



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

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

**TEMA: 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.**

AUTOR: GARCÍA MEYTHALER, NICOLÁS AGUSTO

DIRECTOR: ING. MULLO QUEVEDO, ÁLVARO SANTIAGO

LATACUNGA

2019



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**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**” fue realizado por el señor **García Meythaler, Nicolás Augusto**, 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 Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 25 de enero de 2019

A handwritten signature in blue ink is located at the bottom center of the page. The signature is stylized and appears to read 'Álvaro Múlla Quevedo'.

Ing. Álvaro Múlla Quevedo
Ing. Múlla Quevedo, Álvaro Santiago
C.C. 0502768542

DIRECTOR



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **García Meythaler, Nicolás Augusto**, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“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”**, es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Latacunga, 25 de enero de 2019



Nicolás Augusto García Me

García Meythaler, Nicolás Augusto
C.C. 0503574543



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

AUTORIZACIÓN

Yo, **García Meythaler, Nicolás Augusto**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“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**”, en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Latacunga, 25 de enero de 2019



Nicolás Augusto García Meythaler

García Meythaler, Nicolás Augusto
C.C. 0503574543

DEDICATORIA

Quiero dedicar este proyecto a mis padres Paúl Y Gladys, por su amor, sacrificio y sobre todo paciencia durante estos años de estudio, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy, además por impartirme sus valores como el respeto y educación, que son los que me han llevado a culminar otra etapa de mis estudios, a mis hermanos Galy y Carlos por estar siempre presentes, y apoyarme en toda esta etapa, ya que ustedes con su experiencia supieron aconsejarme y guiarme en este camino muy difícil que es la Universidad.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi gratitud a Dios, quien con su bendición llena siempre mi vida y a toda mi familia por estar siempre presentes.

A mis cuatro pilares fundamentales en mi vida mis padres Paul y Gladys, mis hermanos Galy y Carlos y demás familiares que siempre estuvieron apoyándome en este camino con sus consejos valores y enseñanzas.

Finalmente, deseo expresar mi más sincero agradecimiento al Ing. Álvaro Mullo, que más que un docente, se convirtió en un amigo y quien fue el principal colaborador durante todo este proceso, quien me honró con su dirección, conocimiento, enseñanza y colaboración, permitiendo el normal desarrollo de este proyecto.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARATULA

CERTIFICACIÓN	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	ii
AUTORIZACIÓN	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
RESUMEN	xvi
ABSTRACT.....	xvii

CAPÍTULO I

PROBLEMÁTICA

1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Planteamiento del problema	3
1.3. Justificación e Importancia.....	4
1.4. Objetivos.....	6
1.4.1. Objetivo General.....	6
1.4.2. Objetivos Específicos	6

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS TEORICOS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. Aisladores.....	7
2.2. Materiales empleados en los aisladores.....	7
2.2.1. Porcelana.....	8
2.2.2. Vidrio	9
2.2.3. Polímeros.....	10
2.3. Tipo de aisladores	11
2.3.1. Aisladores de Soporte	11

2.3.2.	Aislador de Suspensión	12
2.3.3.	Aislador tipo Espiga, Palillo o Pin	15
2.4.	Exigencias eléctricas	16
2.5.	Grado de aislamiento.....	17
2.6.	Perdida dieléctrica de un aislador	20
2.7.	Cadena de aisladores	21
2.8.	Tipos de cadena de Aisladores.....	22
2.8.1.	Cadena de Suspensión simple	22
2.8.2.	Cadena de Suspensión Doble	23
2.9.	Calculo de cadena de Aisladores	23
2.10.	Contaminación de aisladores con ceniza Volcánica	25
2.10.1.	Contaminación tipo Solida o tipo A	26
2.10.2.	Contaminación Activa o Densidad de Depósito de Sal Equivalente (ESDD) ..	27
2.10.3.	Contaminación Inerte o Densidad de depósito no Soluble NSDD	29
2.11.	Impacto sobre los aisladores	30
2.12.	Flashover	34
2.13.	Desarrollo de Flashover.....	35
2.13.1.	Proceso de formación de un arco en una superficie contaminada de fácil humedecimiento	36
2.13.2.	Proceso de formación de un arco en una superficie contaminada de difícil humedecimiento	39
2.13.3.	Fase libre de descarga	42
2.14.	Modelos de Flashover	43
2.15.	Cuarto de pruebas de corriente de fuga laboratorio CIGELE Canadá	45
2.16.	Método de elemento finitos (FEM)	46
2.16.1.	Uso del método de elementos finitos	48
2.16.2.	Convergencia del método	49
2.17.	Procedimiento General	50
2.18.	Finit Element Method Magnetics FEMM	54
2.19.	Matlab	56
2.19.1.	Características Principales	57

2.19.2. Simulink	57
2.20. Hipótesis	58
2.21. Variables de Investigación	58
2.22. Operacionalización de Variables	59

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Antecedentes investigativos	60
3.2. Modalidad de investigación.....	63
3.2.1. Método Bibliográfico Documental	63
3.2.2. Método Inductivo – Deductivo.....	64
3.3. Tipo de Investigación	64
3.3.1. Investigación Cuantitativa	64
3.4. Población	65
3.5. Muestra.....	66
3.6. Instrumentos	66

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. Determinación de la cantidad de aisladores	67
4.2. Distribución de Voltaje en la Cadena de Aisladores	69
4.2.1. Modelamiento Computacional de la Distribución de Voltaje en la Cadena de Aisladores	69
4.2.2. Análisis de distribución de voltaje de 5 aisladores	70
4.3. Análisis de Densidad de Voltaje en distintas cadenas de aisladores mediante simulación	78
4.4. Análisis de distribución de voltaje de una cadena de aisladores con herraje de protección	81
4.5. Análisis del aislador ANSI tipo B C29.2-52-3 FOG	86
4.5.1. Análisis del diámetro eficaz y promedio.....	86
4.6. Área superficial	93
4.6.1. Método Numérico	93

4.6.2.	Método computacional.....	94
4.7.	Análisis de la Ceniza depositada en el aislador.....	97
4.7.1.	Análisis del Depósito de Sal Equivalente ESDD sobre el aislador.....	97
4.8.	Análisis de la conductividad a temperatura de 20°C de la parte superior del aislador	99
4.9.	Análisis de la conductividad a temperatura de 20°C de la parte inferior del aislador	101
4.10.	Análisis de la resistencia de contaminación por ceniza volcánica en el aislador	103
4.11.	Análisis de la Resistencia de Contaminación Ambiental (Húmedo).....	106
4.12.	Análisis de la Conductividad específica de Contaminación en función de la temperatura.	107

CAPÍTULO V

PROPUESTA

5.1.	Propuesta	109
5.2.	Objetivos de la propuesta	109
5.3.	Justificación de la propuesta.....	110
5.4.	Análisis y Fundamentación de la Propuesta	110
5.5.	Resultados Simulación Computacional	112
5.5.1.	Influencia de la contaminación ambiental en la corriente de fuga.....	112
5.5.2.	Influencia de la temperatura del contaminante en la corriente de fuga	118
5.6.	Análisis de los Distintos Casos de contaminación	123
5.7.	Resultados Modelamiento Computacional.....	126
5.8.	Análisis de Corriente de fuga.....	129
5.9.	Análisis de Flashover.....	131
5.10.	Análisis del Programa	140
5.11.	Comprobación de la hipótesis.....	141

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1.	CONCLUSIONES	143
------	--------------------	-----

6.2. RECOMENDACIONES.....	144
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	145
ANEXOS	149

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Distancia de fuga recomendada.....	19
Tabla 2.	Operacionalización de variable independiente.....	59
Tabla 3.	Operacionalización de variable independiente.....	59
Tabla 4.	Población de aisladores	65
Tabla 5.	Valores de r_k y D_k para el cálculo del diámetro eficaz de aislador	91
Tabla 6.	Conductividad de la Ceniza Volcánica en la parte superior del aislador	101
Tabla 7.	Conductividad de la Ceniza Volcánica en la parte inferior del aislador ..	102
Tabla 8.	Valores de Resistencia de Contaminación.....	105
Tabla 9.	Resistencia de la contaminación ambiental	107
Tabla 10.	Conductividad Superior en función de la temperatura	108
Tabla 11.	Conductividad inferior en función de la temperatura	108
Tabla 12.	Casos de Contaminación	111
Tabla 13.	Valores de Conductividad Especifica y permeabilidad que posee un aislador.....	112
Tabla 14.	Corriente de fuga en función de la Contaminación Ambiental.....	115
Tabla 15.	Corriente de fuga en función de la temperatura	120
Tabla 16.	Corrientes de fuga (Simulación) para los distintos casos de Contaminación.....	124
Tabla 17.	Corrientes de fuga (MATLAB) para los distintos casos de Contaminación.....	128
Tabla 18.	Diferencia de corriente simulación y modelamiento	130
Tabla 19.	Corrientes de fuga que generan flashover	136

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Aisladores de Porcelana.....	8
Figura 2. Aislador de vidrio	9
Figura 3. Aislador Polímero	10
Figura 4. Aislador de subestación tipo Post-Type, para 161kV	11
Figura 5. Ejemplo de un aislador Post-Type, 35 kV.....	12
Figura 6. Aislador de suspensión, Tipo Campana Espárrago.....	13
Figura 7. Aislador de suspensión, Tipo Ojo-Pasador.....	13
Figura 8. Partes de un aislador de Suspensión, tipo Campana-Espárrago	14
Figura 9. Aislador tipo pin de porcelana 11 kV	16
Figura 10. Circuito Equivalente de un Dieléctrico	20
Figura 11. Cadena de Aisladores	22
Figura 12. Cadena de Aisladores de Suspensión simple	22
Figura 13. Cadena de Aisladores de Suspensión Doble	23
Figura 14. Relación entre S_a y σ_{20}	28
Figura 15. Proceso de medición del NSDD	30
Figura 16. Adherencia de ceniza volcánica con humedad.....	32
Figura 17. Factores que influyen en un proceso de descarga sobre un aislador, debido a la contaminación por ceniza volcánica.	33
Figura 18. Efecto Flashover en 3 aisladores de Suspensión.....	35
Figura 19. Proceso de formación de arco en una superficie de aislante contaminado de fácil humedecimiento	37
Figura 20. Proceso de formación de un arco en una superficie contaminada de difícil humedecimiento	40
Figura 21. Cámara de pruebas de corriente de fuga CIGELE	45
Figura 22. Diagrama eléctrico medidor de Corriente de fuga CIGELE	46
Figura 23. Modelo de elemento finito de prótesis de una mano	47
Figura 24. Dominio bi–dimensional arbitrario con límite curvado	50
Figura 25. Pre-procesamiento	51
Figura 26. Procesamiento.....	52
Figura 27. Post-procesamiento.....	54

Figura 28. Interface de FEMM	55
Figura 29. Distintos problemas registrados en Sistemas Eléctricos, causados por las diferentes actividades volcánicas en el mundo desde 1980	61
Figura 30. Aislador tipo ANSI tipo B C29.2-52-3 FOG.....	66
Figura 31. Numero de Aisladores en función del Nivel de Contaminación Según las Normas IEC y IEEE	68
Figura 32. Distribución de Voltaje en 3 Aisladores	70
Figura 33. Circuito Equivalente de 5 Aisladores	71
Figura 34. porcentaje de voltaje de cada de 5 aislador con referencia a la torre o tierra	74
Figura 35. Simulación de la distribución de voltaje en una cadena de 5 aisladores ...	75
Figura 36. Densidad de voltaje en un aislador.....	75
Figura 37. Distribución de voltaje en una cadena de 5 aislador mediante software FEMM.....	76
Figura 38. Distribución de voltaje en una cadena de 5 aisladores.....	77
Figura 39. Densidad de voltaje en una cadena de 4 aisladores	78
Figura 40. Densidad de voltaje en una cadena de 5 aisladores	79
Figura 41. Densidad de voltaje en una cadena de 8 aisladores	80
Figura 42. Densidad de voltaje en una cadena de 16 aisladores	80
Figura 43. Aisladores de Suspensión con capacitancia de línea.....	81
Figura 44. Diagrama Eléctrico de cadena de "n" aisladores.....	82
Figura 45. Diferencia de la densidad de voltaje en una cadena de 29 aisladores con herraje y sin herraje	84
Figura 46. Curva de distribución de voltaje de una cadena de 29 aisladores sin herraje	85
Figura 47. Curva de distribución de voltaje de una cadena de 29 aisladores con herraje	86
Figura 48. Principio Básico para estimar el diámetro eficaz de un aislador	88
Figura 49. Perfil del aislador 52-3.....	89
Figura 50. Medición practica de Rk para el diámetro eficaz de un aislador	90
Figura 51. Aislador de 52-3 porcelana Solidwork	94
Figura 52. Porcelana aisladora 52-3 Solidwork	95
Figura 53. Superficie para ensamble del aislador con la caperuza	95

Figura 54. Superficie eficaz del aislador 52-3 Solidwork	96
Figura 55. Área superficial del aislador 52-3 Solidwork	96
Figura 56. Determinación se ESDD y NSDD-Cotopaxi –Porcelana	98
Figura 57. Área Superior aislador 52-3 Solidwork	99
Figura 58. Densidad de Voltaje Caso 3 Contaminación Ambiental	113
Figura 59. Densidad de Voltaje Caso 5 Contaminación Ambiental	113
Figura 60. Densidad de Voltaje Caso 7 Contaminación Ambiental	113
Figura 61. Densidad de Voltaje Caso 9 Contaminación Ambiental	114
Figura 62. Densidad de Voltaje Caso 11 Contaminación Ambiental	114
Figura 63. Curva de Corriente de fuga vs Contaminación en función del Ambiente.	116
Figura 64. Curva de Corriente de fuga vs Ambiente en función de la Contaminación	117
Figura 65. Densidad de Voltaje Caso 3 vs temperatura	118
Figura 66. Densidad de Voltaje Caso 7 vs temperatura	119
Figura 67. Densidad de Voltaje Caso 11 vs temperatura	119
Figura 68. Curva de Corriente de fuga vs temperatura en función de la Contaminación	121
Figura 69. Curva de Corriente de fuga vs Contaminación en función de la temperatura	122
Figura 70. Casos de Contaminación de aisladores	123
Figura 71. Curva de la corriente de fuga de los distintos casos de contaminación (Simulación)	125
Figura 72. Circuito Eléctrico para calcular la corriente de fuga MATLAB	126
Figura 73. Corriente de fuga caso 11 (MATLAB).....	127
Figura 74. Curva de la corriente de fuga de los distintos casos de contaminación (Modelado)	128
Figura 75. Corrientes de fuga Modelamiento vs Simulación.....	129
Figura 76. Curva de Flashover	133
Figura 77. Punto de Intersección V_p y V_{arc}	134
Figura 78. Curvas de Corriente para un flashover	135
Figura 79. Caso de contaminación que produce un flashover	137
Figura 80. Corriente que produce flashover	138

Figura 81. Curva de Flashover de Simulación y Modelamiento.....	138
Figura 82. Simulación del caso 25 que genera “flashover voltaje”	139
Figura 83. Interfaz del programa	140
Figura 84. Interfaz del programa Ejecutada.....	141

RESUMEN

El presente trabajo, expone el análisis de los aisladores de la línea de transmisión del Sistema Eléctrico de 500kV, afectados con ceniza del volcán Cotopaxi en la zona donde este contaminante tiene mayor impacto sobre el sistema. El análisis del rendimiento de un aislador en varios niveles de contaminación, mediante un proceso experimental, requiere de mucho tiempo y de equipos, que no son de fácil adquisición y de un costo muy elevado. Por lo tanto, el desarrollo de un modelamiento matemático computacional y simulaciones, son importantes para predecir los efectos de los aisladores durante un “flashover voltage”. En esta investigación, se propone un análisis previo de las condiciones del sistema de aislamiento actual, para proceder a realizar un enfoque basado en modelos matemáticos y en el método de elementos finitos para desarrollar un modelo de simulación del aislador más cercano a la línea, ya que este es el que está sometido al mayor nivel de voltaje de toda la cadena, y que sea expuesto a varios niveles de contaminación depositados en la superficie de este, como también otros factores que intervienen en el aumento o disminución de la contaminación, como es la temperatura y la humedad del depósito contaminante, donde se ha encontrado que todos estos factores afectan a la corriente de fuga, principal variable en la obtención de un modelo de “flashover voltage”.

PALABRAS CLAVE:

- **AISLADORES ELÉCTRICOS**
- **CONTAMINACIÓN CON CENIZA VOLCÁNICA**
- **CORRIENTE DE FUGA**
- **FLASHOVER VOLTAGE**

ABSTRACT

This work presents the analysis of the insulators of the transmission line of the 500 kV Electrical System, affected with ash from the Cotopaxi volcano in the area where this contaminant has the greatest impact on the system. The analysis of the performance of an insulator at various levels of contamination, through an experimental process, requires a lot of time and equipment, which are not easy to acquire and very high cost. Therefore, the development of computational mathematical modeling and simulations are important to predict the effects of insulators during a flashover voltage. In this investigation, a previous analysis of the conditions of the current insulation system is proposed, to proceed to make an approach based on mathematical models and on the finite element method to develop a simulation model of the insulator closest to the line, since this is the one subjected to the highest voltage level of the whole chain, and is exposed to various levels of pollution deposited on the surface of this, as well as other factors involved in increasing or decreasing pollution, such as temperature and humidity of the polluting deposit, where it has been found that all these factors affect the leakage current, the main variable in obtaining a model of "flashover voltage".

KEYWORDS:

- **ELECTRICAL INSULATORS**
- **VOLCANIC ASH POLLUTION**
- **LEAKAGE CURRENT**
- **FLASHOVER VOLTAGE**

CAPÍTULO I

1. PROBLEMÁTICA

1.1. Antecedentes

En los últimos años en país ha realizado una gran inversión en mejorar, la seguridad, calidad y confiabilidad del sistema eléctrico, la mayor parte de esta inversión se ha asignado a la creación de nuevas centrales hidroeléctricas y a su vez a la creación del Sistema de Transmisión de 500Kv, garantizado el abastecimiento de energía eléctrica producida por las nuevas centrales.

Hace alrededor de una década cuando se inició el proceso de estudio, diseño y planificación del Sistema de transmisor de 500Kv, una de las rutas que se contemplaba para su construcción y por la cual se terminó realizando es la que bordea el Parque Nacional Cotopaxi, por la zona noroccidental esta ruta genero un gran impacto al ecosistema de la zona y a su vez levanto varias dudas sobre si cumplía las normas ambientales, uno de los factores más importantes es el riego que produce esta construcción con las cercanías al Volcán Cotopaxi, una de las afectaciones a la línea de transmisión ante una posible erupción del Volcán es la caída de ceniza, que esta podría afectar al sistema ya que solo es necesario el fallo de uno de sus tramos para que todo el sistema deje de funcionar.

Algo relevante que en los últimos años se pudo conocer es que existen ciertas falencias en las Construcciones, Repotenciaciones de los Sistemas Eléctricos del país ya

sea de generación, transmisión o distribución realizados en la última década esto pone en duda la confiabilidad de los Sistemas Eléctricos que en estos se podría incluir el de la Línea de Transmisión de 500Kv, una de las principales razones para este tema de investigación.

Varias investigaciones se han basado en los efectos que generan los contaminantes, no solo industriales, en este caso naturales, como es la humedad, polvo, lluvia o en casos extremos la niebla, granizadas o caída de nieve que se adhieren más fácilmente a las superficies, dichos contaminantes no solo están enfocados en el área de la agricultura o salud, otra área que se está investiga es la contaminación en los Sistemas Eléctricos.

Uno de los principales temas de investigación que empieza a tomar relevancia es la que se enfoca en la contaminación de los Sistemas Eléctricos por ceniza volcánica, estos contaminantes no se producen con frecuencia, pero cuando lo hacen son un verdadero peligro potencial ya que afecta directamente a la infraestructura eléctrica.

El área que más se investiga en función de los Sistemas Eléctricos contaminados por ceniza volcánica es la que afecta a los aisladores eléctricos de suspensión, al ser contaminados estos pierden sus propiedades dieléctricas “aislantes” llevando a una falla del sistema, una de las investigaciones realizadas sobre este tema en Ecuador es de los aisladores de 230Kv con pruebas de laboratorio.

1.2. Planteamiento del problema

El uso de nuevas tecnologías para la simulación de elementos Eléctricos o Mecánicos, como son los Software CAD CAE ha venido en aumento y se han vuelto imprescindibles en el desarrollo de la ingeniería moderna, en torno al ambiente eléctrico, estos Software nos permiten simular casos en general de posibles fallas en los Sistemas Eléctricos sean de Generación, Transmisión, Distribución o de Consumo.

Ya enfocándose en los elementos que conforman los Sistemas Eléctricos y específicamente en los aisladores eléctricos, se pueden simular o diseñar posible falla de estos, por lo que es factible adecuar los medios necesarios para que estos Softwares puedan ejecutarse con elementos externos como son los contaminantes naturales y así poder predecir posibles fallas y poder actuar antes de que estas ocurrieran.

Por ellos se ha decidido realizar la simulación de una posible falla de los aisladores eléctricos de suspensión de la línea de 500Kv del Sistema Nacional Interconectado, específicamente en la zona donde la ceniza del Volcán Cotopaxi afecta más a este tipo de elementos que son fundamentales en la Distribución de Energía Eléctrica, conjuntamente con la simulación, se desarrollara un modelamiento matemático ya que este nos permite aumentar la cantidad de datos, tablas o parámetros que pueden servir para ampliar la investigación y así poder identificar la mayor cantidad de factores en este caso naturales que afectan al aislador.

1.3. Justificación e Importancia

Los Elementos Eléctricos de Alto Voltaje normalmente son elaborados para diferentes tipos de condiciones tanto ambientales como de trabajo ya, que se encuentran siempre en constante funcionamiento, una gran cantidad de elementos eléctricos no son elaborados para condiciones de trabajo extremas como es en este caso, es decir soportar grandes cantidades de contaminación por ceniza volcánica, los análisis para estas posibles fallas se realizan tanto con análisis matemáticos, computacionales y pruebas de laboratorio principalmente.

Las pruebas de Laboratorio en su mayoría para este tipo de investigaciones solo se las realiza hasta niveles de medio voltaje ya que, para niveles de voltaje, superiores se requieren un gran espacio físico, equipos, materiales y elementos que resultan de un alto costo para adquirirlos, debido a estos aspectos, se ha implementado el uso de softwares que faciliten estas pruebas o a su vez mediante modelos matemáticos en base a los datos obtenidos.

Las Simulaciones computacionales, le ofrecen al usuario una gran variedad y beneficios en el proceso de programación, uno de los aspectos más importantes y que más han avanzado, es la capacidad de los programas CAD de simular el proyecto antes de implementarlo, ponerlo en marcha o en casos especiales remplazarlo ya que son simulados en condiciones reales. el poder simular en un Sistema CAD que posee CDF es vital para eliminar posibles errores y accidentes, que pueden llegar a surgir en altos costos no solo económicos sino de seguridad.

Alex Julián López Cáchalo realizó su trabajo de titulación para la Escuela Politécnica Nacional el tema: Evaluación del impacto de ceniza volcánica en la Rigidez Dieléctrica de los aisladores de suspensión en líneas de alto voltaje mediante análisis del factor de pérdida dieléctrica. Este trabajo es práctico realizado en un laboratorio especial y está más enfocado en aisladores específicos que son los ANSI 52-3 que son de un diámetro y una distancia de fuga menor que los instalados en las líneas de 500Kv.

Las Simulaciones no podrán reemplazar al 100 por ciento a los trabajos prácticos, pero si son una gran ayuda, ya que, en una simulación, si el elemento estudiado llegara a fallar este no tendría ningún problema en volverlo a probar, al contrario de los elementos físicos que al momento de producir una falla este no necesariamente deja de funcionar, pero sin pierde sus propiedades principales en este caso se las conoce como pruebas destructivas.

Dentro de los objetivos que tiene la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE se encuentra la formación integral de profesionales de excelencia con enfoque investigativo, capaces de solucionar problemas en el entorno en el que se desarrollan, es por eso que el presente proyecto busca analizar, mejorar los elementos de un Sistema eléctrico y fomentar a la utilización de herramientas computacionales para mejorar la experiencia educativa de los estudiantes.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Modelar y Simular el efecto “flashover voltage” en los aisladores de suspensión de las líneas de transmisión de 500Kv, mediante simulación estática computacional y matemática, para determinar las condiciones normales y críticas de la caída de ceniza.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Realizar un modelamiento matemático y simulación estática del efecto “flashover voltage” de aisladores contaminados con ceniza volcánica, para evitar una posible falla.
- Diseñar un programa que permita visualizar y evaluar el nivel de contaminación del aislador, para poder realizar un mantenimiento preventivo de ser necesario.
- Simular el nivel de contaminación máxima que soporta la cadena de aisladores de 500Kv, en función de la corriente de fuga hasta producirse un “flashover voltaje”.
- Comprobar la Simulación con los datos obtenidos del modelamiento en función de la corriente de fuga.

CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. Aisladores

Los aisladores son elementos de un Sistema Eléctrico, que son los encargados de soportar mecánicamente los elementos conductores que se encuentran en tensión en condiciones normales de servicio, aislándolos eléctricamente entre si y de otros elementos conductores puestos al potencial de tierra (Martínez Darlington, 2013).

El aislamiento eléctrico es una parte vital de un sistema de energía eléctrica. Aunque el costo del aislamiento es solo una pequeña fracción del costo del aparato o línea, el rendimiento de la línea depende en gran medida de la integridad del aislamiento. La falla del aislamiento puede causar daños permanentes al equipo y apagones a largo plazo. Como ejemplo, un cortocircuito en un sistema de 500Kv puede ocasionar la pérdida de energía en un área grande durante varias horas. Las posibles pérdidas financieras enfatizan la importancia de un diseño confiable del aislamiento (Grigsby, 2012).

2.2. Materiales empleados en los aisladores

Los tres principales materiales que se emplean en un aislador al momento de su fabricación son:

2.2.1. Porcelana

La porcelana fue el primer material empleado en la fabricación de aisladores, como se observa en la Figura 1. Se trata de una porcelana especial, conocida como electrotécnica, formada por una mezcla de arcilla plástica (caolín, arcillas inglesas), cuarzo y feldespato en polvo fino. Cada uno de estos materiales constituyentes es responsable de diferentes propiedades de la porcelana. Así, la cantidad de feldespato influye en la rigidez dieléctrica, el cuarzo en la resistencia mecánica, y la arcilla en la resistencia a los cambios de temperatura (Martínez Darlington, 2013).



Figura 1. Aisladores de Porcelana

Fuente:(megaelectric, 2019)

Como valores característicos, obtenidos en la porcelana electrotécnica, si bien son variables, se pueden tomar los siguientes:

- Resistencia a la compresión = $30 \div 50 \text{ kg/cm}^2$

- Resistencia a la tracción = $3 \div 5 \text{ kg/cm}^2$
- Módulo de elasticidad = $7.000 \div 8.000 \text{ kg/mm}^2$
- Coeficiente de dilatación térmica = $3,5 \div 9,1 \times 10^{-6} (\text{°C})^{-1}$
- Resistividad eléctrica (20°C) = $10^{14} \div 10^{15} \Omega - \text{cm}$
- Rigidez dieléctrica = $100 \div 300 \text{ kV/cm}$
- Constante dieléctrica = $5,5 \div 6,5$

2.2.2. Vidrio

El vidrio está compuesto por una mezcla de sílice, carbonato de calcio y de sodio y otros materiales, como el sulfato de bario y la alúmina, junto con una pequeña cantidad de agua. El precio de los aisladores de vidrio (véase Figura 2) es reducido en comparación de la porcelana, su transparencia facilita el control visual de su fabricación a la luz y en general, en funcionamiento da la posibilidad de presentar defectos visibles, como no puede suceder con la porcelana de haber una grieta (Martínez Darlington, 2013).



Figura 2. Aislador de vidrio

Fuente:(megaelectric, 2019)

2.2.3. Polímeros

Los aisladores poliméricos como se indica en la Figura 3, para líneas de transmisión de alto voltaje comprenden un núcleo de fibra de vidrio con resina, que proporciona resistencia mecánica y una cubierta polimérica para la protección contra condiciones climáticas adversas (Rizk & Trinh, 2014).



Figura 3. Aislador Polímero
Fuente:(Celasa, 2015)

Los aisladores compuestos o compuestos reducen el peso en comparación de los de porcelana o vidrio en hasta 10 veces en los aisladores de 400Kv y en dimensiones especialmente radiales, pero en diferencia a el tiempo de trabajo estos tipos de materiales compuestos están sometidos a un mayor proceso de envejecimiento (Martínez Darlington, 2013).

2.3. Tipo de aisladores

Según (Acosta Pérez, 2017), los aisladores pueden ser clasificados según el diseño que se lo coloque, distinguiéndose tres grandes grupos:

2.3.1. Aisladores de Soporte

Se emplean generalmente en sistemas de hasta 69 kV, constan o bien de una sola pieza de porcelana o varias piezas cementadas entre sí como se muestra en la Figura 4. La superficie del núcleo, sigue, en lo posible, la dirección de las líneas de fuerza y las campanas viene a ser perpendiculares a las mismas, con lo cual se evitan, por una parte, los espacios huecos con intensos flujos de campo electrostático, y por otra, se consigue que la distribución del campo sea aproximadamente la misma en estado seco que en estado húmedo(Acosta Pérez, 2017).

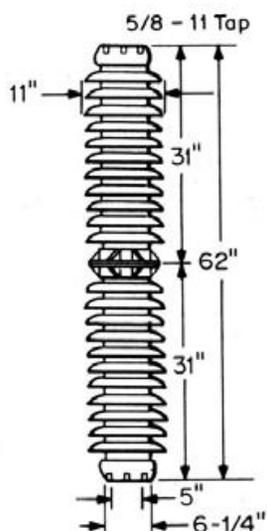


Figura 4. Aislador de subestación tipo *Post-Type*, para 161kV
Fuente:(Acosta Pérez, 2017)

Con miras a obtener economía al momento de invertir en aisladores, a veces se reemplaza la cadena de aisladores por aisladores de un solo cuerpo como los de la Figura 5, que es de tipo sólido y hace veces de la cadena pues oscila de su punto de sujeción y aunque no es tan flexible, le permite al conductor sus movimientos en todos los sentidos. Se producen de dos tipos: uno para condiciones normales, y otro con mayor número de pliegues para cuando exista polución (Acosta Pérez, 2017).

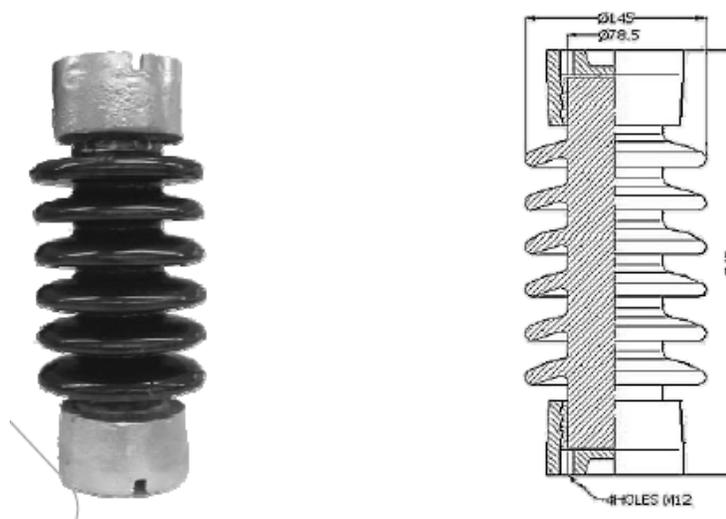


Figura 5. Ejemplo de un aislador *Post-Type*, 35 kV
Fuente:(Acosta Pérez, 2017)

2.3.2. Aislador de Suspensión

Este tipo de aisladores también es denominado plato, en este material aislante (porcelana, vidrio, etc.) tiene adherido con cemento a lado y lado, elementos metálicos que se pueden encajar uno dentro de otro, permitiendo la formación de cadena flexibles.(Acosta Pérez, 2017).

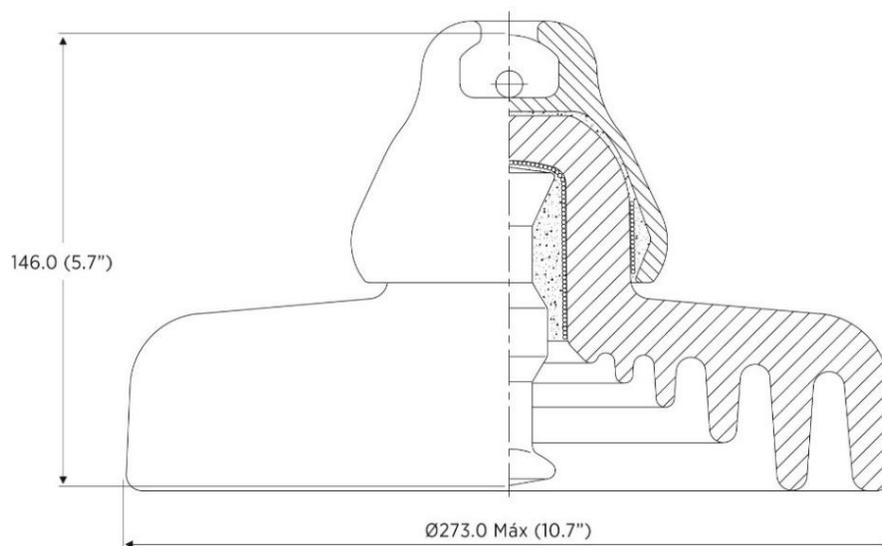


Figura 6. Aislador de suspensión, Tipo Campana Espárrago
Fuente:(Gamma, 2018a)

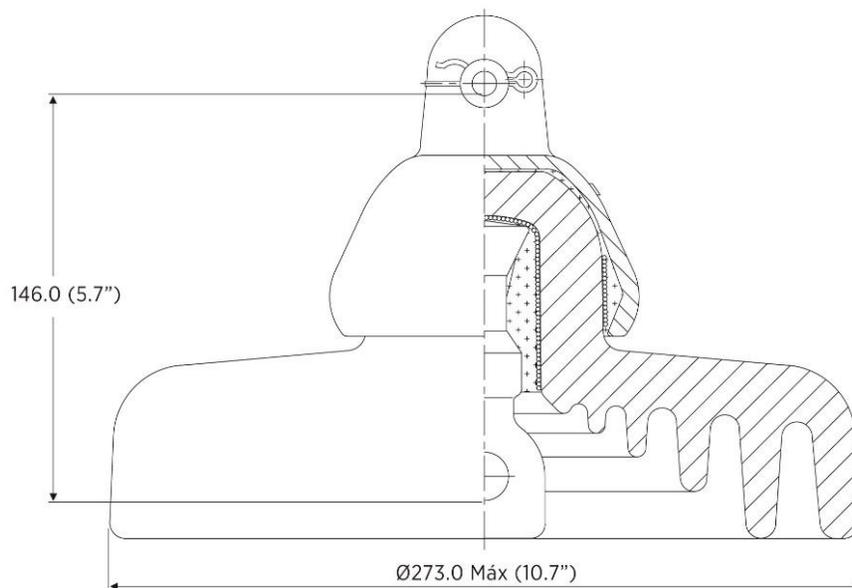


Figura 7. Aislador de suspensión, Tipo Ojo-Pasador
Fuente:(Gamma, 2018b)

Los Aisladores de tipo campana y espárrago (véase Figura 6) dominan hoy en día el margen de voltajes comerciales comprendidos a partir de los 70 kV no resulta de igual manera para los aisladores tipo Ojo-Pasador (véase Figura 7). Para tales voltajes el aislador de apoyo resulta antieconómico, siendo además apreciable la longitud que tendría que denotar los mismos para vencer voltajes más altos. Los aisladores a base de campana y espárrago (también denominados rotula y horquilla) denotan la peculiaridad de poder suspender, hasta cierto límite, a un elemento del otro, formando una especie de cadena, hasta vencer el voltaje deseado. Este hecho ha simplificado notablemente la manufactura de este (Acosta Pérez, 2017).

Las partes que conforman un aislador de Suspensión, tipo Campana-Espárrago se representan a continuación en la Figura 8:

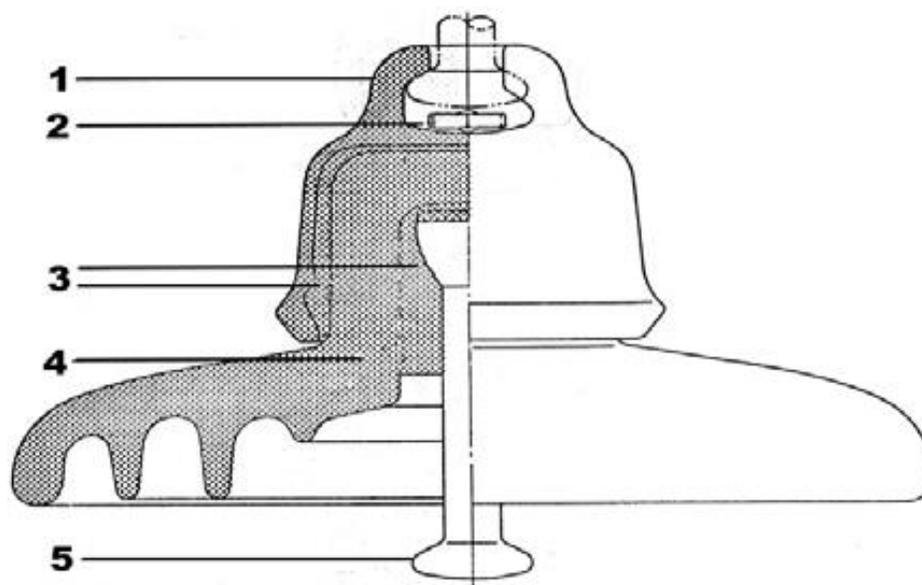


Figura 8. Partes de un aislador de Suspensión, tipo Campana-Espárrago

Fuente:(Acosta Pérez, 2017)

- 1) Caperuza Metálica, denominada también capurucha, fabricada de acero galvanizado en caliente (Acosta Pérez, 2017).
- 2) Pasador de seguridad, fabricado en latón o acero inoxidable.
- 3) Cemento Portland, tiene como finalidad unir a la caperuza metálica a la falda del elemento (Acosta Pérez, 2017).
- 4) Falda de cerámica o vidrio templado. Últimamente también de plástico, cuando menos para fines experimentales (Acosta Pérez, 2017).
- 5) Espárrago de fabricación de acero galvanizado.

