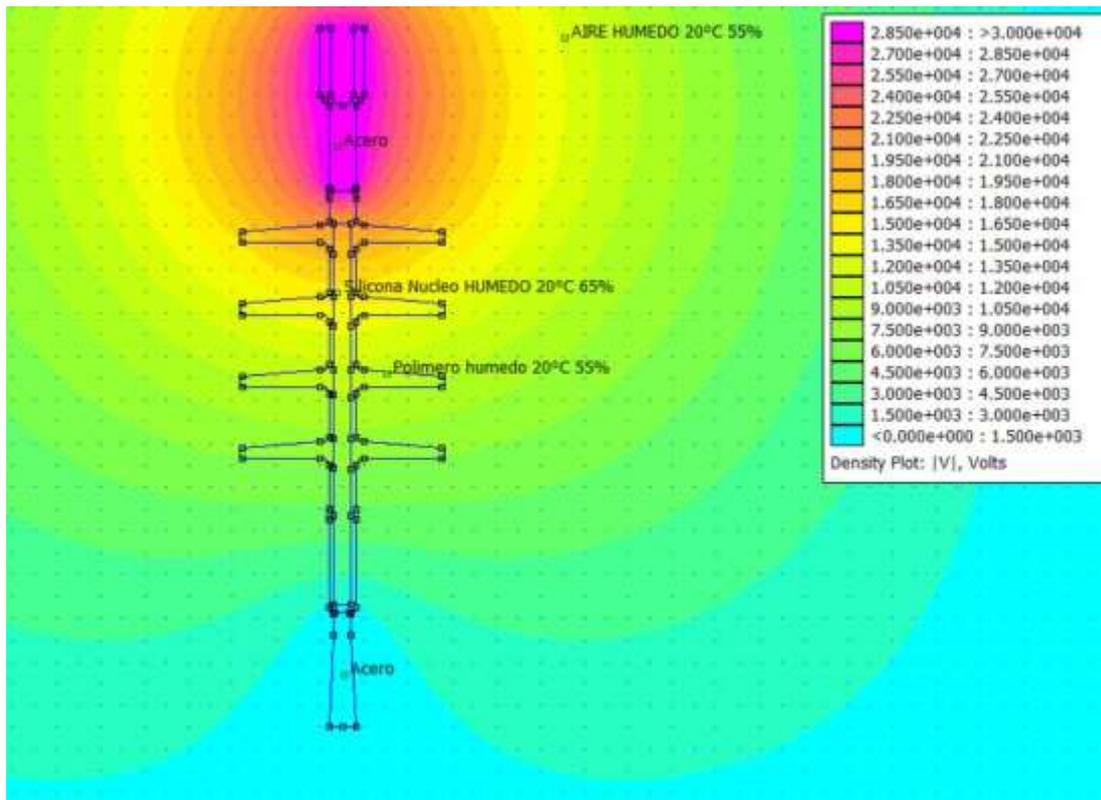


Figura 74. Simulación de voltaje aplicado al aislador polimérico de suspensión, a una temperatura de 20°C y humedad de 55%

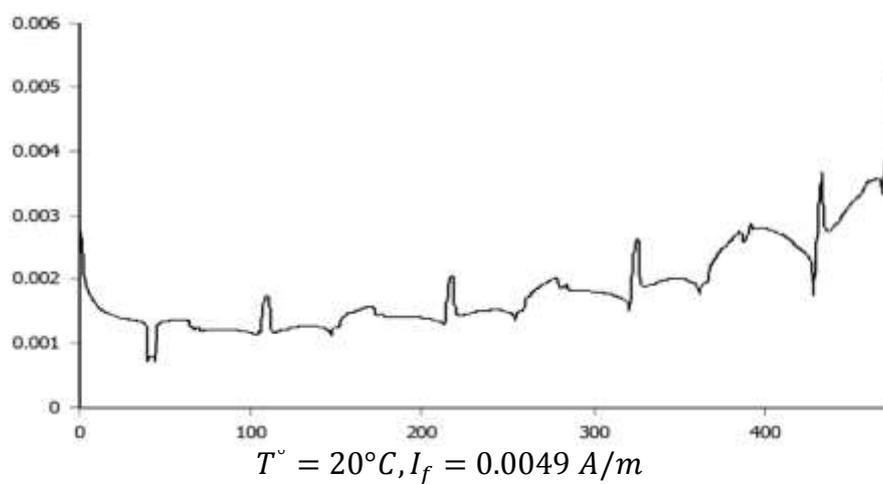


Figura 75. Generación de graficas de Corriente de fuga (I_f) en FEMM al aislador polimérico de suspensión, a una temperatura de 20°C y humedad de 55%

El aumento de la humedad de 36 a 55% en el caso de aislador polimérico debido a las propiedades que en sus materiales, muestra que el incremento de la corriente de fuga en este aislador no es muy representativo ya que su máximo llegó a 0.005 A/mm como se muestra en la Figura 75, esta cifra muestra una mejor eficiencia al momento de presentar variaciones en humedad del ambiente en donde se encuentra el aislador por lo que las materiales del material del que el aislador polimérico se compone como la silicona su núcleo de resina epoxi presentan una mejor confiabilidad en el aspecto ambiental húmedo.

d. *Pruebas físicas y virtuales en ambiente lluvioso*

Para realizar pruebas físicas en un ambiente lluvioso tomamos en cuenta los valores de conductividad de la atmosfera y en el material del aislador ya que al tener un ambiente de este tipo el aire se ioniza fácilmente y permite la ozonificación del mismo además el flameo o Flas Over ocurrirá cuando las partículas del agua conduzcan en la superficie del aislador la corriente dejando así mayores probabilidades de que la rigidez dieléctrica del aislador disminuya por lo que en esta prueba se aplicará el mismo procedimiento a los aisladores pero teniendo en cuenta que aunque no se llegue al máximo voltaje permitido ya tendremos flameos pequeños en el interior de la cámara. (Gonzalo Faraig, 2016)

a) Aislador Cerámico Tipo Pin Sencillo GAMMA CORONA ANSI-4, NBA 95Kv, 13 Kn (Ambiente lluvioso)

En el aspecto de un Ambiente lluvioso el aislador cerámico requiere que este a una humedad relativa del rango mayor de 55% y con una precipitación de lluvia del 0.1 a

40 mm/hr, con agua de conductividad de aproximadamente 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$) descritos en la norma (IEC60507, 2002).

Ya realizada la prueba en ambiente lluvioso a 20°C y 89% se obtienen los valores de corriente de fuga y se los ubica en una gráfica de acuerdo a la corriente observada en el amperímetro analógico y voltajes aplicados como se observa en Figura 76.

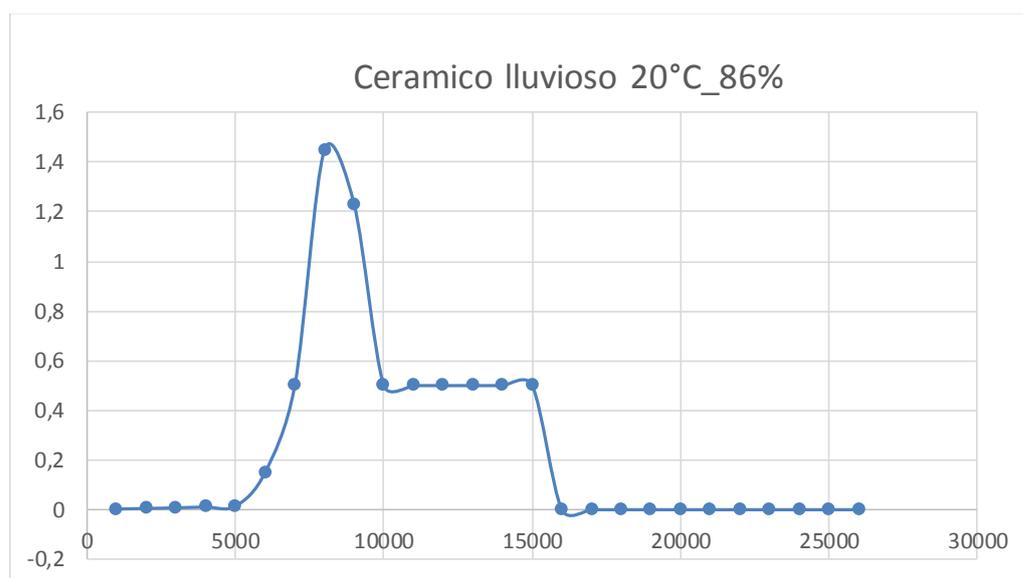


Figura 76. Valores de corriente de fuga en aislador cerámico, ambiente lluvioso.

