



Análisis de la influencia de la contaminación y la altitud en el cálculo de la distancia de fuga de aisladores

JERSIM DANIEL ARAYA SALINAS

2019

Requisito parcial para obtener el título de:
Ingeniero Electricista

Profesores guía:
Dr. Johny Montaña Chaparro
Dr. Roger Schurch Brandt

Valparaíso, noviembre 2019

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Índice de contenidos	2
Índice de figuras	5
Índice de tablas	8
Resumen	9
Abstract	10
Glosario	11
1 Capítulo 1: Introducción	13
1.1 Introducción	13
1.2 Objetivos y alcances del proyecto	15
1.2.1 Objetivos	15
1.2.2 Alcances del proyecto	15
2 Capítulo 2: Conceptos básicos	16
2.1 Campo eléctrico E	16
2.2 Potencial eléctrico ϕ	17
2.3 Densidad de corriente J	18
2.4 Aislamiento eléctrico	18
3 Capítulo 3: Compilado de investigaciones sobre el tema	20
3.1 Introducción de la sección	20
3.2 Distribución de la contaminación en la superficie del aislador	20
3.3 Representación de la capa de contaminación en softwares de simulación	21
3.4 Distribución de potencial y campo eléctrico en la superficie aislante	22
3.5 Nivel de severidad de la contaminación	25
3.6 Efecto de la altitud de operación y la presión atmosférica en aisladores contaminados	27
4 Capítulo 4: Marco teórico	29
4.1 Introducción a la contaminación de aisladores	29
4.2 Enfoques de estudios para la selección del aislador	30
4.2.1 Introducción a los estudios	30
4.2.2 Variables necesarias para la selección y dimensionamiento de aisladores	32
4.3 Severidad de la contaminación	35
4.3.1 Evaluación de la severidad de la contaminación del entorno SPS	35
4.3.2 Niveles de severidad de la contaminación del entorno	36
4.4 Dimensionamiento de la distancia de fuga según SPS	40
4.4.1 Obtención del RUSCD	40
4.4.2 Selección del perfil	40

4.4.3	Cálculo de la distancia de fuga	41
4.5	Método de cálculo para obtención del ESDD y NSDD.....	42
4.5.1	Introducción	42
4.5.2	Cálculo del ESDD	42
4.5.3	Cálculo del NSDD	43
4.6	Construcción de la contaminación tipo A de capa sólida para ensayos	44
4.7	Método de elementos finitos para problemas electrostáticos.....	45
4.7.1	Introducción	45
4.7.2	Discretización del modelo	45
4.7.3	Aplicación del cálculo variacional.....	46
4.7.4	Condiciones de borde.....	47
5	Capítulo 5: Definición de parámetros	48
5.1	Modelos y diseños de aisladores	48
5.1.1	Introducción	48
5.1.2	Norma eléctrica para el diseño de aisladores de suspensión para tensiones sobre 1kV.....	48
5.1.3	Diseños de aisladores por fabricantes	49
5.1.4	Cálculo de la tensión máxima según la distancia de fuga y RUSCD.....	50
5.1.5	Dibujo del prototipo a utilizar	51
5.2	Construcción de la capa de contaminación	52
5.2.1	Material soluble	52
5.2.2	Material inerte no soluble.....	52
5.2.3	Espesor de la capa de contaminación	52
5.2.4	Cálculo de la superficie del aislador	54
5.2.5	Valores finales para la capa de contaminación a simular	56
5.3	Tensiones de servicio según altitud de operación	56
5.3.1	Introducción	56
5.3.2	Cálculo de las tensiones de simulación según altitud de operación	56
5.4	Configuración de parámetros en el software de simulación	57
5.4.1	Introducción	57
5.4.2	Elección del estudio.....	58
5.4.3	Geometría	59
5.4.4	Materiales	59
5.4.5	Módulo de física electrostática	62
5.4.6	Módulo de corrientes eléctricas de revestimiento o corteza	63
5.4.7	Malla de elementos finitos.....	64
6	Capítulo 6: Simulaciones y resultados	65