2.3.3. Aislador tipo Espiga, Palillo o Pin

Esta clase de aisladores su fijación con el conductor es rígido. Existe una gran variedad en función del tamaño y su forma de sujetar al conductor un ejemplo es el de la Figura 9; en su gran mayoría requieren de ligaduras, o sea de hilos del mismo material del conductor que amarren este del aislador, gracias a sus formas exteriores; también los hay que tiene una pinza o mordaza en el tope estos aisladores tiene una rosca interna que aloja la espiga y a ella se ajusta gracias a una caperuza de plomo que se deforma para asentarse a la cruceta, y sobresale a partir de ella roscada, en una longitud que varía si se trata de cruceta de hierro o madera (Acosta Pérez, 2017).

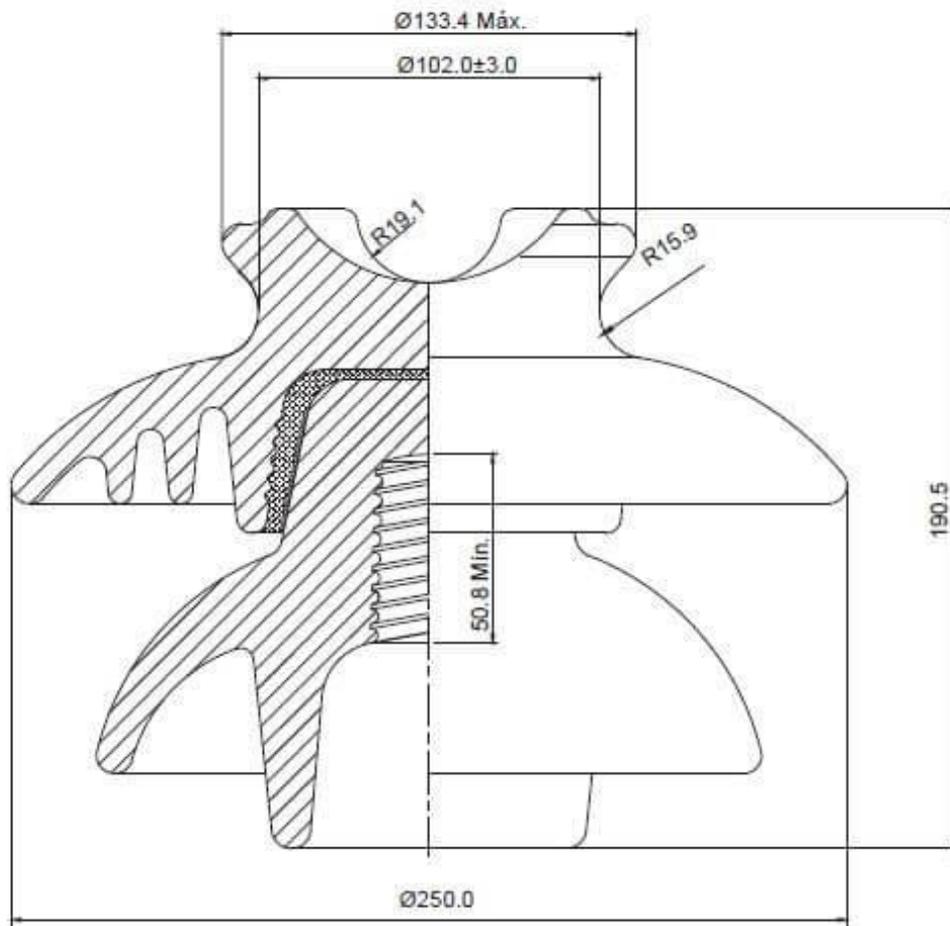


Figura 9. Aislador tipo pin de porcelana 11 kV
Fuente:(Gamma, 2018b)

2.4. Exigencias eléctricas

Un aislador o una cadena de aisladores están sometidos, permanentemente, a un voltaje entre fase y tierra del sistema, o a voltajes compuestos, o sea entre fases, en el caso de incidente monofásico que sobreviene en una línea de neutro aislado. Es necesario vigilar que estos voltajes puedan ser soportadas permanentemente por los

aislantes, aun en el estado más desfavorables (contaminación) determinado en cada caso, por las condiciones atmosféricas y el medio ambiente local (proximidad de la costa, de las zonas industriales, etc.) (Acosta Pérez, 2017).

En fin, se debe tomar en cuenta la frecuencia de las tormentas, ya que los rayos que alcanzan líneas, torres o conductores, someten estos aislantes a ondas de sobretensiones de elevaciones bastantes rápidas, como para ocasionar la perforación de algunos aisladores, y de amplitud suficiente como para provocar un salto (Acosta Pérez, 2017).

2.5. Grado de aislamiento

Un valor de Voltaje elevado puede provocar:

- El *santo en el aislador*, o sea una excitación en el aire circundante entre las dos piezas conductoras en termínale. Solo la energía térmica desprendida por el arco puede provocar un deterioro del aislamiento (Acosta Pérez, 2017).
- La *perforación del aislador*, por una excitación a través del dieléctrico del material que constituye el aislante (Acosta Pérez, 2017).

La duración de la aplicación de un voltaje constante, necesario para la excitación, varia con la amplitud de este voltaje. La ley de esta variación es diferente según se trate de un salto o una perforación (Acosta Pérez, 2017)

Las perforaciones son muchas veces, solo una consecuencia de las grietas producidas por las tensiones mecánicas. La amplitud mínima del voltaje que provoca un salto exterior en un aislamiento, varía en función de (Acosta Pérez, 2017):

- La naturaleza, el voltaje aplicado (constante, alterna, transitoria, etc.) (Acosta Pérez, 2017)
- La condiciones atmosféricas y climáticas (temperatura, densidad del aire, estado de ionización del aire)
- El estado de la superficie del aislante (humedad, polución, etc.) (Acosta Pérez, 2017)

La contaminación es un fenómeno que ayuda al salto eléctrico superficial del aislador. Para establecer la especificación de los aisladores se suele utilizar el grado de aislamiento que se define como la relación entre la longitud del camino de fuga de un aislador (o una cadena total), y el voltaje de fase. Siendo la longitud de fuga la distancia que se mide sobre la superficie del aislador del menor camino para la corriente de fuga (Acosta Pérez, 2017).

La Tabla 1 indica los valores mínimos de distancia de fuga requeridos para distintos tipos de ambiente, existen dos organizaciones que establecen estas distancias el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos por sus siglas IEEE y la Comisión Electrotécnica Internacional con sus siglas IEC

Tabla 1
Distancia de fuga recomendada

Grado de Contaminación	Tipo de Ambiente	Mínima distancia de fuga (mm/kV) IEC	Mínima distancia de fuga (mm/kV) IEEE
I Bajo	<ul style="list-style-type: none"> • Áreas sin industria y con baja densidad de viviendas equipadas con Plantas de calefacción. • Áreas con baja densidad de industria o casas, pero sujetas a frecuentes vientos o lluvias. • Áreas agrícolas • Áreas montañosas • Todas estas zonas están situadas a una distancia mínima de 10 a 20 Km del mar y no estarán expuestas a vientos directamente desde el mar 	27.7	16
II Medio	<ul style="list-style-type: none"> • Áreas con industria que no producen humo particularmente contaminante y/o densidad media de viviendas equipadas con plantas de calefacción. • 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 y expuestas al mar o a vientos muy contaminantes del mar. • Las zonas desérticas, caracterizadas por la ausencia de lluvias durante largos periodos, vientos que llevan arena de sal, y se someten a condensación regular. 	53.7	31

Fuente:(IEEE Power Engineering Society. Technical Counsel., Institute of Electrical and Electronics Engineers., & IEEE-SA Standards Board., 1999).

2.6. Pérdida dieléctrica de un aislador

Un dieléctrico ideal está libre de pérdidas en este caso vendría a ser el aislador de suspensión y si su permeabilidad relativa es ϵ_r , su permeabilidad está dada por

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad \text{Ec. (1)}$$

y ϵ también conocida como la constante dieléctrica es un número real. Un dieléctrico real siempre está asociado con la pérdida. Los siguientes son los mecanismos que conducen a la pérdida que también pueden ser asociados con las pérdidas que presenta un aislador:(Wadhwa, 2007).

- Pérdida de conducción P_c por conducción iónica o electrónica. El dieléctrico, tiene un valor de σ como conductividad.
- Pérdida de polarización P_p por capa límite de orientación o polarización por deformación.
- Pérdida de ionización P_i por descargas parciales de zonas internas o externas.

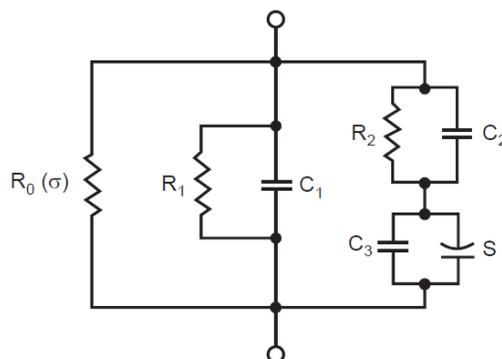


Figura 10. Circuito Equivalente de un Dieléctrico
Fuente:(Wadhwa, 2007)

La Figura 10 muestra un circuito equivalente de un dieléctrico con pérdida por conducción, polarización y descargas parciales. Un dieléctrico ideal puede representarse por un condensador puro $C1$, las pérdidas de conducción pueden ser tomadas en cuenta por una resistencia $R0$ (σ) en paralelo. Las pérdidas por polarización producen un componente real de la corriente de desplazamiento que es simulada por la resistencia $R1$. Las descargas parciales de pulso son simuladas por la rama de la mano derecha. $C3$ es la capacitancia del vacío y S es la chispa que se dispara durante la descarga de PD y la recarga repetida de $C3$ se realiza mediante una resistencia $R2$ o un condensador $C2$ (Wadhwa, 2007).

2.7. Cadena de aisladores

En las líneas de transmisión aéreas debido al alto nivel de tensión eléctrica en la cual operan se hace necesario la utilización de cadenas de aisladores como el de la Figura 11, constituidas por “ n ” aisladores en serie, donde el nivel de aislamiento de la cadena es siempre menor que “ n ” veces el aislamiento de un aislador solo, y esto es más notorio cuando el número de aisladores es grande. El largo de la cadena depende del voltaje, mientras más grande aumenta el largo de la cadena, para cumplir con la distancia mínima, y se requiere una altura mayor en las torres (Acosta Pérez, 2017).



Figura 11. Cadena de Aisladores

Fuente:(Barescar90, 2017)

2.8. Tipos de cadena de Aisladores

2.8.1. Cadena de Suspensión simple

Empleado en la alineación y en los pequeños ángulos flexibles como se muestra en la Figura 12.

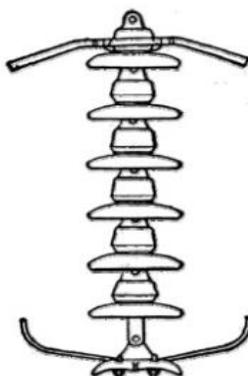


Figura 12. Cadena de Aisladores de Suspensión simple

Fuente:(Gonzalez-Longatt, 2016)

2.8.2. Cadena de Suspensión Doble

Utilizadas en algunos cruces importantes y en los ángulos flexibles mayores. El sistema más simple está formado por dos cadenas elementales como se muestra en la Figura 13, unidas por un balancín al estribo o a la horquilla de muñón fijado al brazo de habilitación (Acosta Pérez, 2017).



Figura 13. Cadena de Aisladores de Suspensión Doble
Fuente:(SectorElectricidad, 2019)

2.9. Cálculo de cadena de Aisladores

El número de aisladores para una línea de un Sistema Eléctrico viene dado por la ecuación:

$$Na = V_{ff} * \frac{D_f}{d_f} \quad Ec. (2)$$

Donde:

V_{ff} : Voltaje de fase del Sistema (kV)

D_f : Distancia de minima de fuga recomendada segun

la norma elegida $\left(\frac{mm}{kV}\right)$ (véase **Tabla 1**)

d_f : Distancia de minima de fuga de cada aislador (mm) "datos del fabricante"

La *Tabla 1* expresa los valores para instalaciones de aisladores a nivel del mar, por lo que si se desea instalar aisladores a otro nivel de altitud se debe corregir mediante la ecuación siguiente:

$$D_{fc} = \frac{D_f}{\sqrt{\delta}} \left(\frac{mm}{kV}\right) \quad Ec. (3)$$

Donde:

D_{fc} : Distancia minima de fuga corregida a nivel requerida (mm/kV)

δ : densidad relativa del aire

Donde la densidad relativa del aire esta expresada en función de la presión barométrica:

$$\delta = \frac{3.86 + b}{273 + t} \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde:

b: presión barométrica (cm Hg).

t: temperatura del ambiente (°C)

La presión barométrica a cualquier altura es:

$$\log b = \log 76 - \frac{h}{18336} \Rightarrow b = 10^{\left(\log 76 - \frac{h}{18336}\right)} \quad \text{Ec. (5)}$$

Donde:

h: altura sobre el nivel del mar (m)

Finalmente se aplica un factor de seguridad del 10% para prevenir un fallo de un sobre voltaje temporal en el sistema, obteniendo como resultado:

$$Na = 1.1 * V_{ff} * \frac{D_{fc}}{d_f} \quad \text{Ec. (6)}$$

2.10. Contaminación de aisladores con ceniza Volcánica

Según (John Wardman et al., 2019) y (J Wardman, Wilson, Hardie, & Bodger, 2014) la ceniza puede viajar suspendida en el aire por cientos o miles de kilómetros.

Cuando las líneas de transmisión o subestaciones están dentro de las zonas por donde la ceniza se traslada, es muy probable que sus aisladores se contaminen, si se suman condiciones ambientales desfavorables de humedad, los aisladores pueden correr un alto riesgo de fallar (Wilson et al., 2012).

De acuerdo a las normas IEC-60815-1 (IEC, 2008), en general se puede clasificar a la contaminación que se deposita sobre los aisladores en dos grandes tipos:

- Contaminación tipo A o tipo capa sólida
- Contaminación tipo B o tipo niebla salina

La contaminación tipo B es la que se conforma por niebla o humedad con componentes salinos que se pueden adherir en el aislador, por esa razón no son tema de este estudio.

Pero la ceniza volcánica encaja como una contaminación sólida tipo A que presenta sales solubles potencialmente conductivas (J Wardman et al., 2014). Es por esta razón que se realiza un análisis de este tipo de contaminante de una forma más detallada.

2.10.1. Contaminación tipo Sólida o tipo A

Es cuando existe la combinación entre un contaminante de tipo sólido con un componente no soluble, como es la ceniza volcánica, esta contaminación se adhiere en el aislador y convierte en un contaminante conductivo cuando se humedece (López Chachalo, 2018).

Una falla por contaminación tipo A requiere por lo tanto de un contaminante con sales solubles y de humedad. La contaminación tipo A se detalla de mejor manera a continuación con los dos tipos de mediciones como son la densidad de depósito de sal equivalente y la densidad de depósito no soluble (López Chachalo, 2018).

2.10.2. Contaminación Activa o Densidad de Depósito de Sal Equivalente (ESDD)

La contaminación activa o ESDD cuya unida está representada en mg/cm^2 está compuesta por las siguientes partes.

- **Contaminación conductiva**, es la que permanentemente es conductiva, como son las partículas metálicas.
- **Sales de alta solubilidad**, son las que al mezclarlas con agua se disuelven sin ningún inconveniente.
- **Sales de baja solubilidad**, Son las que al mezclarlas con una gran cantidad de agua y aún son difíciles de disolver.

Para medir la densidad de depósito de Sal Equivalente ESDD se debe medir la conductividad y la temperatura de la solución mediante la ecuación:

$$ESDD = S_a * \frac{V}{A} \quad Ec. (7)$$

Donde:

ESDD: Es la densidad de deposito de sal equivalente en (mg/cm^2)

S_a : Es la salinidad en (Kg/m^3)

V : Es el volumen del agua destilada en (cm^3)

A : Es el area de la superficie del aislador, de la que se recolecto el contaminante en (cm^2)

La salinidad está en función de la conductividad a temperatura de 20°C , en (S/m):

$$S_a = (5,7\sigma_{20})^{1,03} \quad \text{Ec. (8)}$$

Donde:

σ_{20} : Es la conductividad a temperatura a 20°C , en (S/m)

También se puede utilizar una tabla de relación entre σ_{20} y S_a (véase Figura 14)(IEC, 2008).

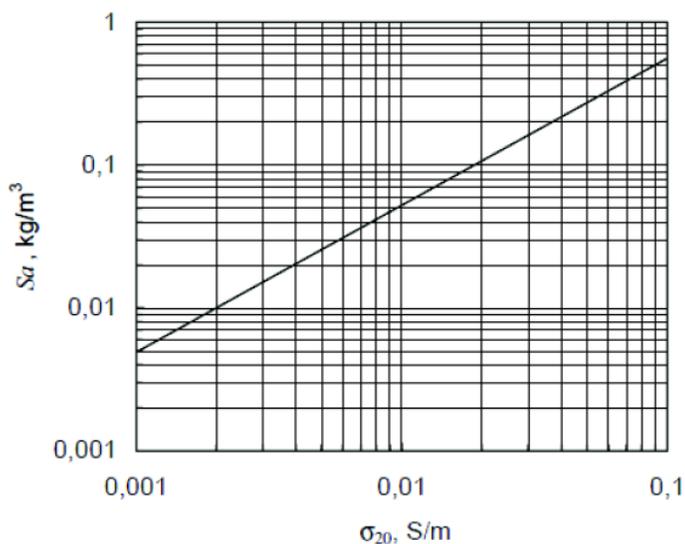


Figura 14. Relación entre S_a y σ_{20}

Fuente:(IEC, 2008)

La medición de conductividad debe corregirse mediante la ecuación.

$$\sigma_{20} = \sigma_{\theta} [1 - b(\theta - 20)] \quad \text{Ec. (9)}$$

Donde:

θ : Es la temperatura de la solución en (°C)

σ_{θ} : Es la conductividad a temperatura $\theta^{\circ}\text{C}$, en (S/m)

σ_{20} : Es la conductividad a temperatura 20°C , en (S/m)

b : Es el factor que depende de la temperatura θ , y se obtiene mediante la ecuación 10.

$$b = -3,2 * 10^{-8} \theta^3 + 1,032 * 10^{-5} \theta^2 - 8,27210^{-4} \theta + 3,544 * 10^{-2} \quad \text{Ec. (10)}$$

2.10.3. Contaminación Inerte o Densidad de depósito no Soluble NSDD

Es el componente o restante del contaminante que no es conductivo pero sigue conformando parte del contaminante en sí y se lo puede asemejar a el polvo, la arcilla, etc. (López Chachalo, 2018).

El NSDD debe ser calculado con la siguiente ecuación y mediante el proceso de la Figura 15:

$$NSDD = \frac{1000(W_f - W_i)}{A} \quad \text{Ec. (11)}$$

Donde:

W_f : Es el peso del papel filtro en condiciones secas, en gramos (g)

W_i : Es el peso inicial del papel filtro en condiciones secas, gramos (g)

A : Es el área de la superficie del aislador, de la que se recolectó el contaminante, en (cm²)

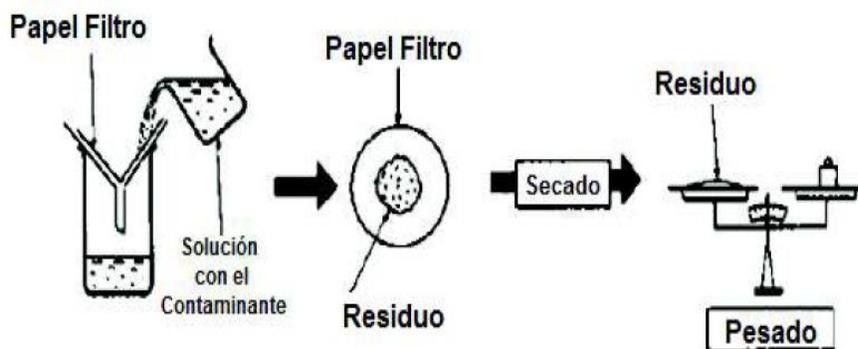


Figura 15. Proceso de medición del NSDD
Fuente:(IEC, 2008)

2.11. Impacto sobre los aisladores

Cuando se produce un evento eruptivo con emisión de ceniza, este tipo de eventos pueden producir fallos o afectaciones de gran consideración en los Sistemas Eléctricos

esto puede agravarse si en el proceso de emisión de ceniza interviene el viento ya que la ceniza puede viajar por varios kilómetros (López Chachalo, 2018).

La característica principal de la ceniza volcánica en el impacto sobre los aisladores eléctricos es la creación de descargas eléctricas que pueden generarse a través del aislador o sobre su superficie, esto produce también una rápida degradación en la calidad y en su tiempo de vida útil por la generación de varias descargas que se producen con el tiempo o a su vez por la circulación de corrientes de fuga (Wilson et al., 2012).

Una capa fina de contaminación que contenga sales solubles como en este caso la ceniza volcánica, que se deposita sobre el aislador por lo general no produce impacto sobre el rendimiento dieléctrico del aislador por su baja conductividad (Wightman & Bodger, 2011) (Wilson et al., 2012).

Añadiendo a lo dicho anteriormente se dice que los vientos o lluvias fuertes contribuyen a la limpieza de los aisladores (J Wardman et al., 2014). Pero con la aparición de humedad o lluvias ligeras que no superen los 6mm/h de precipitación el contaminante como es la ceniza volcánica que contiene sales solubles podrían disolverse, formando una capa conductora sobre el aislador (Wilson et al., 2012).

La ceniza seca solo puede adherirse solamente en superficies horizontales o que tengan una ligera inclinación, con la humedad esto varia ya que la adherencia de la ceniza húmeda aumenta pudiendo así depositarse en toda la superficie del aislador y poder

cubrir zonas que antes no se podía como es la falda del aislador como se observa en la Figura 16 (López Chachalo, 2018).



Figura 16. Adherencia de ceniza volcánica con humedad
Fuente:(López Chachalo, 2018)

Con lo dicho anteriormente, el riesgo que corre un aislador por una posible falla aumenta conforme se incrementa la cantidad de ceniza que cubre este. Ya que (Nellis & Hendrix, 1980) predijo que si un aislador posee el 30% o menos de su distancia de fuga limpia y seca esta no posee una probabilidad de generar una descarga.

Contrario a esto se puede decir que si un aislador que posee más del 70% de su distancia de fuga cubierta con contaminante con sales solubles como la ceniza posee un alto nivel de producir una descarga (López Chachalo, 2018).

(Wilson et al., 2012) (Johnston, 1997), Analizaron varios factores que podrían influir en la generación o inicio de una descarga o contorneo de un aislador contaminado con ceniza volcánica como se muestra en la Figura 17.

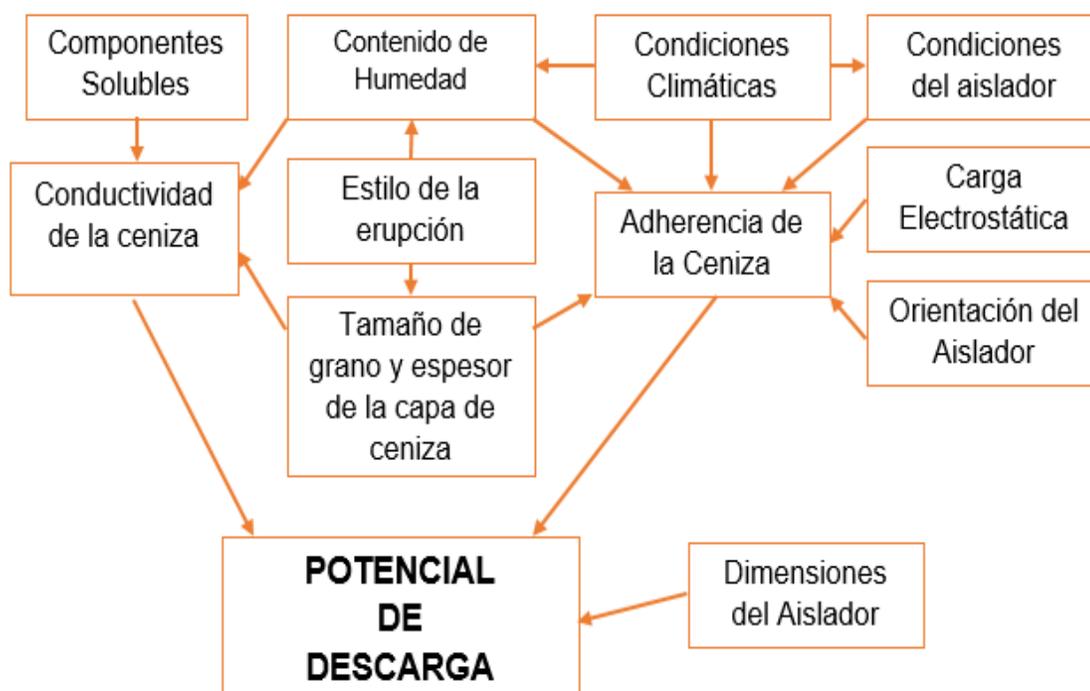


Figura 17. Factores que influyen en un proceso de descarga sobre un aislador, debido a la contaminación por ceniza volcánica.

Fuente:(Johnston, 1997)

Uno de los factores que también intervienen es la composición de la ceniza ya que si esta es demasiado fina produce una mayor afectación y su facilidad de flotar en el ambiente y adherirse a la superficie en comparación con la ceniza gruesa. Este tipo de ceniza produciría que se cubra con mayor facilidad la superficie de un aislador y con la

humedad antes mencionada pueda depositarse hasta en las faldas del aislador aumentando el riesgo de una posible falla.(López Chachalo, 2018).

La composición y forma de un aislador influye en la adherencia de la ceniza, al igual que su disposición y orientación (Wilson et al., 2012). Por ejemplo, el nuevo estilo de aisladores compuesto tiene mayores adherencias que los aisladores de porcelana o vidrio.

La ubicación de la cadena de aisladores también es un parámetro importante ya que no es lo mismo que esta se ubique verticalmente como para una cadena de línea de transmisión como puede ser horizontalmente con para una cadena de retención (López Chachalo, 2018).

Para finalizar también se puede señalar que los aisladores que ya poseen una superficie contaminada sea esta por uso prolongado, corrosión, humedad, etc. Podrían aumentar su potencial de falla con la adherencia de ceniza volcánica (López Chachalo, 2018).

2.12. Flashover

Es el Voltaje al que se produce una descarga eléctrica entre dos electrodos que están separados por un aislante; el valor depende de si la superficie del aislador está seca o húmeda. También conocido como voltaje de chispa.

En pocas palabras un flashover es la descarga eléctrica que atraviesa un aislante que en algunos casos puede viajar alrededor como el de la Figura 18 o entre el aislante.



Figura 18. Efecto Flashover en 3 aisladores de Suspensión
Fuente:(Wilson et al., 2012)

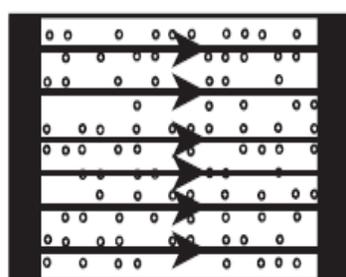
2.13. Desarrollo de Flashover

Existen grandes números de parámetros que intervienen en el proceso de contorno de los aisladores contaminados, estos son: la conductividad o resistividad de la capa superficial del contaminante, el contenido de agua y su distribución espacial, la

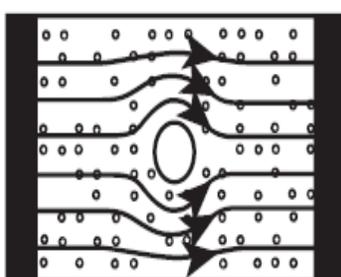
turbulencia del aire, las propiedades de la superficie y estructura química de la capa superficial. El efecto de estos parámetros y las distintas combinaciones de ellos ha sido estudiado parcialmente, y la mayoría de ocasiones de forma empírica. El contorneo se produce bajo ciertas condiciones adecuadas que se indican a continuación (Martínez Darlington, 2013).

2.13.1. Proceso de formación de un arco en una superficie contaminada de fácil humedecimiento

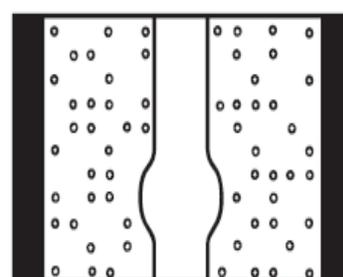
El desbordamiento en la superficie contaminada del aislante hidrófilo (aquellos que no gotean agua) a menudo implica una serie de pasos, ilustrados usando la Figura 19, en un campo simple para establecer la geometría plana. Esta geometría se ha utilizado en muchas series de experimentos para establecer la naturaleza general y los parámetros específicos del arco para varias superficies de agua y contaminantes (Encalada Simbaña & Bernard, 2016).



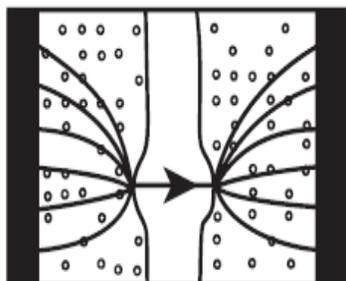
a) flujo uniforme de corriente de fuga en la capa de contaminación húmeda



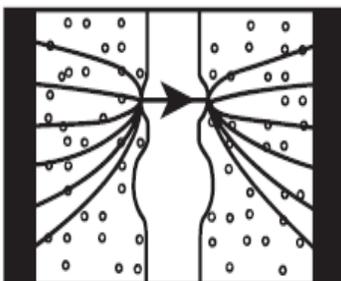
b) calentamiento local de la corriente de fuga forma un punto seco



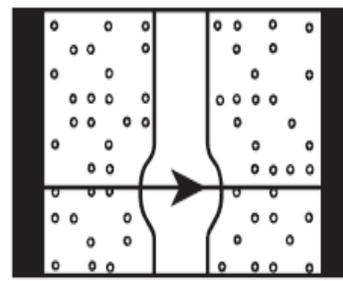
c) las zonas secas crecen y se unen, formando una banda seca, que interrumpe la corriente



d) arco local a través de la banda seca, hace que las regiones de alta densidad de corriente en las raíces del arco



e) La banda seca crece en las raíces del arco hasta que se reducen las rayas eléctricas; el arco migra lateralmente.



f) el arco crece a lo largo de la superficie húmeda hasta alcanzar una longitud crítica, lo que lleva a que se produzca una descarga eléctrica entre los electrodos

Figura 19. Proceso de formación de arco en una superficie de aislante contaminado de fácil humedecimiento

Fuente:(Masoud Farzaneh & Chisholm, 2009)

- 1) Depósito de una capa de contaminación en las superficies del aislador debido a la exposición a sal de mar o carretera, polvo insoluble y diversas formas de contaminación industrial como los sulfatos de las centrales eléctricas de carbón (Masoud Farzaneh & Chisholm, 2009).

- 2) Humedecer la capa de contaminación en condiciones atmosféricas que pueden incluir niebla, llovizna, rocío, lluvia, nieve o hielo. Una capa de contaminación seca tiene una alta resistividad y, en consecuencia, no tiene efectos significativos en el rendimiento eléctrico del aislante. Solo cuando la capa de contaminación está húmeda, el contaminante húmedo resultante tiene suficiente conductividad para soportar el flujo de la corriente de fuga medible que fluye en la superficie del aislador, como se muestra en la Figura 19-a (Masoud Farzaneh & Chisholm, 2009).
- 3) Las pequeñas perturbaciones en el flujo de la corriente de fuga conducen a áreas de mayor densidad de corriente y mayores efectos de calentamiento local, lo que resulta en la formación de un punto seco, Figura 19-b. Los puntos secos múltiples pueden extenderse y unirse para formar una sola banda seca, Figura 19-c (Masoud Farzaneh & Chisholm, 2009).
- 4) La conductividad de una banda seca es mucho menor que la de la capa de contaminante húmedo. La distribución de voltaje, que puede haber sido originalmente uniforme, se vuelve no uniforme a lo largo del aislador y ahora aparece en la banda seca. Si el campo eléctrico dado por la caída de voltaje a través de la banda seca, dividido por el ancho de banda seca es lo suficientemente alto, ocurrirá una ruptura, lo que resultará en la formación de un arco local a través de la banda seca como se muestra en la Figura 19-d (Masoud Farzaneh & Chisholm, 2009).

5) La banda seca crecerá a partir del calentamiento por el efecto Joule y el calentamiento por radiación cerca de las raíces del arco. El arco local puede moverse lateralmente hacia un área con mayor tensión del campo eléctrico, Figura 19-e. El arco local también se puede mover a lo largo de la superficie del contaminante húmedo, lo que eventualmente provoca un flashover en una longitud crítica que se muestra en la Figura 19-f. El arco local también puede extinguirse, devolviendo el proceso a un estado similar al de la Figura 19-c (Masoud Farzaneh & Chisholm, 2009).

2.13.2. Proceso de formación de un arco en una superficie contaminada de difícil humedecimiento

Algunos materiales aislantes son difíciles de humedecer completamente. La superficie contaminada del aislante hidrófobo (aquellos que son fáciles humedecer con el agua) tiene un mecanismo de flashover diferente, ilustrado en la Figura 20 (Masoud Farzaneh & Chisholm, 2009).

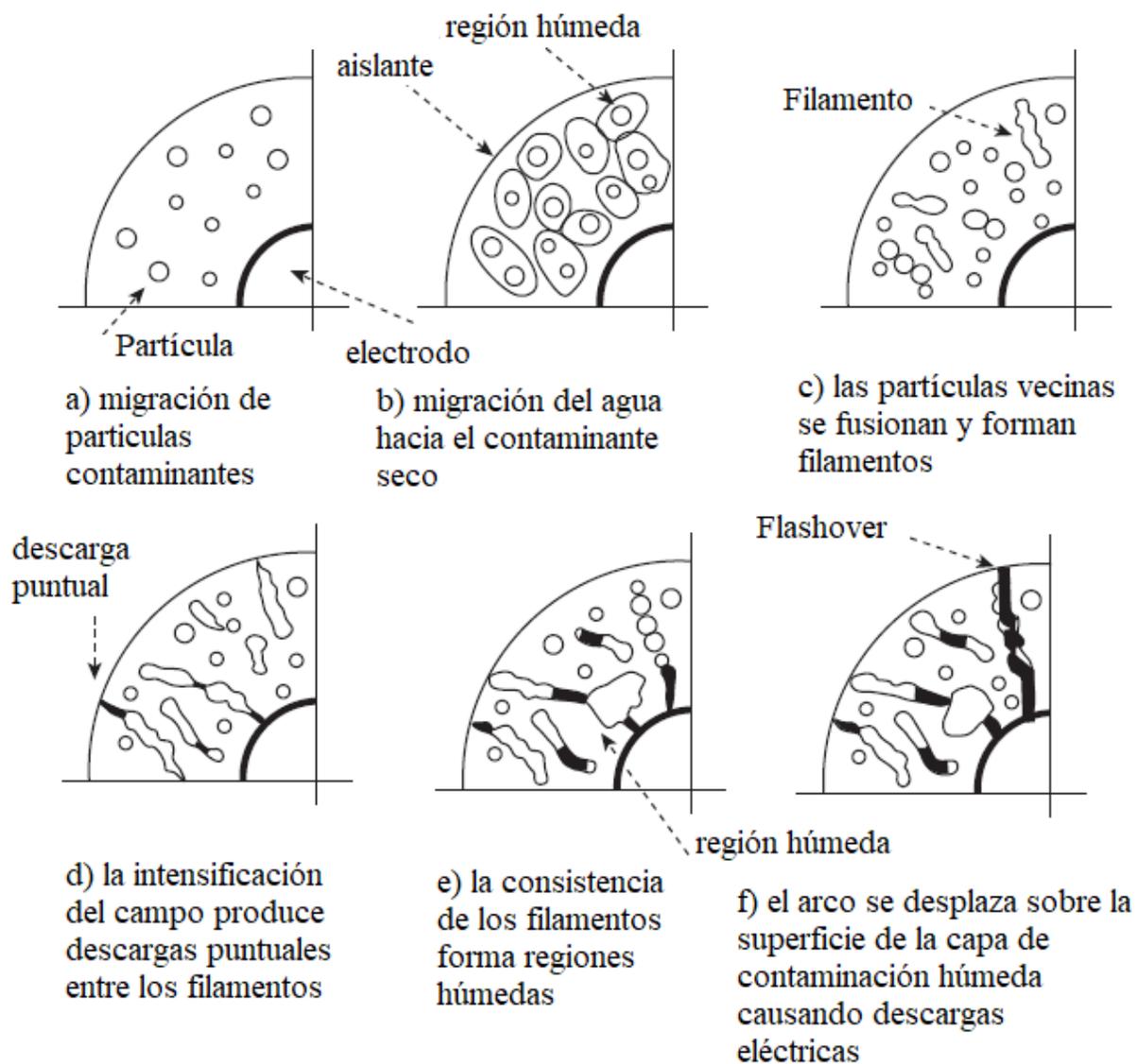


Figura 20. Proceso de formación de un arco en una superficie contaminada de difícil humedecimiento

Fuente:(Masoud Farzaneh & Chisholm, 2009)

La humedad ambiental produce gotas de agua (Figura 20-a) en lugar de una capa conductora continua de contaminante húmedo, como se encuentra en las superficies

hidrófilas. La contaminación se difunde en las gotas de agua, que luego se vuelven conductoras (Masoud Farzaneh & Chisholm, 2009).

La región húmeda alrededor de cada gota de agua crece por difusión, causando áreas de mayor conductividad, como se muestra en la Figura 20-b. La difusión continúa hasta el punto en que las áreas húmedas se unen y pequeñas cantidades de corrientes de fuga comienzan a fluir en varios caminos diferentes. El calor por el efecto Joule seca algunas áreas húmedas y, finalmente, se alcanza un equilibrio entre la evaporación y la humectación. La baja conductividad de la superficie del polímero persiste entre las áreas húmedas (Masoud Farzaneh & Chisholm, 2009).

La interacción entre el campo eléctrico y las gotitas tiende a alargarlas en filamentos como se muestra en la Figura 20-c y también las aplana a través de la superficie (Masoud Farzaneh & Chisholm, 2009).

La intensificación de campo en las puntas de cada filamento produce descargas puntuales que se distribuyen aleatoriamente a lo largo de la superficie del aislador, como se muestra en la Figura 20-d (Masoud Farzaneh & Chisholm, 2009).

Las descargas superficiales pueden secar varias zonas, dando lugar a áreas húmedas irregulares. Los campos eléctricos continúan aplanando las gotas de agua, promoviendo este proceso de humedecimiento como se muestra en la Figura 20-e. Las regiones húmedas permanecen rodeadas de capas de baja conductividad que aún están cubiertas por gotitas (Masoud Farzaneh & Chisholm, 2009).