Ya realizados los cambios respectivos en las propiedades de los materiales en ambiente lluviosos del aislador cerámico, el Software grafica el paso del voltaje aplicado en el aislador y calcula la corriente de fuga que emerge de esta simulación como se puede observar en las siguientes Figuras 77 y 78, para la lluvia aplicada.

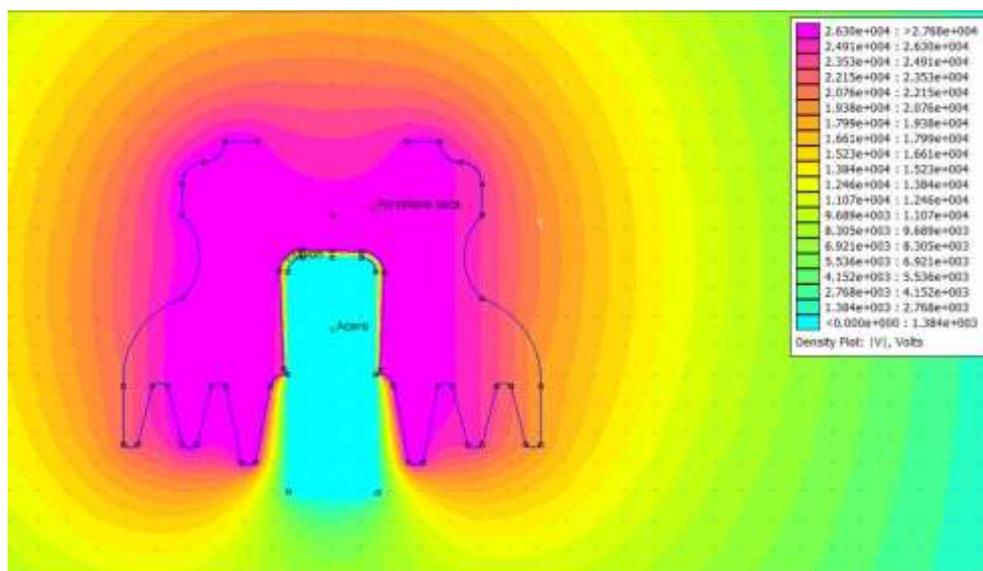


Figura 77. Simulación de voltaje aplicado al aislador tipo pin cerámico, a temperatura de 20°C y humedad de 86% y precipitación de lluvia de 0.1mm/hr.

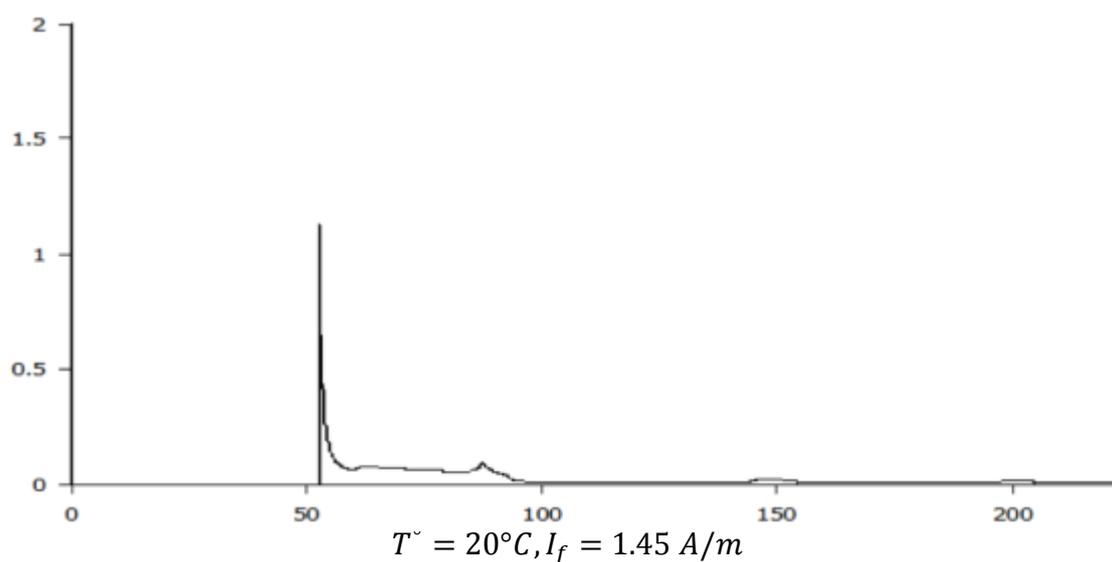


Figura 78. Generación de grafica de Corriente de fuga (I_f) en FEMM al aislador tipo pin cerámico, temperatura de 20°C y humedad de 86% y precipitación de lluvia de 0.1mm/hr.

La grafica de corriente de fuga generada en la cámara de simulación climática nos muestra en la Figura 76 que la corriente de fuga sube bruscamente hasta 1.45 A/m

del aislador inclusive antes de llegar al voltaje máximo de aplicación de 27 Kv, esto se contrasta con la gráfica del software FEMM que con las características programadas (ambiente lluvioso), de la Figura 78 se observa el mismo comportamiento de la corriente. Esto muestra que al momento de que el aire se llega a ionizar por el aumento de la humedad en la cámara y las partículas de agua permiten la conducción en el aislador afecta de forma brusca el comportamiento de este y su rigidez dieléctrica se ve afectada del mismo modo como se puede observar en la Figura 77.

b) Aislador Cerámico Tipo Pin Sencillo GAMMA CORONA ANSI-4, NBA 95Kv, 13 Kn (con falla en ambiente lluvioso)

Imitando las características de permeabilidad y conductividad tanto del agua como la atmosfera de la cámara de simulación en el anterior literal con el aislador cerámico sano se aplican del mismo modo para el aislador cerámico con falla.

Ya realizada la prueba en ambiente lluvioso a 20°C y 89% se obtienen los valores de corriente de fuga y se los ubica en una gráfica de acuerdo a la corriente observada en el amperímetro analógico y voltajes aplicados como se observa en Figura 79.

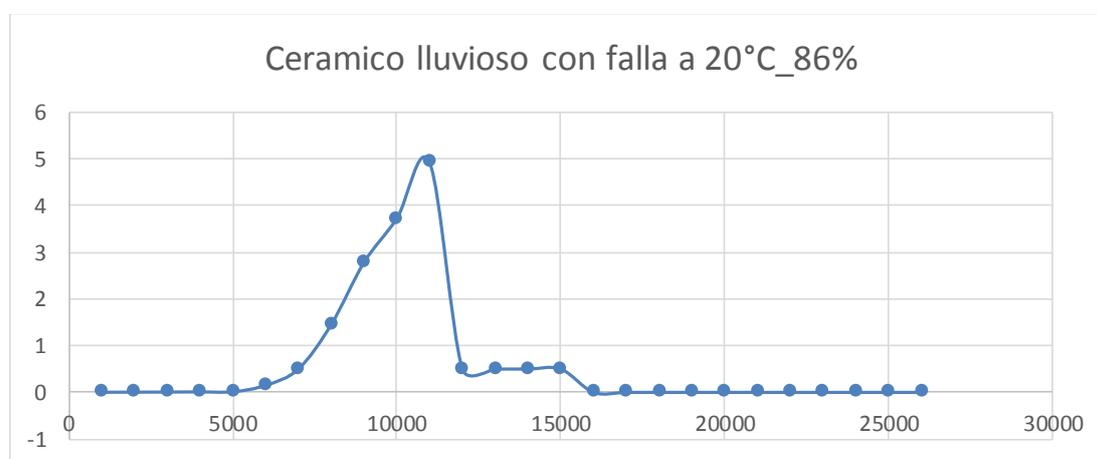


Figura 79. Valores de corriente de fuga en aislador cerámico CON FALLA, ambiente lluvioso.