6.1	Diagrama de flujo.....	65
6.2	Variación del espesor de la capa de contaminación	66
6.2.1	Distribución de potencial eléctrico	66
6.2.2	Distribución de campo eléctrico tangencial	66
6.3	Variación de la conductividad de la capa de contaminación	67
6.3.1	Distribución de potencial eléctrico	67
6.3.2	Distribución de campo eléctrico tangencial	69
6.4	Variación del nivel de severidad de contaminación del entorno (SPS).....	71
6.4.1	Distribución de potencial eléctrico	71
6.4.2	Distribución de campo eléctrico tangencial	71
6.5	Variación de la altitud de operación	73
6.5.1	Distribución de campo eléctrico tangencial	73
6.5.2	Métodos para mejorar el rendimiento del aislador por el aumento de altitud de operación.....	74
6.5.3	Aplicación de factores de corrección por altitud	76
7	Capítulo 7: Conclusiones y trabajos futuros	78
7.1	Conclusiones	78
7.2	Trabajos futuros.....	79
	Bibliografía.....	80
	Apéndice A: Elección del perfil del aislador según IEC 60815-2	83
	Apéndice B: Toma de muestras para determinación de nivel de contaminación según IEC60815-1	88
	Apéndice C: Ejemplos de aplicaciones para obtención de SPS.....	90
	Apéndice D: Ilustraciones	91
	Apéndice E: Ejemplo de aplicación para la selección de aislamiento para casos de contaminación	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura (2.1): (a) Líneas equipotenciales y de campo eléctrico por fuente de carga positiva. (b) Líneas equipotenciales y de campo eléctrico por fuente de carga negativa. [14]	17
Figura (2.2): Densidad de corriente J que pasa a través de una superficie de normal n . [10]	18
Figura (3.1): Ejemplo de aislador de porcelana retirado del sistema eléctrico, por presencia de quiebre provocado por vandalismo. [16]	20
Figura (3.2): Ejemplos de configuraciones de contaminación: a. aislador limpio, b. capa uniforme, c. en el lado superior, d. en el lado inferior, e. cerca del terminal energizado, f. solo en las aletas, g. por tramos 1, h. por tramos 2. [17]	20
Figura (3.3): Distribución de campo eléctrico para distintas localizaciones de bandas sin contaminación, a. Terminación de la banda cerca del terminal de tensión, b. Terminaciones de las bandas en el cuerpo del aislador, c. Terminación de la banda en una de las aletas del aislador, d. Terminaciones en la parte baja de la aleta del aislador. [17]	21
Figura (3.4): a. Configuración eje simétrico de un aislador polimérico tipo barra larga, b. Malla de elementos finitos para contaminación como condición de borde, c. Malla de elementos finitos para contaminación dibujada como material. [19]	22
Figura (3.5): Comparación de la distribución de potencial obtenida a lo largo de la contaminación uniforme del aislador, usando una capa dibujada en la superficie (3D surface) y la capa como condición de borde (2D axisymmetric). ($\sigma v = 1 \mu S/m$ y $\epsilon r = 80$) [19]	22
Figura (3.6): Comparación de la distribución de potencial a lo largo del camino de fuga para aisladores de porcelana y vidrio, condición a. Limpios, b. contaminación húmeda. [20]	23
Figura (3.7): Comparación de la distribución de campo eléctrico a lo largo del camino de fuga para aisladores de porcelana y vidrio, condición a. Limpios, b. contaminación húmeda. [20]	23
Figura (3.8): a. Distribución de potencial eléctrico sin contaminación, b. Distribución de campo eléctrico sin contaminación. [21]	24
Figura (3.9): a. Distribución de potencial eléctrico con contaminación, b. Distribución de campo eléctrico con contaminación. [21]	24
Figura (3.10): Para un aislador polimérico, a. Distribución de campo eléctrico a distintos espesores de contaminación, b. Distribución de campo eléctrico a distintas conductividades de la capa de contaminación. [22]	25
Figura (3.11): Relación entre ESDD, NSDD y severidad de contaminación del entorno tipo A, para aislador estándar tipo campana y pin. [5]	26
Figura (3.12): Resultados de la relación entre ESDD, NSDD para ceniza volcánica. [23]	26
Figura (4.1): Proceso de formación de flameo eléctrico en una cadena de aisladores de superficie hidrofílica [25].	30
Figura (4.2): Relación entre ESDD/NSDD y el SPS para aislador de referencia tipo pin y campana U120B. [5]	37
Figura (4.3): Relación entre ESDD/NSDD y el SPS para aislador de referencia tipo barra larga L100. [5]	37
Figura (4.4): Relación entre la salinidad específica del entorno (SES) y el SPS para aisladores de referencia tipo pin, campana y barra larga. [5]	38
Figura (4.5): Distancia de fuga unificada de referencia o RUSCD respecto al nivel de severidad de contaminación o SPS. [3]	40
Figura (4.6): Perfil estándar de referencia de aisladores de capa. [3]	41