Finalmente, la combinación del crecimiento de filamentos y la formación de áreas húmedas puede eventualmente provocar un cortocircuito en el aislante con una trayectoria electrolítica conductora. Un arco puede viajar a lo largo de esta trayectoria de contaminación húmeda, lo que causa un incendio en la Figura 20-f (Masoud Farzaneh & Chisholm, 2009).

2.13.3. Fase libre de descarga

La conductividad de la capa superficial se establece por la humedad, en la cual se disuelve el contaminante sólido. La solución contiene iones de varias sales y su conductividad determina la conductancia que hay entre los electrodos del aislador, junto con su distribución geométrica y espacial. Partículas conductoras sólidas, tales como polvos metálicos, raramente son responsables del contorneo de los aisladores. El problema de la contaminación del aislador, casi siempre, se ha considerado que proviene del contaminante húmedo y de la conductividad iónica (Martínez Darlington, 2013).

Una de las propiedades importantes del contaminante húmedo es que su conductividad es una función discontinua de su temperatura. Esta discontinuidad, en la dependencia de la conductividad con la temperatura, se debe a la evaporación del agua. Debido a la generación de calor que provoca el flujo de la corriente, la conductividad crece con la elevación de la temperatura (Martínez Darlington, 2013).

2.14. Modelos de Flashover

El proceso de ignición de la cadena del aislador se reconoce generalmente como un circuito en serie formado por un arco parcial y una capa de contaminación residual. Así, a partir del modelo de flashover matemático en la ecuación básica para mantener el arco de CA a lo largo del aislante contaminado se puede expresar de la siguiente manera (Rizk, 1981):

$$U_m = U_{arc_m} + U_{p_m} = AxI_m^{-n} + r_a(L - x)I_m \quad Ec. (12)$$

donde U_m e I_m son el valor máximo de la tensión aplicada y la corriente de fuga; U_{arc_m} es el voltaje en el arco; U_{p_m} 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 (Rizk, 1981).

La condición de reinicio del arco y las condiciones de propagación también deben cumplirse. El criterio de propagación del arco se podría expresar como (Nellis & Hendrix, 1980):

$$E_p > E_{arc} \quad Ec. (13)$$

donde E_p es el gradiente de voltaje de las partes contaminadas residuales, E_{arc} es el gradiente de arco. E_p y E_{arc} se pueden expresar como (Sima, Yuan, Yang, Xu, & Sun, 2010):

$$E_p = \frac{U_{p_m}}{L - x} = \frac{r_a(L - x)I_m}{L - x} = r_a I_m \quad Ec. (14)$$

$$E_{arc} = \frac{U_{arc_m}}{x} = \frac{AxI_m^{-n}}{x} = AI_m^{-n} \quad Ec. (15)$$

Se sabe comúnmente que la corriente de fuga a lo largo de la superficie del aislador aumenta con el incremento de la conductividad de la capa. Según las ecuaciones anteriores, bajo una misma longitud de arco (x), E_{arc} disminuye con el aumento de I_m . Es decir, la probabilidad de satisfacción del criterio de propagación del arco aumenta con el aumento de la conductividad de la superficie. Por lo tanto, para el aislador con baja conductividad superficial, el criterio de propagación del arco es difícil de satisfacer, por lo tanto, el voltaje aplicado debe incrementarse para aumentar la corriente de fuga y satisfacer el criterio de propagación del arco. Por lo tanto, bajo diferentes materiales de contaminación, la corriente de fuga del aislador es diferente, lo que afecta la propagación parcial del arco durante el proceso de destrucción de la contaminación y, por último, da como resultado la variación de la tensión de la combustión de la contaminación del aislante (Zhang, Zhang, Jiang, & Liu, 2015).

2.15. Cuarto de pruebas de corriente de fuga laboratorio CIGELE Canadá

El laboratorio CIGELE de Canadá posee un equipo de pruebas para determinar la corriente de fuga de aisladores este equipo cuenta con una cámara cerrada para simular diferentes tipos de ambientes como se ve en la Figura 21, añadiendo a esta cámara existe un circuito de prueba que como el de la Figura 22.

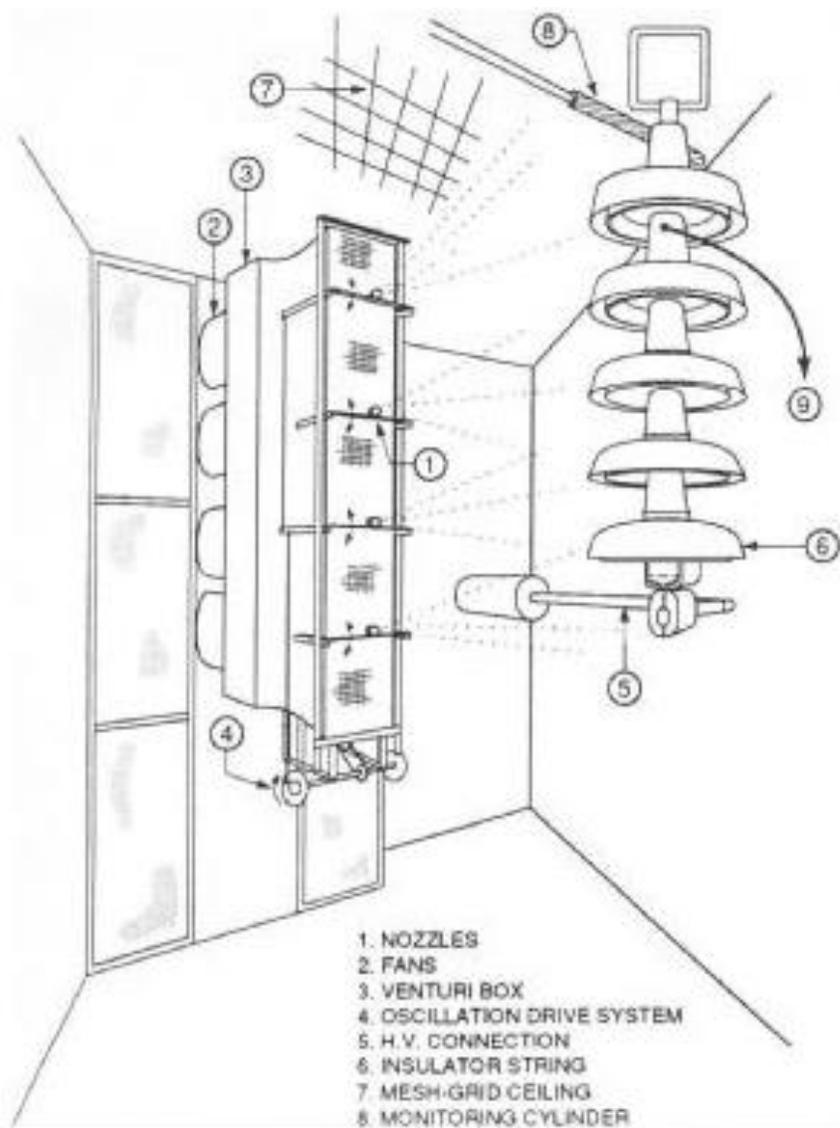


Figura 21. Cámara de pruebas de corriente de fuga CIGELE

Fuente:(M. Farzaneh & Fofana, 2004)

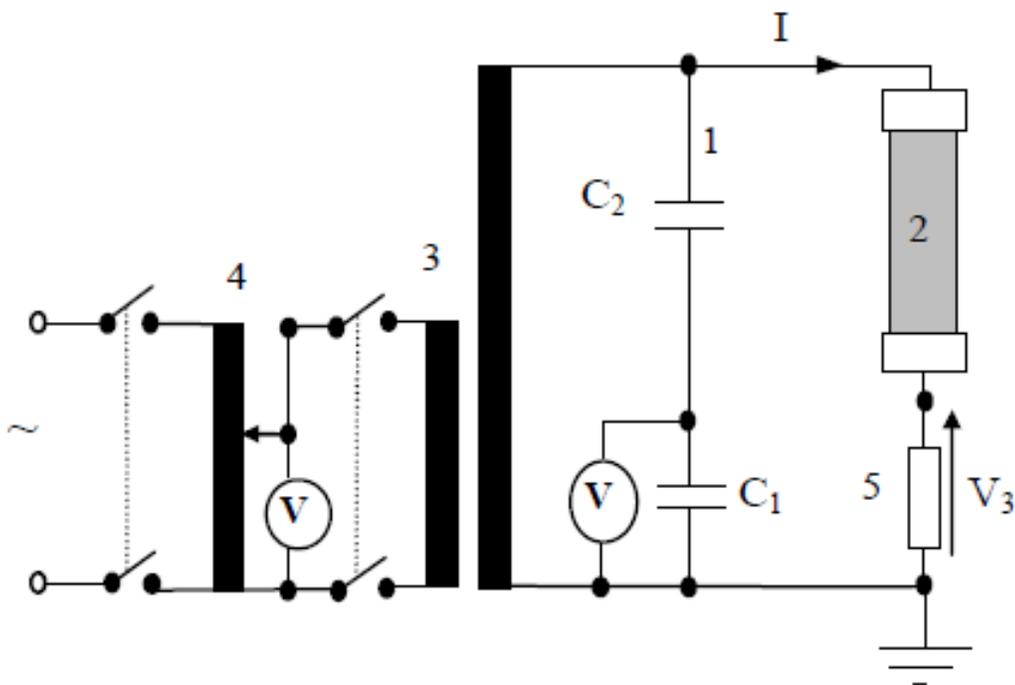


Figura 22. Diagrama eléctrico medidor de Corriente de fuga CIGELE

Fuente:(M. Farzaneh & Fofana, 2004)

2.16. Método de elemento finitos (FEM)

El método de elemento finito es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales (ordinarias y parciales) muy utilizado en diversos problemas principalmente de ingeniería y física–matemática aplicada.(Molina P, 2010).

Típicamente el método de los elementos finitos se programa computacionalmente como se muestra en la Figura 23-a, para calcular el campo de la variable dependiente del problema real (ver Figura 23-b) y, posteriormente, a través de relaciones generales y constitutivas se calculan las variables secundarias de interés luego que se ha obtenido la

solución para el modelo de elemento finito que ha sido formulado. Esta técnica tuvo su origen en el tratamiento de problemas planteados por la mecánica de sólidos deformables, pero en la actualidad es más generalmente aplicable a cualquier problema de la mecánica de medios continuos (que involucra a todos los estados agregados de la materia). (Molina P, 2010).

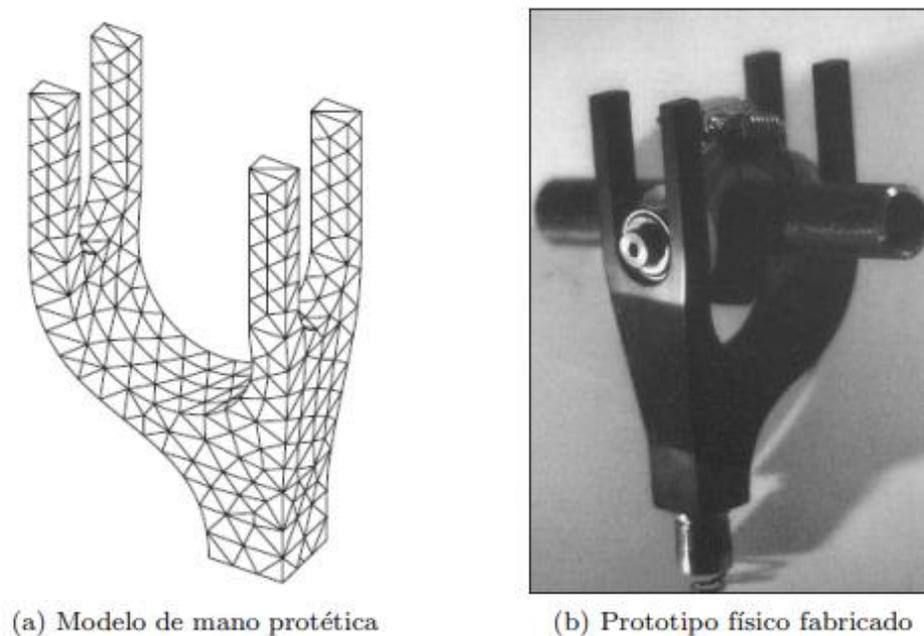


Figura 23. Modelo de elemento finito de prótesis de una mano
Fuente: (Molina P, 2010)

El método de los elementos finitos es muy usado debido a su generalidad y a la facilidad de introducir dominios de cálculo complejos (en dos o tres dimensiones). Además, el método es fácilmente adaptable a problemas de transmisión de calor, de mecánica de fluidos para calcular campos de velocidades y presiones (fluido dinámico) o de campo electromagnético. Dada la imposibilidad práctica de encontrar la solución

analítica de estos problemas, con frecuencia en la práctica ingenieril los métodos numéricos y, en particular, los elementos finitos, se convierten en la única alternativa práctica de cálculo. (Molina P, 2010).

Una importante propiedad del método es la convergencia; si se consideran particiones de elementos finitos sucesivamente más finas, la solución numérica calculada converge rápidamente hacia la solución exacta del sistema de ecuaciones. (Molina P, 2010).

2.16.1. Uso del método de elementos finitos

El método de elemento finito (MEF), a veces llamado análisis de elemento finito (AEF), es una técnica computacional usada para obtener soluciones aproximadas de problemas con valores límite en diversos campos de la ingeniería. Declarado de manera simple, los problemas con valores límite son problemas matemáticos en los cuáles una o más variables dependientes deben satisfacer una ecuación diferencial en todas partes dentro de un dominio conocido de variables independientes y satisfacer condiciones específicas en el límite del dominio de definición del problema. Los problemas de valores límite también se llaman a veces problemas de campo. (Molina P, 2010).

El campo es el dominio de interés y a menudo representa una estructura física. Las variables de campo son las variables dependientes de interés gobernadas por la ecuación diferencial. Las condiciones límite son los valores especificados de las variables de campo (o variables relacionadas como sus derivadas) sobre los límites del campo. Dependiendo del tipo de problema físico que se analiza, las variables de campo pueden

incluir desplazamiento físico, temperatura, flujo de calor, y velocidad de flujo, para mencionar solamente algunas variables que se presentan.(Molina P, 2010).

2.16.2. Convergencia del método

El proceso de representar un dominio físico con elementos finitos es referido como un proceso de discretización, y la serie resultante de elementos es conocida como la malla de elemento finito. Como la mayoría de las geometrías de elemento normalmente usadas tienen como fronteras lados rectos, generalmente es imposible incluir el dominio físico entero en la malla de elementos, si el dominio incluye límites curvados. Tal situación se muestra en la Figura 24(a), donde un dominio físico superficial de límite-curvo se discretiza (bastante groseramente) usando elementos cuadrados, siendo el número de ellos 45. Una malla más refinada en el proceso de partición para el mismo dominio se muestra en Figura 24(b), usando pequeños, y más numerosos elementos del mismo tipo (la malla contiene 83 elementos). Se nota a simple vista que la malla refinada incluye significativamente una mayor superficie del dominio físico en la representación de elemento finito, y los límites curvados son más estrechamente aproximados (elementos triangulares podrían aproximar los límites aún de mejor manera).(Molina P, 2010).

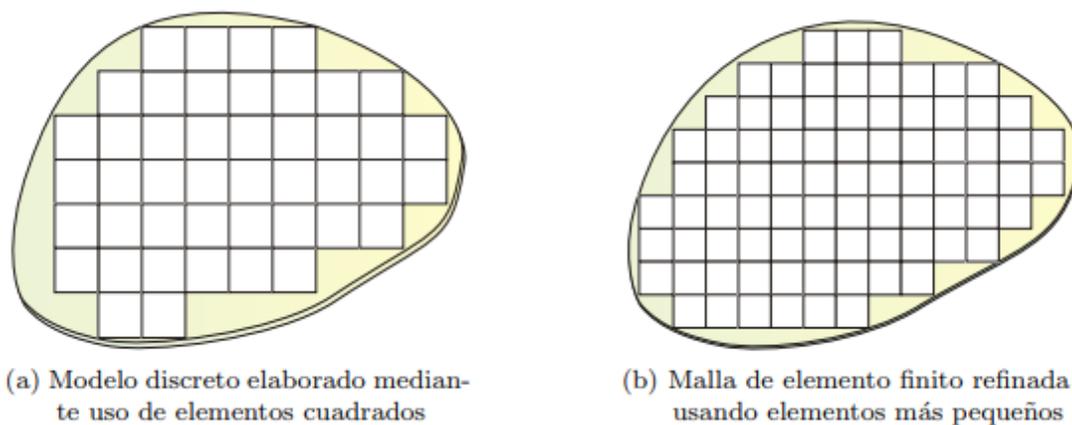


Figura 24. Dominio bi-dimencional arbitrario con límite curvado

Fuente:(Molina P, 2010)

2.17. Procedimiento General

Ciertos pasos en la formulación de un análisis de elemento finito de un problema físico son comunes a todos los análisis de característica discreta, sea éste estructural, transmisión de calor, flujo fluido, o algún otro problema. Estos pasos son incluidos en los paquetes comerciales de elemento. Los pasos se describen como sigue:(Molina P, 2010).

2.17.1.1. Pre-procesamiento

El paso de pre-procesamiento es, generalmente, descrito como el proceso de definir al modelo como indica la Figura 25, e incluye las siguientes acciones a ejecutar:

- Definir el dominio geométrico del problema.
- Definir el tipo del elemento a ser utilizado.
- Definir las propiedades materiales de los elementos.

- Definir las propiedades geométricas de los elementos (la longitud, el área, etc.).
- Definir las conectividades de los elementos (el modelo de la malla).
- Definir las restricciones físicas (condiciones de borde límite).
- Definir la sollicitación o perturbación externa.(Molina P, 2010).

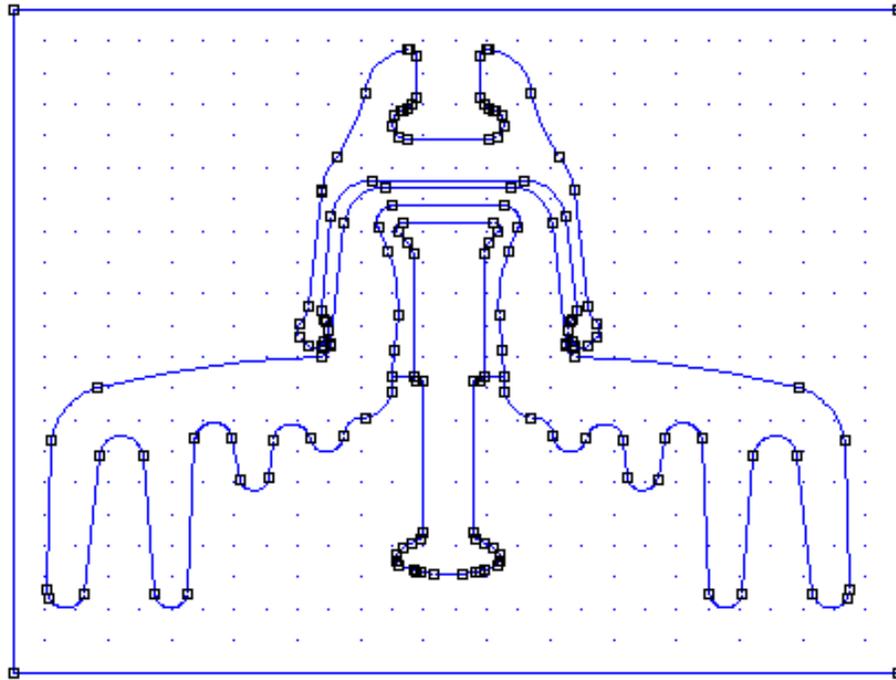


Figura 25. Pre-procesamiento

El paso de pre-procesamiento (la definición del modelo) es realmente crítico. En ningún caso es más apropiado el ejemplo del axioma relacionado con los procesos relacionados con el uso de la computadora “basura entrante, resulta en basura saliente”. Una solución de elemento finito perfectamente calculada numéricamente no posee

absolutamente ningún valor si corresponde a un pésimo proceso de modelado, o a un problema erróneamente planteado.(Molina P, 2010).

2.17.1.2. Procesamiento o Solución

Durante la fase de solución, el software de elemento finito ensambla las ecuaciones algebraicas gobernantes en forma matricial como indica la Figura 26 y calcula los valores desconocidos de las variables primarias del campo involucrado en el problema. Los valores computados se usan luego por sustitución regresiva para evaluar las variables adicionales, derivadas o secundarias, como las fuerzas de reacción, tensiones de elemento, flujo de calor, velocidades y aceleraciones de movimiento, etc.(Molina P, 2010).

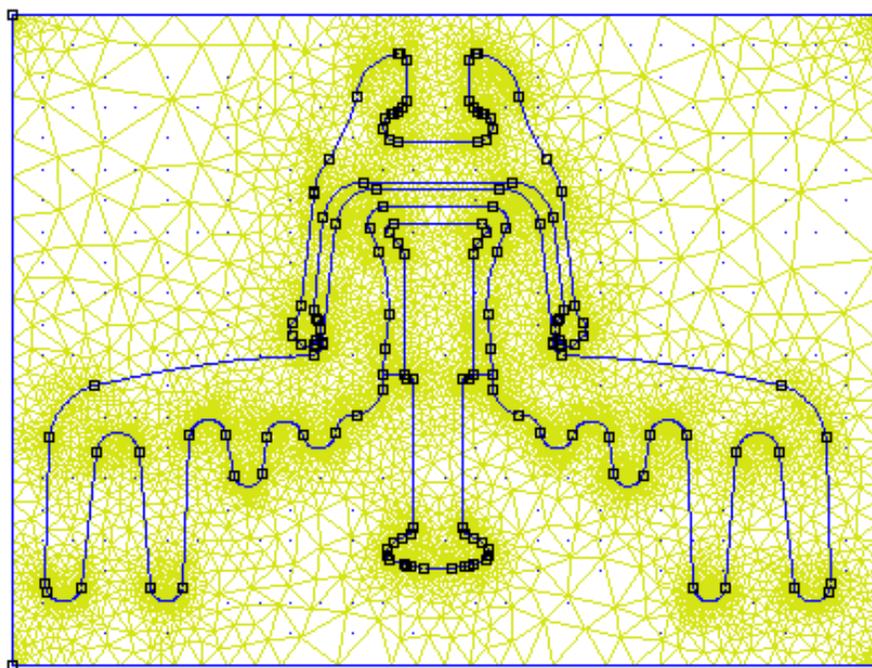


Figura 26. Procesamiento

2.17.1.3. Post-procesado

El análisis y la evaluación de los resultados como muestra la Figura 27 de la solución es denominado como post–procesamiento.

El software asociado a este proceso importante del método de elemento finito contiene rutinas sofisticadas usadas para ordenar, imprimir, y trazar los resultados seleccionados de una solución que haya sido obtenida. Los ejemplos de operaciones que puede lograrse en esta fase incluyen:(Molina P, 2010).

- Clasificar las tensiones internas de elemento en orden de magnitud.
- Verificar el equilibrio estático estructural.
- Calcular factores de seguridad de diseño.
- Bosquejar la deformación estructural producida.
- Producir esquemas dinámicos de la respuesta del modelo.
- Producir graficas de color–codificado para el campo de temperaturas.(Molina P, 2010).

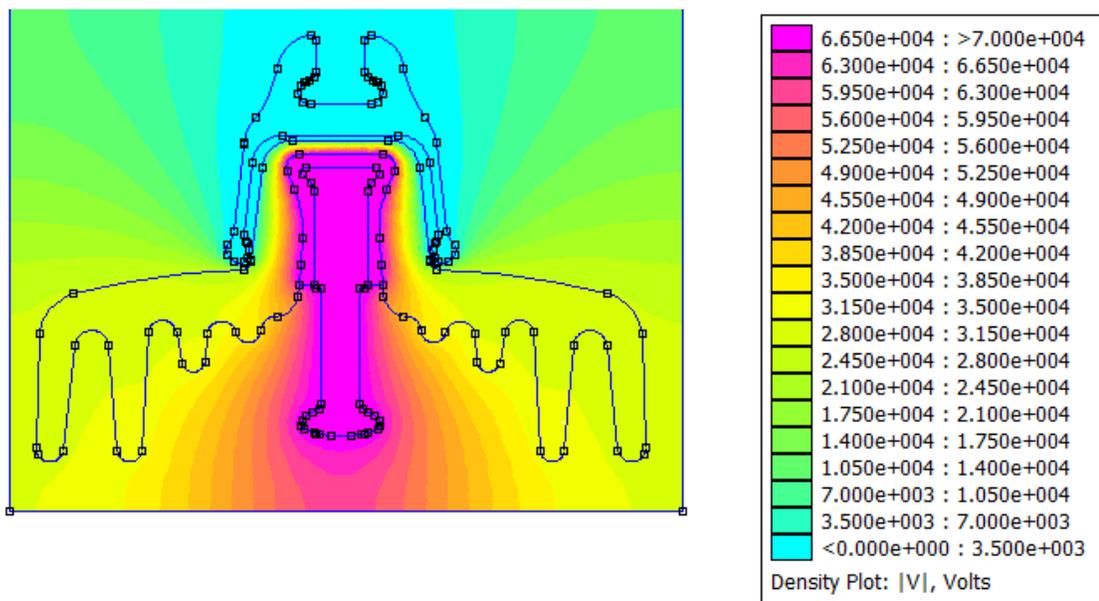


Figura 27. Post-procesamiento

Puesto que los datos de la solución pueden manipularse de muchas maneras en la fase final de post-procesamiento, el objetivo más importante es aplicar de modo legítimo el juicio de ingeniería con el objetivo de determinar las condiciones bajo las cuales los resultados de la solución obtenida son físicamente razonables. (Molina P, 2010).

2.18. Finit Element Method Magnetics FEMM

FEMM es un conjunto de programas como indica la Figura 28 para resolver problemas electromagnéticos de baja frecuencia en dominios bidimensionales planar y asimétricos. El programa actualmente se ocupa de los problemas magnetostáticos lineales / no lineales, los problemas magnéticos de armónicos de tiempo lineales / no lineales, los

problemas electrostáticos lineales y los problemas de flujo de calor en estado estacionario.(Meeker, 2018)

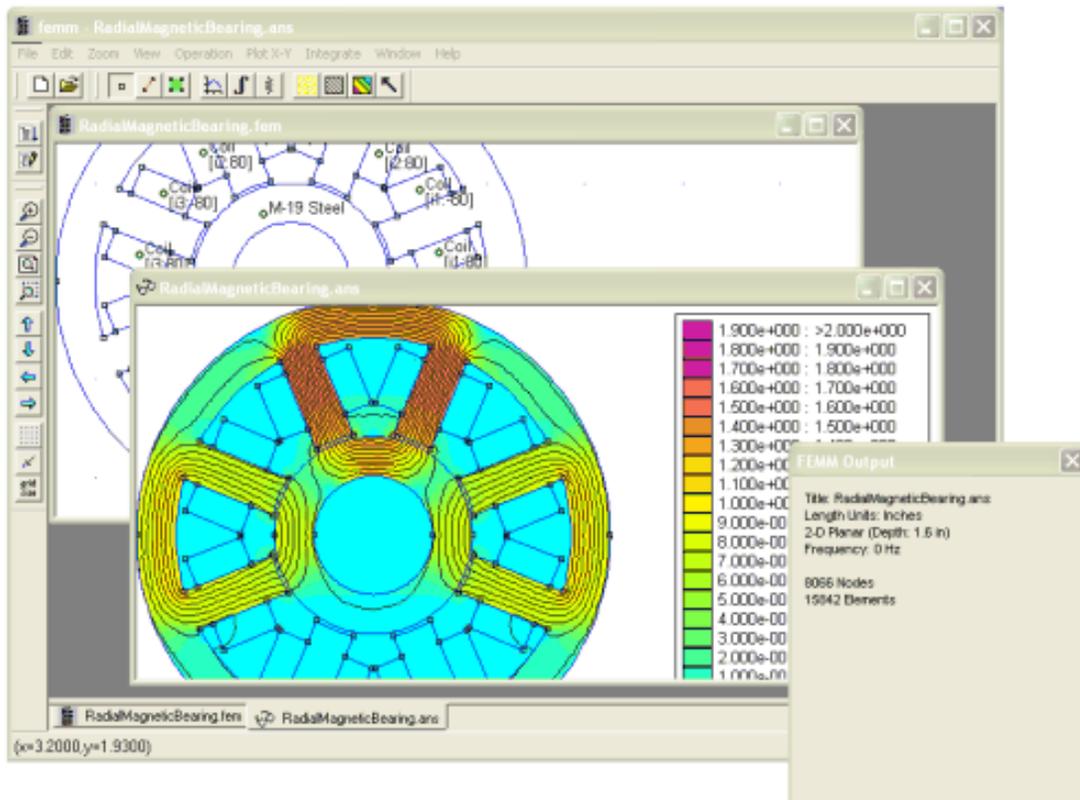


Figura 28. Interface de FEMM

Fuente:(Meeker, 2018)

FEMM se divide en tres partes:

- Shell interactivo (femm.exe). Este programa es un preprocesador de interfaz de documentos múltiples y un post-procesador para los diversos tipos de problemas resueltos por FEMM. Contiene una interfaz tipo CAD para establecer la geometría del problema a resolver y para definir las propiedades del material y las condiciones de

contorno. Los archivos DXF de Autocad, Solidwork, etc.; se pueden importar para facilitar el análisis de las geometrías existentes. Las soluciones de campo se pueden mostrar en forma de gráficos de contorno y densidad. El programa también permite al usuario inspeccionar el campo en puntos arbitrarios, así como evaluar una serie de integrales diferentes y trazar varias cantidades de interés a lo largo de los contornos definidos por el usuario.(Meeker, 2018).

- `triangle.exe`. El triángulo descompone la región de la solución en una gran cantidad de triángulos, una parte vital del proceso de elementos finitos.

- Solvers (`fkern.exe` para magnetismo; `belasolv` para electrostática); `hsolv` para problemas de flujo de calor; y `csolv` para problemas de flujo actuales. Cada solucionador toma un conjunto de archivos de datos que describen el problema y resuelve las ecuaciones diferenciales parciales relevantes para obtener valores para el campo deseado en todo el dominio de la solución.(Meeker, 2018).

2.19. Matlab

MATLAB es el nombre abreviado de “MATrix LABoratory”. La plataforma de MATLAB está optimizada para resolver problemas de ingeniería y científicos. El lenguaje MATLAB basado en matrices es la forma más natural del mundo de expresar las matemáticas computacionales. Los gráficos incorporados facilitan la visualización y la comprensión de los datos. Una vasta biblioteca de toolbox’s preconstruidos te permiten comenzar de inmediato con los algoritmos esenciales para el dominio. El entorno de escritorio invita a

la experimentación, exploración y descubrimiento. Estas herramientas y capacidades de MATLAB están rigurosamente probadas y diseñadas para trabajar conjuntamente.(MathWorks, 2018a).

2.19.1. Características Principales

- Lenguaje de alto nivel para la informática científica y de ingeniería
- Entorno de escritorio optimizado para la exploración, el diseño y la resolución de problemas de forma iterativa
- Gráficos para visualizar datos y herramientas para crear gráficos personalizados
- Aplicaciones para ajuste de curvas, clasificación de datos, análisis de señales, sintonización de sistemas de control y muchas otras tareas.
- Toolbox adicionales para una amplia gama de aplicaciones científicas y de ingeniería
- Herramientas para crear aplicaciones con interfaces de usuario personalizadas
- Interfaces para C/C++, Java®, .NET, Python, SQL, Hadoop y Microsoft® Excel®.(MathWorks, 2018a).

2.19.2. Simulink

Simulink® es un entorno de diagramas de bloques para simulación multidominio y diseño basado en modelos. Soporta el diseño a nivel de sistema, la simulación, la generación automática de código y las pruebas y verificaciones continuas de sistemas

embebidos. Simulink proporciona un editor gráfico, librerías de bloques personalizables y solucionadores para modelar y simular sistemas dinámicos. Está integrado con MATLAB®, lo que le permite incorporar algoritmos de MATLAB en modelos y exportar resultados de simulación a MATLAB para su análisis posterior. n bloque puede representar un componente físico, un sistema pequeño o una función; una relación de entrada/salida caracteriza completamente al bloque. La definición de un bloque sólo se completa con sus entradas y salidas y esta tarea se relaciona con el objetivo del modelo.(MathWorks, 2018b).

2.20. Hipótesis

Si se desarrolla una simulación y modelo matemático para el análisis de “flashover voltaje” de cadena de aisladores, se podría predecir una posible falla del sistema eléctrico en la línea de transmisión de 500kv por la contaminación con ceniza volcánica.

2.21. Variables de Investigación

Variable Independiente: Elaboración de un modelo matemático y simulación para el análisis de “flashover voltage” de cadena de aisladores.

Variable Dependiente: Predecir una posible falla de la cadena de aisladores de 500kv por la contaminación con ceniza volcánica.

2.22. Operacionalización de Variables

Tabla 2.

Operacionalización de variable independiente

Variable (Independiente)	Definición	Dimensionamiento	Indicador
Elaboración de un modelo matemático y simulación para el análisis de “flashover voltage” de cadena de aisladores	Modelar y Simular las condiciones más desfavorables a las que estará sometido el aislador con contaminación de ceniza volcánica.	Conductividad	[S/m]
		Resistividad	[ohm*mm]
		Longitud	[mm]

Tabla 3.

Operacionalización de variable independiente

Variable (Dependiente)	Definición	Dimensionamiento	Indicador
Predecir una posible falla de la cadena de aisladores de 500kv por la contaminación con ceniza volcánica	Predecir en qué condiciones el aislador fallaría y provocaría un colapso del sistema	Voltaje	[V]
		Corriente	[A]

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

3.1. Antecedentes investigativos

Los Aisladores de Suspensión tipo ANSI 52.3 son los más utilizados en los Sistemas Eléctricos, en especial en la transmisión de la energía de medio y alto voltaje, pero esto no quiere decir que todos estos tipos de aisladores tienen las mismas características, ya que dependiendo del voltaje con los que trabajan, estos varían sus características como son el material del aislador, que por lo general son de porcelana o vidrio, sus dimensiones como son el diámetro y la altura principalmente, y la distancia de fuga.

En la investigación realizada por(Wilson et al., 2012), presenta un resumen que se puede observar en la Figura 29, de distintos problemas registrados en sistemas eléctricos, causados por las diferentes actividades volcánicas en el mundo desde 1980.

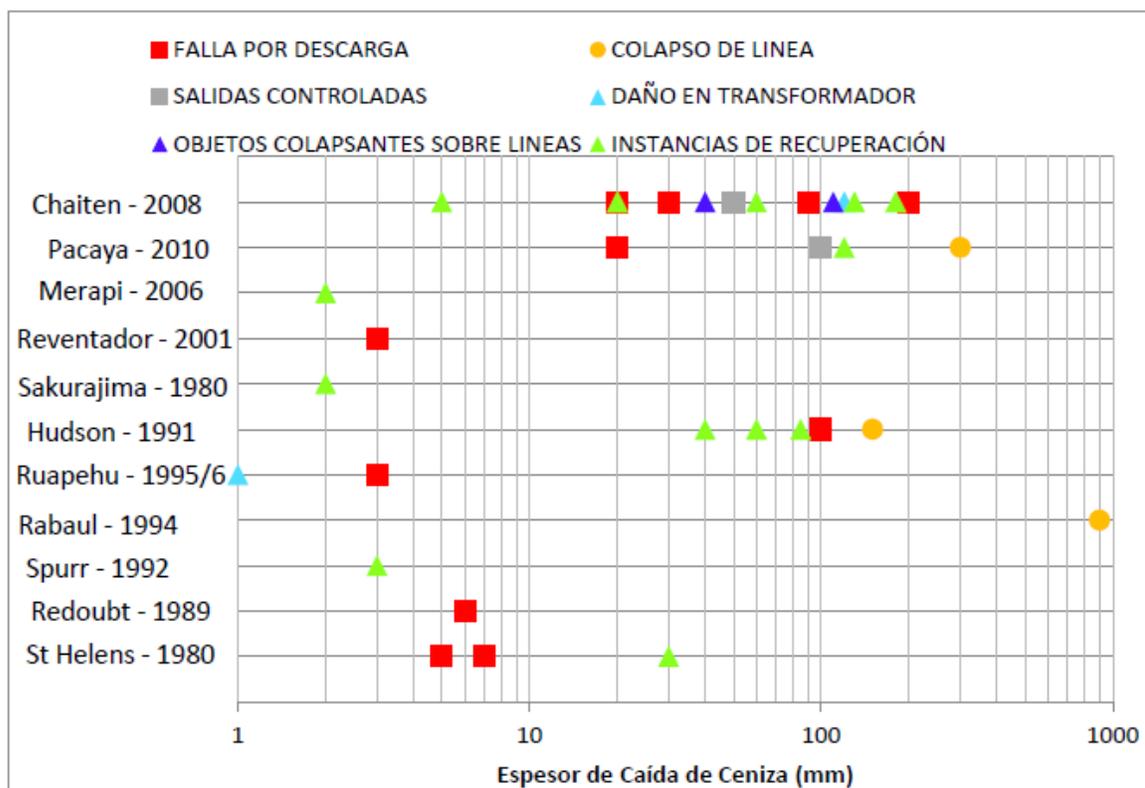


Figura 29. Distintos problemas registrados en Sistemas Eléctricos, causados por las diferentes actividades volcánicas en el mundo desde 1980

Fuente:(Wilson et al., 2012)

En la Figura 29 se puede ver que existen diferentes fallos en los sistemas eléctricos, registrándose uno como el de mayor frecuencia que es el de “fallas por descarga” que vendría a ser el Efecto Flashover del cual es el tema de estudio. Añadiendo a esto El Instituto Geofísico de la EPN manifiesta que, en el Ecuador, el Cotopaxi como el Tungurahua son los dos volcanes activos que más registran procesos eruptivos con emisión de ceniza en los últimos años.(López Chachalo, 2018).

Para (López Chachalo, 2018), el proceso realizado para la obtención de los datos de esta investigación, se basa únicamente en el análisis de laboratorio sin tener otro tipo de sustento como puede ser matemático o computacional, aunque se puede decir que el análisis de laboratorio es el más importante o relevante en una investigación, siempre es necesario corroborar dichos datos, ya que este caso de investigaciones intervienen mucho los parámetros ambientales y meteorológicos los cuales no son de fácil aplicación al momento de realizar un análisis práctico, aunque para (López Chachalo, 2018) este parámetro pudo ser cubierto ya que en esta investigación pudo emplear una cámara de niebla, esta cámara de niebla puede simular diferentes condiciones de humedad (niebla o lluvia ligera), aun con este tipo de equipos no siempre se van a obtener los datos 100% reales ya que esta no puede simular temperaturas ambientales y menos aún el proceso de esparcimiento de la ceniza volcánica sobre el aislador.