Ya realizados los cambios respectivos en las propiedades de los materiales en ambiente lluviosos del aislador cerámico, el Software grafica el paso del voltaje aplicado en el aislador y calcula la corriente de fuga que emerge de esta simulación como se puede observar en las siguientes Figuras 80 y 81, para la lluvia aplicada.

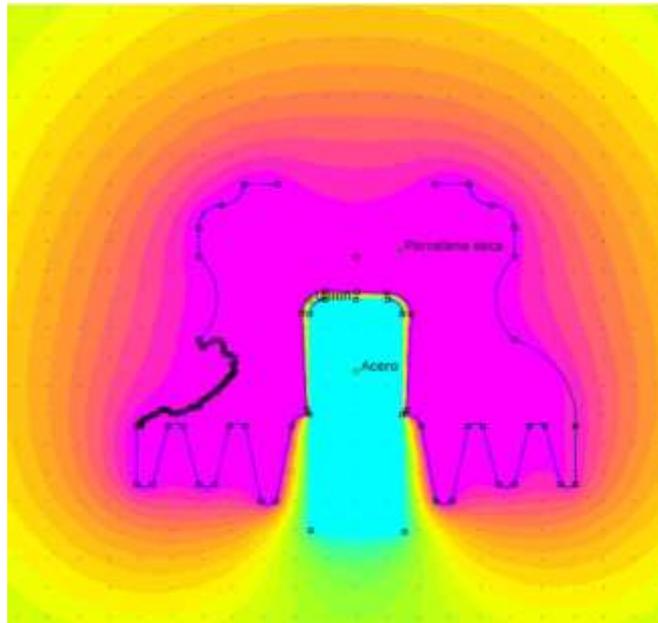
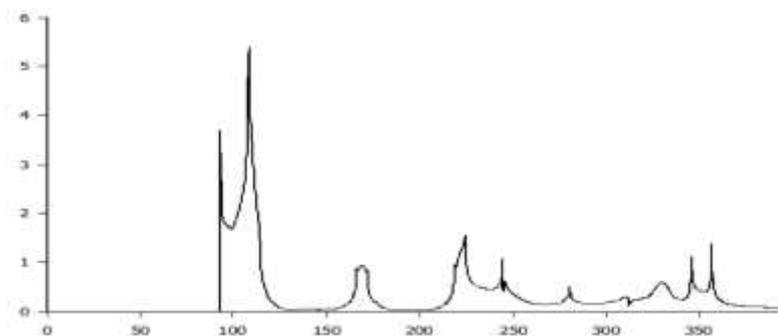


Figura 80. Simulación de voltaje aplicado al aislador tipo pin cerámico CON FALLA, a temperatura de 20°C y humedad de 86% y precipitación de lluvia de 0.1mm/hr.



$$T^{\circ} = 20^{\circ}C, I_f = 5.45 \text{ A/m}$$

Figura 81. Generación de grafica de Corriente de fuga (I_f) en FEMM al aislador tipo pin cerámico, temperatura de 20°C y humedad de 86% y precipitación de lluvia de 0.1mm/hr.

La grafica de corriente de fuga generada en la cámara de simulación climática nos muestra en la Figura 79 que la corriente de fuga sube bruscamente hasta 5.45 A/m del aislador inclusive antes de llegar al voltaje máximo de aplicación de 27 Kv, esto se contrasta con la gráfica del software FEMM que con las características programadas (ambiente lluvioso), de la Figura 81 se observa el mismo comportamiento de la corriente. Esto muestra que al momento de que el aire se llega a ionizar por el aumento de la humedad en la cámara y las partículas de agua permiten la conducción incluyendo la falla estructural en el al aislador afecta de forma brusca el comportamiento de este y su rigidez dieléctrica se ve afectada del mismo modo como se puede observar en la Figura 80.

c) Aislador Polimérico de Suspensión Clevis-Lengüeta, GAMMA ANSI C29.5 SML 70Kn, NBA 14Kv (clima lluvioso)

En el ambiente lluvioso este aislador polimérico también sufre cambios de conductividad y permeabilidad que se encuentra en las Tablas del literal 5.4.2 y se utilizan los aspectos de presión y humedad tomando en cuenta la forma de el mismo aislador y la parte de aislamiento del mismo basados en los parámetros de la norma (IEC60507, 2002)

Para obtener los valores de intensidad de fuga se sigue el procedimiento del literal 5.4.3.1, el cual permitirá observar la rotura de la rigidez dieléctrica de forma físicamente experimental

Las pruebas en ambiente húmedo para el aislador polimérico se las realiza en una temperatura de 20°C y humedad relativa de 89% y con una precipitación de lluvia del 0.1 a 40 mm/hr, ya realizados las pruebas en estas temperaturas se obtienen los

valores de corriente de fuga y se los ubica en una gráfica de acuerdo a sus temperaturas y corriente observada en el amperímetro analógico y voltajes aplicados como se observa en Figura 82.

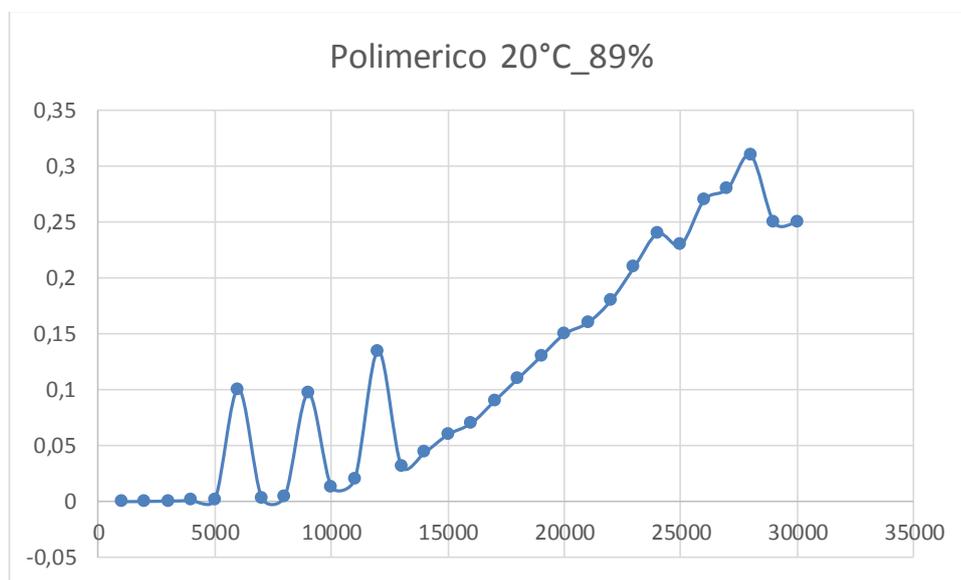


Figura 82. Valores de corriente de fuga en aislador polimérico, clima lluvioso.

Se ubica los cambios de propiedades eléctricas de los materiales en el caso del polímero y su núcleo en ambiente lluvioso, el Software FEMM grafica el paso del voltaje aplicado en el aislador y calcula la corriente de fuga que emerge de esta simulación como se puede observar en las siguientes Figuras 83 y 84, para la lluvia aplicada.