Figura (4.7): Valor de b. [24].....	42
Figura (4.8): Procedimiento para obtener el peso de la contaminación. [5].....	43
Figura (4.9): Malla de elementos finitos formada por elementos triangulares [Elaboración propia].....	45
Figura (4.10): Representación elemento finito triangular. [29]	46
Figura (5.1): Tipos de perfiles de aisladores eléctricos para tensiones sobre 1kV, a. suspensión estándar tipo capa, b. Barra larga de aleta estándar, c. Aerodinámico, d. Barra larga aleta aerodinámica , e. Antiniebla, f. Barra larga con aleta antiniebla, g. Falda profunda, h. Barra larga de aleta con falda profunda, i. Disco de aletas alternadas, j. Barra larga con aletas largo alternado, k. Pin de pieza única, l. Pin multi piezas. [3]	48
Figura (5.2): Aislador tipo campana de suspensión de bola. [6]	49
Figura (5.3): Dibujo del diseño según características de U120B de la Tabla (5.2), 1. Acero stainless (Caperuza y perno), 2. Cemento portland, 3. Vidrio Pirex (Aislador). [Elaboración propia]	51
Figura (5.4): a. Pesa electrónica y vaso precipitado, b. Muestras de 10g cada uno de caolín seco. [Elaboración propia]	53
Figura (5.5): Relación del volumen respecto a la masa de caolín. [Elaboración propia]	54
Figura (5.6): a. Parte superior del aislador, b. Vista superior del disco formado por revolución de la parte superior del aislador. [Elaboración propia]	55
Figura (5.7): a. Parte inferior del aislador, b. Vista superior del disco formado por revolución de la parte inferior del aislador. [Elaboración propia].....	55
Figura (5.8): Primer paso para configuración del espacio de trabajo en COMSOL Multiphysics. [Elaboración propia]	57
Figura (5.9): Interfaz gráfica básica de COMSOL Multiphysics. [Elaboración propia]	58
Figura (5.10): a. Elección de módulos según el tipo de física, b. Elección del estudio en el dominio de la frecuencia. [Elaboración propia]	58
Figura (5.11): Geometría del modelo importado a COMSOL Multiphysics. [Elaboración propia]	59
Figura (5.12): Asociación del entorno como material de aire en COMSOL Multiphysics. [Elaboración propia]	60
Figura (5.13): Asociación de la caperuza y el perno de bola como partes de acero en COMSOL Multiphysics. [Elaboración propia]	60
Figura (5.14): Asociación de las partes de cemento en COMSOL Multiphysics. [Elaboración propia]	61
Figura (5.15): Asociación de la parte aislante como vidrio en COMSOL Multiphysics. [Elaboración propia]...	61
Figura (5.16): a. Acceso a la configuración del módulo, b. Selección de bordes conectadas a tierra, c. Selección de bordes conectadas a tensión V. [Elaboración propia]	62
Figura (5.17): a. Configuración de valores de la capa, b. Selección del borde de la capa de contaminación. [Elaboración propia]	63
Figura (5.18): a. Configuración del tamaño de los elementos de la malla, b. Malla extremadamente fina con elemento triangulares. [Elaboración propia]	64
Figura (6.1): Diagrama de flujo para la elección del modelo. [Elaboración propia]	65
Figura (6.2): Distribución de potencial eléctrico a distintos espesores de la capa. [Elaboración propia]	66
Figura (6.3): Campo eléctrico tangencial a distintos espesores de la capa de contaminación. [Elaboración propia]	67

Figura (6.4): Campo eléctrico tangencial máximo a distintos espesores de la capa de contaminación. [Elaboración propia]	67
Figura (6.5): Distribución de potencial eléctrico a distintas conductividades de la capa de contaminación. [Elaboración propia]	68
Figura (6.6): Distribución de potencial en el espacio al aumentar la conductividad de la capa de contaminación. a. 0 S/m, b. 0,004 S/m, c. 0,04 S/m, d. 0,4 S/m. [Elaboración propia]	68
Figura (6.7): Distribución de campo eléctrico tangencial a distintas conductividades de la capa de contaminación. [Elaboración propia]	69
Figura (6.8): Campo eléctrico tangencial máximo al aumentar la conductividad de la capa de contaminación. [Elaboración propia]	69
Figura (6.9): Distribución de líneas de campo eléctrico al aumentar la conductividad de la capa de contaminación; a. 0 S/m, b. 0,004 S/m, c. 0,04 S/m, d. 0,4 S/m. [Elaboración propia]	70
Figura (6.10): Distribución de potencial eléctrico variando el nivel de contaminación del entorno. [Elaboración propia]	71
Figura (6.11): Campo eléctrico tangencial a distintos niveles de contaminación del entorno. [Elaboración propia]	71
Figura (6.12): Campo eléctrico tangencial máximo según el aumento del nivel de contaminación del entorno. [Elaboración propia]	72
Figura (6.13): Campo eléctrico tangencial a distinta altitud de operación. [Elaboración propia]	73
Figura (6.14): Campo eléctrico tangencial máximo a distintas altitudes de operación. [Elaboración propia]	74
Figura (6.15): Aisladores con distancia de fuga corregida por altitud. a. Distancia de fuga 350mm, b. Distancia de fuga 390mm, c. Distancia de fuga 440mm. [Elaboración propia]	75
Figura (6.16): Aisladores con paso aumentado para mitigar efectos de la altitud. a. Longitud del paso de 170mm, b. Longitud del paso de 195mm, c. Longitud del paso de 250mm. [Elaboración propia]	76
Figura (6.17): Comparación de los métodos de corrección de altitud, a: 1000 msnm, b: 3000 msnm y c: 5000 msnm. [Elaboración propia]	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla (3.1): Recomendación a considerar del factor m según el tipo de tensión del sistema [4].	27
Tabla (3.2): Obtención de los factores a utilizar de acuerdo con las sugerencias de CIGRE. [Elaboración propia]	28
Tabla (4.1): Tres enfoques de estudio para la selección y dimensionamiento del perfil del aislador. [5].	31
Tabla (4.2): Parámetros de entrada para la selección y dimensionamiento de aisladores. [5]	32
Tabla (4.3): Índice de contaminación del indicador direccional de polvo depositado (DDD _G) en relación con los niveles de SPS. [5].	38
Tabla (4.4): Corrección de los niveles de severidad de contaminación del entorno como función de los niveles de DDD _G NSD. [5].	38
Tabla (4.5): Estimación del SPS según ambientes típicos. [5].	39
Tabla (4.6): Clasificación de los niveles de tensión en Chile. [28]	41
Tabla (4.7): Principales características de los materiales inertes usados para la capa sólida en suspensión. [24]	44
Tabla (5.1): Parámetros elegidos del aislador de referencia en base a la norma IEC 60305. [6]	49
Tabla (5.2): Comparación y compilado de valores constructivos del aislador diseñado según fabricante para distintas normas de diseño. [31, 32, 33]	49
Tabla (5.3): Tensiones máximas permitidas para el aislador clase U120B, según el grado de SPS. [Elaboración propia]	50
Tabla (5.4): Valores de la conductividad a utilizar. [Elaboración propia]	52
Tabla (5.5): Parámetros eléctricos del Caolín o arcilla blanca. [36]	52
Tabla (5.6): Resultados de la medición del volumen respecto a la masa de caolín. [Elaboración propia]	53
Tabla (5.7): Resultados de las áreas calculadas. [Elaboración propia]	55
Tabla (5.8): Valores finales a utilizar para simular la capa de contaminación a distintos grados de severidad de contaminación. [Elaboración propia]	56
Tabla (5.9): Tensión equivalente a utilizar para representar el efecto de aumento de altitud. [Elaboración propia]	57
Tabla (5.10): Parámetros eléctricos a utilizar para los materiales. [Elaboración propia]	59
Tabla (5.11): Determinación de materiales a cada parte del modelo del aislador. [Elaboración propia]	60
Tabla (6.1): Distancias de fuga según nivel de SPS calculadas para una tensión de operación de 15kV. [Elaboración propia]	95
Tabla (6.2): Tensiones máximas a soportar del aislador U120B según nivel de SPS. [Elaboración propia]	95
Tabla (6.3): Distancias de fuga necesarias para soportar la tensión 15kV en función de la altitud de operación. [Elaboración propia]	74
Tabla (6.4): Distancias de paso necesarias para soportar la tensión de 15kV en función de la altitud de operación. [Elaboración propia]	75
Tabla (6.5): Factores de derrateo de la tensión en función de la altitud de operación. [Elaboración propia]	76