En lo que corresponde al análisis matemático de aisladores, para (Garcés Gutierrez & Rodriguez Morante, 2015) esta investigación corresponde a aisladores de un nivel de voltaje inferior de 13.8kV en comparación al que se va a realizar en este estudio que es de 500kV. Los aisladores dependiendo con el voltaje que trabajan varían sus características y por lo tanto el modelamiento no comprende para niveles de voltaje superior al estudiado, al hablar del análisis de laboratorio echo por (Garcés Gutierrez & Rodriguez Morante, 2015) realizan pruebas de tres tipos de aisladores que pueden trabajar bajo niveles de voltaje de 13.8kV que son los cerámicos, vidrio y compuestos demostrando que los aisladores de porcelana son los que mejor se comportan al momento de seguridad, aunque este tipo de investigación no comprende un análisis

ambiental ya que no posee una cámara de humedad como si lo hace (López Chachalo, 2018).

Estas características hacen que todos los aisladores se comporten de diferente manera y sus pruebas de laboratorio é análisis varíen, por lo que se desconoce cómo actúen los aisladores de la línea de 500Kv en condiciones de contaminación ambiental y en especial con ceniza volcánica, por esta razón se desea realizar un modelamiento y simulación de estos aisladores en especial (500kV), y así poder conocer en qué momento estas podrían fallar provocando un colapso del sistema.

3.2. Modalidad de investigación

3.2.1. Método Bibliográfico Documental

El proyecto inicialmente se plantea con la recolección de información ya que es la primera etapa del proceso de investigación, en la cual se recopilan de los materiales bibliográficos, artículos científicos, catálogos, revistas científicas, páginas web, y libros de ingeniería en los que se logra obtener información necesaria.

Para el desarrollo de cadena de aisladores de suspensión y su distribución de voltaje en cada uno de ellos, además de los aisladores y sus efectos con distintos ambientes, como también el efecto que genera los contaminantes en estos en función de las pérdidas dieléctricas y las corrientes de fuga y acceder a la información acerca del proceso para la realización de un modelo matemático computacional como también de la simulación mediante análisis de elementos finitos FEM.

3.2.2. Método Inductivo – Deductivo

Mediante este método se va a diseñar los modelos matemáticos computacionales mediante el software Matlab como también la distribución de voltaje en una cadena de “n” aisladores; así mismo se realizará la simulación mediante el software FEMM, que podrá sustentar el modelo de distribución de voltaje en la cadena de aisladores, como también se pretende verificar las principales variables del que afectan al aislador en diferentes condiciones de contaminación y así poderlos comparar con el modelo matemático.

3.3. Tipo de Investigación

3.3.1. Investigación Cuantitativa

El método cuantitativo manifiesta que usa la recolección de datos para verificar la hipótesis, con base en tablas estadísticas, curvas y patrones de comportamiento de las variables para demostrar teorías, además menciona que es un proceso secuencial, donde no se puede eludir ninguna etapa de la investigación. En este tipo de investigación se utilizaron modelos matemáticos y recolección de datos para la implementación de un modelo computacional para su posterior análisis mediante el software Matlab que permite comparar datos con las Simulaciones y determinar el comportamiento de los Aisladores contaminados.

3.4. Población

La población se considera como el conjunto de persona, objetos o medidas con ciertas características en común de las cuales se desea conocer algo en una investigación; Los Sistemas Eléctricos tanto de generación, transmisión y distribución poseen elementos de protección como los aisladores, aunque para el desarrollo del proyecto se considera como la población a todos los distintos aisladores.

Tabla 4.
Población de aisladores

Sistema	Aislador	Material
Generación	Rígidos	Porcelana
		Compuestos
Transmisión	Rígidos	Porcelana
		Compuestos
	Suspensión	Porcelana
		Vidrio
Distribución	Rígidos	Porcelana
		Suspensión
	Suspensión	Porcelana
		Compuestos

La Población total sería 10 tipos de aisladores los cuales se subdividen en un número ilimitados de por sus características eléctricas, mecánicas, su dimensión, etc.

3.5. Muestra

La muestra es un subconjunto que representa de forma fiable a la población, para seleccionar la muestra se utiliza distintos tipos de muestreo que ayudan a una selección adecuada de la muestra.

En este caso no se necesita de un muestreo ya que el aislador seleccionado para este análisis es el ANSI tipo B C29.2-52-3 FOG como indica la Figura 30, único que está instalado en la línea de transmisión de 500kV. Más detalles en Anexos 1.

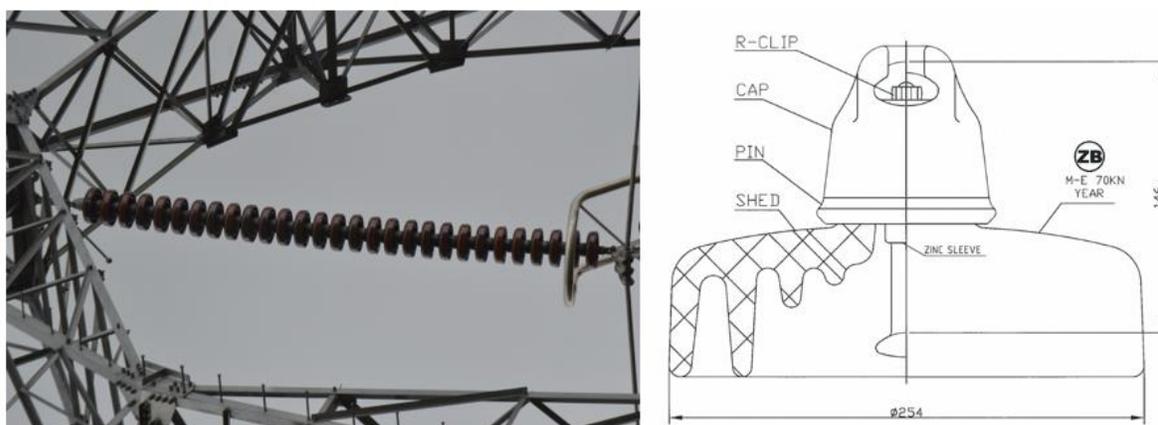


Figura 30. Aislador tipo ANSI tipo B C29.2-52-3 FOG

3.6. Instrumentos

Todos los datos obtenidos para esta investigación son mediante datos investigativos y datos propios de la simulación y modelamiento por lo tanto el instrumento utilizados son los Softwares: FEMM y Matlab con su extensión Simulink.

CAPÍTULO IV

4. ANÁLISIS RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. Determinación de la cantidad de aisladores

Mediante la localización de las torres de transmisión se puede conocer la altura medida a nivel del mar y también su temperatura promedio. Utilizando la ecuación del cálculo de cadena de aisladores:

$$Na = 1.1 * V_{ff} * \frac{D_{fc}}{d_f}$$

En este caso el voltaje de fase es 500kV, la distancia de fuga del aislador se puede ver en el Anexo 1, el valor de distancia de fuga requerida se debe corregir al valor de la altura de la torre medida a nivel del mar obtenidos mediante un programa se puede ver en el Anexo 2.

$$b = 10^{\left(\log 76 - \frac{h}{18336}\right)}$$

$$b = 10^{\left(\log 76 - \frac{3500}{18336}\right)} = 75,809$$

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

$$\delta = \frac{3.86 + 75,806}{273 + 12} = 0,2795$$

$$D_{fc} = \frac{D_f}{\sqrt{\delta}}$$

$$D_{fc} = \frac{D_f}{\sqrt{0,9295}}$$

$$Na = 1,1 * 500kV * \frac{\frac{D_f(mm/kV)}{\sqrt{0,9295}}}{430 mm}$$

Mediante esta fórmula queda expresada la cantidad de aisladores que deberían existir en la torre en función de la distancia de fuga recomendada por las normas IEC y IEEE según la Tabla 1.

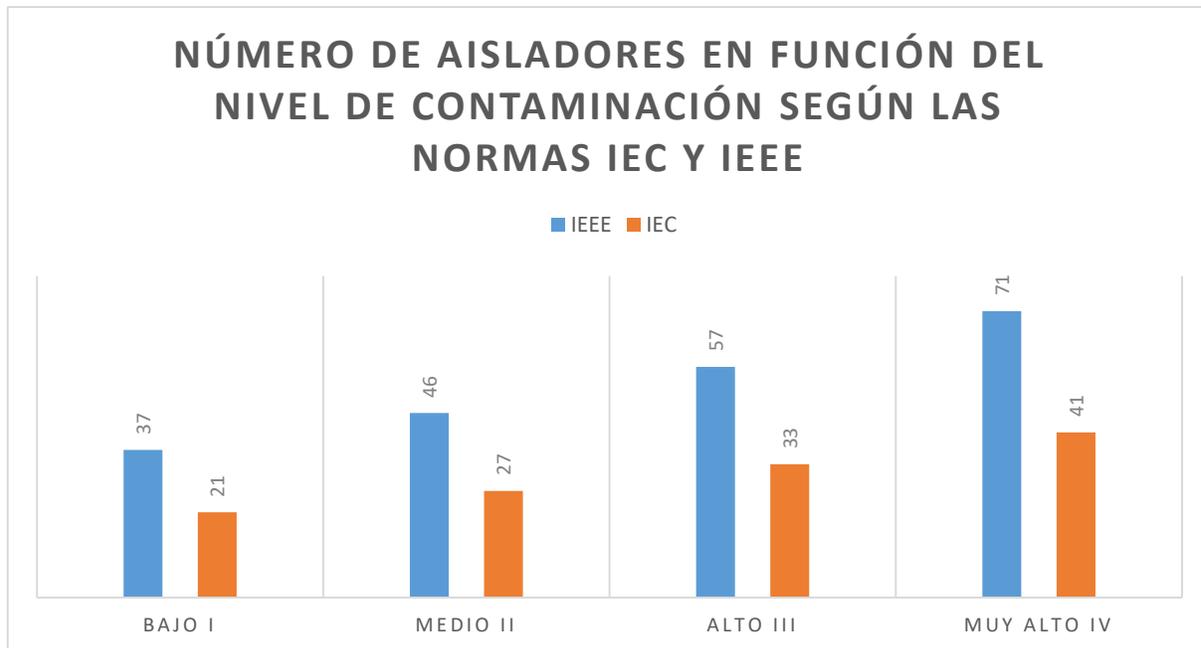


Figura 31. Numero de Aisladores en función del Nivel de Contaminación Según las Normas IEC y IEEE

Según la Figura 31 se determina que las normas IEEE tiene un alto nivel de seguridad pero esta no son las empleadas en este Sistema Eléctrico ya que ningún nivel de contaminación según esta normal se compara con la cantidad de aisladores que están instalados actualmente en este sistema como indica en Anexo 3.

En comparación con las normas IEC siguiendo los datos de la Figura 31 se puede ver que estas poseen una gran similitud con la cantidad de aisladores colocados actualmente en el sistema en especial entre los niveles de contaminación Medio II y Alto III como se indica en el Anexo 3.

4.2. Distribución de Voltaje en la Cadena de Aisladores

Basándose en la cantidad de Aisladores que posee el Sistema, en especial la zona a estudiar se realiza la distribución de Voltaje que posee cada aislador.

4.2.1. Modelamiento Computacional de la Distribución de Voltaje en la Cadena de Aisladores

Se conoce que un aislador o una cadena de aisladores como indica la Figura 32-a, es representado por un capacitor en diagramas eléctricos como indica la Figura 32-b, existen otros tipos de valores que influyen en una cadena de aisladores que se encuentran en una torre de transmisión como es la capacitancia que hay entre un aislador y la torre como indica la Figura 32-c .

La capacitancia entre las partes metálicas (herrajes) y el terminal de tierra (torre), debida principalmente al dieléctrico aire, es por lo general 0.1 del valor de la capacitancia del aislador.

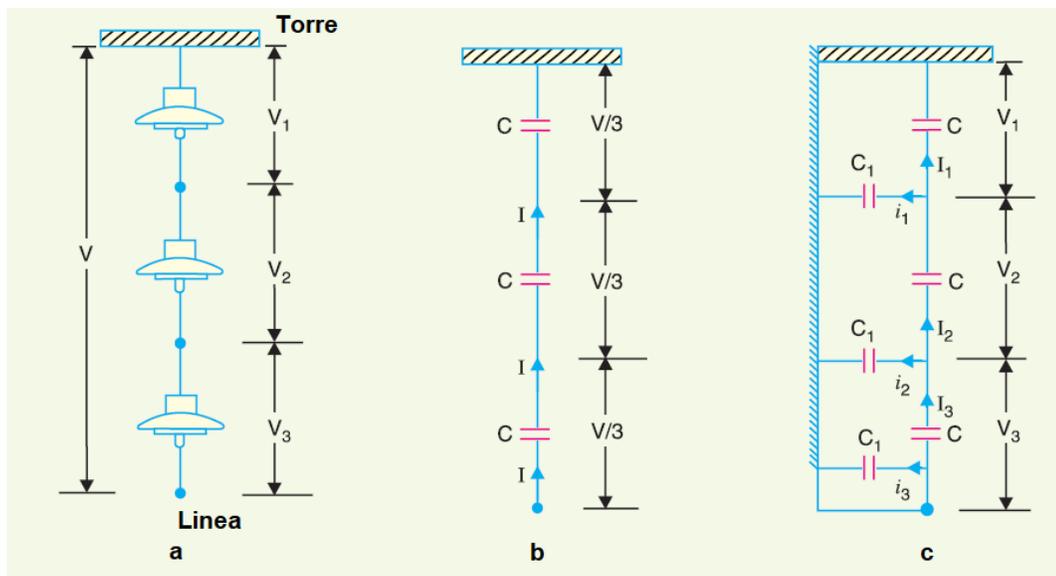


Figura 32. Distribución de Voltaje en 3 Aisladores

4.2.2. Análisis de distribución de voltaje de 5 aisladores

Para el cálculo de voltaje en una cadena de 5 aisladores se realiza ecuación de nodos de corriente y voltaje del diagrama de la Figura 33.

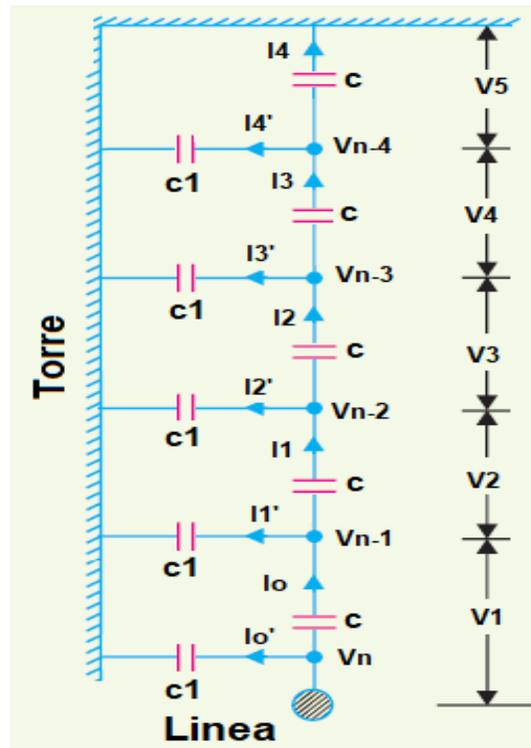


Figura 33. Circuito Equivalente de 5 Aisladores

Nodos de Corriente

$$I_0 = I_1 + I_1'$$

$$I_1 = I_2 + I_2'$$

$$I_2 = I_3 + I_3'$$

$$I_3 = I_4 + I_4'$$

Nodos de Voltaje

$$V_1 = V_n - V_{n-1}$$

$$V_2 = V_{n-1} - V_{n-2}$$

$$V_3 = V_{n-2} - V_{n-3}$$

$$V_4 = V_{n-3} - V_{n-4}$$

$$V_5 = V_{n-4}$$

Igualando las Ecuaciones para obtener solo variables de voltaje en referencia a la torre o tierra se obtiene:

$$C_1 = 0.1C = KC \text{ (capacitancia del aislador a la torre)}$$

$$I_0 = I_1 + I_1'$$

$$V_n - V_{n-1} = I_1 + I_1'$$

$$(V_n - V_{n-1})wC = (V_{n-1} - V_{n-2})wC + (V_{n-1})wkC$$

$$V_n - V_{n-1} = V_{n-1} - V_{n-2} + (V_{n-1})k$$

$$V_n = 2V_{n-1} - V_{n-2} + (V_{n-1})k$$

$$V_n = (2 + k)V_{n-1} - V_{n-2}$$

$$V_{n-1} = (2 + k)V_{n-2} - V_{n-3}$$

$$V_{n-2} = (2 + k)V_{n-3} - V_{n-4}$$

$$V_{n-3} = (2 + k)V_{n-4}$$

$$\text{Si } (2 + k) = A$$

$$V_{n-3} = AV_{n-4}$$

$$V_{n-2} = AV_{n-3} - V_{n-4} = (A^2 - 1)V_{n-4}$$

$$V_{n-1} = AV_{n-2} - V_{n-3} = (A^3 - 2A)V_{n-4}$$

$$V_n = AV_{n-1} - V_{n-2} = (A^4 - 3A^2 + 1)V_{n-4}$$

Por lo tanto

$$V_{n-4} = \frac{V_n}{A^4 - 3A^2 + 1} = \frac{V_n}{(2+k)^4 - 3(2+k)^2 + 1}$$

V_n =voltaje de la Línea en este caso se tomará como el 100%

$$V_{n-4} = \frac{100\%}{2,1^4 - 3(2,1)^2 + 1} = 13,854\%$$

$$V_{n-3} = 29,09\%$$

$$V_{n-2} = 47,24\%$$

$$V_{n-1} = 70,11\%$$

$$V_n = 100\%$$

Este voltaje o en este caso porcentaje de voltaje se toma referencia de cada aislador hacia la torre o tierra, por lo tal razón el porcentaje de voltaje en el aislador más cercano a línea es del 100% como indica la Figura 34.

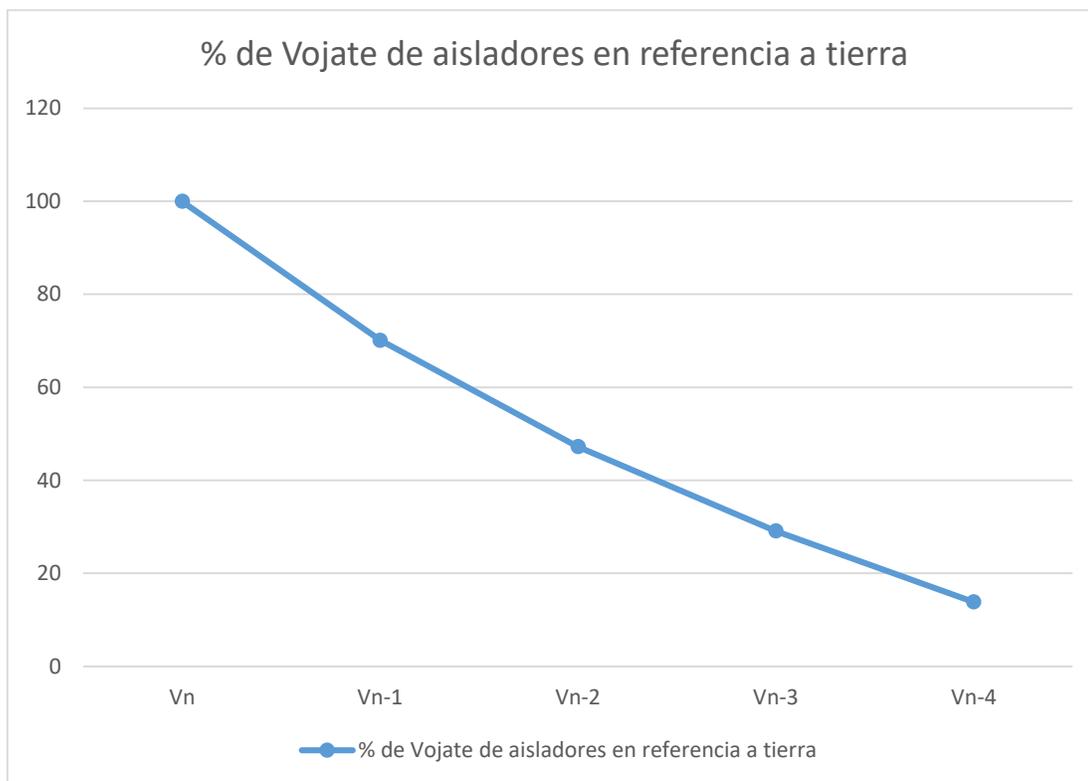


Figura 34. porcentaje de voltaje de cada de 5 aislador con referencia a la torre o tierra

Para comprobar que el análisis matemático de la distribución de voltaje en cada aislador de una cadena de aisladores se realiza una simulación en el software FEMM como indica la Figura 35, donde se puede ver la densidad de voltaje en los 5 aisladores.

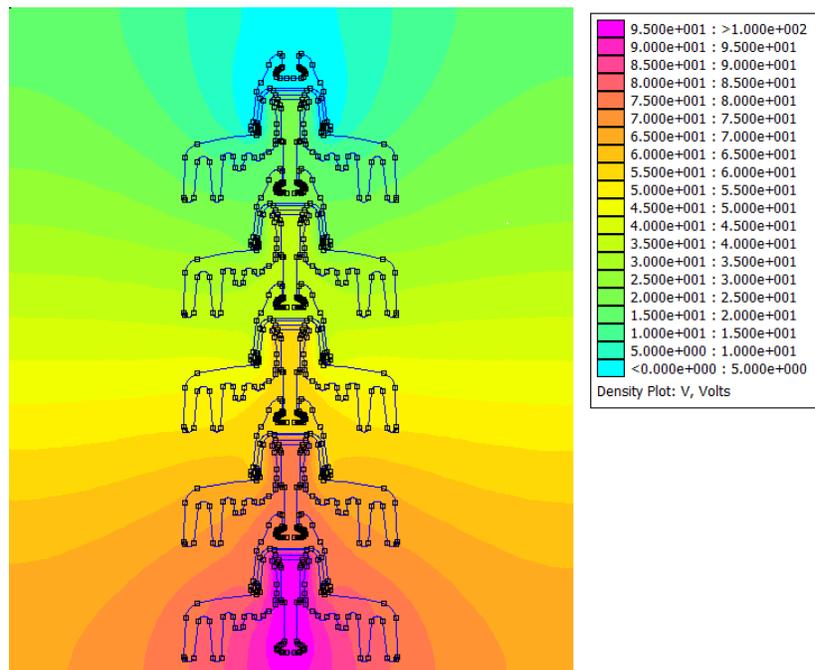


Figura 35. Simulación de la distribución de voltaje en una cadena de 5 aisladores

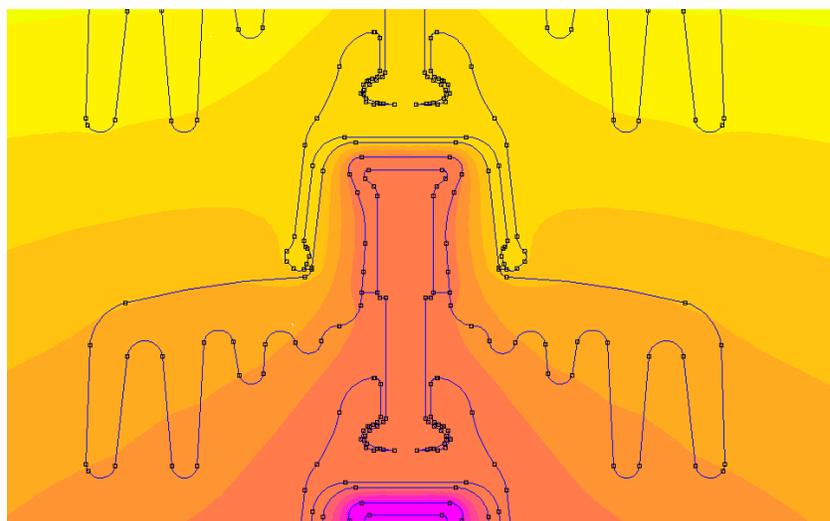


Figura 36. Densidad de voltaje en un aislador

El simulador también da la facilidad de dar tabla de datos y curvas de los parámetros vistos en la simulación como indica la Figura 37, en esta curva se indica, en este caso el porcentaje de voltaje que se encuentra en cada aislador, las líneas horizontales representan cada aislador ya que se toma como eje x la distancia de la línea a la torre y el voltaje en cada aislador es constante en su parte conductora como indica la Figura 36.

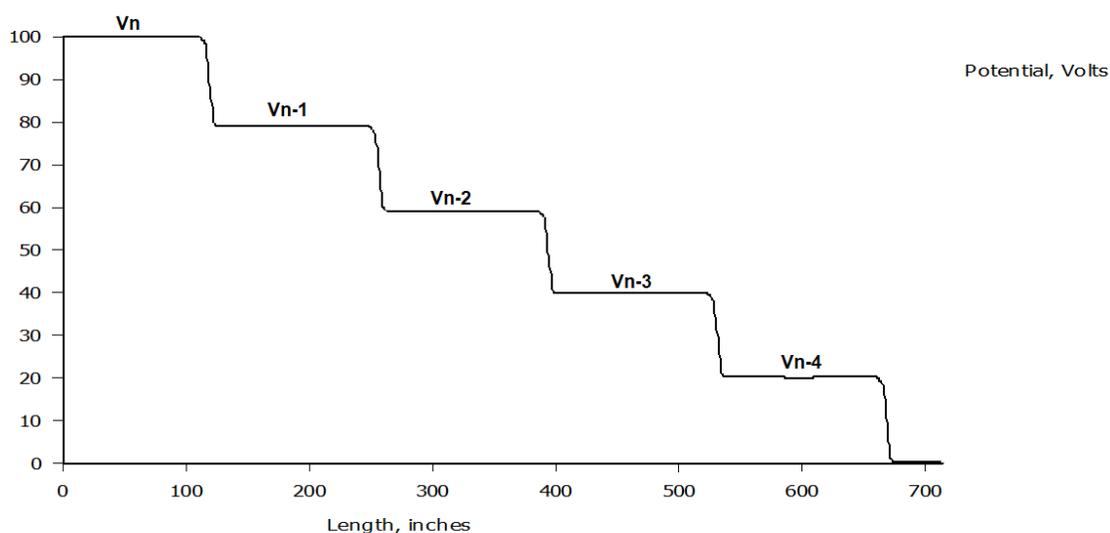


Figura 37. Distribución de voltaje en una cadena de 5 aislador mediante software FEMM

Remplazando los valores del porcentaje de voltaje de cada aislador con referencia la torre, en los nodos de voltaje expresados anteriormente, se obtiene el voltaje o en este caso el porcentaje de voltaje que se encuentra en cada aislador como se representa en la Figura 38.

$$V1 = V_n - V_{n-1} = 100\% - 70,11\% = 29,89\%$$

$$V2 = V_{n-1} - V_{n-2} = 70,11\% - 47,24\% = 22,87\%$$

$$V3 = V_{n-2} - V_{n-3} = 47,24\% - 29,09\% = 18,15\%$$

$$V4 = V_{n-3} - V_{n-4} = 29,09\% - 13,85\% = 15,24\%$$

$$V5 = V_{n-4} = 13,85\%$$

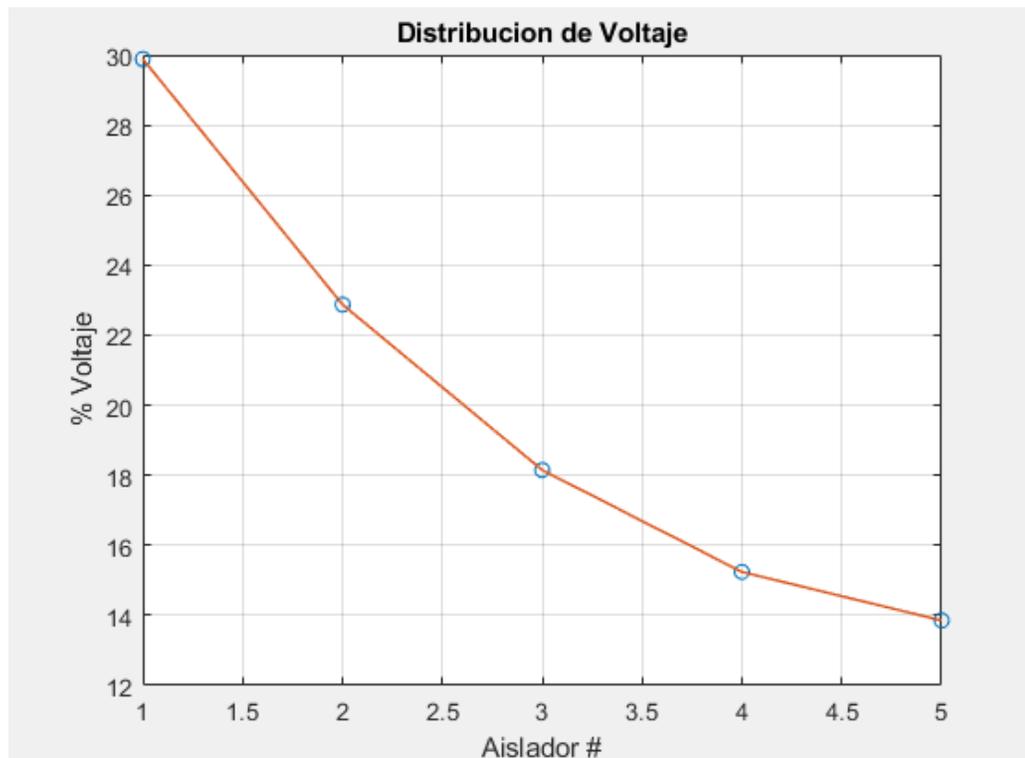


Figura 38. Distribución de voltaje en una cadena de 5 aisladores

4.3. Análisis de Densidad de Voltaje en distintas cadenas de aisladores mediante simulación

Con el aumento de aisladores en una cadena de suspensión, el voltaje como la densidad de voltaje tratan de distribuirse equitativamente para que cada aislador soporte el mismo nivel como se muestra a continuación:

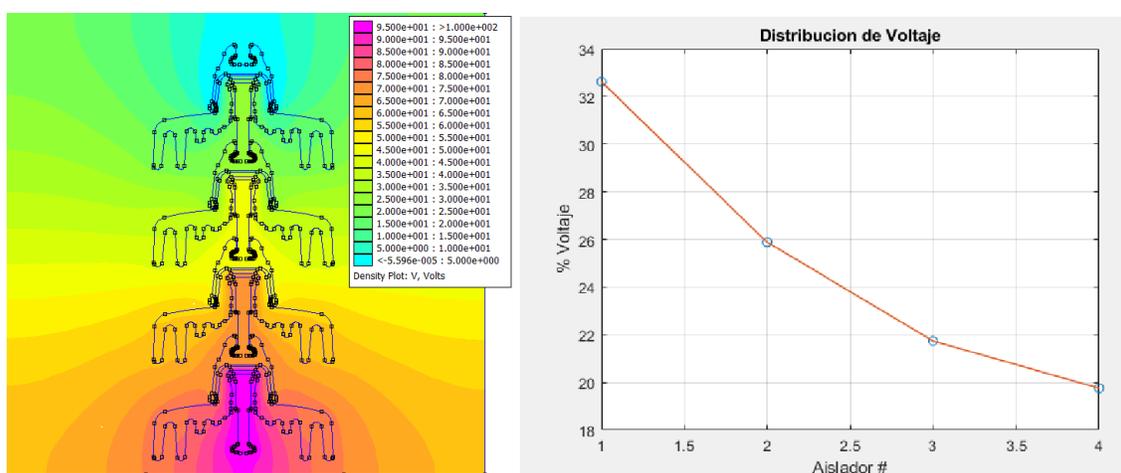


Figura 39. Densidad de voltaje en una cadena de 4 aisladores

Como se observa en la Figura 39, la densidad de voltaje en una cadena de 4 aisladores no contempla mayor complejidad ya que al poseer un número reducido de elementos el voltaje se distribuye de manera lineal como sucede también en una cadena de 5 aisladores como indica la Figura 40.

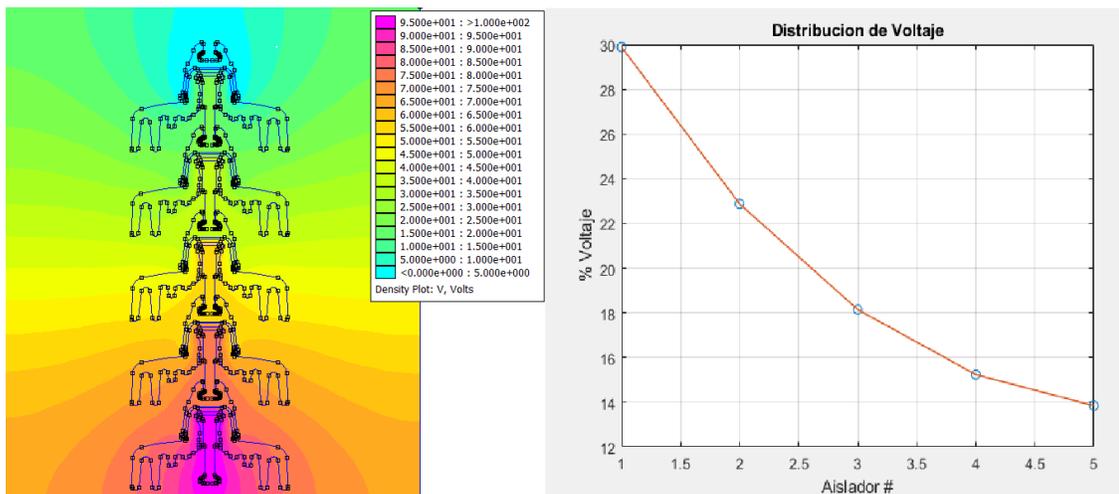


Figura 40. Densidad de voltaje en una cadena de 5 aisladores

Mientras que con el aumento de aisladores a una cantidad elevada como indica la Figura 41, el voltaje ya no se distribuye de una manera lineal y empieza a distribuirse de forma exponencial-inversa ya que el primer aislador el que se encuentra más cercano a la línea soporta la mayor parte de voltaje y con el aumento de aisladores este soporta cada vez más como indica la Figura 42.

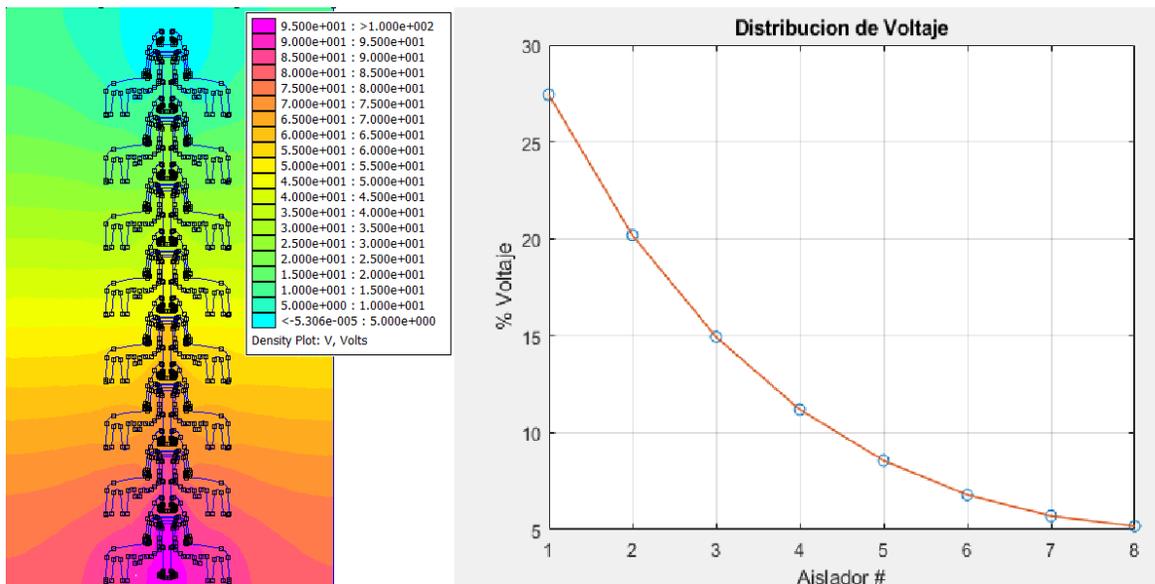


Figura 41. Densidad de voltaje en una cadena de 8 aisladores

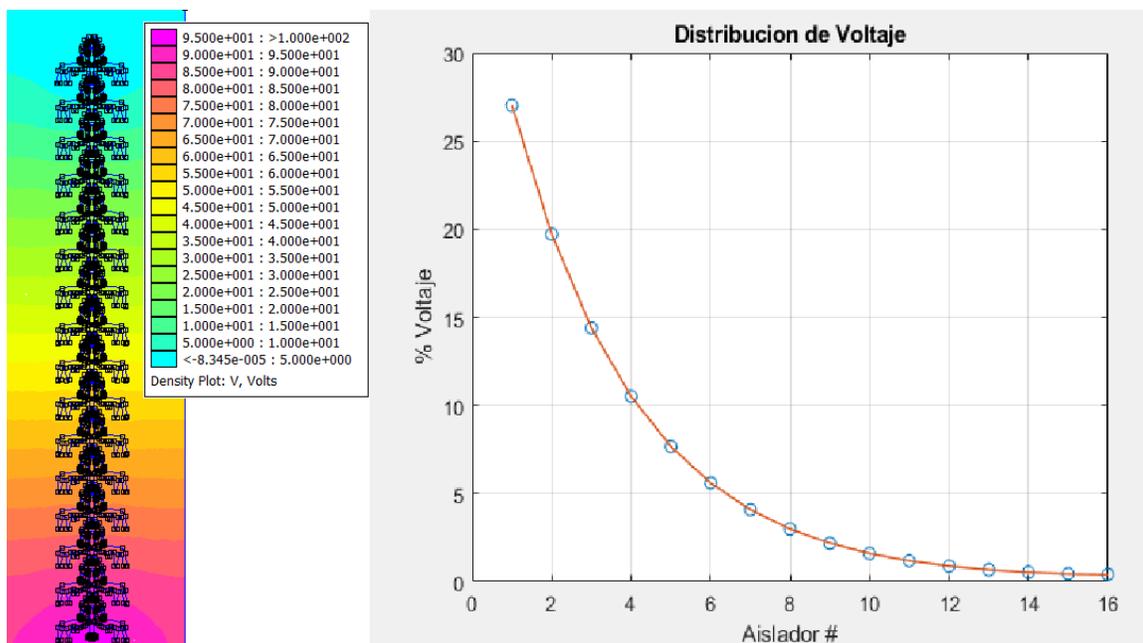


Figura 42. Densidad de voltaje en una cadena de 16 aisladores

4.4. Análisis de distribución de voltaje de una cadena de aisladores con herraje de protección

En la actualidad existen 3 capacitancias que intervienen en un aislador suspendido en una torre de transmisión que son las dos vistas anteriormente y una que por lo general se despreciaba, pero ahora con la incorporación de herrajes que se encuentran en la unión del primer aislador con la línea energizada esta capacitancia ha tomado más relevancia como indica la Figura 43-a, este herraje lo que hace es tratar de nivelar el voltaje que soporta cada aislador ósea distribuir equitativamente el voltaje en la cadena de aisladores.