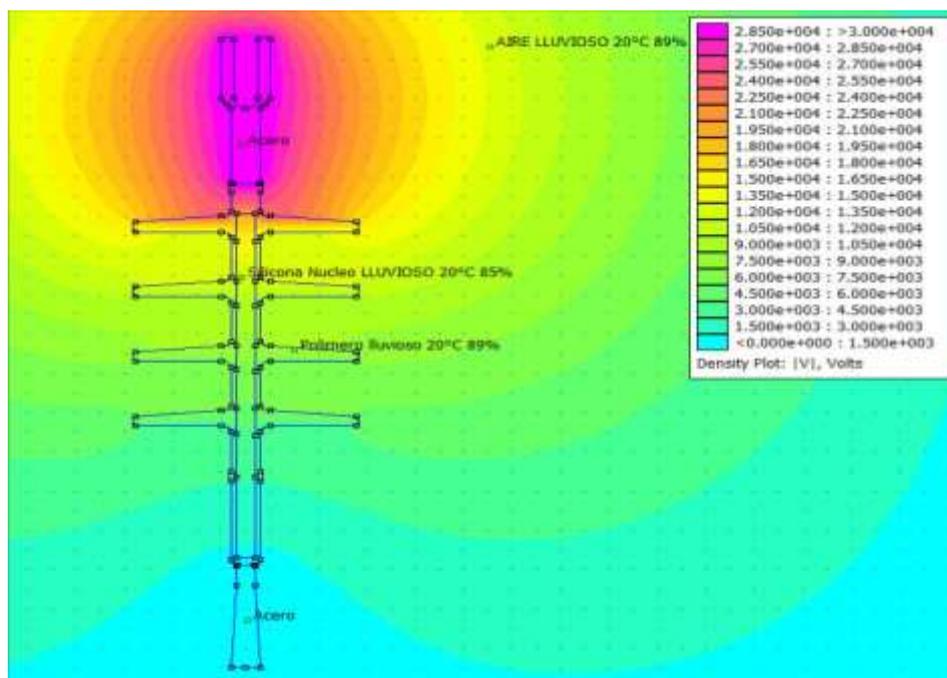


Figura 83. Simulación de voltaje aplicado al aislador polimérico de suspensión, a una temperatura de 20°C y humedad de 86% y precipitación de lluvia de 0.1mm/hr.

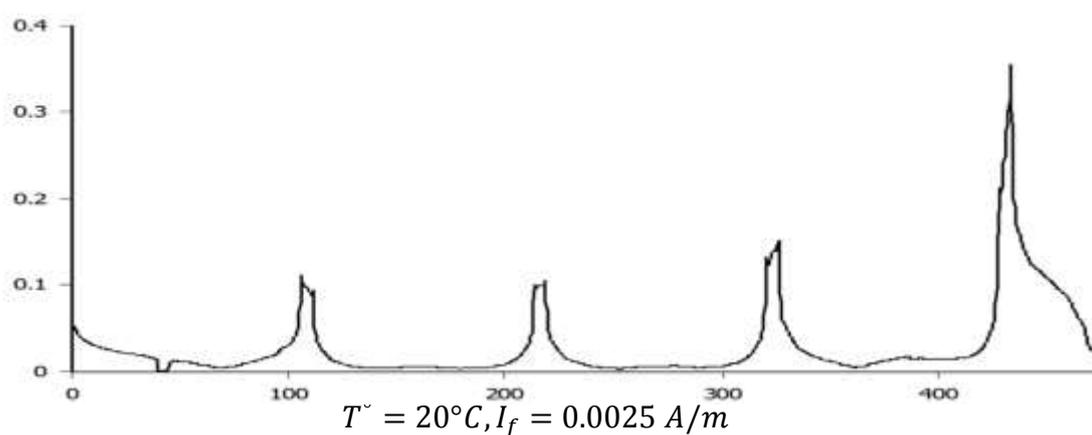


Figura 84. Generación de graficas de Corriente de fuga (I_f) en FEMM al aislador polimérico de suspensión, temperatura de 20°C y humedad de 86% y precipitación de lluvia de 0.1mm/hr.

El aumento de la humedad de 55 a 89% y lluvia en el caso de aislador polimérico debido a las propiedades que en sus materiales, muestra que el incremento de la corriente de fuga en este aislador ya es representativo porque ya tenemos presencia

de flameo o flash over al presentar un máximo de corriente de fuga de 0.35 A/mm como se muestra en la Figura 84, esta cifra muestra que aunque el aislador polimérico tenga materiales con conductividad más baja y permeabilidad de la misma manera la presencia de agua en su exterior mejorar la rigidez dieléctrica del mismo minorando así su eficiencia como se observa en la Figura 82.

5.5 Análisis de los distintos casos de condiciones ambientales

a) Aislador Cerámico Tipo Pin Sencillo GAMMA CORONA ANSI-4, NBA 95Kv, 13 Kn (Nuevo en ambientes seco, húmedo y lluvioso)

Mediante las características técnicas de rigidez dieléctrica que el fabricante del aislador cerámico proporciona, determinamos los rangos que esta propiedad rige en ambientes seco y húmedos en el aislador y realizando las pruebas físicas determinamos el valor de la rigidez dieléctrica del aislador al momento de que la corriente de fuga sube produciéndose el “Flash Over” como se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10

Valores de corriente de fuga y rigidez dieléctrica de aislador cerámico sano en prueba de distintos ambientes climáticos.

| Ambiente | Seco | Húmedo | Lluvioso |
|---|-------------|---------------|-----------------|
| I_f A/m (Datos de Prueba Real) | 1.02 | 1.2 | 1.52 |
| I_f A/m (Datos de Prueba en FEMM) | 0.98 | 1.35 | 1.4 |
| Rigidez Die. V/m (Datos Técnicos) | 65000 | 35000 | 35000 |
| Rigidez Die. V/m (Datos de Prueba Real) | 29000 | 24000 | 8000 |

Al analizar la Tabla 10. Se determina el comportamiento del aislador Cerámico Tipo Pin Sencillo GAMMA CORONA ANSI-4, NBA 95Kv, 13 Kn, al someterlo a distintos ambientes donde se observa que el ambiente lluvioso y húmedo son los más críticos donde el aislador debe operar de forma correcta pero observando el mayor valor de la corriente fuga determinamos la manifestación del Flash Over rompiendo así la rigidez dieléctrica del aislador en valores de corriente fuga que se presentaron mucho antes de los valores de rigidez determinados por el fabricante como se observa en la Figura 85 y 86.