RESUMEN

En el presente trabajo de título se estudió el desempeño de un aislador bajo distintos niveles de contaminación tipo A y a distintas altitudes de operación. Para el desarrollo del estudio se dibujó un prototipo de aislador de vidrio con las características del aislador de referencia clase U120B, este fue utilizado para realizar las simulaciones con las condiciones de interés. El programa elegido para ejecutar estas simulaciones fue el software comercial “COMSOL *Multiphysics*”, el cual es utilizado para dar solución al problema electrostático y de capa conductiva por medio del método de elementos finitos.

La contaminación fue representada como una delgada capa conductiva e ingresada como condición de borde del modelo por todo el camino de fuga del aislador. La conductividad de la capa (σ) se varió dentro del rango de 0,004 a 0,4 [S/m] y los espesores (e) entre 20 a 40 [μm], la elección y combinación de estos parámetros es determinado por el nivel de severidad de contaminación del sitio (SPS).

Para representar el efecto de la disminución de la rigidez dieléctrica en la frontera aire-aislante por la disminución de la presión atmosférica producto del aumento de altitud, fueron utilizados factores sugeridos por la norma IEC 60071-2 y CIGRE 361-1 y aplicados sobre la tensión de operación, distancia de fuga y distancia de paso del aislador seleccionado.

Para determinar el desempeño eléctrico del aislador se analizó la distribución de potencial y el campo eléctrico tangencial en la superficie. Los resultados dejaron una evidente dependencia del aumento de la intensidad de campo eléctrico tangencial con el aumento de la conductividad de la capa de contaminación, superando en un 52,6% para la conductividad de 0,4 [S/m] respecto al valor mínimo. Mientras que el aumento del espesor no significó grandes variaciones para la distribución de potencial ni campo eléctrico tangencial, obteniéndose menos del 2% de diferencia entre sus valores máximos.

El aumento de las distancias de fuga y de paso necesarias para todas las altitudes estudiadas mostraron una mejoría en el rendimiento respecto a los resultados sin corregir, sin embargo, las distancias obtenidas deben ser revisadas y comparadas con las distancias calculadas para la corrección con los efectos de la contaminación, ya que estas representan un sobredimensionamiento mayor respecto a las distancias corregidas por altitud.

Palabras claves: Aislador de vidrio, Campo eléctrico tangencial, Potencial eléctrico, Severidad de la contaminación del entorno (SPS), Altitud de operación, Distancia de fuga.

ABSTRACT

In this title work, the performance of an insulator was studied under different levels of type A contamination and at different operating altitudes. For the development of the study, a prototype glass insulator was drawn with the characteristics of the reference insulator class U120B, this was used to perform simulations with the conditions of interest. The program chosen to execute these simulations was the commercial software "COMSOL Multiphysics", which is used to solve the electrostatic problem and the conductive layer problem through the finite element method.