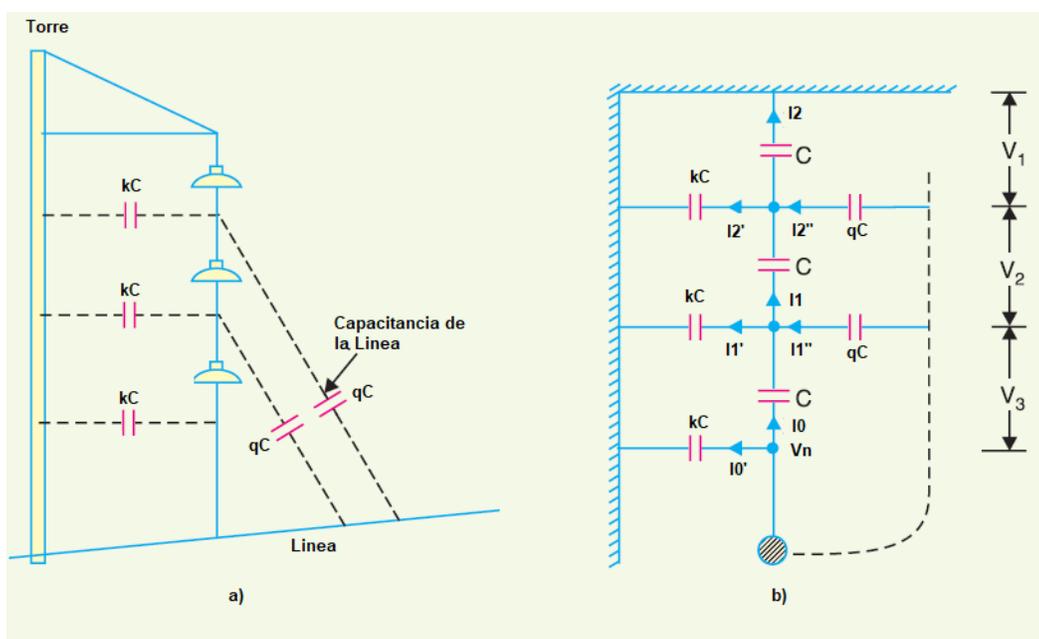


Figura 43. Aisladores de Suspensión con capacitancia de línea

Mediante el proceso realizado anteriormente para calcular el voltaje que soporta cada aislador en una cadena de 5 aisladores se realiza el mismo procedimiento empezando por realizar el diagrama eléctrico incorporando la nueva capacitancia a estudiar como indica la Figura 43-b, que por lo general es de 0,022 y haciendo un análisis para “n” aisladores como se representa en la Figura 44:

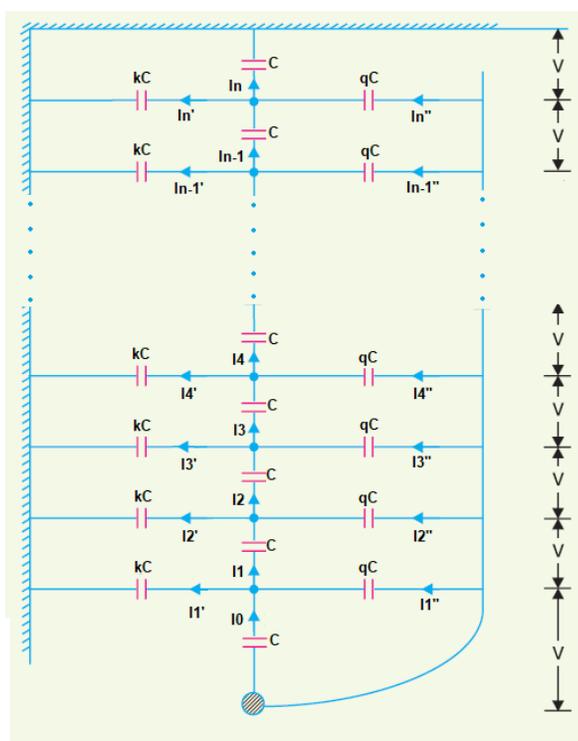


Figura 44. Diagrama Eléctrico de cadena de "n" aisladores

Nodos de Corriente

$$I_0 + I_1'' = I_1 + I_1'$$

$$I_1 + I_2'' = I_2 + I_2'$$

$$I_2 + I_3'' = I_3 + I_3'$$

$$I_3 + I_4'' = I_4 + I_4'$$

*

*

$$*I_{n-1} + I_n'' = I_n + I_n'$$

Nodos de Voltaje

$$V_1 = V_n - V_{n-1}$$

$$V_2 = V_{n-1} - V_{n-2}$$

$$V_3 = V_{n-2} - V_{n-3}$$

$$V_4 = V_{n-3} - V_{n-4}$$

*

*

$$V_n = V_{n-1}$$

Como el proceso es demasiado extenso para el cálculo de la cadena de aisladores se procede a realizar un programa en Matlab (Anexo 4) para poder calcular la distribución de voltaje en cualquier cantidad de aisladores.

Con la incorporación del herraje se puede observar un cambio en la distribución del potencial de voltaje en los aisladores como indica la Figura 45.

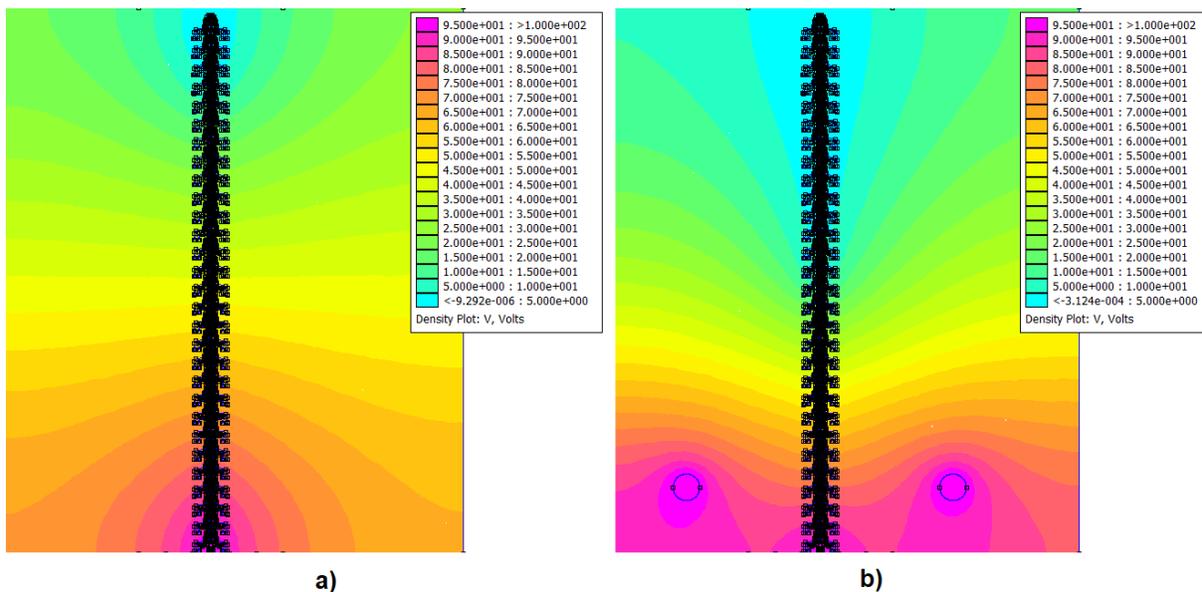


Figura 45. Diferencia de la densidad de voltaje en una cadena de 29 aisladores con herraje y sin herraje

En la Figura 45-a, se puede observar que no existe el herraje de distribución equitativa de potencial lo que ocasiona que el voltaje se distribuya solamente en los primeros aisladores, a diferencia de la Figura 45-b, que si posee herraje y lo que trata es de distribuir el voltaje a todos los aisladores por igual.

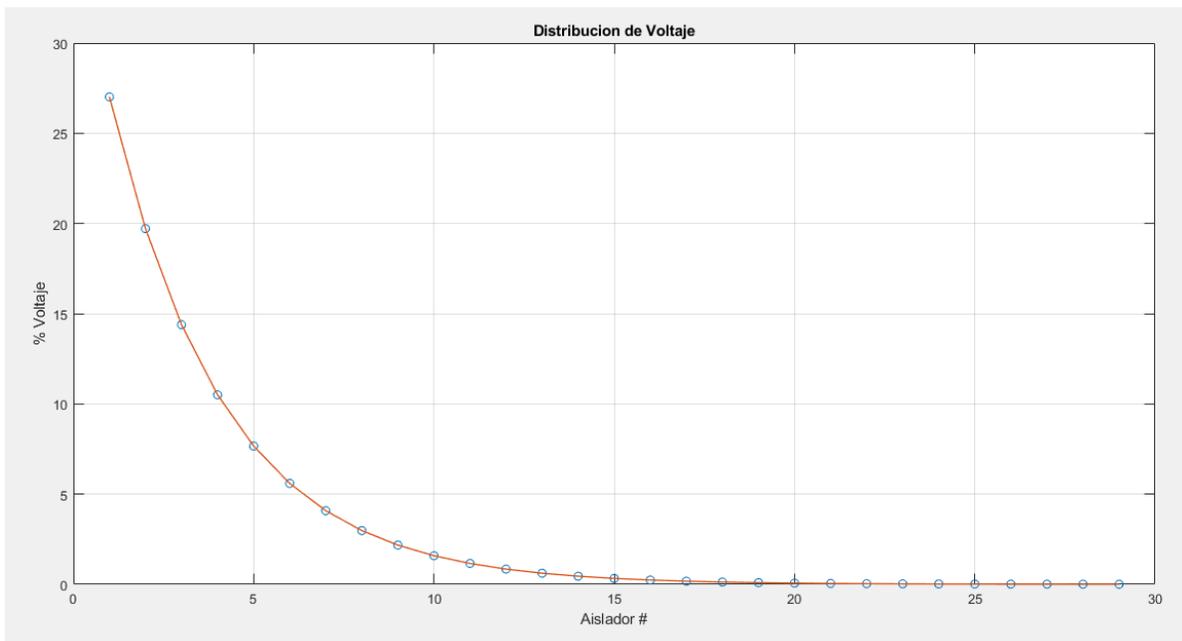


Figura 46. Curva de distribución de voltaje de una cadena de 29 aisladores sin herraje

En la Figura 46, se representa la curva distribución de voltaje de una cadena de 29 aisladores que no poseen herraje como se indica en la gráfica Figura 45-a, se puede ver que entre los 3 o 5 primeros aisladores soportan la mayor parte del voltaje de línea en especial el primer aislador que soporta más del 28% del voltaje.

Esto no sucede con la implementación del herraje de distribución, aunque gráficamente solo se puede observar un aumento en el voltaje que soportan los últimos aisladores, que se encuentran lo más cercanos a la torre como indica la Figura 47,

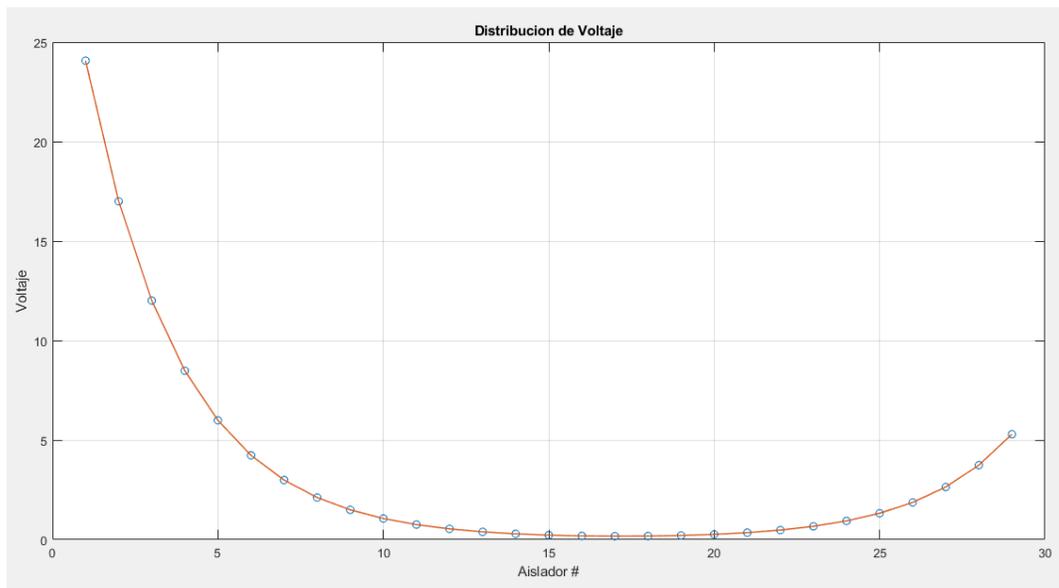


Figura 47. Curva de distribución de voltaje de una cadena de 29 aisladores con herraje

Existe algo más relevante que es el voltaje que soportan los primeros aisladores, comparándolo con la curva de la Figura 46 existe un claro decremento de la capacidad que soportan los primeros aisladores en especial el más cercano a la línea, que de soportar alrededor del 28% del voltaje de línea con la implementación del herraje este se redujo a menos del 25%.

4.5. Análisis del aislador ANSI tipo B C29.2-52-3 FOG

4.5.1. Análisis del diámetro eficaz y promedio

El diámetro eficaz de un aislador se puede calcular utilizando la fórmula:

$$d_{eff} = \frac{L}{\pi * f}$$

Donde:

L: es la distancia de fuga del aislador

f: es el factor de forma del aislador

El factor de forma es una de las variables más importantes de un aislador ya que de esta depende el cálculo de la resistencia superficial del aislador para estudios de contaminación de aisladores y se la puede expresar como:

$$f = \int_0^L \frac{dl}{\pi dl} = \frac{L}{\pi D_{eff}}$$

El Factor de forma no se puede calcular matemáticamente cuando no se posee la función o ecuación con la que está realizado el contorno propio del aislador ya que cada tipo de aislador esta establecidos por cada fabricante y son de su confidencialidad.

Pero para esto existe un método practico con el que se puede calcular el diámetro eficaz y promedio del aislador que se describe a continuación.

4.5.1.1. Cálculo practico

Se debe seguir el siguiente procedimiento:

1. El perfil del aislador se traza en un dibujo a escala 1:1.

2. La superficie del aislador se subdivide en pequeños elementos, Δl , sobre la gráfica de escala 1:1 como se indica en la Figura 48. Elementos Δl de 2 a 5 mm entregan, por lo general, una buena aproximación. El número de elementos viene dado entonces por $\left(\frac{L}{\Delta l}\right) + 1$.

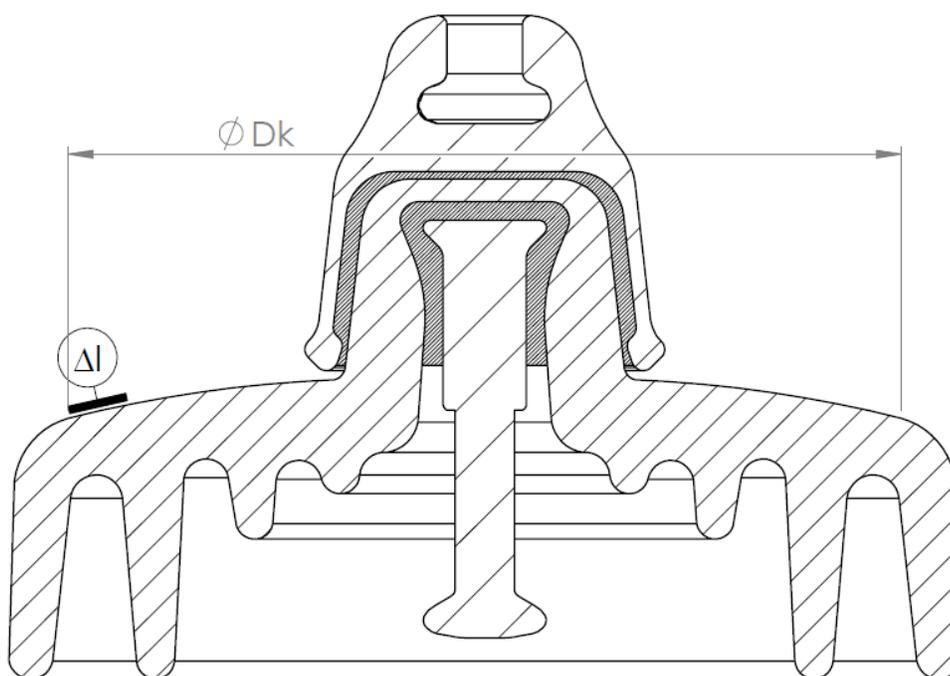


Figura 48. Principio Básico para estimar el diámetro eficaz de un aislador

3. A cada elemento se le adjudica un número de 1 a n. Al primer elemento se le adjudica el N° 1 y al último la letra n.
4. En la gráfica a escala 1:1 se mide de diámetro, D_k , correspondiente al punto. El Diámetro Promedio se define, entonces, como media aritmética.

$$D'_{Pr} = \frac{D_1 + D_2 + \dots + D_n}{n} = \frac{\sum_{k=1}^{k=n} D_k}{n}$$

Si el número de elementos, n , es elevado, la relación D'_{Pr} representa una buena aproximación para el Diámetro Promedio expresado, originalmente, en forma integral.

Este proceso se realiza para el aislador ANSI tipo B C29.2-52-3 FOG, pero en este caso se mide el radio r_k por motivos de rapidez en comparación a medir D_k .

Se realiza el perfil del aislador en un software en este caso Solidwork como indica la Figura 49.

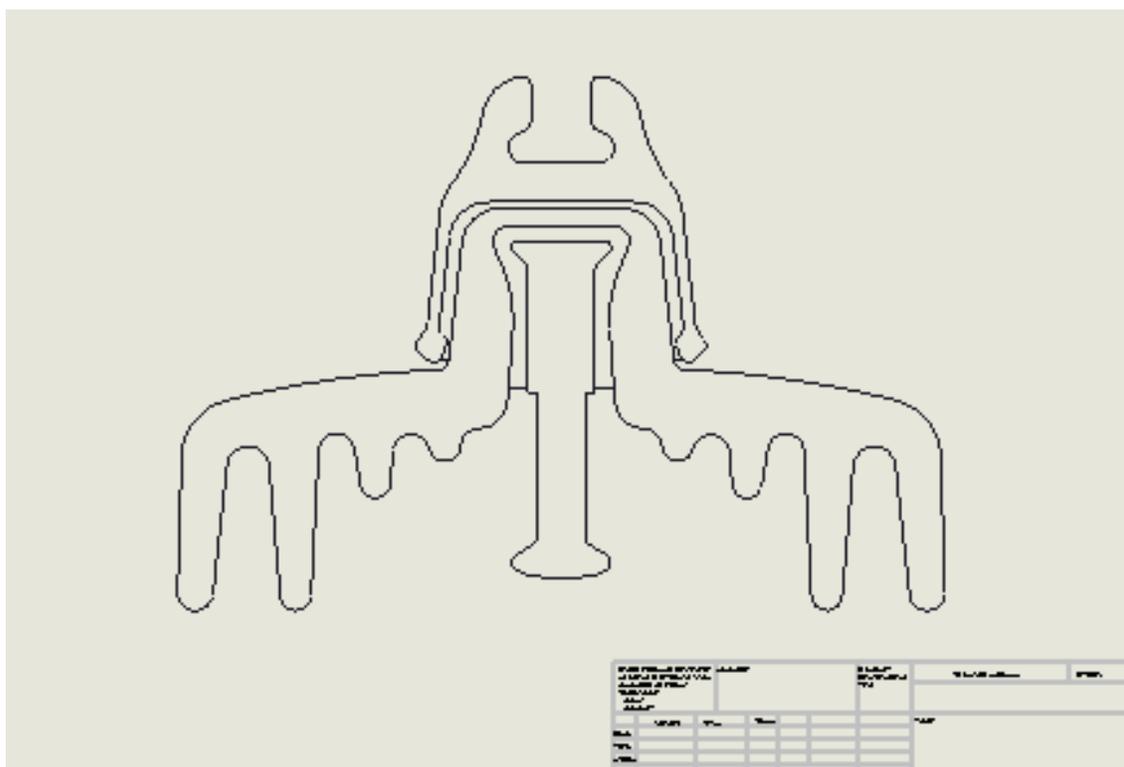


Figura 49. Perfil del aislador 52-3

A la superficie del aislador se divide en varias partes y con ayuda de Solidwork se calcula su radio "rk" en función de la línea vertical que divide el aislador a la mitad como se muestra en la Figura 50.

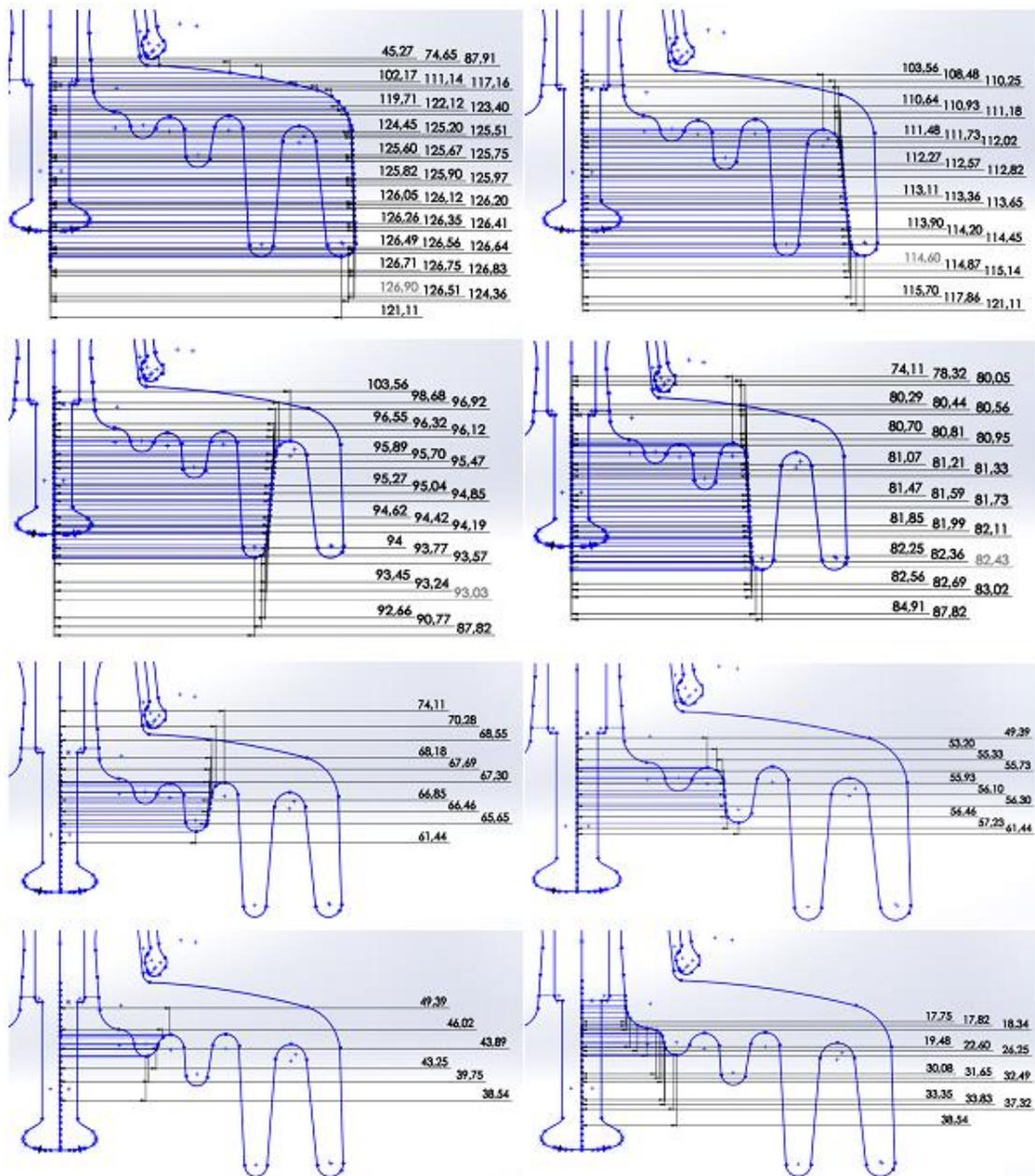


Figura 50. Medición práctica de R_k para el diámetro eficaz de un aislador

El aislador se subdivide en 143 elementos que cada uno posee su propio radio o diámetro como indica la Tabla 5:

Tabla 5.

Valores de rk y Dk para el cálculo del diámetro eficaz de aislador

Al	rk	Dk	Al	rk	Dk	Al	rk	Dk	Al	rk	Dk
1	45,27	90,54	37	115,14	230,28	73	94,42	188,84	109	70,28	140,56
2	74,65	149,3	38	114,87	229,74	74	94,19	188,38	110	68,55	137,1
3	87,91	175,82	39	114,6	229,2	75	94	188	111	68,18	136,36
4	102,17	204,34	40	114,45	228,9	76	93,77	187,54	112	67,69	135,38
5	111,14	222,28	41	114,2	228,4	77	93,57	187,14	113	67,3	134,6
6	117,16	234,32	42	113,9	227,8	78	93,45	186,9	114	66,85	133,7
7	119,71	239,42	43	113,65	227,3	79	93,24	186,48	115	66,46	132,92
8	122,12	244,24	44	113,36	226,72	80	93,03	186,06	116	65,65	131,3
9	123,4	246,8	45	113,11	226,22	81	92,66	185,32	117	61,44	122,88
10	124,45	248,9	46	112,82	225,64	82	90,77	181,54	118	57,23	114,46
11	125,2	250,4	47	112,57	225,14	83	87,82	175,64	119	56,46	112,92
12	125,51	251,02	48	112,27	224,54	84	84,91	169,82	120	56,3	112,6
13	125,6	251,2	49	112,02	224,04	85	83,02	166,04	121	56,1	112,2
14	125,67	251,34	50	111,73	223,46	86	82,69	165,38	122	55,93	111,86
15	125,75	251,5	51	111,48	222,96	87	82,56	165,12	123	55,73	111,46
16	125,82	251,64	52	111,18	222,36	88	82,43	164,86	124	55,33	110,66
17	125,9	251,8	53	110,93	221,86	89	82,36	164,72	125	53,2	106,4
18	125,97	251,94	54	110,64	221,28	90	82,25	164,5	126	49,39	98,78
19	126,05	252,1	55	110,25	220,5	91	82,11	164,22	127	46,02	92,04
20	126,12	252,24	56	108,48	216,96	92	81,99	163,98	128	43,89	87,78
21	126,2	252,4	57	103,56	207,12	93	81,85	163,7	129	43,25	86,5
22	126,26	252,52	58	98,68	197,36	94	81,73	163,46	130	39,75	79,5
23	126,35	252,7	59	96,92	193,84	95	81,59	163,18	131	38,54	77,08
24	126,41	252,82	60	96,55	193,1	96	81,47	162,94	132	37,32	74,64
25	126,49	252,98	61	96,32	192,64	97	81,33	162,66	133	33,83	67,66
26	126,56	253,12	62	96,12	192,24	98	81,21	162,42	134	33,35	66,7
27	126,64	253,28	63	95,89	191,78	99	81,07	162,14	135	32,49	64,98

Continua



28	126,71	253,42	64	95,7	191,4	100	80,95	161,9	136	31,65	63,3
29	126,75	253,5	65	95,47	190,94	101	80,81	161,62	137	30,08	60,16
30	126,83	253,66	66	95,27	190,54	102	80,7	161,4	138	26,25	52,5
31	126,9	253,8	67	95,04	190,08	103	80,56	161,12	139	22,6	45,2
32	126,51	253,02	68	94,47	188,94	104	80,44	160,88	140	19,48	38,96
33	126,36	252,72	69	95,27	190,54	105	80,29	160,58	141	18,34	36,68
34	121,11	242,22	70	95,04	190,08	106	80,05	160,1	142	17,82	35,64
35	117,86	235,72	71	94,85	189,7	107	78,32	156,64	143	17,75	35,5
36	115,7	231,4	72	94,62	189,24	108	74,11	148,22			

Con los valores de diámetros obtenidos en cada punto se procede a calcular diámetro promedio y eficaz utilizando las ecuaciones:

Diámetro promedio

$$D_{Pr} = \frac{D_1 + D_2 + \dots + D_n}{n}$$

$$D_{Pr} = \frac{90,54 + 149,3 + \dots + 35,5}{143} = 178,4451mm$$

Diámetro Eficaz:

$$\frac{1}{D_{eff}} = \frac{1}{n} \left(\frac{1}{D_1} + \frac{1}{D_2} + \dots + \frac{1}{D_n} \right)$$

$$\frac{1}{D_{eff}} = \frac{1}{143} \left(\frac{1}{90,54} + \frac{1}{149,3} + \dots + \frac{1}{35,5} \right) = 0,00693962 \frac{1}{mm}$$

$$\frac{1}{D_{eff}} = 0,00693962 \frac{1}{mm} \Rightarrow D_{eff} = 144,1mm$$

4.6. Área superficial

El área superficial de un aislador es una variable importante en este estudio ya que es la parte donde se coloca el contaminante y se la puede calcular de dos maneras, realizando un sólido en un programa que permita obtener las propiedades físicas o a su vez mediante la ecuación

Se realiza por los dos métodos para su validación.

4.6.1. Método Numérico

El área superficial se puede calcular haciendo uso de la expresión siguiente:

$$A = \int_0^L \pi D(l) dl = \int_0^L \frac{\pi D(l)}{L} L dl$$

Es decir

$$A = \pi L \int_0^L \frac{D(l)}{L} dl$$

Donde:

A : área superficial

L : distancia de fuga del aislador

l : distancia a lo largo de la línea de fuga

D(l): diámetro del aislador en el punto *l*

Esta relación se puede simplificar haciendo uso del parámetro geométrico Diámetro Promedio, D_{Pr} :

$$D_{Pr} = \int_0^L \frac{D(l)}{L} dl$$

Como anteriormente se pudo calcular el diámetro promedio del aislador, por lo tanto

$$A = \pi L D_{Pr}$$

$$A = \pi * 430mm * 178,4451mm = 241058,7805 mm^2$$

4.6.2. Método computacional

Mediante el software Solidwork realizando un modelo del aislador en 3D como se indica en la Figura 51, basado en el Anexo 1 y usando la función propiedades físicas

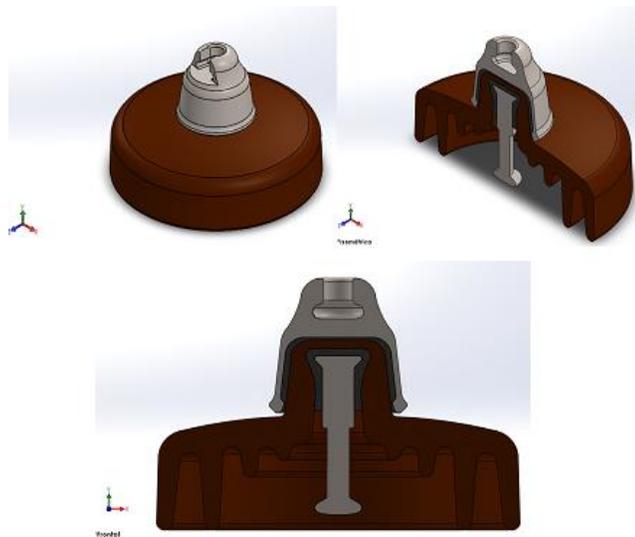


Figura 51. Aislador de 52-3 porcelana Solidwork

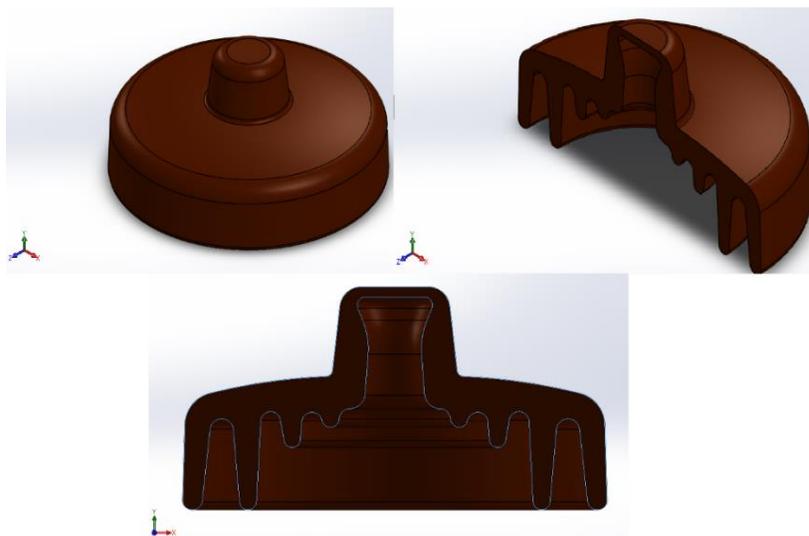


Figura 52. Porcelana aisladora 52-3 Solidwork

Se puede ver que la parte principal del aislador la que realiza el trabajo como aislante en la Figura 52, pero el área total del este no es el eficaz que corresponde a la que se encuentra en la distancia de fuga, ya que cierta parte de esta no es utilizada para aislar sino para ser ensamblada a las demás partes del aislador como por ejemplo la caperuza como se indica en la Figura 53.

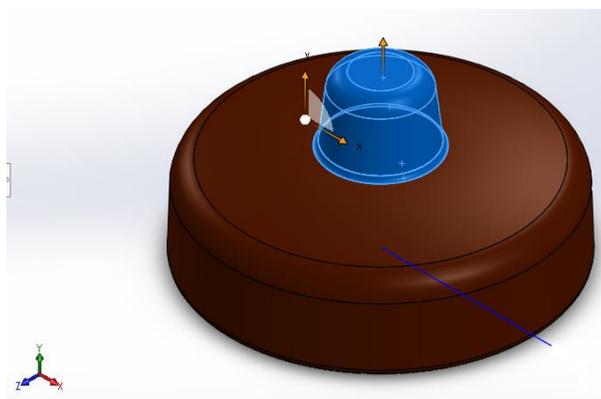


Figura 53. Superficie para ensamble del aislador con la caperuza

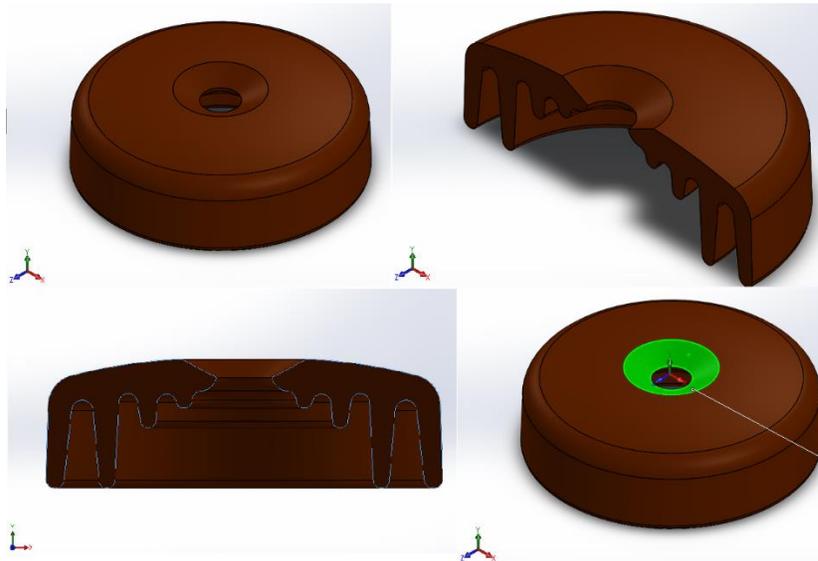


Figura 54. Superficie eficaz del aislador 52-3 Solidwork

En la Figura 54, se puede apreciar área eficaz del aislador exceptuando el área sombreada de color verde que no forma parte de él.

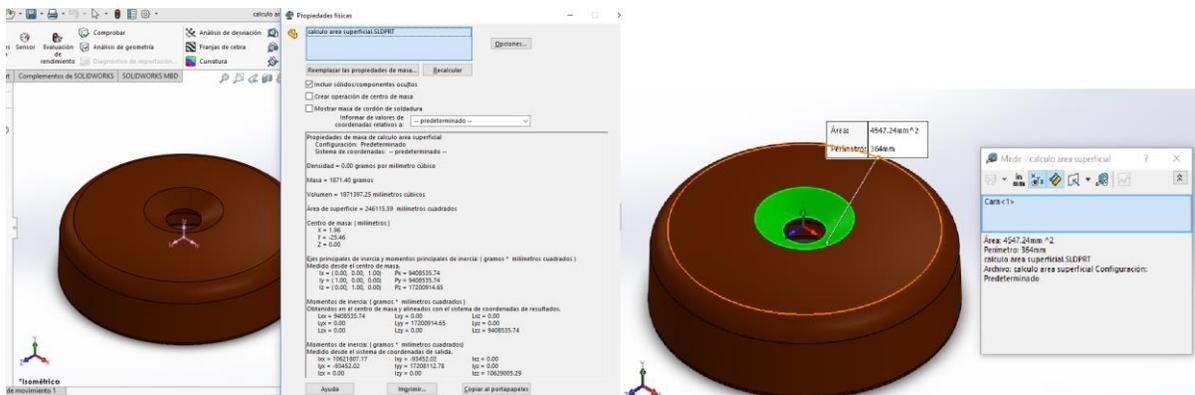


Figura 55. Área superficial del aislador 52-3 Solidwork

Con base en la Figura 55, el área superficial de todo el aislador de vidrio es de $246115.59mm^2$ a este valor se le debe restar el área sombreada de color verde dicha anteriormente que tiene un valor de $4547.25mm^2$.