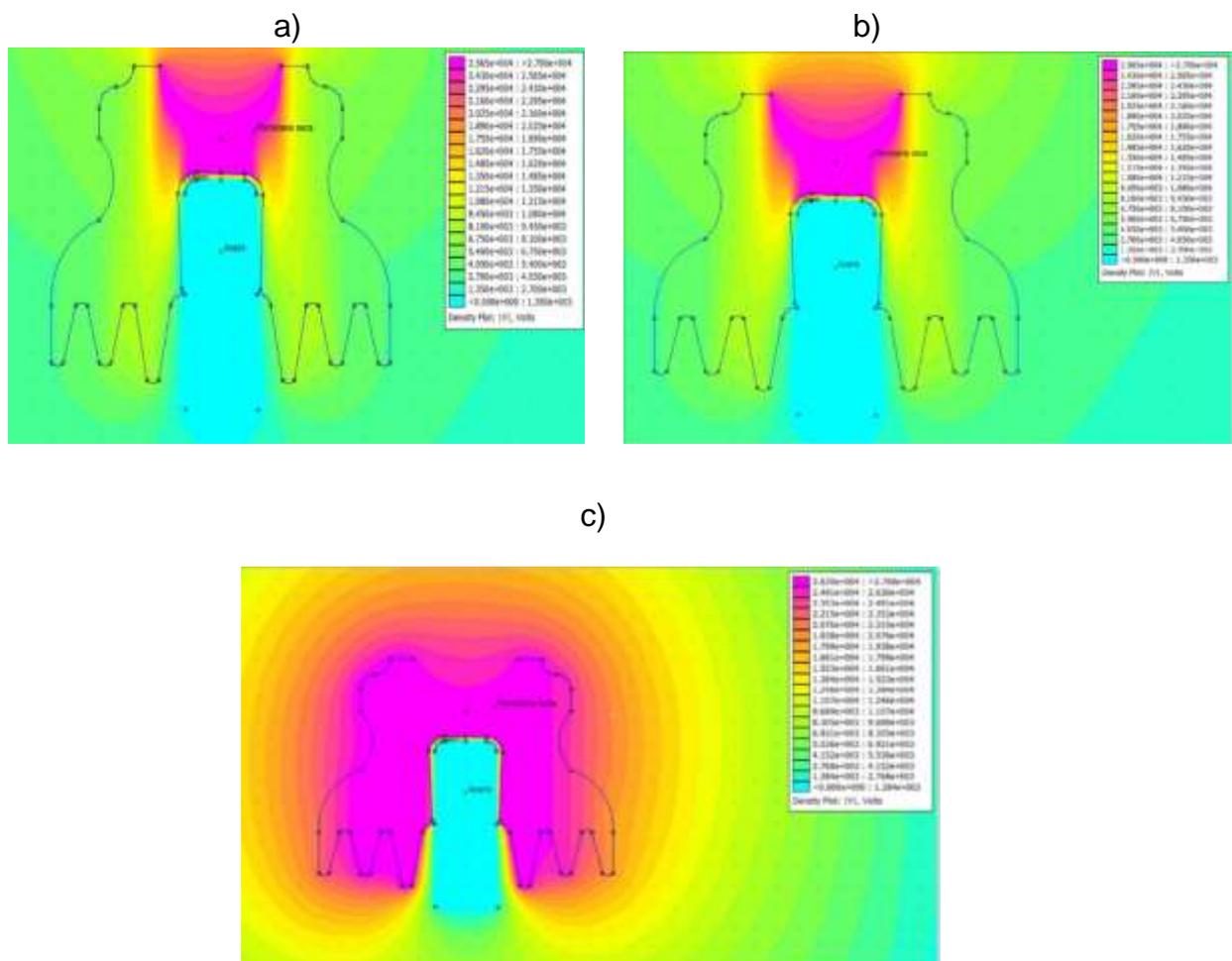


Figura 85. Simulación de voltaje aplicado al aislador tipo pin cerámico NUEVO, a distintas ambientes: a) seco, b) húmedo, c) lluvioso

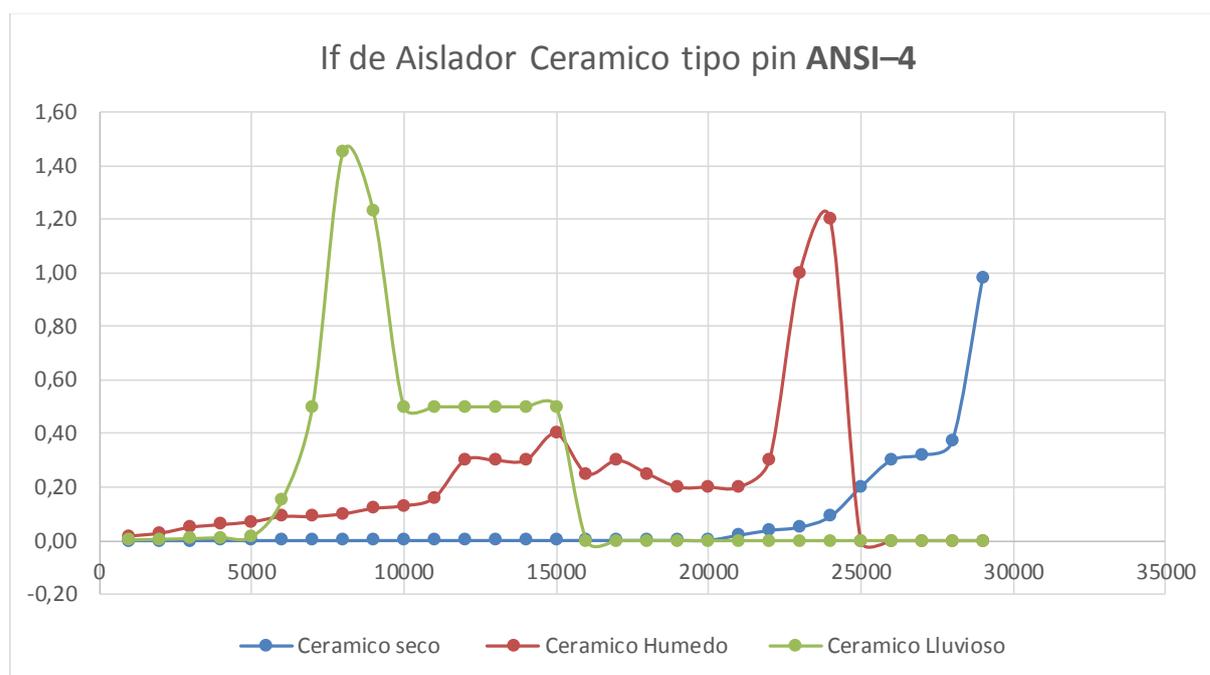


Figura 86. Valores de corriente de fuga en aislador cerámico tipo Pin ANSI-4 en distintos ambientes.

**b) Aislador Cerámico Tipo Pin Sencillo GAMMA CORONA ANSI-4,
NBA 95Kv, 13 Kn (Con falla en ambientes seco, húmedo y lluvioso)**

Mediante una prueba similar al aislador cerámico tipo pin con falla, los valores de la rigidez dieléctrica del aislador al momento de que la corriente de fuga sube produciéndose el “Flash Over” como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11.

Valores de corriente de fuga y rigidez dieléctrica de aislador cerámico con falla en prueba de distintos ambientes climáticos.

| Ambiente | Seco | Húmedo | Lluvioso |
|---|-------------|---------------|-----------------|
| I_f A/m (Datos de Prueba Real) | 1.4 | 4.52 | 4.92 |
| I_f A/m (Datos de Prueba en FEMM) | 1.5 | 4.45 | 5.5 |
| Rigidez Die. V/m (Datos Técnicos) | 65000 | 35000 | 35000 |
| Rigidez Die. V/m (Datos de Prueba Real) | 29000 | 27000 | 11000 |

Al analizar la Tabla 11. Se determina el comportamiento del aislador Cerámico Tipo Pin Sencillo GAMMA CORONA ANSI-4, NBA 95Kv, 13 Kn con falla en sus estructura, al someterlo a distintos ambientes donde se observa que la falla que este aislador presenta afecta de una manera significativa el comportamiento del aislador en comparación con uno nuevo y sano por lo que en todos los ambientes climáticos al que se le sometió dio como resultado el rompimiento de la rigidez dieléctrica en valores de corriente fuga que se sobrepasaron considerablemente a los del aislador sano como se observa en la Figura 87 y 88