The contamination was represented as a thin conductive layer and entered as the edge condition of the model all the way of insulator leakage. The conductivity of the layer (σ) was varied within the range of 0.004 to 0.4 [S / m] and the thicknesses (e) between 20 to 40 [μm], the choice and combination of these parameters is determined by the level of site contamination severity (SPS).

To represent the effect of the decrease in dielectric strength on the air-insulating boundary due to the decrease in atmospheric pressure due to the increase in altitude, factors suggested by IEC 60071-2 and CIGRE 361-1 were used and applied to the operating voltage, leakage distance and passage distance of the selected insulator.

To determine the electrical performance of the insulator, the potential distribution and the tangential electric field on the surface were analyzed. The results left an obvious dependence on the increase of the tangential electric field intensity with the increase in the conductivity of the contamination layer, exceeding by 52.6% for the conductivity of 0.4 [S / m] with respect to the minimum value. While the increase in thickness did not mean large variations for the distribution of potential or tangential electric field, obtaining less than 2% difference between their maximum values.

The increase in the leakage and passage distances necessary for all the altitudes studied showed an improvement in performance with respect to the uncorrected results, however, the distances obtained must be reviewed and compared with the distances calculated for the correction with the effects of the contamination, since these represent a larger oversize with respect to the distances corrected by altitude.

Keywords: Glass insulator, Tangential electric field, Electric potential, Site contamination severity (SPS), Operating altitude, Creepage distance.

GLOSARIO

Aislador de referencia de capa y pin

Aisladores de capa y pin U120B o U160B de acuerdo con la IEC 60305, normalmente usado en cadenas de 7 o 9 unidades para medir la severidad de contaminación del entorno.

Aislador de referencia de barra larga

Aislador de barra larga L100 de acuerdo con la IEC 60433, contiene aletas planas sin pliegues. Es usado para medir la severidad de la contaminación del entorno.

Distancia de fuga

Es la distancia más corta o la suma de las distancias más cortas a través de la superficie de la parte aislante del aislador. La parte aislante es la que separa las piezas metálicas conectadas a tierra y a la tensión.

Distancia específica de fuga unificada USCD

Es la distancia de fuga dividida por el valor en r.m.s. de la tensión de operación más alta a través del aislador, generalmente la tensión de fase a tierra.

Distancia específica de fuga unificada de referencia RUSCD

Es el valor inicial de la USCD para un tipo de contaminación antes de las correcciones de tamaño, perfil, posición de montaje, etc. Se expresa en mm/kV.

Densidad equivalente de sal SDD

Cantidad de cloruro de sodio (NaCl) en depositada artificialmente sobre la superficie de un aislador (sin incluir las partes metálicas) divididas por el área de esta superficie, expresada generalmente en mg/cm^2 .

Densidad equivalente de sal depositada ESDD

Cantidad de cloruro de sodio (NaCl) que cuando es disuelta en agua desmineralizada da la misma conductividad del volumen que de la contaminación natural removida de una superficie de un aislador. Esta es dividida por la superficie de donde fue removida, se expresa generalmente en mg/cm^2 .

Densidad equivalente de no solubles depositados NSDD

Cantidad de residuos no solubles removidos de una superficie de un aislador dividida por la misma superficie, generalmente expresada en mg/cm^2 .

Salinidad equivalente del sitio SES

Salinidad obtenida de acuerdo con el ensayo de niebla salina de la IEC 60507, donde se podrían obtener valores de corrientes de fuga comparables con las que son producidas a una misma tensión bajo contaminación natural del sitio, se expresa generalmente en kg/m^3 .

Índice indicador de depósito de polvo soluble DDGI-S

Conductividad volumétrica, generalmente expresada en $\mu S/cm$, de contaminantes recolectados por un medidor de polvo en un periodo de tiempo dado cuando se disuelve en una cantidad dada de agua desmineralizada.

Índice indicador de depósito de polvo no soluble DDGI-N

Masa del residuo no soluble recolectado por un medidor de polvo en un periodo de tiempo determinado, generalmente expresado en mg .

Severidad de contaminación del entorno SPS

Máximo valor de ESDD/NSDD, SES o DDGI-S/DDGI-N medidos en un periodo de tiempo.

Distancia nominal de paso de aislador de suspensión P

Distancia mínima nominal entre el terminal conectado a tierra y el terminal que sujeta al cable con tensión.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de título tendrá como parte de los objetivos principales analizar, por medio de simulaciones, el efecto de distintas condiciones de contaminación sobre un aislador tipo suspensión de vidrio, usualmente utilizados en áreas de transmisión y distribución del mercado eléctrico.

El motivo de estudio de este tema es analizar una de las causas que provocan la interrupción del sistema eléctrico. Por ejemplo, la concentración de campo eléctrico en las fronteras del aislamiento originado por la acumulación de contaminación provoca un camino de menor impedancia para las corrientes de fuga, que en primera instancia generan pequeños arcos parciales, condición que puede llegar a producir flameos eléctricos haciendo operar finalmente las protecciones.