Por lo tanto, el área superficial del aislador es

$$A = 246115.59mm^2 - 4547.25mm^2 = 241568.34mm^2$$

Calculando el porcentaje de error de las dos formas de medición del área superficial:

$$\%error = \frac{|aproximado - exacto|}{exacto} * 100$$

$$\%error = \frac{|matemático - computacional|}{computacional} * 100$$

$$\%error = \frac{|241058,7805 mm^2 - 241568.34mm^2|}{241568.34mm^2} * 100 = 0.21\%$$

4.7. Análisis de la Ceniza depositada en el aislador

4.7.1. Análisis del Depósito de Sal Equivalente ESDD sobre el aislador

Usando los datos de la Figura 56 de (López Chachalo, 2018), de la Determinación se ESDD y NSDD-Cotopaxi –Porcelana se puede determinar el ESDD del aislador de este estudio haciendo los cambio se sus parámetros ya que el nivel de contaminación ESDD se puede ver que varía linealmente con el aumento de contaminación.

Escenario	Contam. Superior	Contam. Inferior	Volumen agua destilada V (cm ³)	Area de contaminación A (cm ²)	Factor b	Temperatura de la solución θ (°C)	Conductividad de la Solución σθ (S/m)	Conductividad a 20 °C σ ₂₀ (S/m)	Salinidad S _a (kg/m ³)	ESDD (mg/cm ²)	Wf (g)	Wi (g)	NSDD (mg/cm ²)
1	1mm	-	500	436.5	0.0232	19.00	0.0123	0.0126	0.0665	0.0762	69.56	18.55	116.86
2	3mm	-	500	436.5	0.0232	19.00	0.0367	0.0376	0.2044	0.2341	135	18.55	266.78
3	6mm	-	500	436.5	0.0232	19.00	0.0736	0.0753	0.4184	0.4793	228.63	18.55	481.28
4	1mm	-	500	436.5	0.0232	19.00	0.0125	0.0127	0.0671	0.0769	49.32	15.14	78.30
	-	1mm	500	1043	0.0232	19.00	0.0274	0.0280	0.1511	0.0724	39.4	15.14	23.26
5	3mm	-	500	436.5	0.0232	19.00	0.0304	0.0311	0.1683	0.1928	97.66	15.14	189.05
	-	1mm	500	1043	0.0232	19.00	0.0313	0.0320	0.1735	0.0832	48.72	15.14	32.20
6	6mm	-	500	436.5	0.0232	19.00	0.0761	0.0779	0.4332	0.4962	186.34	15.14	392.21
	-	1mm	500	1043	0.0232	19.00	0.0385	0.0394	0.2147	0.1029	49	15.14	32.46

Figura 56. Determinación se ESDD y NSDD-Cotopaxi –Porcelana

Mediante la Ecuación para calcular el ESDD y la salinidad:

$$ESDD = S_a * \frac{V}{A}$$

$$S_a = (5,7\sigma_{20})^{1.03}$$

Sustituyendo S_a en ESDD y despejando la conductividad a temperatura de 20°C se obtiene:

$$\sigma_{20} = \frac{\sqrt[1.03]{\frac{ESDD * A}{V}}}{5.7}$$

Con los datos de la Figura 56 y sabiendo que la variación de ESDD varia linealmente con la cantidad de contaminante, se calcula la conductividad de la ceniza volcánica en el aislador ANSI tipo B C29.2-52-3 FOG.

4.8. Análisis de la conductividad a temperatura de 20°C de la parte superior del aislador

Para el cálculo del Área superior del aislador se realiza el mismo procedimiento que se utilizó para el cálculo del área superficial del aislador

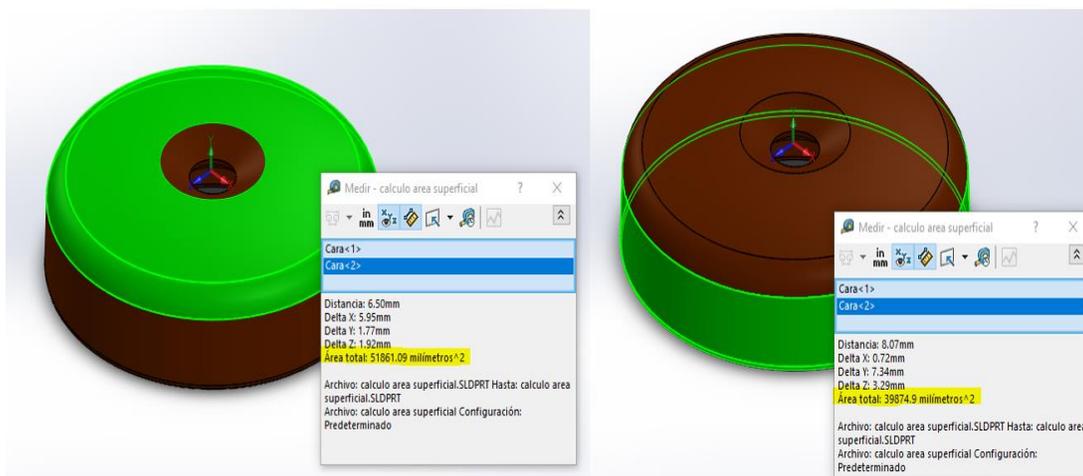


Figura 57. Área Superior aislador 52-3 Solidwork

El área superior es de:

$$A_s = 51891,09mm^2 + 39874,9mm^2 = 91765.99mm^2 \approx 91766mm^2$$

Como se mencionó el ESDD varía linealmente en función de la cantidad de contaminante entonces se procede a realizar una regla de tres para el cálculo de ESDD del aislador en varios niveles de contaminación empezando desde 1mm.

<i>ATs</i>	<i>ESDD</i>
$436,5\text{cm}^2$	$0,0762 \frac{\text{mg}}{\text{cm}^2}$
$917,66\text{cm}^2$	X

Dando como resultado:

$$X = \frac{917,66\text{cm}^2 * 0,0762 \frac{\text{mg}}{\text{cm}^2}}{436,5\text{cm}^2}$$

$$X = 0.160 \frac{\text{mg}}{\text{cm}^2}$$

Entonces la conductividad superficial con 1mm de contaminación superior a 20 grados es de:

$$\sigma_{20} = \frac{\sqrt[1.03]{\frac{ESDD * A}{500}}}{5.7} = \frac{\sqrt[1.03]{\frac{0,160 \frac{\text{mg}}{\text{cm}^2} * 917,66\text{cm}^2}{500\text{cm}^3}}}{5.7} = 0.0533 \text{ S/m}$$

Tabla 6.

Conductividad de la Ceniza Volcánica en la parte superior del aislador

Contaminación (mm)	Conductividad Superior (S/m)	Contaminación (mm)	Conductividad Superior (S/m)
1	0,053389637	11	0,547668584
2	0,104645149	12	0,595944412
3	0,155124891	13	0,644103071
4	0,205107354	14	0,692153844
5	0,254723272	15	0,740104668
6	0,304049029	16	0,787962404
7	0,353134788	17	0,835733042
8	0,402016025	18	0,883421856
9	0,450719147	19	0,931033526
10	0,499264579	20	0,978572231

4.9. Análisis de la conductividad a temperatura de 20°C de la parte inferior del aislador

Se realiza el mismo procedimiento para la capa inferior de contaminación desde 1mm:

$$AT_i = AT - AT_s = (246115,59mm^2 - 4547,24mm^2) - 91766mm^2$$

$$AT_i = AT - AT_s = 241568.35mm^2 - 91766mm^2 = 149802,35mm^2$$

AT_i	$ESDD$
$1043cm^2$	$0,0724 \frac{mg}{cm^2}$
$1498,02cm^2$	X

$$X = \frac{1498,02 \text{ cm}^2 * 0,0724 \frac{\text{mg}}{\text{cm}^2}}{1043 \text{ cm}^2} = 0,1039 \frac{\text{mg}}{\text{cm}^2}$$

Entonces la conductividad superficial con 1mm de contaminación inferior a 20 grados es de:

$$\sigma_{20} = \frac{\sqrt[1.03]{\frac{ESDD * A}{500}}}{5.7} = \frac{\sqrt[1.03]{\frac{0,1039 \frac{\text{mg}}{\text{cm}^2} * 1498,02 \text{ cm}^2}{500 \text{ cm}^3}}}{5.7} = 0.0565 \text{ S/m}$$

Y esto se hace con los siguientes niveles de contaminación.

Tabla 7.

Conductividad de la Ceniza Volcánica en la parte inferior del aislador

Contaminación (mm)	Conductividad Inferior (S/m)	Contaminación (mm)	Conductividad Inferior (S/m)
1	0,056500272	11	0,579577339
2	0,110742078	12	0,630665857
3	0,164162916	13	0,681630379
4	0,217057502	14	0,732480729
5	0,269564186	15	0,783225306
6	0,321763804	16	0,833871372
7	0,373709443	17	0,884425266
8	0,425438641	18	0,934892568
9	0,476979348	19	0,985278232
10	0,528353178	20	1,035586679

4.10. Análisis de la resistencia de contaminación por ceniza volcánica en el aislador

Considere una delgada película conductora de espesor h . La resistividad de la superficie (bidimensional) en cualquier punto de la película se define por:

$$\rho_s = \frac{\rho}{h}$$

ρ_s : resistividad superficial (Ω)

ρ : resistividad específica ($\Omega * cm$)

Si un aislador con simetría axial está uniformemente contaminado con resistividad de superficie ρ_s , entonces la resistencia total entre los electrodos viene dada por:

$$R = \rho_s \int_0^L \frac{dL}{\pi d(L)}$$

donde dL es un elemento de la trayectoria de fuga, L es la longitud de fuga y $d(L)$ es el diámetro del aislador en dL .

El 'diámetro efectivo del aislante' se define por:

$$d_{eff} = \frac{L}{\int_0^L \frac{dL}{\pi d(L)}}$$

Entonces:

$$R = \frac{\rho_s L}{\pi D_{eff}}$$

Si conductividad es el inverso de la resistividad, esto se calcula para obtener los valores de la resistencia de contaminación superior e inferior, por lo tanto:

$$\rho_s = \frac{1}{\sigma_s}$$

La distancia de fuga de la parte superior del aislador esta alrededor de 150mm y la de la parte inferior esta alrededor de 280mm entonces:

$$R = \frac{\rho_s * 430mm}{\pi * 144.1mm} \text{ ó } \frac{\rho * 430mm}{\pi * h * 144.1mm} \cong \frac{\rho_{sp} * 150mm}{\pi * h_{sp} * 144.1mm} + \frac{\rho_{if} * 280mm}{\pi * h_{if} * 144.1mm}$$

Donde:

ρ_{sp} : es la resistividad especifica de la contaminación superior

ρ_{if} : es la resistividad especifica de la contaminación inferior

Se debe cambiar la conductividad específica a resistividad específica, para remplazar en la ecuación de la resistencia superficial.

$$\rho_{ss} = \frac{1}{\sigma_{ss}} = \frac{1}{0.0533 \text{ S/m}} = 18730.22 \Omega * mm$$

$$\rho_{si} = \frac{1}{\sigma_{si}} = \frac{1}{0.0565 \text{ S/m}} = 17700 \Omega * mm$$

$$R_{superior}(1mm) = \frac{\rho_{sp} * 150mm}{\pi * h_{sp} * 144.1mm} = \frac{(18730.22 \Omega * mm) * 150mm}{\pi * 1mm * 144.1mm} = 6206.12 \Omega$$

$$R_{inferior}(1mm) = \frac{\rho_{sp} * 280mm}{\pi * h_{sp} * 144.1mm} = \frac{(17700 \Omega * mm) * 280mm}{\pi * 1mm * 144.1mm} = 10946,96 \Omega$$

$$R_{superior}(2mm) = \frac{\rho_{sp} * 150mm}{\pi * h_{sp} * 144.1mm} = \frac{(18730.22 \Omega * mm) * 150mm}{\pi * 2mm * 144.1mm} = 3103,06 \Omega$$

$$R_{inferior}(2mm) = \frac{\rho_{sp} * 280mm}{\pi * h_{sp} * 144.1mm} = \frac{(17700 \Omega * mm) * 280mm}{\pi * 2mm * 144.1mm} = 5473,48 \Omega$$

Tabla 8.
Valores de Resistencia de Contaminación

Contaminación (mm)	Resistencia de Contaminación Superior (Ω)	Resistencia de Contaminación Superior (Ω)	Contaminación (mm)	Resistencia de Contaminación Superior (Ω)	Resistencia de Contaminación Superior (Ω)
1	6206,12382	10946,96275	11	564,1930745	995,1784322
2	3103,06191	5473,481377	12	517,176985	912,2468961
3	2068,70794	3648,987585	13	477,39414	842,074058
4	1551,530955	2736,740688	14	443,2945586	810,925911
5	1241,224764	2189,392551	15	413,741588	729,7975169
6	1034,35397	1824,493792	16	387,8827387	684,1851721
7	886,5891171	1563,851822	17	365,0661071	643,9389855
8	775,7654775	1368,370344	18	344,7846567	608,1645974
9	689,5693133	1216,329195	19	326,6380958	576,1559344
10	620,612382	1094,696275	20	310,306191	547,3481377

4.11. Análisis de la Resistencia de Contaminación Ambiental (Húmedo)

Únicamente se realiza un análisis en condiciones de humedad ya que en ambiente seco la contaminación de ceniza no afecta al aislador y la lluvia el aislador en este caso se limpiaría como se mencionó anteriormente.

La conductividad específica en ambiente húmedo es de:

$$\sigma_{ah} = 0.00015 \text{ S/m}$$

Cambiando la conductividad específica a resistividad específica para poder obtener la resistencia de contaminación ambiental.

$$\rho_{ah} = \frac{1}{\sigma_{ah}} = \frac{1}{0.00015 \text{ S/m}} = 6666.666 \Omega * m \approx 6666666 \Omega * mm$$

$$R_1 = \frac{6666666 \Omega * mm * 430mm}{\pi * 1mm * 3900mm} = 233971.34 \Omega$$

Remplazando la resistividad en la ecuación de la resistencia de contaminación ya que se analiza el efecto que causa en la contaminación superficial que es la ceniza, se obtiene la siguiente Tabla 9.

Tabla 9.
Resistencia de la contaminación ambiental

Nivel de contaminación (Caso)	Resistencia(Ω)
1	233971.34
2	89902.82
3	46794.26
4	17035.54
5	15428.43
6	8690.36

4.12. Análisis de la Conductividad específica de Contaminación en función de la temperatura.

Con la ecuación para calcular la conductividad en diferentes temperaturas se varia la temperatura para distintos escenarios.

$$\sigma_{20} = \sigma_{\theta} [1 - b(\theta - 20)] \quad \Rightarrow \quad \sigma_{\theta} = \frac{\sigma_{20}}{[1 - b(\theta - 20)]}$$

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

Contaminante superior

$$\sigma_{21} = \frac{0.0533 \frac{S}{m}}{[1 - 0.0223(21 - 20)]} = 0.0545 \frac{S}{m}$$

$$\sigma_{17} = \frac{0.0533 \frac{S}{m}}{[1 - 0.0242(17 - 20)]} = 0.0497 \frac{S}{m}$$

Tabla 10.
Conductividad Superior en función de la temperatura

Temperatura Contaminante Superior									
7°C	9°C	11°C	13°C	15°C	17°C	19°C	21°C	23°C	
b	0,0301	0,0288	0,0275	0,0264	0,0252	0,0242	0,0232	0,0223	0,0215
Conductividad Superior (S/m)									
	0,0384	0,0405	0,0428	0,0451	0,0474	0,0498	0,0522	0,0546	0,0571

Contaminante inferior

$$\sigma_{23} = \frac{0.0565 \frac{S}{m}}{[1 - 0.0215(23 - 20)]} = 0.0604 \frac{S}{m}$$

$$\sigma_{17} = \frac{0.0565 \frac{S}{m}}{[1 - 0.0242(17 - 20)]} = 0.0527 \frac{S}{m}$$

$$\sigma_7 = \frac{0.0565 \frac{S}{m}}{[1 - 0.0301(7 - 20)]} = 0.0406 \frac{S}{m}$$

Tabla 11.
Conductividad inferior en función de la temperatura

Temperatura Contaminante Inferior									
7°C	9°C	11°C	13°C	15°C	17°C	19°C	21°C	23°C	
b	0,0301	0,0288	0,0275	0,0264	0,0252	0,0242	0,0232	0,0223	0,0215
Conductividad Inferior (S/m)									
	0,0406	0,0429	0,0453	0,0477	0,0502	0,0527	0,0552	0,0578	0,0604

CAPÍTULO V

5. PROPUESTA

5.1. Propuesta

La propuesta que se presenta en este capítulo está relacionada con el modelamiento y simulación de los efectos que generan los contaminantes sobre un aislador, más específicamente de la ceniza volcánica del Cotopaxi, mediante la corriente de fuga que genera este contaminante se espera analizar qué caso de contaminación con ceniza ubicada en la superficie del aislador es la que produce un fallo en el sistema y así poder generar un programa que facilite todo este cálculo como análisis previos de la distribución de voltaje en la cadena de aisladores, factores como el ambiente la humedad, etc.

5.2. Objetivos de la propuesta

- Realizar un modelamiento matemático y simulación estática del efecto “flashover voltage” de aisladores contaminados con ceniza volcánica, para evitar una posible falla.
- Diseñar un programa que permita visualizar y evaluar el nivel de contaminación del aislador para poder realizar un mantenimiento preventivo de ser necesario.
- Simular el nivel de contaminación máxima que soporta la cadena de aisladores de 500Kv, en función de la corriente de fuga hasta producirse un “flashover voltage”.

- Comprobar la Simulación con los datos obtenidos del modelamiento en función de la corriente de fuga.

5.3. Justificación de la propuesta

El programa ah implementar pretende determinar y representar los valores y características con los que el aislador tiende a perder su rigidez eléctrica por el aumento de la corriente de fuga, ya que ningún aislador se parece a otro en sus características eléctricas y por lo tanto el análisis del programa se enfoca únicamente en el aislador C29.2-52-3 FOG.

5.4. Análisis y Fundamentación de la Propuesta

Antes de realizar los distintos análisis de resultados se debe expresar que se realizó distintos niveles de contaminación sea superior o inferior y se los agrupo como casos como indica la Tabla 12.

También los valores de Conductividad específica y permeabilidad que poseen los materiales del aislador se resumen en la Tabla 13.

El valor de la temperatura se elegido basándose en el caso más reciente de una posible erupción del Cotopaxi que fue el 14 de agosto del 2015 y en el cual se tomaron los datos de ESDD ya que (López Chachalo, 2018), analiza la composición de la ceniza de esa erupción.

La temperatura en la que se encontraba esa fecha se adquirió de la base de datos de (weatherspark, 2015) ver en Anexo 5, página que proporciona base datos históricas de temperatura, viento, humedad, etc. Y el lugar que más cercano donde se encuentra los aisladores analizados, es en el Aeropuerto Internacional Cotopaxi.

Tabla 12.
Casos de Contaminación

CASOS	CONTAMINACIÓN h (mm)	CASOS	CONTAMINACIÓN h (mm)
1	SUPERIOR 0	8	SUPERIOR 4
	INFERIOR 0		INFERIOR 3
2	SUPERIOR 1	9	SUPERIOR 4
	INFERIOR 0		INFERIOR 4
3	SUPERIOR 1	10	SUPERIOR 5
	INFERIOR 1		INFERIOR 4
4	SUPERIOR 2	11	SUPERIOR 5
	INFERIOR 1		INFERIOR 5
5	SUPERIOR 2	12	SUPERIOR 6
	INFERIOR 2		INFERIOR 5
6	SUPERIOR 3	13	SUPERIOR 6
	INFERIOR 2		INFERIOR 6
7	SUPERIOR 3		
	INFERIOR 3		

Tabla 13.

Valores de Conductividad Especifica y permeabilidad que posee un aislador

MATERIAL	PERMEABILIDAD	CONDUCTIVIDAD (S/m)
AIRE	1	$1.00 \cdot 10^{-14}$
CONTAMINACIÓN AMBIENTAL (HÚMEDO)	10	$1.50 \cdot 10^{-4}$
CONTAMINACIÓN AMBIENTAL (LLUVIOSO)	50	$5 \cdot 10^{-4}$
CEMENTO (UNIONES)	15	$5.30 \cdot 10^{-3}$
ACERO (CAPERUZA, PIN)	1000000	598000000
PORCELANA (AISLANTE)	6	$1.00 \cdot 10^{-8}$
CONTAMINACIÓN (SUPERIOR)	80	0.0533
CONTAMINACIÓN (INFERIOR)	80	0.0565

5.5. Resultados Simulación Computacional

Previo al análisis de la corriente de fuga de los distintos casos de contaminación, se analiza los efectos que generan la temperatura y la contaminación ambiental en función de la corriente de fuga.

5.5.1. Influencia de la contaminación ambiental en la corriente de fuga

Las gráficas que se verán a continuación, corresponde a la Densidad de voltaje en el aislador contaminado desde 1mm hasta 6mm de ceniza volcánica en su parte superior e inferior.

Desde la parte inferior el color rosa que representa el 100% de voltaje que es este caso será el que soporta el primer aislador que es 70kV calculado previamente, seguido por una gama de colores que cada uno representa un voltaje hasta llegar al celeste que equivale el 0% de voltaje a 0 Voltios.

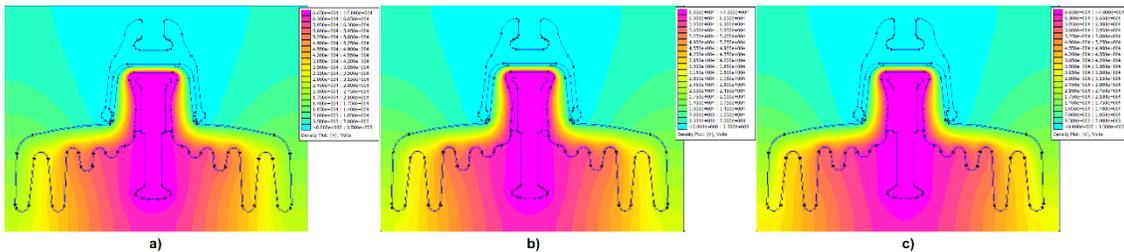


Figura 58. Densidad de Voltaje Caso 3 Contaminación Ambiental

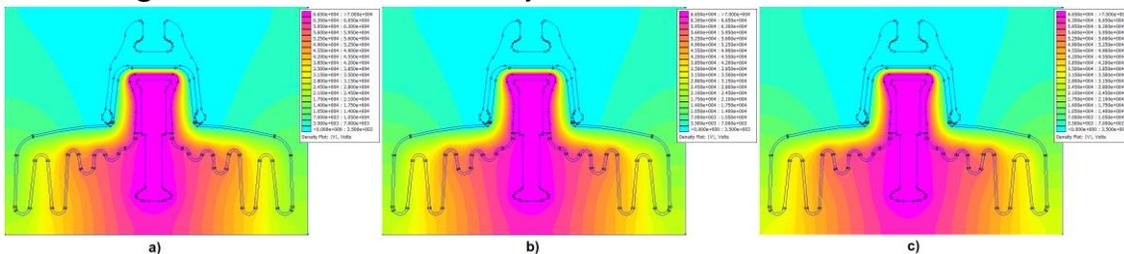


Figura 59. Densidad de Voltaje Caso 5 Contaminación Ambiental

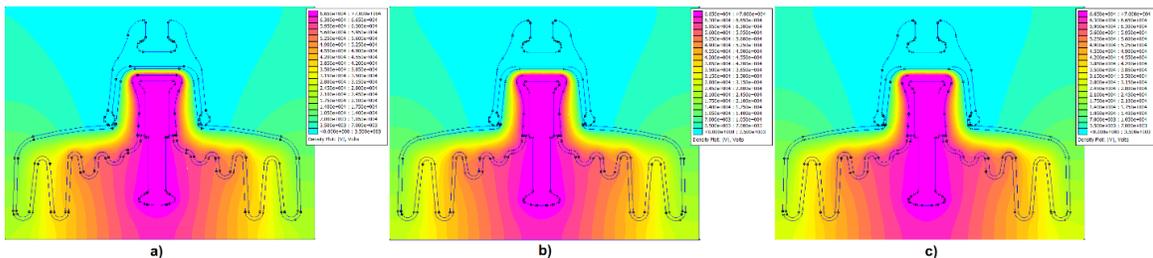


Figura 60. Densidad de Voltaje Caso 7 Contaminación Ambiental

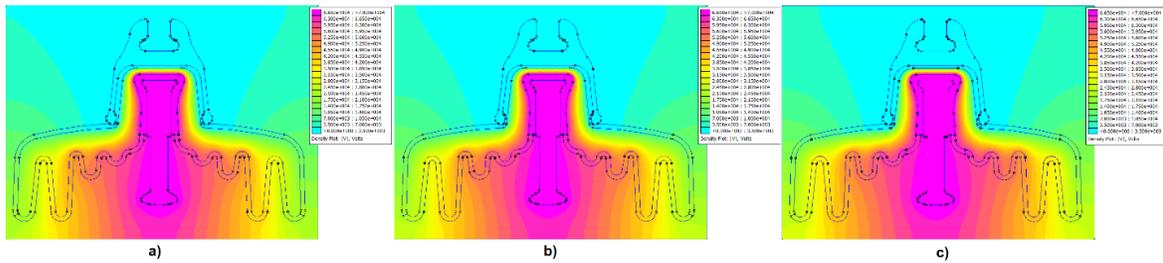


Figura 61. Densidad de Voltaje Caso 9 Contaminación Ambiental

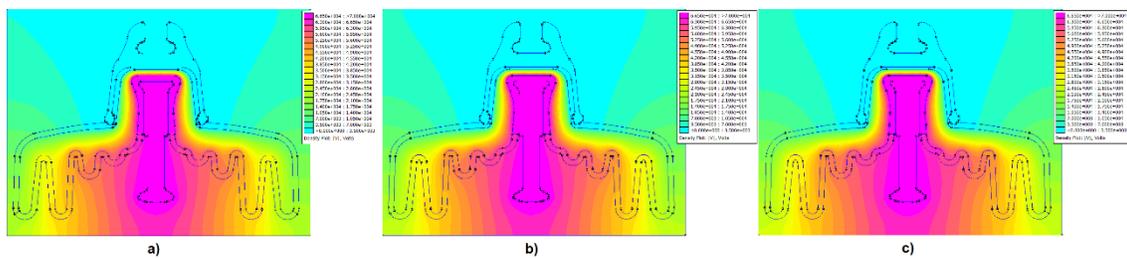


Figura 62. Densidad de Voltaje Caso 11 Contaminación Ambiental

Desde la Figura 58 hasta la Figura 62, se presentan los distintos factores que afectan a los aisladores en función de la contaminación ambiental, todas las figuras con inciso “a)” corresponden a una contaminación seca la cual no se puede observar ningún cambio en su distribución de densidad de voltaje.

Los incisos “b)” corresponden a un ambiente húmedo el cual se puede observar que existe una ligera perturbación en la distribución de voltaje generada por el contaminante ya que asociados con la humedad aumentan su conductividad, este tipo de contaminante a medida que aumenta su espesor en la superficie del aislador se puede notar que la densidad de voltaje trata de abrirse camino por esta.

Con respecto a los incisos “c)” se puede apreciar un aumento notable en la perturbación en la densidad de voltaje ya que las lluvias en conjunto con la contaminación forman una cadena conductora apreciable, aunque este tipo de contaminación es de poca relevancia ya que la lluvia en el mayor de los casos los que ocasiona es una limpieza del aislador.

Una mejor apreciación de los efectos que generan estas condiciones climáticas se puede apreciar en la Tabla 14, ya que se considera otra variable que es la corriente de fuga.

Tabla 14.
Corriente de fuga en función de la Contaminación Ambiental

CASO	CONTAMINACIÓN (mm)		Corriente de Fuga (A)		
			Contaminación Seca	Contaminación Húmeda	Contaminación Lluviosa
3	SUPERIOR	1	0,0147977	0,0265229	0,0366639
	INFERIOR	1			
5	SUPERIOR	2	0,0399531	0,068288	0,101708
	INFERIOR	2			
7	SUPERIOR	3	0,0589042	0,117368	0,202498
	INFERIOR	3			
9	SUPERIOR	4	0,160911	0,230613	0,342029
	INFERIOR	4			
11	SUPERIOR	5	0,183862	0,294682	0,483681
	INFERIOR	5			

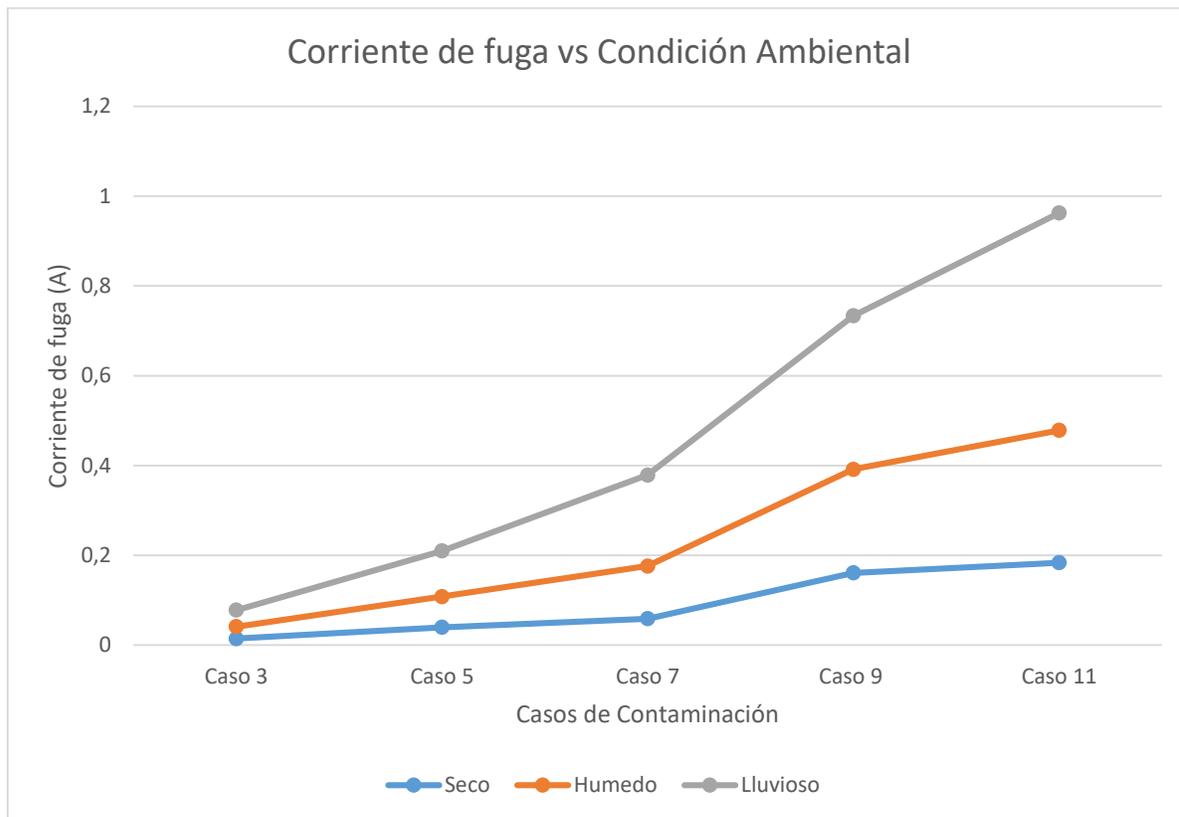


Figura 63. Curva de Corriente de fuga vs Contaminación en función del Ambiente

En las Curvas de la Figura 63, se representa de mejor manera la diferencia que genera los distintos tipos de ambiente en la corriente de fuga, tal es el Caso 3 que los tres tipos de ambientes no generan una mayor diferencia ya que su espesor es mínimo, en comparación con el caso 9 o 11 que los factores ambientales si influyen en las corrientes de fuga.

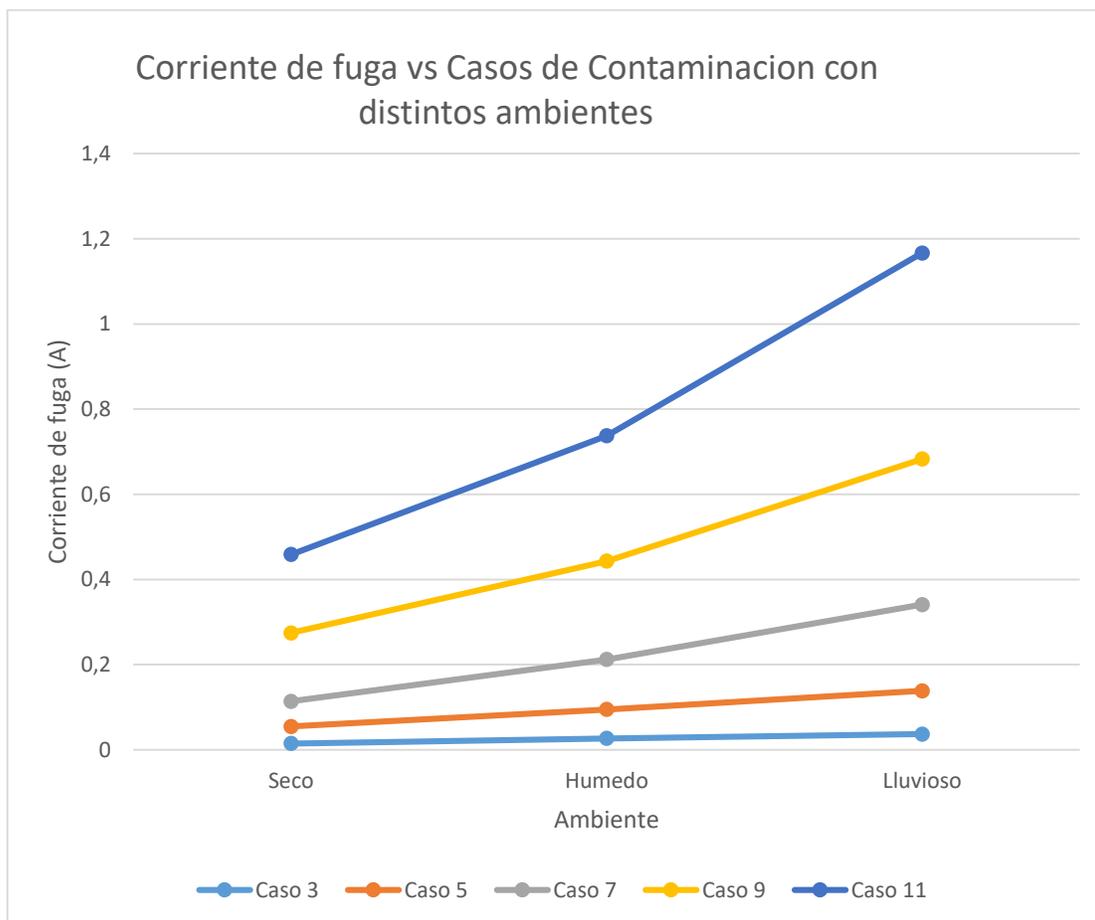


Figura 64. Curva de Corriente de fuga vs Ambiente en función de la Contaminación

En las Curvas de la Figura 64, se observa distintos casos de contaminación en los cuales los casos 3 y 5 no se aprecia un aumento de la corriente de fuga en ningún ambiente en comparación de los casos 9 y 11 en los cuales se puede ver que existe un aumento proporcional de la corriente de fuga con la contaminación ambiental.

5.5.2. Influencia de la temperatura del contaminante en la corriente de fuga

De igual manera como se realizó el análisis de la contaminación ambiental en función de la corriente de fuga, se procede a realizar el mismo análisis, pero ahora con la variación de la temperatura en el contaminante.

En las gráficas desde la **Figura 65** a la Figura 67, se observa 6 tipos de casos empezando por el a) que representa 7°C, b) 11°C, c) 15°C, d) 19°C, e) 21°C y f) 23°C.

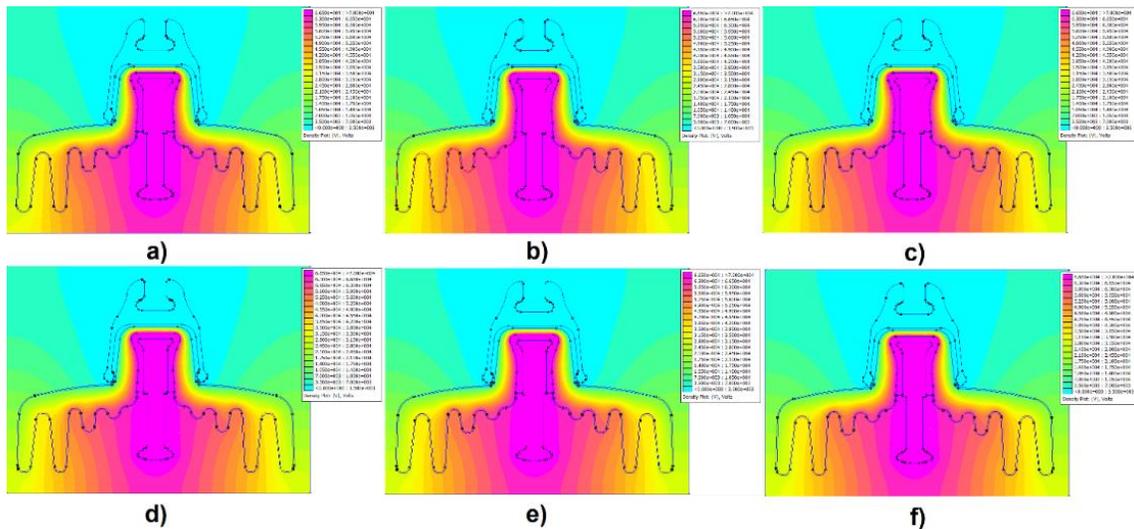


Figura 65 .Densidad de Voltaje Caso 3 vs temperatura

En la Figura 65, se representa la densidad de voltaje que varía en función de la temperatura como es el caso del inciso a) a temperatura de 7°C no presenta una mayor alteración de la distribución de voltaje, tampoco se puede observar en los demás incisos una variación apreciable del voltaje ya que en este caso (Caso 3) la contaminación es mínima.