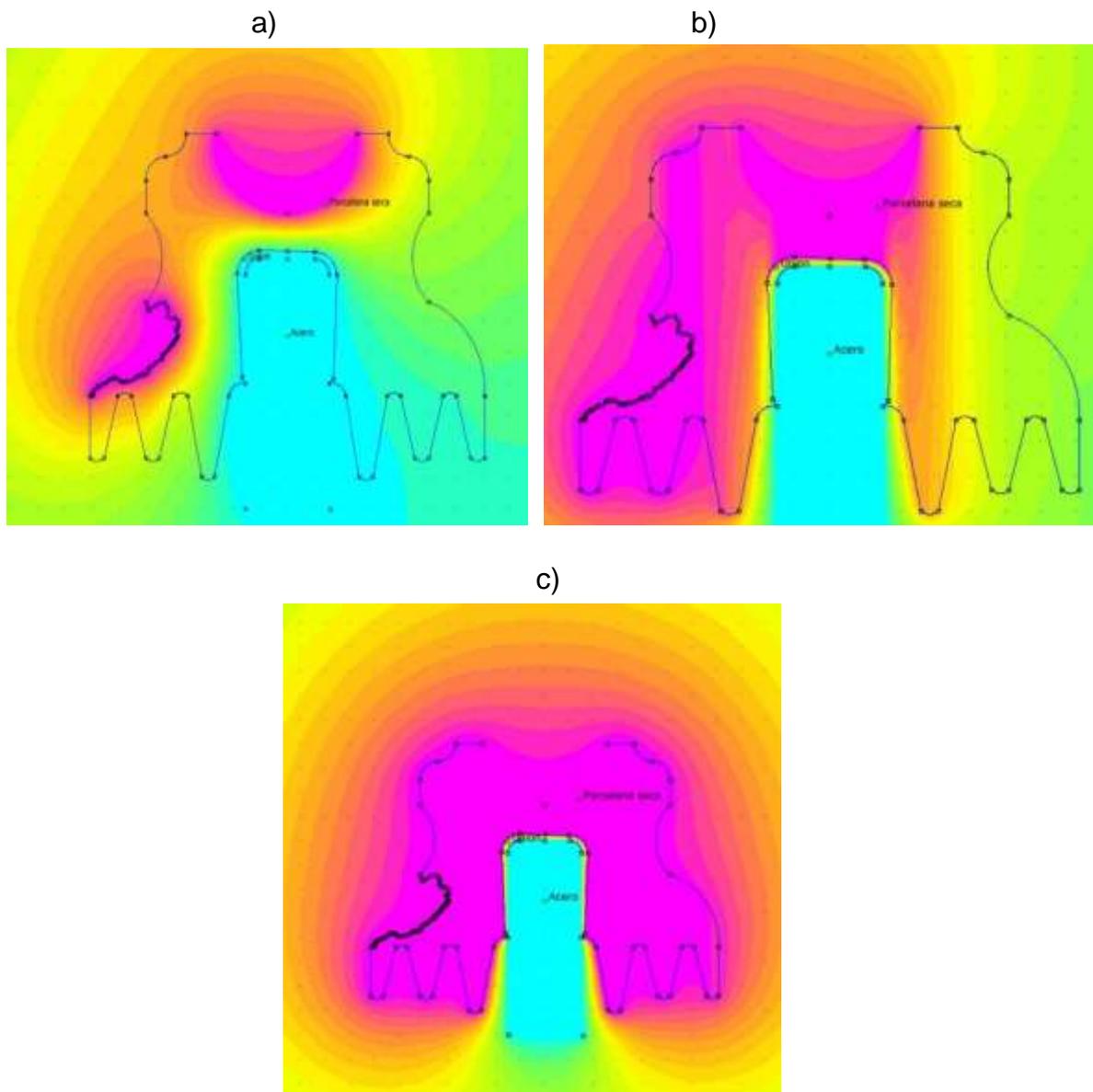


Figura 87. Simulación de voltaje aplicado al aislador tipo pin cerámico CON FALLA, a distintas ambientes: a) seco, b) húmedo, c) lluvioso

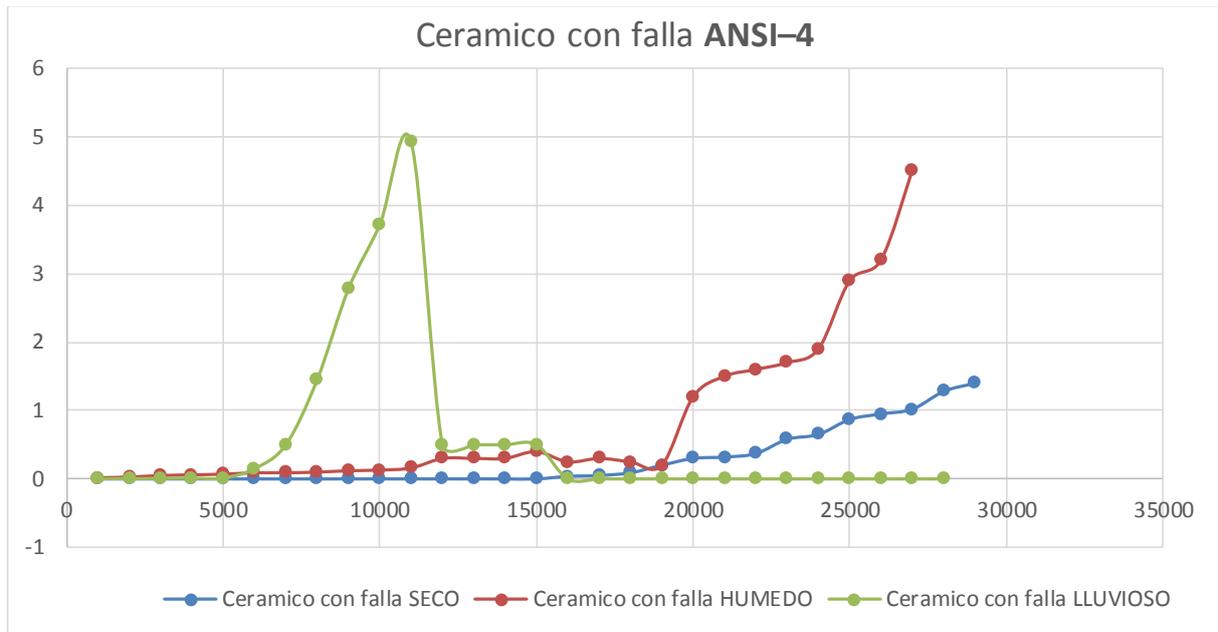


Figura 88. Valores de corriente de fuga en aislador cerámico tipo Pin ANSI-4 CON FALLA en distintos ambientes.

Por motivo de la falla expuesta en la estructura del aislador cerámico tipo pin se puede observar el salto de corriente o Flameo que ocurrió en la prueba realizada en la cámara de simulación climática en el Laboratorio de Alto Voltaje de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga, como se observa en la Figura 88.



Figura 89. FLASH OVER ocurrido en la Cámara de simulación climática en el Laboratorio de Alto Voltaje de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga

c) Aislador Polimérico de Suspensión Clevis-Lengüeta, GAMMA ANSI C29.5 SML 70Kn, NBA 14Kv (ambientes seco, húmedo y lluvioso)

El aislador de suspensión polimérico al igual que el aislador cerámico nos permite conocer su rigidez dieléctrica en ambientes secos y húmedos por lo que se los registra con los valores máximos de corriente de fuga y rigidez dieléctrica calculados en el software y en la cámara de simulación climática al momento de realizarse las pruebas como lo podemos observar en la Tabla 12.

Tabla 12.

Valores de corriente de fuga y rigidez dieléctrica de aislador de suspensión polimérico en prueba de distintos ambientes climáticos.

| Ambiente | Seco | Húmedo | Lluvioso |
|--|-------------|---------------|-----------------|
| I_f A/m(Datos de Prueba Real) | 0.000 | 0.043 | 0.32 |
| I_f A/m(Datos de Prueba en FEMM) | 0.028 | 0.05 | 0.38 |
| Rigidez Die. V/m (Datos Técnicos) | 95000 | 85000 | 85000 |
| Rigidez Die. V/m (Datos de Prueba Real) | 30000 | 30000 | 29000 |

Al analizar la Tabla 12. Se determina el comportamiento del aislador Polimérico de Suspensión Clevis-Lengüeta, GAMMA ANSI C29.5 SML 70Kn, NBA 14Kv, que la rigidez que este presenta según los datos de corriente de fuga en la pruebas realizadas solo en el ambiente lluvioso obtenemos Flas Over de una manera significativa ya que se dio como resultado el rompimiento de la rigidez dieléctrica como se observa en la Figura 90 y 91.