Las interrupciones del sistema eléctrico son causadas en su mayoría por las condiciones ambientales o climáticas donde han sido instaladas. La salinidad del ambiente, la polución de las industrias, climas extremos como lugares de bajas presiones, desiertos o lugares cercanos a los polos, son ejemplos de condiciones climáticas en las que estarían expuesto los equipos y que podrían provocar situaciones indeseadas si no se realiza un estudio previo [1].

Los elementos de los sistemas eléctricos, como los aisladores o conductores, son diseñados mecánicamente para soportar sobreesfuerzos asociados con cargas de viento, hielo, entre otras, logrando buen comportamiento en situaciones reales [2]. Sin embargo, el desempeño eléctrico de los elementos debe ser revisados y estudiados con mayor detalle por el dinamismo de las condiciones ambientales. Por lo que resulta necesario evaluar los riesgos de posibles flameos eléctricos simulando los escenarios ambientales en las que se expondrá el aislador, para poder considerar en el diseño las condiciones que más afectarían al funcionamiento.

Al hacer una revisión bibliográfica, se podría decir que, el comportamiento de los equipos eléctricos en altitudes hasta los 1000 msnm se encuentra estudiado tanto para el diseño como para realización de ensayos. Como metodología del diseño se utilizan factores de corrección para mejorar las características del equipo, como es el caso de la IEC 60815-2 [3] que propone el aumento de las distancias de fuga a través de estos factores según el nivel de severidad de contaminación del entorno. La interrogante ocurre cuando se superan los 1000 msnm para la operación, ya que se desconoce si dichos factores de corrección tendrán la misma efectividad por la disminución de la rigidez dieléctrica del aire, más aún bajo condiciones de contaminación. En CIGRE 705 [4] se ha realizado un compilado de las decisiones tomadas por ingenieros para tratar esta interrogante, dentro del capítulo 3 se expondrá este tema.

Con motivo de dar un acercamiento y un entendimiento básico a los temas que serán tratados en este trabajo, dentro del capítulo 2 se plantean y se definen algunas propiedades eléctricas sugeridas para recordar antes de empezar la lectura de este texto.

En el capítulo 3 se resumen algunas de las investigaciones más recientes sobre el análisis de los parámetros eléctricos que determinan el desempeño o rendimiento del aislamiento en función de la contaminación y de la distribución de esta a lo largo del camino de fuga. También se presentan los métodos computacionales que pueden ser utilizados para representar la capa de contaminación exponiendo su principal diferencia. Para terminar este apartado, se determinarán los factores de corrección que se usarán para representar el efecto de la disminución de la presión por el aumento de altitud de operación en la tensión de servicio.

La primera parte del capítulo 4 describe tres enfoques de estudio para la correcta elección del aislamiento basados en la norma IEC 60815-1 [5], para esto es necesario obtener información de las condiciones de

frontera, entorno-aislamiento, y los requerimientos propios del sistema eléctrico, así poder dimensionar correctamente el camino de fuga (apéndice A). Además, con el objetivo de clasificar el nivel de severidad del ambiente, se muestran los métodos de obtención y cálculos de los indicadores que dependen de la conductividad y la cantidad de elementos no solubles en la capa de contaminación. Como complemento de este tema se han desarrollado los apéndices B y C, el primero se resume el procedimiento utilizado para el lavado del aislador según la norma IEC 60815-1 y el segundo expone ejemplos reales de la evaluación del nivel de severidad de contaminación del entorno. Finalmente se da una sencilla descripción del método matemático utilizado por los softwares de simulación de elementos finitos enfocado a la solución de problemas electrostáticos.

En el capítulo 5 se desarrollan los conceptos que se utilizarán para dar sustento a este trabajo. En la primera parte se expone el tipo de aislador a utilizar, se muestran sus parámetros y el prototipo diseñado. Además, para determinar los valores que representarán la contaminación, se propone un método de cálculo para el espesor de la capa y la superficie superior e inferior del aislador, luego de esto, se obtendrán en una tabla todos los valores que se ingresarán al programa de simulación elegido. Para terminar este capítulo se da una descripción del programa comercial COMSOL *Multiphysics* y se muestran los pasos que se siguieron para la configuración del programa según las necesidades de este trabajo.

Luego de las configuraciones del programa a utilizar se desarrollaron una serie de simulaciones como se verá en el capítulo 6 por medio de un diagrama de flujo. Mediante comparaciones de resultados, para distintos niveles de contaminación y a distintas altitudes de operación con y sin factores de corrección, se muestran los análisis de los parámetros eléctricos que reflejan el comportamiento del aislador.

Finalmente, en el capítulo 7 se darán las conclusiones del trabajo y se expondrán también posibles trabajos futuros y sugerencias relacionados con el tema presentado.

1.2 OBJETIVOS Y ALCANCES DEL PROYECTO

En este apartado se definen claramente los objetivos que se trabajarán en este proyecto y se establecen los alcances con el fin de aclarar qué estará dentro y fuera del estudio.