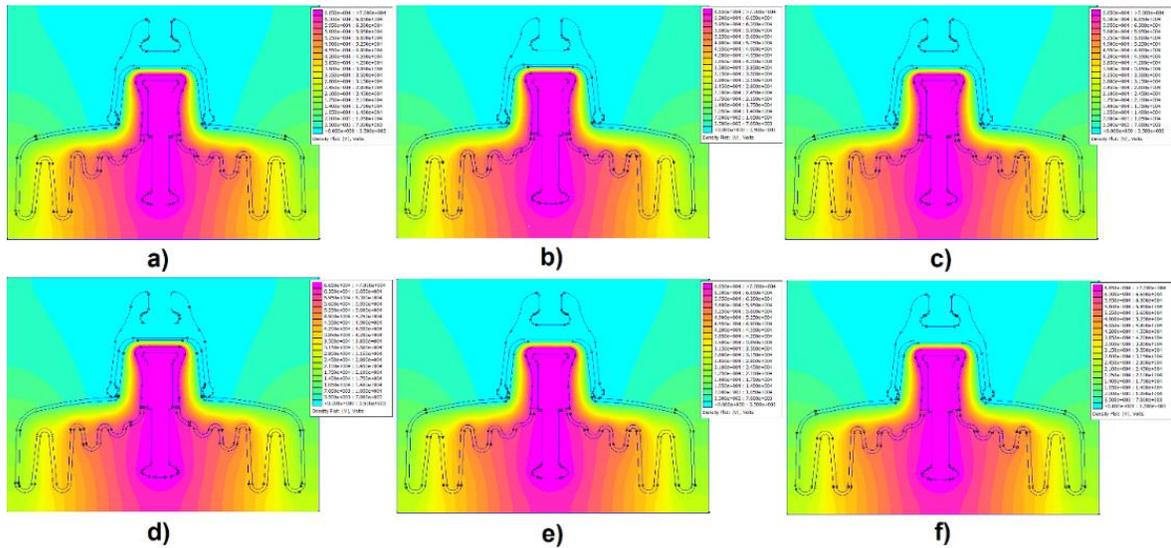


Figura 66. Densidad de Voltaje Caso 7 vs temperatura

En la Figura 66, ya con una mayor nivel de contaminación que en el caso anterior se aprecia una pequeña variación de la densidad de voltaje, debido a que el contaminante y la temperatura son directamente proporcional.

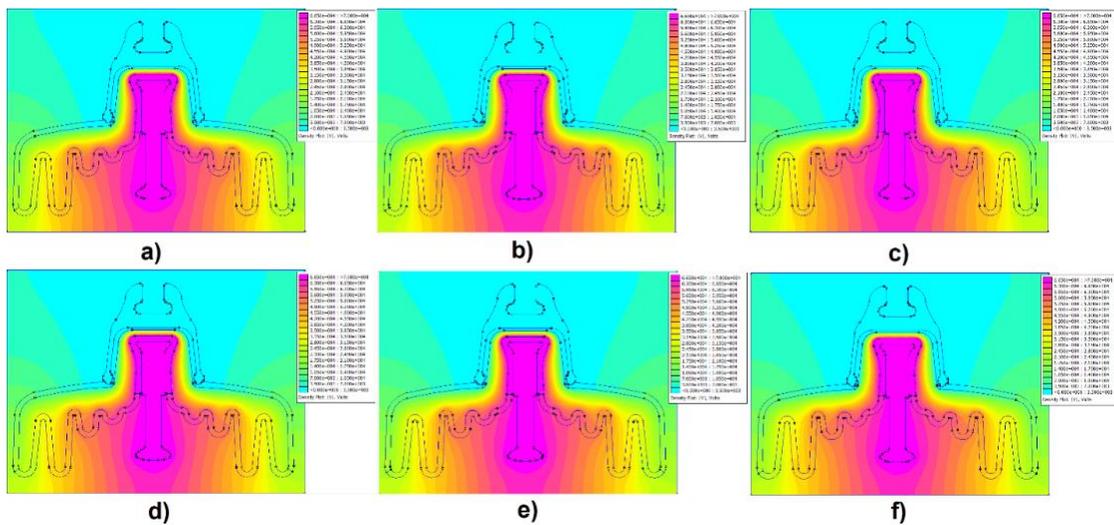


Figura 67. Densidad de Voltaje Caso 11 vs temperatura

Por último, se analiza un nivel superior de contaminación como es el caso 11 Figura 67, con las mismas temperaturas que los otros casos, ya en este caso se puede ver una mayor variación de la densidad de voltaje ya que la conductividad aumenta con el aumento de la temperatura.

En la Tabla 15, esta tabulado los valores de las corrientes de fuga que se genera con 3 distintos casos a 6 diferentes temperaturas, donde se puede apreciar el aumento significativo de corriente en el caso 11, mas no es así con un caso de menor contaminación como el 3 que la variación de corriente no representa una mayor diferencia.

Tabla 15.
Corriente de fuga en función de la temperatura

CASOS	Temperatura (°C)					
	7	11	15	19	21	23
	Corriente de fuga (A)					
3	0,016226	0,0192289	0,0224041	0,025685	0,0273862	0,0291024
7	0,0821773	0,0927091	0,103541	0,114643	0,12029	0,126017
11	0,214478	0,238342	0,263114	0,288454	0,30134	0,314391

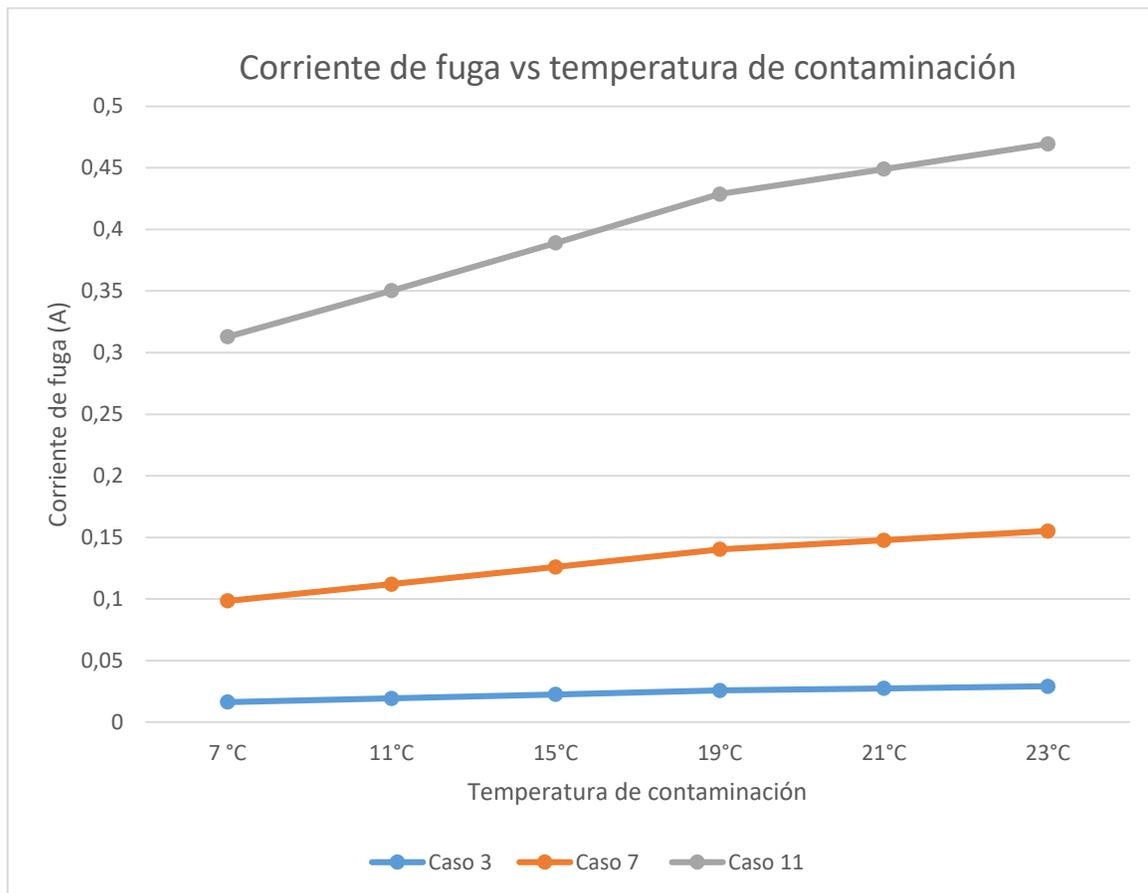


Figura 68. Curva de Corriente de fuga vs temperatura en función de la Contaminación

En las curvas de la **Figura 68**, se aprecia que niveles bajos de contaminación como son el caso 3 y 7 no son mayormente afectados en la generación de corrientes de fuga por una variación de la temperatura, en comparación con el caso 11 donde la contaminación es superior y se puede ver q su corriente de fuga se incrementa con el aumento de temperatura.

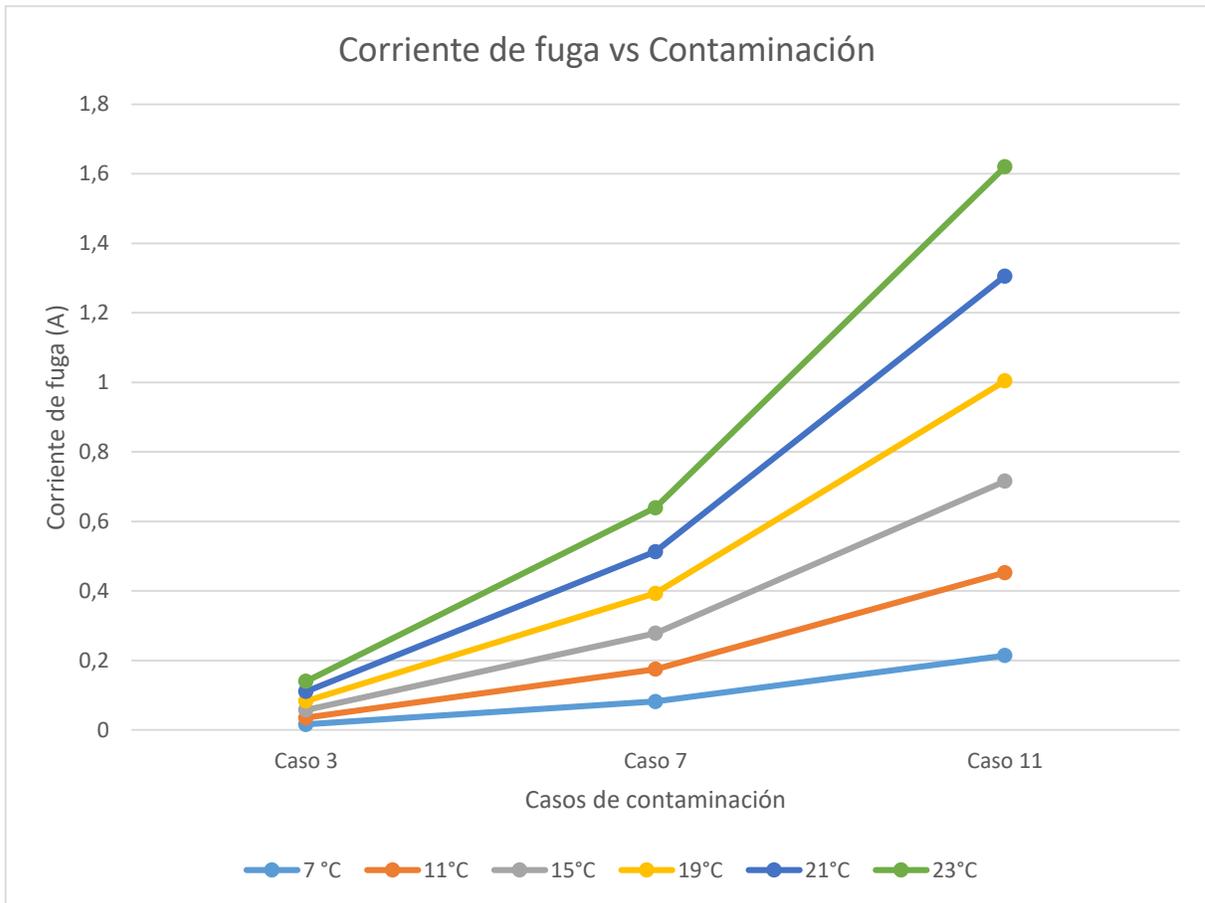


Figura 69. Curva de Corriente de fuga vs Contaminación en función de la temperatura

En las gráficas de la Figura 69 se aprecia que a un nivel bajo de contaminación como en el caso 3 la variación de temperatura poco afecta al aumento de la corriente de fuga, mas no es así cuando el nivel de contaminación es superior como el caso 11 que con el aumento de temperatura la corriente de fuga aumenta considerablemente.

5.6. Análisis de los Distintos Casos de contaminación

Con el análisis de los factores de contaminación en referencia de la contaminación ambiental y la temperatura se realiza la simulación y cálculo de la corriente de fuga de los distintos casos de contaminación como se indica en la Figura 70.

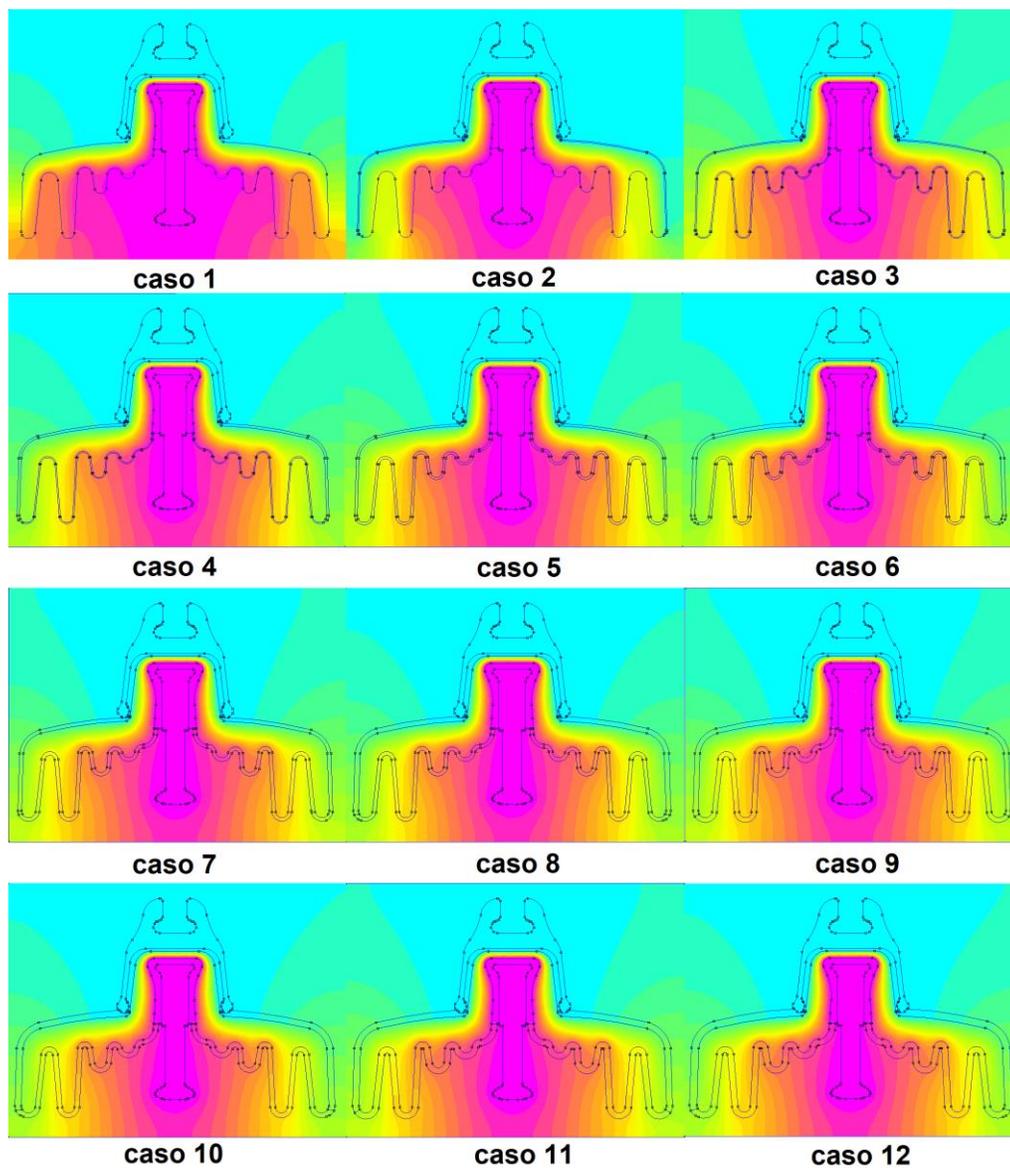


Figura 70. Casos de Contaminación de aisladores

Mediante las simulaciones de los distintos casos de contaminación como se observa en la Figura 70, se obtiene los datos de la corriente de fuga de cada caso que se detallan en la Tabla 16.

Tabla 16.

Corrientes de fuga (Simulación) para los distintos casos de Contaminación

CASOS	CONTAMINACIÓN (mm)	CORRIENTE DE FUGA SIMULACIÓN (A)	CASOS	CONTAMINACIÓN (mm)	CORRIENTE DE FUGA SIMULACIÓN (A)
1	SUPERIOR	0	8	SUPERIOR	4
	INFERIOR	0		INFERIOR	3
2	SUPERIOR	1	9	SUPERIOR	4
	INFERIOR	0		INFERIOR	4
3	SUPERIOR	1	10	SUPERIOR	5
	INFERIOR	1		INFERIOR	4
4	SUPERIOR	2	11	SUPERIOR	5
	INFERIOR	1		INFERIOR	5
5	SUPERIOR	2	12	SUPERIOR	6
	INFERIOR	2		INFERIOR	5
6	SUPERIOR	3	13	SUPERIOR	6
	INFERIOR	2		INFERIOR	6
7	SUPERIOR	3			
	INFERIOR	3			

La Tabla 16 nos muestra que el primer caso donde el aislador no posee contaminación su corriente de fuga que es de 0.000000145 amperios, es casi despreciable, mientras el aislador se va contaminado se puede ver que también existe un incremento apreciable de la corriente de fuga, tal es el caso que a nivel de contaminación caso 6 la corriente de

fuga a aumentado hasta 0.0697094 amperios y con un nivel de contaminación caso 13 la corriente ha aumentado alrededor de 20 veces más que el caso 6.

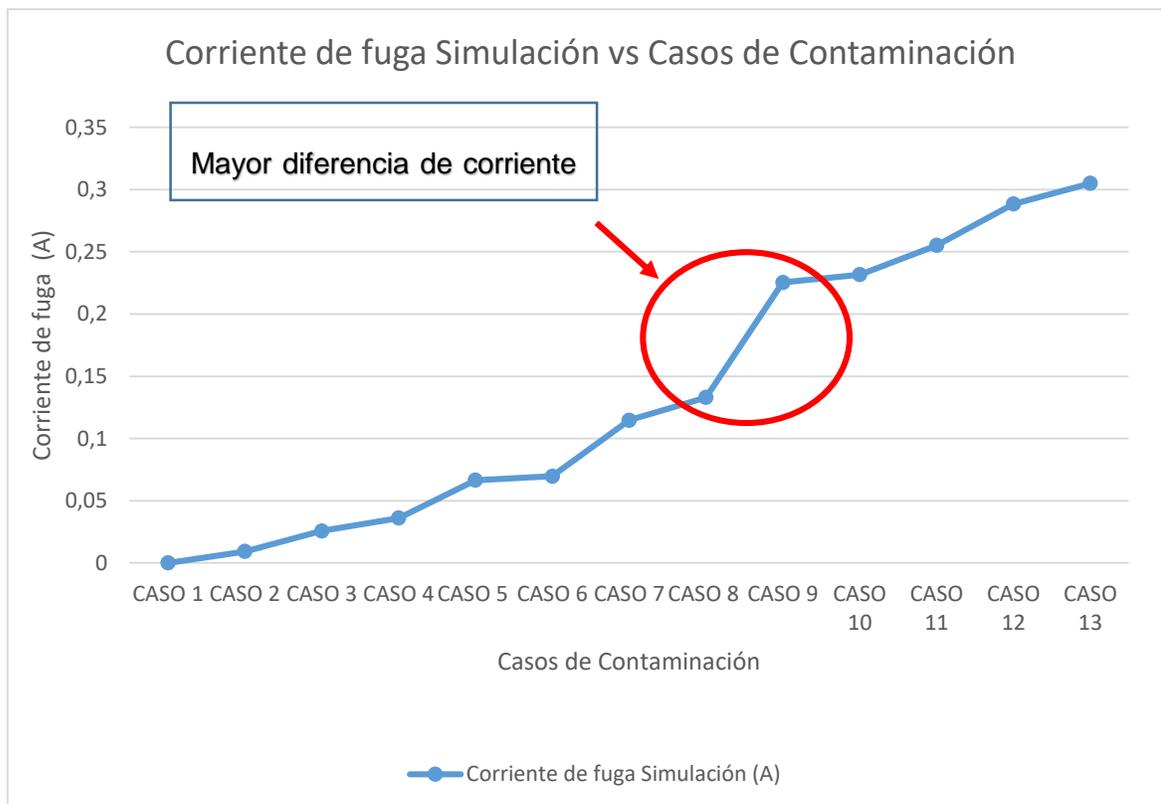


Figura 71. Curva de la corriente de fuga de los distintos casos de contaminación (Simulación)

La curva de la **Figura 71**, es la que nos permite identificar de mejor manera como los casos de contaminación afectan al aislador y esta incrementa su corriente de fuga, en la curva se puede apreciar que entre los casos 8 y 9 existe el mayor incremento de corriente pasando de 0.13 a 0.22 amperios habiendo una diferencia de al menos 0.09 amperios mientras que la diferencia entre los demás casos varían entre 0.03 a 0.05 amperios.

5.7. Resultados Modelamiento Computacional

Diseñando en Matlab del diagrama eléctrico para la medición de corriente de fuga del laboratorio CIGELE (ver Figura 72).

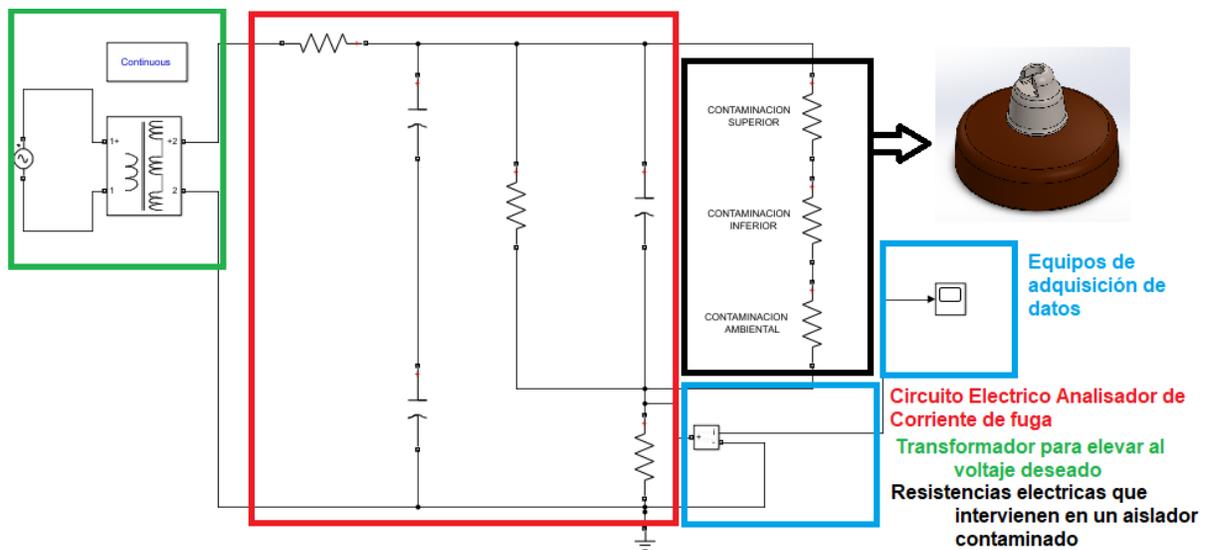


Figura 72. Circuito Eléctrico para calcular la corriente de fuga MATLAB

Con la implementación del diagrama de la Figura 72, se obtiene las corrientes de fuga de los casos simulados anterior mente para poderlos comparar más adelante.

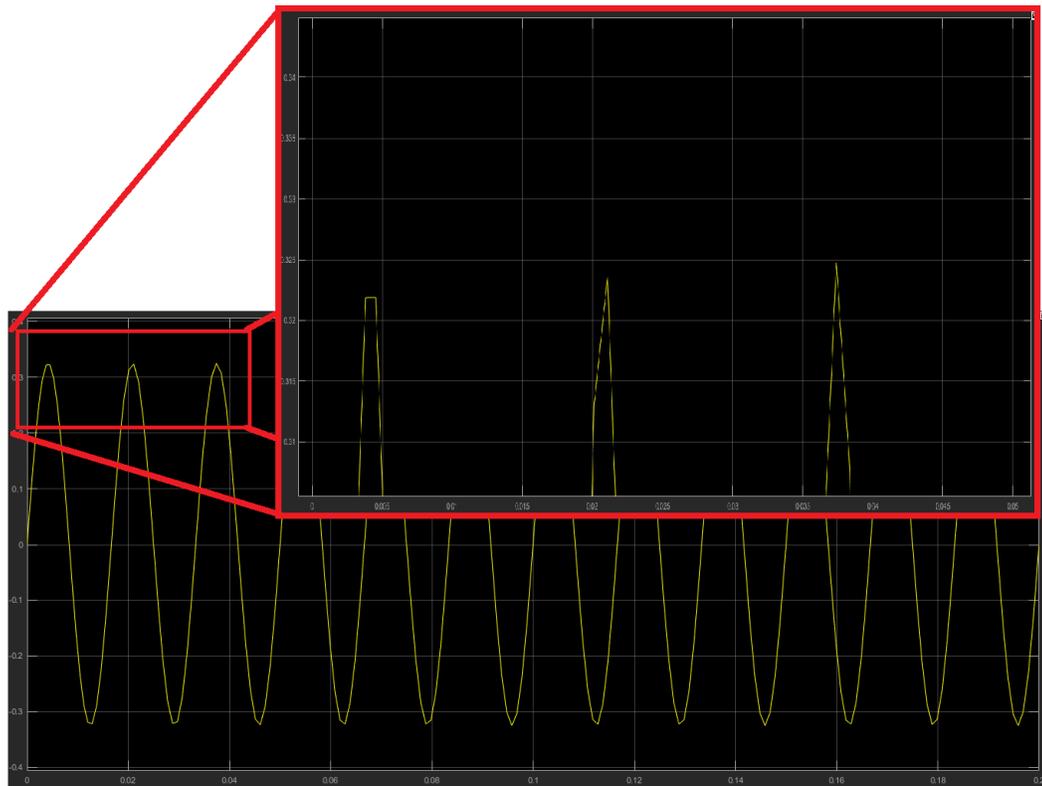


Figura 73. Corriente de fuga caso 11 (MATLAB)

En la Figura 73 representa la corriente de fuga que se obtiene mediante la simulación del aislador contaminado con el caso 11, se observa una corriente sinusoidal de amplitud constante donde el pico de corriente es el que se toma como dato principal que es este caso es de 0.324 amperios.

Tabla 17.

Corrientes de fuga (MATLAB) para los distintos casos de Contaminación

CASOS	CONTAMINACIÓN (mm)		CORRIENTE DE FUGA MODELACIÓN (A)
3	SUPERIOR	1	0,0272
	INFERIOR	1	
5	SUPERIOR	2	0,0655
	INFERIOR	2	
7	SUPERIOR	3	0,112
	INFERIOR	3	
9	SUPERIOR	4	0,223
	INFERIOR	4	
11	SUPERIOR	5	0,241
	INFERIOR	5	
13	SUPERIOR	6	0,324
	INFERIOR	6	

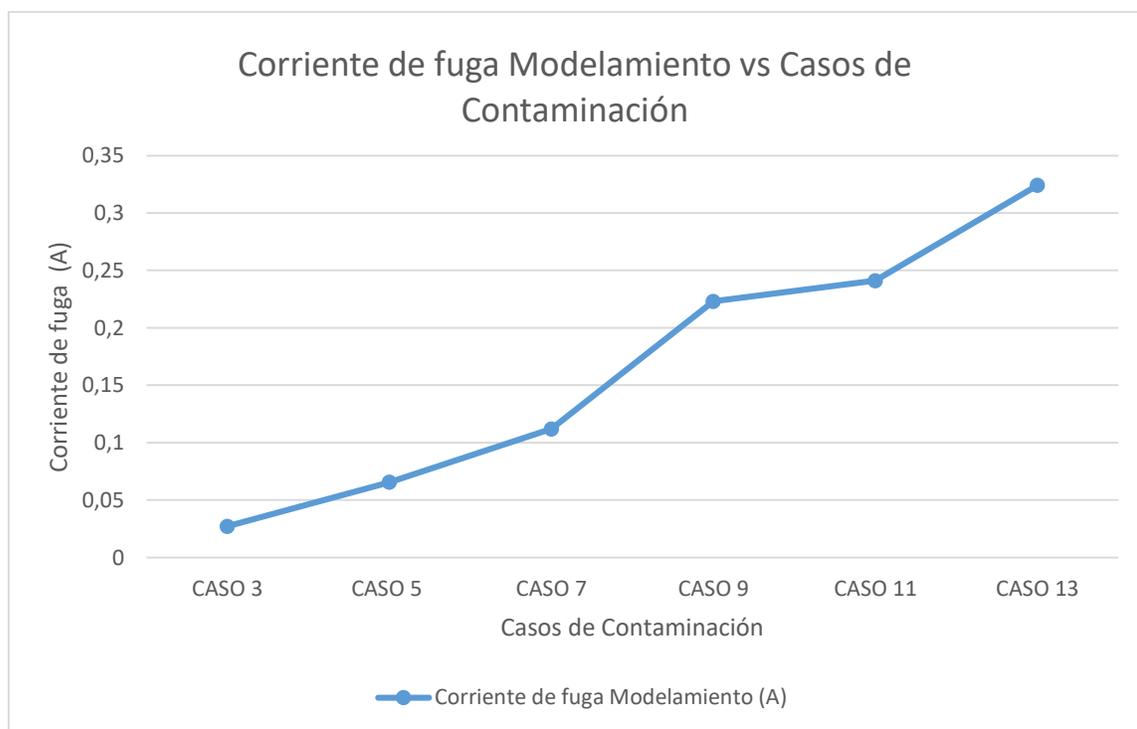


Figura 74. Curva de la corriente de fuga de los distintos casos de contaminación (Modelado)

La curva de la Figura 72 representa la corriente de fuga mediante el modelamiento, el incremento de la corriente es directamente proporcional al aumento de contaminación, en la curva, se puede apreciar que entre los casos 7 al 9 y 11 al 13 existe el mayor incremento de corriente pasando de 0.112 a 0.223 y 0.241 a 0.324 amperios respectivamente habiendo una diferencia de al menos 0.1 amperios mientras que la diferencia entre los demás casos varían entre 0.04 amperios.

5.8. Análisis de Corriente de fuga

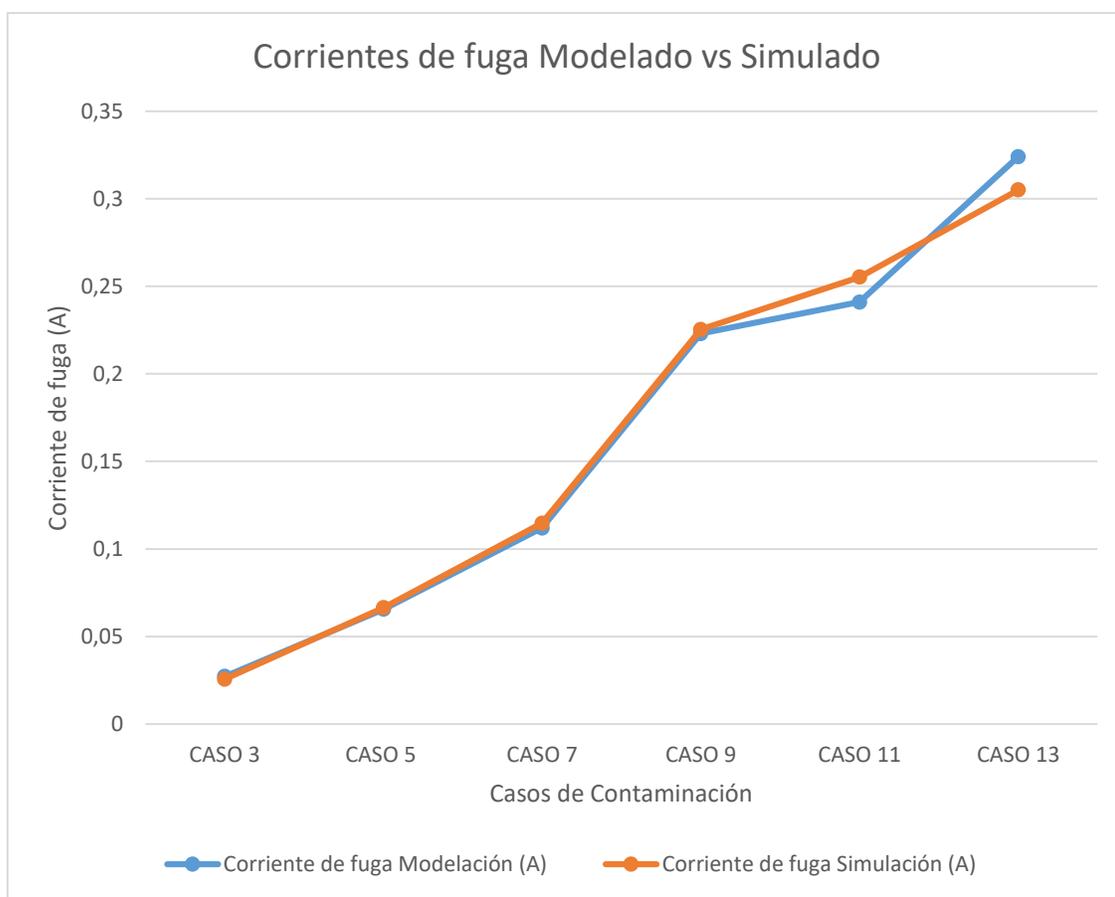


Figura 75. Corrientes de fuga Modelamiento vs Simulación

Tabla 18.
Diferencia de corriente simulación y modelamiento

CASOS	CONTAMINACIÓN (mm)		CORRIENTE DE FUGA MODELACIÓN (A)	CORRIENTE DE FUGA SIMULACIÓN (A)	DIFERENCIA DE CORRIENTE (A)
3	SUPERIOR	1	0,0272	0,0256	0.0016
	INFERIOR	1			
5	SUPERIOR	2	0,0655	0,0664	0.0009
	INFERIOR	2			
7	SUPERIOR	3	0,112	0,114	0.002
	INFERIOR	3			
9	SUPERIOR	4	0,223	0,225	0.002
	INFERIOR	4			
11	SUPERIOR	5	0,241	0,255	0.014
	INFERIOR	5			
13	SUPERIOR	6	0,324	0,305	0.019
	INFERIOR	6			

Con el análisis realizado de las corrientes de fuga de la simulación como del modelamiento, se puede obtener la diferencia que existen entre estas dos como nos muestra la Figura 75 o para mejor apreciación en la Tabla 18, en la cual se puede observar que hasta el caso 9 incluyendo este, las corrientes entre las dos no varían demasiado como ejemplo el caso 5 la diferencia entre sus corrientes el de 0.0009 amperios, esto no sucede a partir de los siguientes casos donde ya se aprecia una mayor diferencia entre sus valores tal es el así que en el caso 13 la diferencia entre sus corrientes es al menos 0.019 amperios.

5.9. Análisis de Flashover

Con la corriente de fuga ya calculada se procede a cumplir con la ecuación para la propagación del arco:

$$E_p > E_{arc}$$

$$E_p = \frac{U_{pm}}{L-x} = \frac{r_a(L-x)I_m}{L-x} = r_a I_f$$

$$E_{arc} = \frac{U_{arc_m}}{x} = \frac{AxI_m^{-n}}{x} = AI_f^{-n}$$

Donde:

$$V_p = xE_p$$

$$V_{arc} = xE_{arc}$$

entonces:

$$V_p > V_{arc}$$

Donde V_p es un valor constante ya que la resistencia de contaminación no varía porque se hace un estudio de contaminación uniforme es decir

corresponde al voltaje que soporta el primer aislador ya que al ser el que más voltaje de toda la cadena soporta, entonces viene a ser el más propenso a comenzar un flashover, dicho valor de voltaje ya calculado anteriormente para una cadena de 29 aisladores que el que se estudia es de 69466.1507 Voltios.

Y V_{arc} es AxI_m^{-n} donde A y n son valores constantes de 102 y 0.7 respectivamente y x es la distancia mínima de fuga del aislador dando como resultado la ecuación:

$$V_{arc} = 102 * 430 * I_f^{-0.7}$$

Entonces se debe cumplir lo siguiente para que se produzca un flashover:

$$69466,1507 \text{ V} > 102 * 430 * I_f^{-0.7}$$

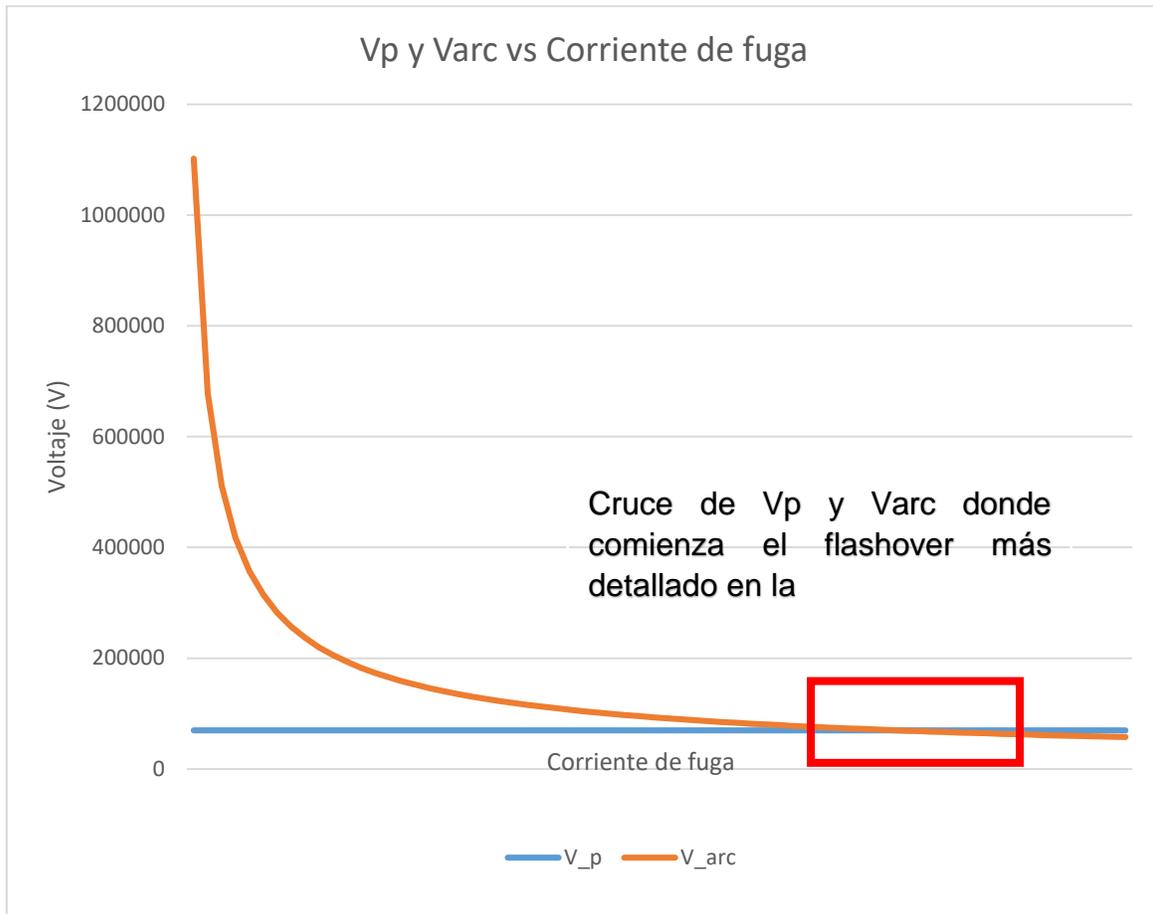


Figura 76. Curva de Flashover

En la Figura 76, se observa dos curvas, donde la curva naranja representa el voltaje de arco el cual al ser mayor que el voltaje de contaminación "línea horizontal azul", este no produce un falla pero con el aumento de corriente de fuga, el voltaje de arco disminuye llegando a un punto donde este voltaje es ya menor que el voltaje de contaminación el cual si produce un fallo.