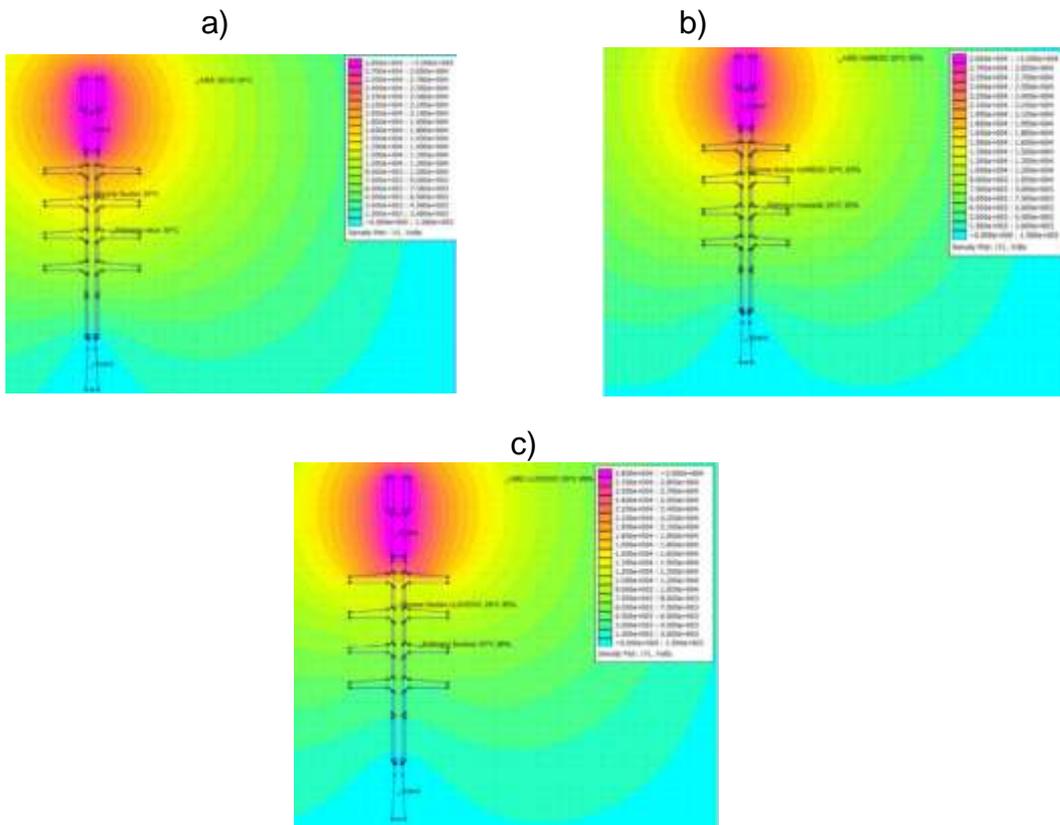


Figura 90. Simulación de voltaje aplicado al aislador de suspensión polimérico, a distintos ambientes: a) seco, b) húmedo, c) lluvioso

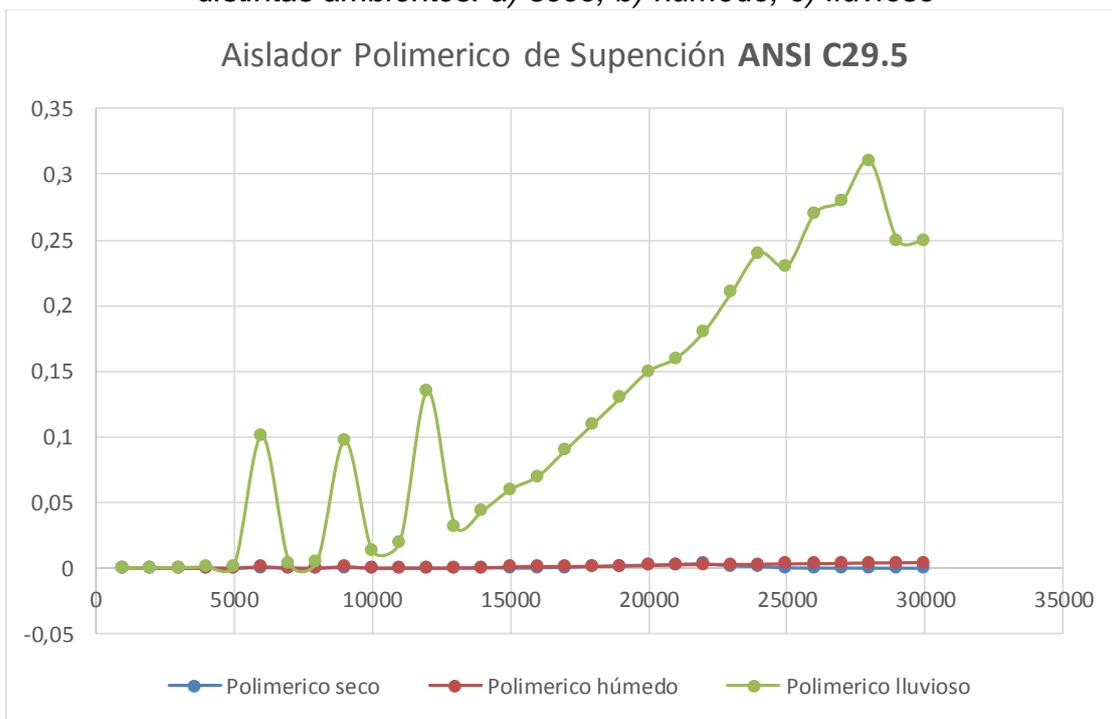


Figura 91. Valores de corriente de fuga en aislador cerámico tipo Pin ANSI-4 CON FALLA en distintos ambientes.

5.6 Comprobación de la hipótesis

Hipótesis: “Mediante la implementación de una cámara de ensayos de recreación de diferentes ambientes climáticos, se permitirá determinar el comportamiento de la rigidez dieléctrica de aisladores de hasta medio voltaje sometiéndolos a dicha cámara”.

Con el diseño y construcción de la cámara de simulación climática realizado en el Laboratorio de Alto Voltaje de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga y a su vez con la simulación realizada en el software FEMM, se determinó el comportamiento de la rigidez dieléctrica por medio de la norma (IEC60815-1, 2002) en el aislador tipo pin en buen estado, se permite observar que al someterlo a 29kv la corriente de fuga es menor a 1.02A este a su vez puede resistir en seco hasta los 60kv, mientras que en un ambiente lluvioso la corriente de fuga es de 1.52A a 8000v este en húmedo puede resistir hasta 35kv, de similar forma y con la norma mencionada sometimos a un aislador tipo pin pero con una rotura, a 29kv dándonos una corriente de 1.4A en seco mientras que en lluvioso esta corriente aumento a 4.92A a un voltaje de 11kv en este punto se pudo observar que hubo la perdida de la rigidez dieléctrica y el flameo, este podría ocasionar problemas en el sistema eléctrico dando perdidas de energía y arriesgando la seguridad de la línea energizada.

En el aislador polimérico de suspensión con la misma norma mencionada en seco se sometió a 29kv dándonos una corriente de fuga de 0.A, mientras que en lluvioso la corriente aumento a 0.32A con un voltaje de 29kv no hubo flameo alguno.

CAPÍTULO VI

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- Se construyó una cámara capaz de simular ambientes de climas seco, húmedo y lluvioso por medio de un controlador electrónico según las normas: IEC 60815-1 Y IEC 60507, que permite la realización de pruebas de voltaje en aisladores cerámicos y poliméricos de suspensión y el análisis de la rigidez dieléctrica que presentan los aisladores al momento de operar en dichas condiciones climáticas.
- Se realizó los cambios pertinentes en temperatura con un máximo de 50°C controlables y una humedad relativa de 36-98%, que interfieren en el ambiente de la cámara de simulación climática así permitiendo una recreación específica de los ambientes a los cuales el aislador está sometido en operación.
- La pruebas realizadas de disrupción eléctrica en clima simulado seco a temperaturas de 20°, 25° y 30°C, humedad a 55% y lluvia a 95% con una conductividad de agua de 200 $\mu\text{S}/\text{m}$, se aplicaron a dos tipos de aisladores Pin sencillo cerámico marca GAMMA CORONA ANSI-4 (Nuevo y con Falla en su estructura) y el aislador de suspensión polimérico Clevis-Lengüeta, GAMMA ANSI C29.5, permitiendo así determinar las corrientes de fuga en cada y rigidez dieléctrica al momento de su operación pertinente.