1.2.1 Objetivos

- Recopilar y examinar información existente en la literatura referente al análisis de contaminación en aisladores y el efecto que tiene la altitud en el cálculo de distancias de fuga.
- Identificar las características de distintos escenarios ambientales y su relación con la contaminación de aisladores.
- Simular el efecto que tiene la capa de contaminación en aisladores y la altitud en la disminución de la rigidez dieléctrica, y su relación con el cálculo de distancias de fuga.
- Comparar los resultados obtenidos de las simulaciones y contrastar con las sugerencias definidas en la normativa vigente.

1.2.2 Alcances del proyecto

Modelo de aislador a utilizar:

Aislador de suspensión de vidrio clase U120B para tensiones sobre $1kV$ según parámetros de [6, 7]. Este modelo tiene un camino de fuga de $295mm$ y una distancia de arco de $146mm$.

Capa de contaminación:

Según los valores de SPS representados por la norma IEC 60815-1 [5] se determinarán el ESDD y NSDD, con estos valores se obtendrá la conductividad y el espesor de la capa de contaminación.

Aumento de la altitud

Para representar el efecto que provoca el aumento de la altitud de operación se utilizarán factores de corrección aplicados a la tensión de simulación para forzar la obtención de resultados de campo eléctrico y finalmente compararlos con otros métodos de mejoramiento de distancias de fuga [8, 9].

Tensión de servicio del aislador

La tensión de servicio variará para lograr un buen desempeño según el SPS y la altitud de operación elegida.

Programa de simulación

Como herramienta del estudio se utilizará el método de elementos finitos (MEF) proporcionado por el software *COMSOL Multiphysics*.

Parámetros eléctricos por analizar en las simulaciones

Se analizarán las distribuciones de potencial y el campo eléctrico transversal a lo largo de la superficie del aislador según las condiciones de operación y se compararán los efectos que tendrían sin las correcciones.

CAPÍTULO 2: CONCEPTOS BÁSICOS

Este capítulo tiene como función entregar al lector definiciones de algunos conceptos tratados en este trabajo de título.

2.1 CAMPO ELÉCTRICO $\vec{E}$

El concepto de campo eléctrico se explicará a través de la teoría de la electrostática. Esta cantidad vectorial es definida en todo el espacio y en una posición específica se describe como la fuerza que actuaría sobre una carga puntual positiva unitaria si estuviera en esa posición. La fuerza ejercida es conocida como fuerza de Coulomb, y es representada en la ecuación (1) como la interacción entre ambas cargas eléctricas puntuales q_1 y q_2 :

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 * q_2}{r^2} \hat{r} [N] \quad (1)$$

La carga eléctrica es la propiedad elemental de la materia para ejercer dicha fuerza y tiene el valor numérico de un electrón [10], la unidad de medida es el coulomb:

$$q = 1,6 * 10^{-9} [C] \quad (2)$$

Si se fija en el espacio una de las cargas especificadas en la ecuación (1), definiéndola además como Q , y se ubica la segunda carga positiva q en una posición r variable alrededor de la carga recién fijada. La carga movable experimentaría un módulo de fuerza eléctrica $|\vec{F}|$ mayor al acercarse y menor al alejarse de Q . Ahora se puede decir que, en el espacio alrededor de la carga fija conocida, independiente del valor de la carga q que interactúe con esta, está determinado un módulo específico de fuerza en función de r [11]. A esta propiedad en el espacio se le llama campo eléctrico E_Q , representado por la ecuación (3):

$$E = \frac{F}{q} \Rightarrow E_Q = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} [N/C] \quad (3)$$

A modo de ampliar la definición, la ecuación (4) describe la magnitud vectorial de campo eléctrico generado por la carga q_i de valor conocido a una carga puntual q que se encuentra a una distancia r , la dirección $\hat{r}_i$ del vector es dado si la propiedad de la carga es repulsiva o atrayente.

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i}{r^2} \hat{r}_i [N/C] \quad (4)$$

Si ahora se tiene una región con una carga distribuida, la igualdad quedará de la forma integral como la ecuación (5). Así con esta forma se puede dar una definición más general de campo eléctrico. [12]

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dq}{r^2} \hat{r}_i [N/C] \quad (5)$$

2.2 POTENCIAL ELÉCTRICO ϕ

Desde la fuerza de Coulomb definida en la ecuación (1), se puede obtener la energía necesaria para que una carga de prueba q se mueva o permanezca a una distancia r de Q . La energía es representada en la ecuación (6).