A continuación se hace un acercamiento más al punto de intersección entre estas dos curvas para encontrar el valor mínimo para que se genere un flashover.

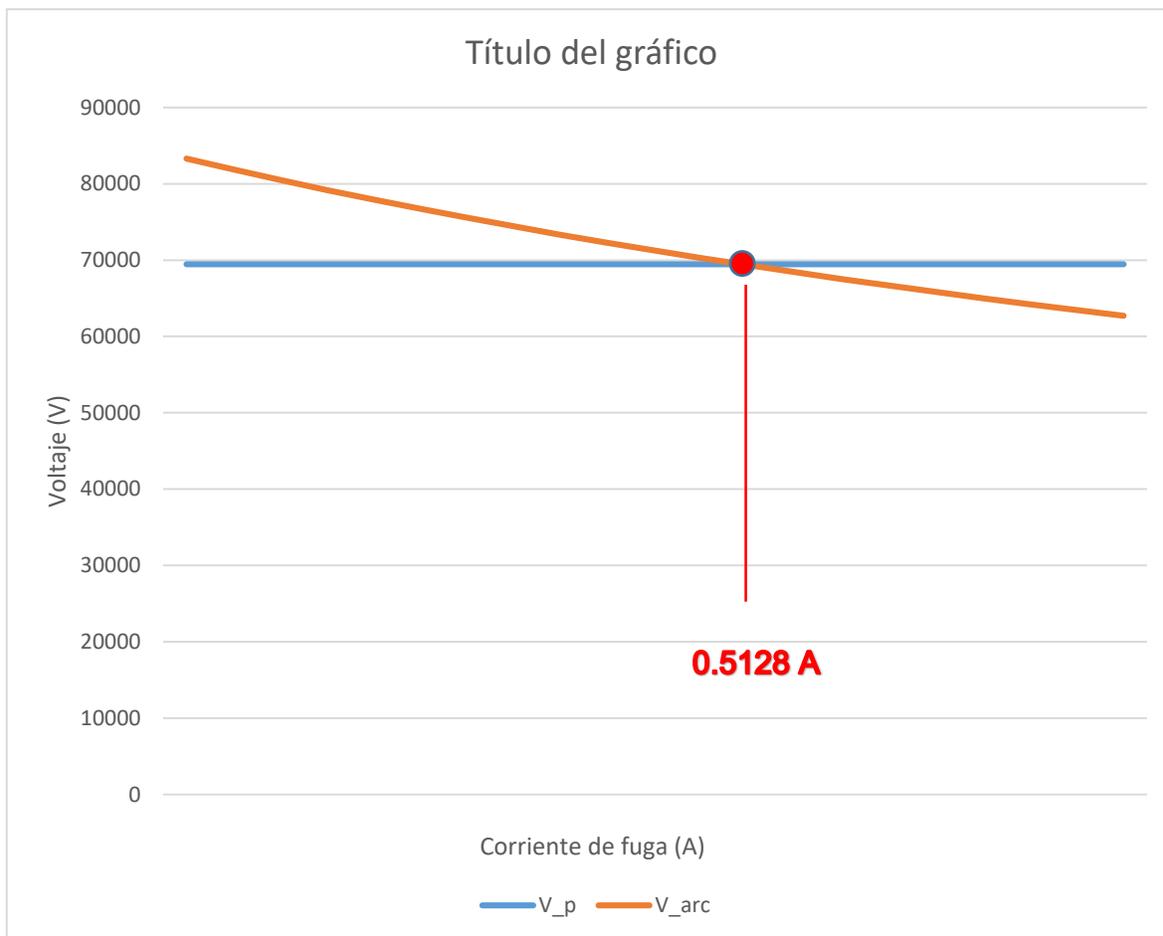


Figura 77. Punto de Intersección V_p y V_{arc}

En la **Figura 77**, se aprecia con más detalle la intersección de las curvas de voltaje de contaminación y voltaje de arco, mediante una igualdad de las ecuaciones de estas curvas se obtiene un valor de corriente que es de 0.5128 amperios el cual es el valor

mínimo para que se produzca un falla, desde este valor de corriente en adelante todos los valores producirán un flashover.

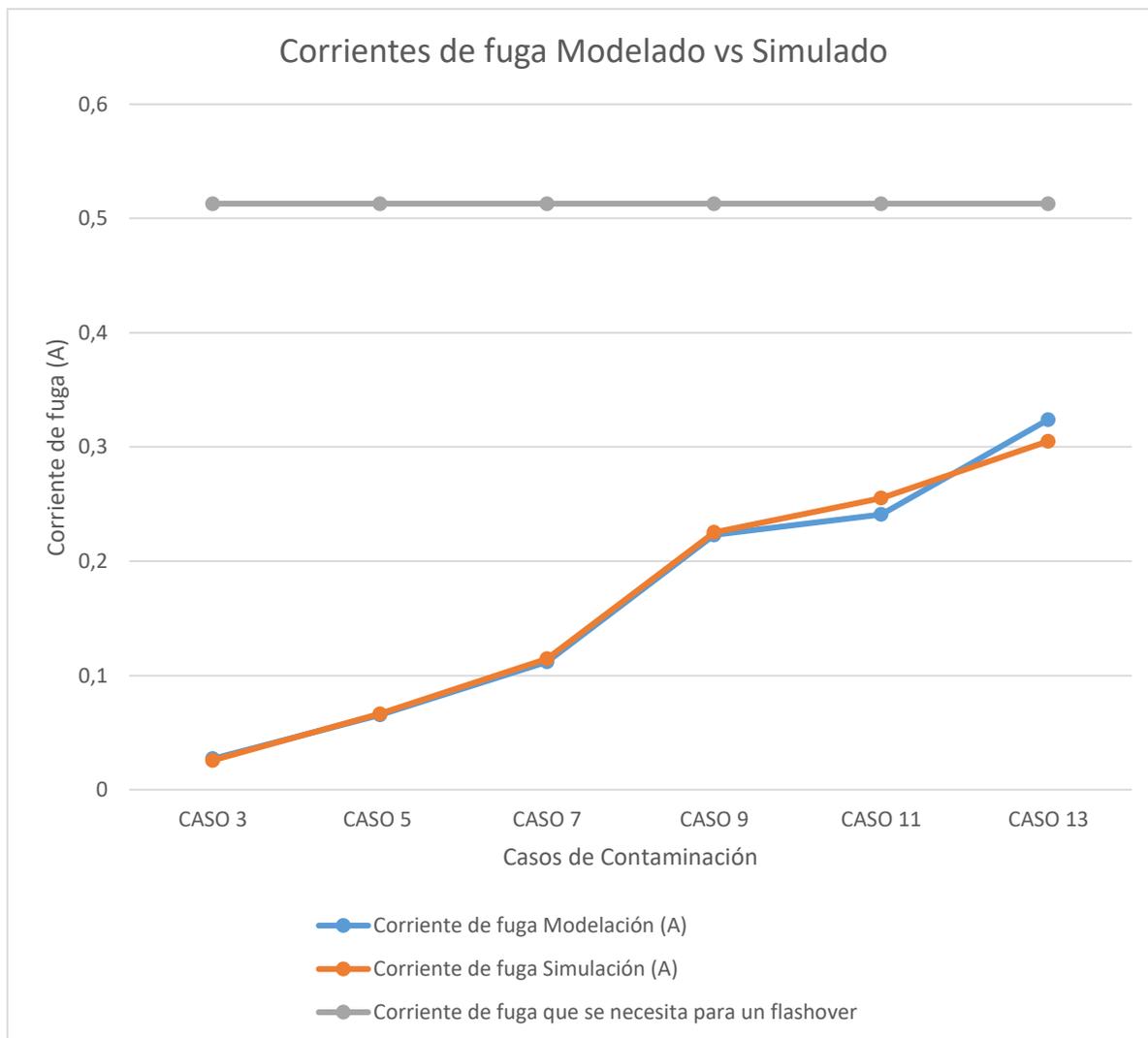


Figura 78. Curvas de Corriente para un flashover

En la Figura 78, se aprecia los voltajes de diferentes casos de contaminación y la línea horizontal de color gris representa la corriente de fuga que debe existir para que se

produzca un fallo que es 0.5128 amperios, como se ve ningún caso de los estudiados anteriormente produce un flashover pero mediante una análisis de casos con mayor nivel de contaminación se puede obtener que posible escenario si produce un flashover y así poder simularlo y modelarlo.

Tabla 19.
Corrientes de fuga que generan flashover

CASOS	CONTAMINACIÓN (mm)		CORRIENTE DE FUGA MODELACIÓN (A)	CORRIENTE DE FUGA SIMULACIÓN (A)
15	SUPERIOR	7	0.330	0,313648
	INFERIOR	7		
17	SUPERIOR	8	0.337	0.32227
	INFERIOR	8		
19	SUPERIOR	9	0.344	0.33089
	INFERIOR	9		
21	SUPERIOR	10	0.351	0.358815
	INFERIOR	10		
23	SUPERIOR	11	0.443	0.44061
	INFERIOR	11		
25	SUPERIOR	12	0.536	0.52241
	INFERIOR	12		

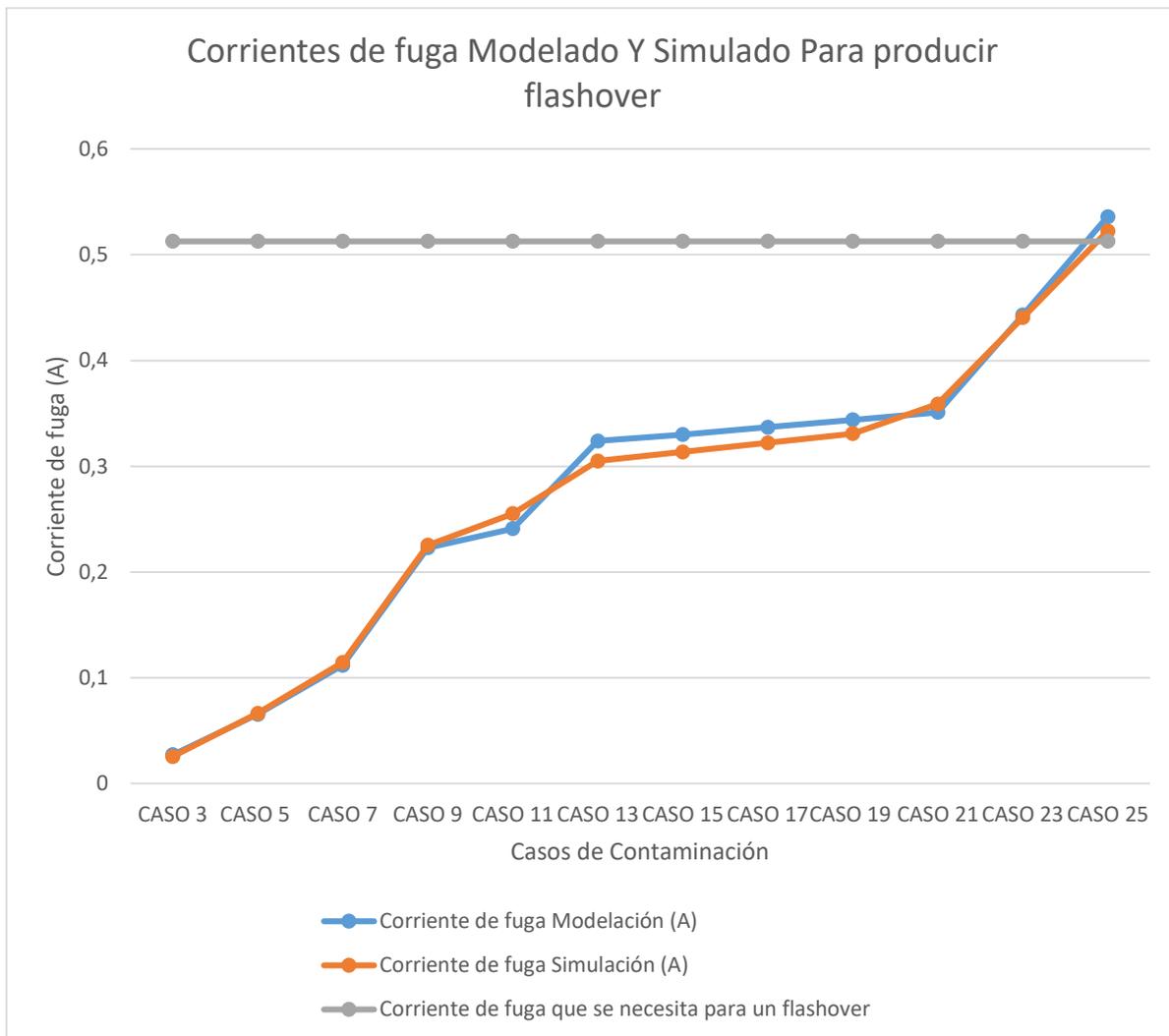


Figura 79. Caso de contaminación que produce un flashover

En la Figura 79 ya calculado la corriente que genera un flashover se puede ver que el caso que genera el flashover es el caso 25 en adelante ya que el caso 24 la corriente de fuga es de 0.489 amperios y no produce una falla y el caso 25 genera 0.536 amperios, en la Figura 80 se puede apreciar de mejor manera este análisis.

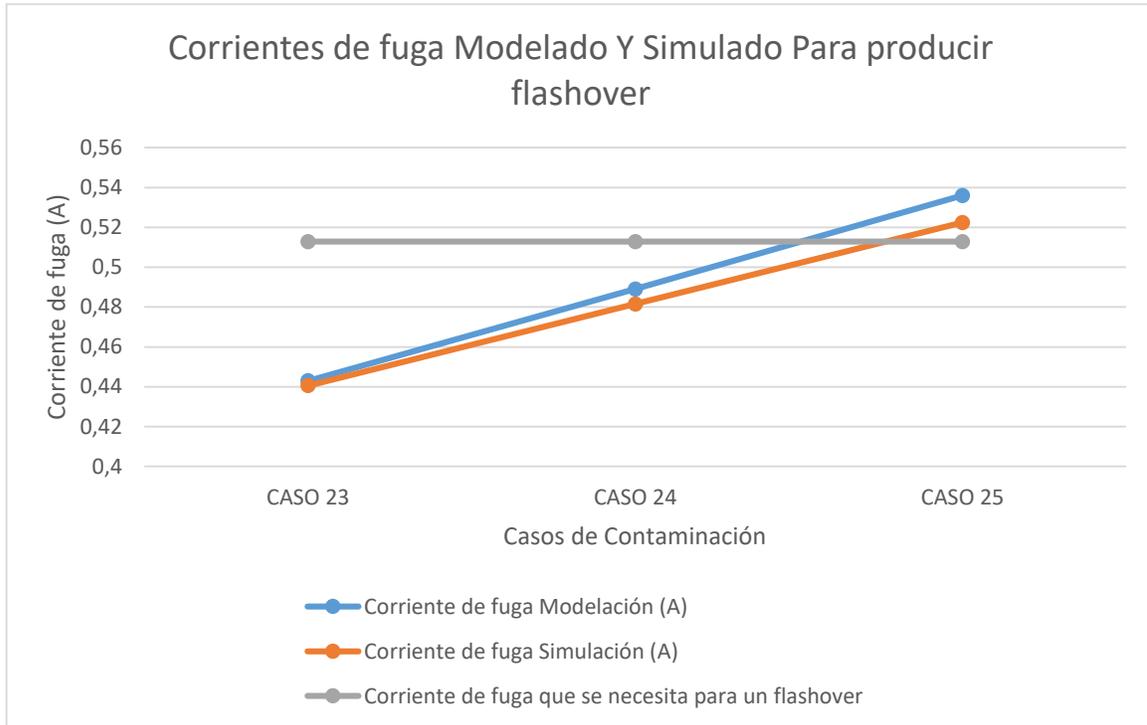


Figura 80. Corriente que produce flashover

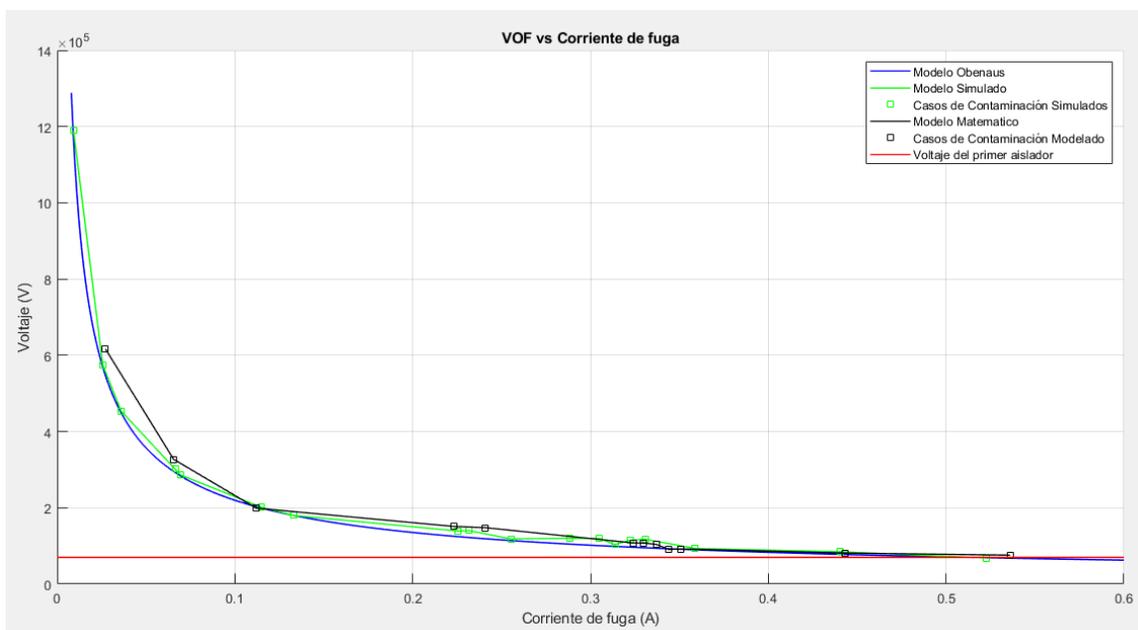


Figura 81. Curva de Flashover de Simulación y Modelamiento

En la Figura 81 se observa los 3 modelos de flashover la curva de color azul representa el modelo original estudiado por Obenaus, la curva verde representa el modelo simulado y los cuadrados del mismo color los casos de contaminación, la curva de color negro representa el modelo computacional y los cuadrados del mismo color los casos de contaminación y la línea roja el voltaje que soporta el primer aislador que es el estudiado.

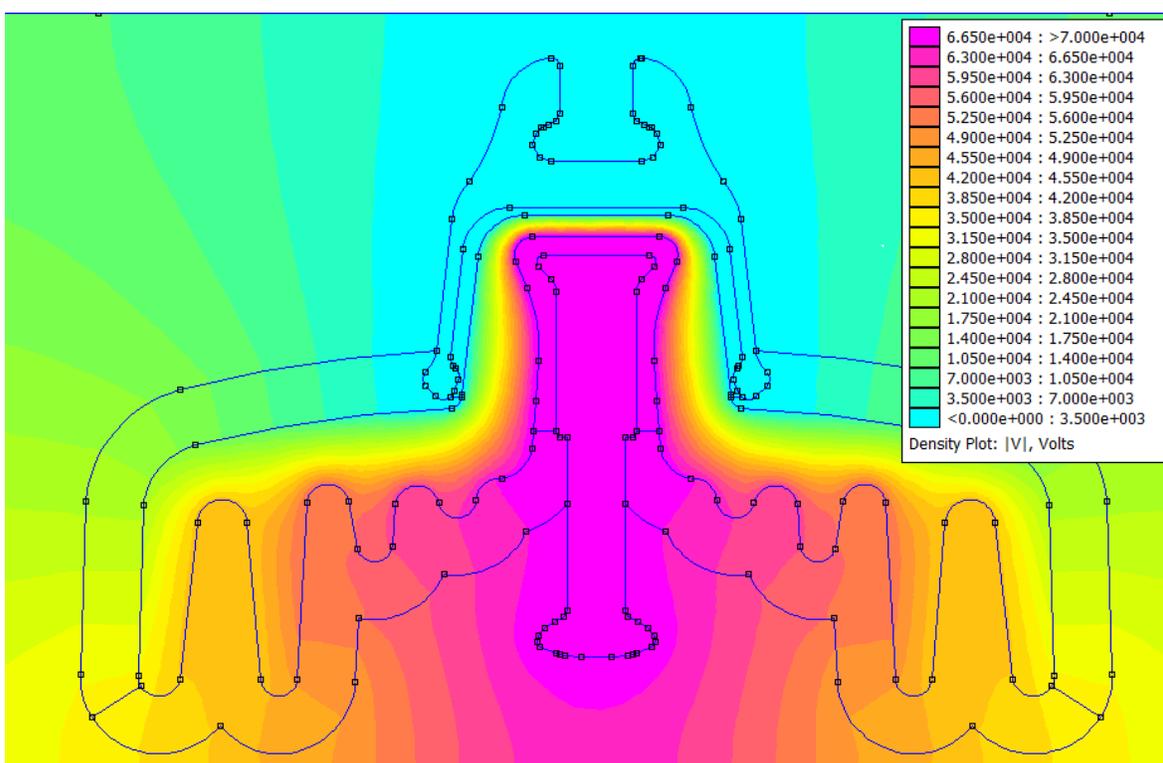


Figura 82. Simulación del caso 25 que genera “flashover voltaje”

5.10. Análisis del Programa

Mediante el Software Matlab y su herramienta Simulink se realizó un programa ver **Figura 83**, donde se ingresaron todos los análisis previos sobre esta investigación como es el cálculo de cadena de aisladores y su distribución de voltaje en cada uno de ellos, con este pre análisis se desarrolló a la par y en el mismo programa un el análisis principal donde se puede apreciar los casos de contaminación y la corriente de fuga que se necesita para generar un flashover voltaje como indica la Figura 84 del programa en ejecución.

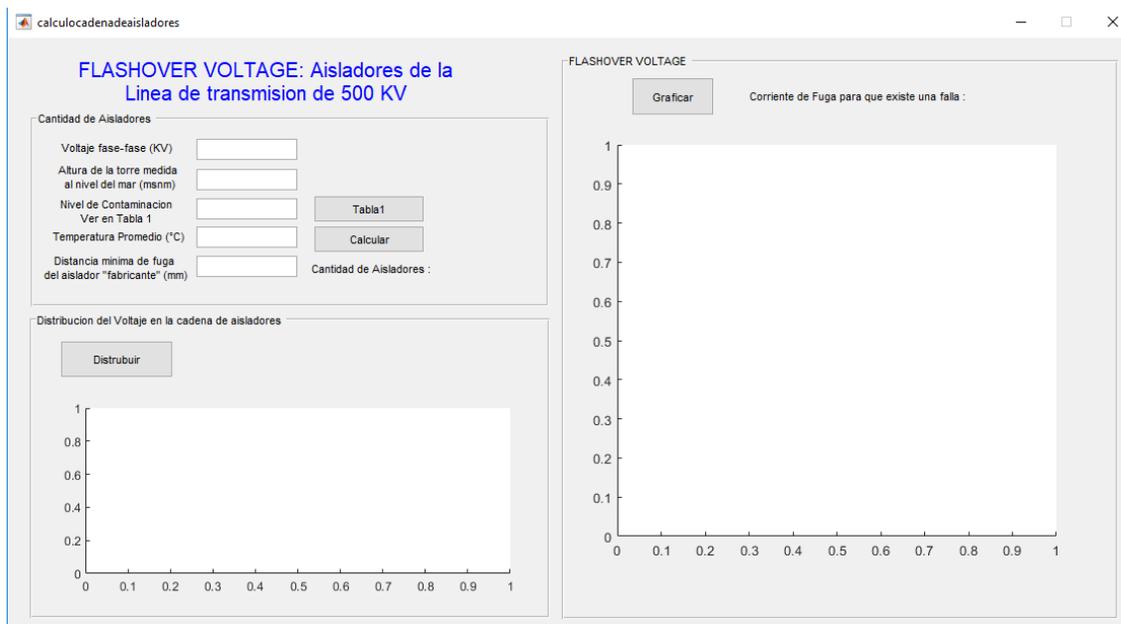


Figura 83. Interfaz del programa

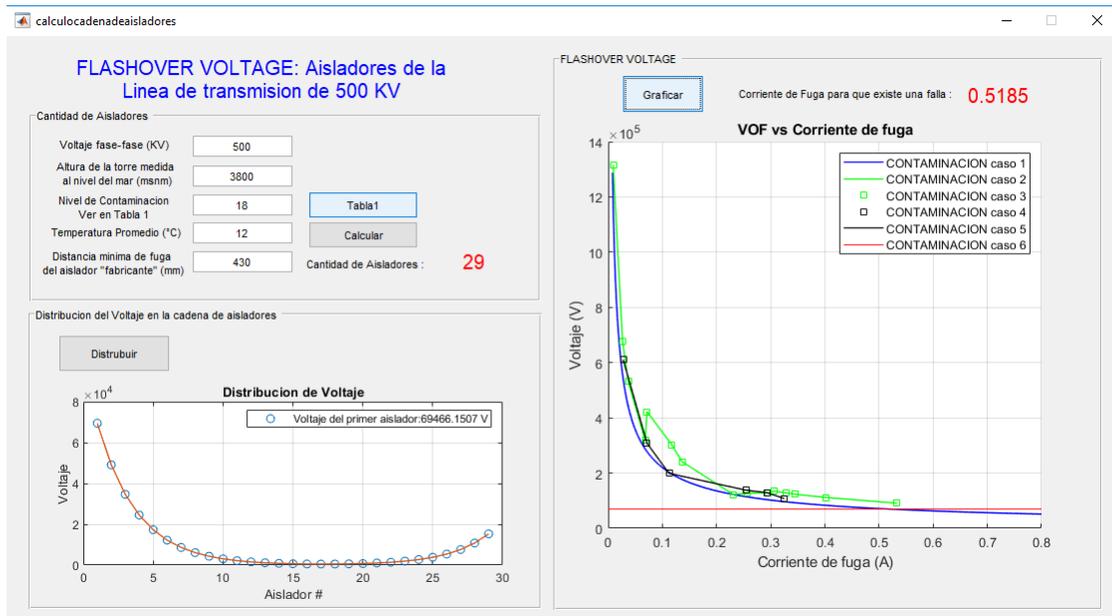


Figura 84. Interfaz del programa Ejecutada

5.11. Comprobación de la hipótesis

Hipótesis: “Si se desarrolla una simulación y modelo matemático para el análisis de “flashover voltaje” de cadena de aisladores, se podría predecir una posible falla del sistema eléctrico en la línea de transmisión de 500kv por la contaminación con ceniza volcánica.”

Mediante el análisis tanto simulado como matemático computacional se determinó que el caso de contaminación 25 es el punto de partida para una posible falla de un aislador, dado que para que existe un fallo la corriente de fuga debe superar los 0.5128 amperios y el caso 24 que corresponde a una contaminación superior de 12 mm e inferior de 11mm genera tan solo 0.486 amperios que no supera esta condición, mas no es así

con el caso 25 que corresponde a una contaminación superior e inferior de 12 mm el cual genera una corriente de fuga de 0.536 amperios el cual si cumple con la condición.

Este caso de contaminación "25" o los que lo superen producirían un fallo en cadena de todos los aisladores y así un colapso en el sistema que podrían costar una gran cantidad económica no solo su reparación, también las pérdidas económicas que se producen mientras el sistema eléctrico no se encuentre trabajando, previa al análisis del efecto "flashover voltage" se realizó un análisis de las condiciones en las que se encuentra el sistema específicamente la cantidad de aisladores que existe y deberían existir, razón por la que el programa que se implementó conjuntamente con el análisis, analiza previamente las condiciones tanto climáticas como estructurales y eléctricas del sistema para después proceder a la simulación del fallo de este y así poder prevenirlo.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

- Se realizó un análisis matemático del efecto “flashover voltage” mediante la condición que el gradiente de contaminación debe superar el gradiente de arco que se encuentran en función de la corriente de fuga en el aislador ANSI tipo B C29.2-52-3 FOG cerámico. obteniéndose una corriente de fuga superior a 0.5128 amperios que es la que produce un el fallo en el sistema.
- Se simularon diferentes casos de contaminación mediante el software FEMM en el aislador ANSI tipo B C29.2-52-3 FOG cerámico dando como resultado que la contaminación depende mucho de condiciones ambientales ya que estas cambiar las características dieléctricas, aumentando o disminuyendo su conductividad dependiendo el caso.
- La contaminación con ceniza volcánica sobre los aisladores por sí sola no ocasiona ningún efecto en la generación o aumento de corriente de fuga al contrario en ciertas ocasiones aumenta su resistividad haciendo que el aislador mejore sus características dieléctricas.
- Se analizó el efecto “flashover voltage” solamente en condiciones de humedad ya que en seco el aislador no produce un gran cambio en su corriente de fuga, mientras que en condiciones de lluvia los aisladores están diseñado para limpiarse de contaminantes por si solos.

- El aislador ANSI tipo B C29.2-52-3 FOG contaminado con espesor de 12mm en su parte superior e inferior, con ceniza volcánica produce “flashover voltage” ya que su corriente de fuga de 0.536 amperios supera la corriente de fuga de 0.5128 amperios que es la que produce un el fallo en el sistema.
- Se diseñó un programa en Matlab que permite visualizar y analizar el efecto “flashover voltage” en el aislador, así como también los parámetros que se deben analizar previamente como en función de la cadena de aisladores.

6.2. RECOMENDACIONES

- Realizar una simulación CDF de la distribución de ceniza en cadena de aisladores de suspensión como de retención para poder simular casos más reales de contaminación.
- Implementar un programa a la par que permita visualizar el nivel de contaminación como las condiciones ambientales para poder tener datos en tiempo real.
- Realizar una cámara de pruebas de contaminación en la Universidad de las Fuerzas Armadas extensión Latacunga para poder realizar pruebas físicas no solo de aisladores sino también de contaminación en las líneas eléctricas, transformadores y demás elementos de protección y aislamiento eléctrico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta Pérez, G. J. (2017). Aisladores. Recuperado el 23 de enero de 2019, de <https://es.slideshare.net/guillermo0077/aisladores-74914391>
- Barescar90. (2017). Aisladores Alta Tensión · Foto gratis en Pixabay. Recuperado el 16 de enero de 2019, de <https://pixabay.com/es/aisladores-alta-tension-electricidad-2370399/>
- Celasa. (2015). AISLADOR POLÍMERO DE SUSPENSION PARA 13.2KV “GPP” | Celasa. Recuperado el 15 de enero de 2019, de <https://celasa.com.gt/tienda/material-de-linea/aislador-polimero-de-suspension-para-13-2kv-gpp/>
- Encalada Simbaña, M., & Bernard, B. (2016). *Preliminary hazard maps associated to Cotopaxi volcano ash fallouts*.
- Farzaneh, M., & Chisholm, W. (2009). *INSULATOR FOR ICING AND POLLUTED ENVIRONMENTS*. John Wiles & Sons, Inc.
- Farzaneh, M., & Fofana, I. (2004). Study of Insulator Flashovers caused by Atmospheric Ice Accumulation. *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, 1(1), 10–23. Recuperado de <http://en.journals.sid.ir/ViewPaper.aspx?ID=56852>
- Gamma. (2018a). Suspensión tipo bola & socket, fog 80kn. Recuperado el 15 de enero de 2019, de <http://www.gamma.com.co/productos/suspension-tipo-bola-socket-fog-80kn/>
- Gamma. (2018b). Suspensión tipo clevis, fog 80kn. Recuperado el 15 de enero de 2019, de <http://www.gamma.com.co/productos/suspension-tipo-clevis-fog-80kn/>
- Garcés Gutierrez, E. J., & Rodriguez Morante, D. A. (2015). “ANALISIS MATEMÁTICO

DE AISLADORES APLICADO A AISLADORES DE PORCELANA, POLÍMERO Y VIDRIO, A NIVEL DE 13.8KV". Universidad Politecnica Salesiana Sede Guayaquil.

Gonzalez-Longatt, F. (2016). *Capítulo 1: Elementos de Líneas de Transmisión Aéreas*.

Grigsby, L. L. (2012). *ELECTRIC POWER GENERATION, TRANSMISSION, AND DISTRIBUTION* (third edit). Taylor & Francis Group, LLC.

IEC. (2008). IEC TS 60815-1: 2008 Selección y dimensionamiento de aisladores de alto voltaje para uso en condiciones de contaminación. Parte 1: Definiciones, información y principios generales. IEC.

IEEE Power Engineering Society. Technical Counsel., Institute of Electrical and Electronics Engineers., & IEEE-SA Standards Board. (1999). *IEEE guide for the application of insulation coordination*. Institute of Electrical and Electronics Engineers. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/806063>

Johnston, D. M. (1997). *Physical and social impacts of past and future volcanic eruptions in New Zealand: a thesis presented in partial fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Earth Science, Massey University, Palmerston North, New Zealand*. Massey University. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10179/4636>

López Chachalo, A. J. (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*. EPN.

Martínez Darlington, H. E. (2013). *Contaminación de aisladores de líneas aéreas de alta tensión*. Editorial Académica Española.

MathWorks. (2018a). Descripción del producto MATLAB - MATLAB & Simulink - MathWorks América Latina. Recuperado el 18 de enero de 2019, de https://la.mathworks.com/help/matlab/learn_matlab/product-description.html

MathWorks. (2018b). Simulink Documentation - MathWorks América Latina. Recuperado el 18 de enero de 2019, de <https://la.mathworks.com/help/simulink/index.html>

Meeker, D. (2018). *Finite Element Method Magnetics*.

megaelectric. (2019). Megaelectric, S.A. de C.V. Recuperado el 15 de enero de 2019, de <http://megaelectric.com.mx/transmision.html>

Molina P, J. G. (2010). *Fundamentos del Método de Elemento Finito*. U.M.S.A.

Nellis, C. A., & Hendrix, K. W. (1980). Progress report on the investigation of volcanic ash fallout from Mount St Helens: Bonneville Power Administration, Laboratory Report ERJ-80-4.

Rizk, F. (1981). Mathematical models for pollution flashover. *Electra vol. 78*, pp. 101–116.

Rizk, F., & Trinh, G. (2014). *HIGH VOLTAGE ENGINEERING*. Taylor & Francis Group, LLC.

SectorElectricidad. (2019). Pregunta del día: ¿Para qué es usada la cadena doble de aisladores? | Sector Electricidad | Profesionales en Ingeniería Eléctrica. Recuperado el 16 de enero de 2019, de <http://www.sectorelectricidad.com/12476/la-cadena-de-aisladores-doble-es-usada-para/>

Sima, W., Yuan, T., Yang, Q., Xu, K., & Sun, C. (2010). Effect of non-uniform pollution on the withstand characteristics of extra high voltage (EHV) suspension ceramic insulator string. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 4(3), 445–455. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2009.0387>

Wadhwa, C. L. (2007). *HIGH VOLTAGE ENGINEERING*. New Age International.

Wardman, J., Wilson, T., Hardie, S., & Bodger, P. (2014). Influence of volcanic ash contamination on the flashover voltage of HVAC outdoor suspension insulators. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 21(3), 1189–1197.

- Wardman, J., Wilson, T., Hardie, S., Bodger, P., Cole, J., Bodger, P., & Johnston, D. (2019). Quantifying the Vulnerability of High Voltage Power Transmission Systems to Volcanic Ashfall Hazards. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 21(3), 1189–1197.
- weatherspark. (2015). El clima típico de cualquier lugar del mundo - Weather Spark. Recuperado el 27 de enero de 2019, de <https://es.weatherspark.com/h/d/149844/2015/8/15/Tiempo-histórico-el-sábado-15-de-agosto-de-2015-en-Aeropuerto-Internacional-Cotopaxi-Ecuador>
- Wightman, A., & Bodger, P. (2011). *Volcanic Ash Contamination of High Voltage Insulators*.
- Wilson, T. M., Stewart, C., Sword-Daniels, V., Leonard, G. S., Johnston, D. M., Cole, J. W., ... Barnard, S. T. (2012). Volcanic ash impacts on critical infrastructure. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 45–46, 5–23. <https://doi.org/10.1016/J.PCE.2011.06.006>
- Zhang, Z., Zhang, D., Jiang, X., & Liu, X. (2015). Effects of pollution materials on the AC flashover performance of suspension insulators. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 22(2), 1000–1008. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2015.7076801>

ANEXOS



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

CERTIFICACIÓN

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por el señor García Meythaler, Nicolás Augusto.

En la ciudad de Latacunga, a los veinte y cinco días del mes de enero de 2019.

Aprobado por:

Ing. Alvaro Mullo

DIRECTOR DEL PROYECTO

Ing. Katya Torres

DIRECTORA DE CARRERA



Dr. Rodrigo Vaca
SECRETARIO ACADEMICO