- Los resultados obtenidos en las pruebas de simulación climática a los aisladores cerámicos GAMMA CORONA ANSI-4 del mismo tipo pero con uno de ellos con falla en su estructura permiten observar que el aislador sano brinda una rigidez dieléctrica aceptable en ambientes seco y húmedo que en comparación con el aislador con falla, la corriente de fuga que este presentó de 5 A en un valor de voltaje 11kV en estos ambientes fue relativamente grande permitiendo el Flash Over inclusive antes de llegar al voltaje de operación de manera constante.
- El aislador polimérico Clevis-Lengüeta ANSI C29.5, presentado en la mayoría de las pruebas climáticas una corriente de fuga considerablemente baja que no superó los 0,32A lo cual indica su eficiencia y confiabilidad de operación en ambientes de clima críticos.
- Los resultados de corriente de fuga y rigidez dieléctrica obtenidos en las pruebas físicas por medio de la cámara de simulación climática se comprobaron mediante la obtención de los mismos datos en condiciones de permeabilidad y conductividad del material y atmósfera en la que se encontraba el aislador en el Software FEMM, demostrando un error del 10% en la similitud de los resultados tanto en forma física como virtual.
- Mediante el controlador electrónico con el que cuenta la cámara de simulación climática se permitió la realización de una Guía-Manual de operación de la misma para su aprovechamiento en el laboratorio de Alto Voltaje de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga.

6.2 Recomendaciones

- Se recomienda la protección adecuada y pertinente de los alumnos, docentes y elementos electrónicos en el interior de la jaula de operación del HI- POT, donde se encuentra la cámara de simulación climática.
- Revisar la guía de operación de la cámara de simulación climática asegurándose de seguir de manera pertinente los pasos de operación de la misma antes y después de realizar las pruebas físicas.
- Realizar pruebas de simulación climática con contaminantes como polvo y ceniza lo cual permitirá observar de manera clara la operación de estos aisladores en ambientes críticos de contaminación externa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta Pérez, G. J. (2015). *es.slideshare.net*. Recuperado el 05 de Octubre de 2019, de <https://es.slideshare.net/guillermo0077/aisladores-74914391>
- AGElectronica. (2016). <http://www.agspecinfo.com>. Recuperado el 06 de Octubre de 2019, de <http://www.agspecinfo.com/pdfs/M/MB0014.PDF>
- Alicia, D. (2017). *SlidePlayer*. Recuperado el 05 de Octubre de 2019, de <https://slideplayer.es/slide/7295985/>
- aluminiumalloyconductors. (2018). *aluminiumalloyconductors.com*. Recuperado el 06 de Octubre de 2019, de aluminiumalloyconductors.com
- ANSI/IEEE. (4-1978). *A proposal for the automatTransactions on Instrumentation and Measurement*.
- Avilés Merino, F. (2019). *Hojas guías de alto voltaje*.
- bolivianelectric. (2016). *bolivianelectric.com*. Recuperado el 06 de Octubre de 2019, de <https://bolivianelectric.com.bo/aisladores-ceramicos/>
- Chachalo, L. &. (2018). *Evaluación del impacto de ceniza volcánica en la rigidez dieléctrica de aisladores de suspensión en líneas de alto voltaje mediante análisis del factor de pérdida dieléctrica* .
- desenchufados. (2017). *desenchufados.net*. Recuperado el 07 de Octubre de 2019, de <https://desenchufados.net/arco-electrico-producido-en-aisladores-bajo-lluvia/>
- EPRECSA. (2018). *eprecsa.mx*. Recuperado el 07 de Octubre de 2019, de <http://www.eprecsa.mx/aisladores-suspension-vidrio/>
- García Meythaler, N. A. (2019). *Modelamiento y simulación del efecto " Flashover Voltage" en los aisladores de suspensión de las líneas de transmisión de 500KV, ante el impacto de la caída de ceniza del Volcán Cotopaxi en la zona de mayor influencia* . Latacunga: Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE".
- Gonzalo Faraig, M. (2016). *Elaboración de procedimientos de ensayo mecánico de aisladores poliméricos para líneas aéreas de alta tensión*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- IEC60507. (2002). *Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on AC systems*.

- IEC60815-1. (2002). *IE Commission*. . Switzerland: International Organization for Standardization.
- IEEE Power Engineering Society. Technical Counsel., I. o.-S. (1999). *IEEE guide for the application of insulation coordination. Institute of Electrical and Electronics Engineers*. IEEE .
- Labfacility. (2019). *Pt100 Datasheet*.
- Lasluisa, M. &. (2014). *Proyecto II: Implantación de la Norma ISO 17025 en el HI-POT de 120 KV del laboratorio del Departamento de Eléctrica y Electrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, extensión Latacunga*. Latacunga: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Mari, E. (1998). *Los materiales cerámicos*. TECNIBOOK EDICIONES.
- Moreno, M. (05 de Febrero de 2015). *es.scribd.com*. Recuperado el 08 de Octubre de 2019, de <https://es.scribd.com/document/344615628/Contaminacion-en-Aisladores>
- PACHECO. S, C. D. (2018). *SILVAMODELO DE MANTENIMIENTO PARA AISLADORES CONTAMINADOS EN LA LÍNEA 220 KV CÓNDORES-PARINACOTA*.
- Pesaltae. (09 de Octubre de 2005). Contaminacion. *ieee.org*.
- Robotics, D. (2010). *Dht11 humidity & temperature sensor. DHT11 Datasheet*.
- Saguay Tacuri, M. F. (2012). *Análisis de comportamiento de medios dieléctricos ante las altas tensiones eléctricas*.
- sectorelectricidad. (08 de Enero de 2017). *sectorelectricidad.com*. Recuperado el 09 de Octubre de 2019, de <http://www.sectorelectricidad.com/11349/cuando-se-usa-una-cadena-simple-de-aisladores-izquierda-y-cuando-una-cadena-doble-derecha/>
- srcc. (08 de Octubre de 2018). *www.srcc.co*. Recuperado el 06 de Octubre de 2019, de <https://www.srcc.co/wp-content/uploads/2017/05/Aislador-de-Porcelana-Roto.jpg>
- Torres Noriega, M. A. (1980). *Prototipo de una cámara de niebla*.
- Villagran, V. (2016). *jdelectricos.com*. Recuperado el 07 de Octubre de 2019, de <http://jdelectricos.com.co/que-son-los-aisladores-electricos/>

Vimatec. (09 de Diciembre de 2018). *www.vimatec.com.co*. Recuperado el 05 de Octubre de 2019, de <https://www.vimatec.com.co/sopladores-industriales/>

Wilson, T. (2012). *Wilson, T. M., Stewart, C., Sword-Daniels, V., Leonard, G. S., Johnston, D* Volcanic ash impacts on critical infrastructure.

ANEXOS



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECAÁNICA
CERTIFICACIÓN

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por los señores **SALAZAR MORALES LUIS ORLANDO Y ZURITA CAISAGUANO JUAN SEBASTIÁN.**

En la ciudad de Latacunga, a los 10 días del mes de julio del 2020.

Firma:

Ing. Álvaro Santiago Múlo Quevedo

C.C.: 0502768542

Aprobado por:

Ing. Freddy Salazar
DIRECTOR DE CARRERA

Dr. Freddy Jaramillo
SECRETARIO ACÁDEMICO