De la definición anterior, se puede hablar de potencial eléctrico como la energía por unidad de carga que habría a una distancia r en el espacio alrededor de Q representado en la ecuación (7), esta **energía potencial** sería mayor en la cercanía de la fuente, y viceversa [13]. Con esto quedan implícitamente definidas las líneas equipotenciales radiales, como se puede ver en la Figura (2.1).

$$W_r = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q * Q}{r} \quad (6)$$

Donde,

$$\phi = \frac{W_r}{q} \Rightarrow \phi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r} [J/C] \quad (7)$$

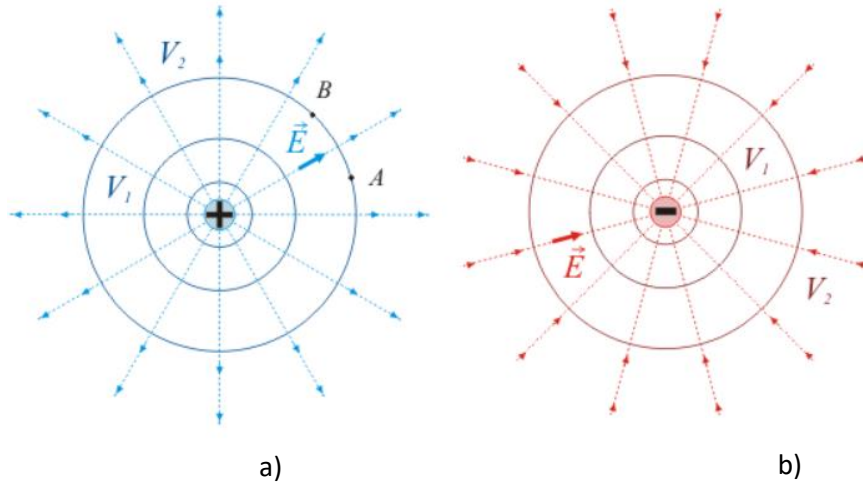


Figura (2.1): (a) Líneas equipotenciales y de campo eléctrico por fuente de carga positiva. (b) Líneas equipotenciales y de campo eléctrico por fuente de carga negativa. [14]

Las líneas equipotenciales como también la distribución del campo eléctrico depende de la forma y del material del medio, por lo que no siempre son radiales como se ve en la Figura (2.1).

2.3 DENSIDAD DE CORRIENTE $\vec{J}$

La condición para que un grupo de cargas sean desplazadas de un punto a otro en una región, es que exista un medio conductor y un campo eléctrico presente. El campo eléctrico, ejercerá una fuerza en cada una de las cargas libres del medio, las cuales comenzarán a moverse a una velocidad de desplazamiento v_a [12].

La densidad de carga volumétrica ρ que se mueve a la velocidad v_a paralelo a la dirección de campo eléctrico, cuando traspasa una superficie S genera una tasa de transporte de carga por unidad de área, llamada densidad de corriente $\vec{J}$, como se aprecia en la ecuación (8) y en la Figura (2.2).

$$\vec{J} = n * \rho * \vec{v}_a \left[\frac{C}{s * m^2} \right] \text{ ó } \left[\frac{A}{m^2} \right] \quad (8)$$

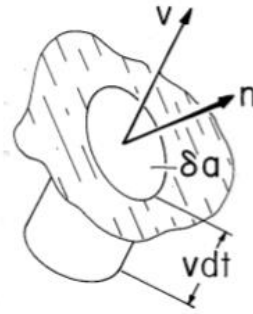


Figura (2.2): Densidad de corriente $\vec{J}$ que pasa a través de una superficie de normal $\hat{n}$. [10]

Como se puede ver la densidad de corriente es una magnitud vectorial y su dirección está dada por la relación de la velocidad con la normal del área de prueba.

2.4 AISLAMIENTO ELÉCTRICO

Un aislamiento eléctrico o dieléctrico es un material que impide la conducción o transporte de cargas, es decir, que no posee electrones o iones libres [15]. Esta característica, le permite al dieléctrico ser usado para almacenamiento o acumulación de cargas según sus propiedades y esencialmente para aislar puntos con distinto potencial.

Aunque el dieléctrico se caracteriza por las propiedades definidas a continuación, en este trabajo será necesario solo conocer la primera de esta.

- Permitividad o constante dieléctrica (ϵ): Es una constante física que indica como es afectado un material en presencia de un campo eléctrico, esta constante propia del medio dieléctrico, relaciona proporcionalmente el vector campo de desplazamiento eléctrico ($\vec{D}$) con el vector campo eléctrico ($\vec{E}$), como se representa en la ecuación (9).

$$\vec{D} = \epsilon * \vec{E} \quad (9)$$

La unidad de la permitividad del medio en el sistema internacional es el Faraday per metro (F/m). Cuando está relacionada con la permitividad del vacío ϵ_0 es llamada permitividad relativa ϵ_r , en las ecuaciones (10) y (11) se muestra la relación de la permitividad relativa y el valor de la permitividad del vacío respectivamente [10, 15].

$$\varepsilon_r = \varepsilon / \varepsilon_0 \quad (10)$$

$$\varepsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} [F/m] \quad (11)$$

La permitividad de los materiales es una propiedad compleja cuando la fuente de campo eléctrico varía en el tiempo. Esta característica compleja permite obtener el factor de pérdida o tangente delta si se relacionan los miembros de la ecuación (12), tal como se puede ver en la ecuación (13). Existen ensayos de laboratorio que permiten obtener el valor de la tangente delta, su valor es utilizado para conocer el estado dieléctrico del material, este tema es estudiado en profundidad en [2]. Para el caso de esta investigación no se ahondará más en este tema ya que solo es suficiente el análisis electrostático.

$$\varepsilon = \varepsilon' - j * \varepsilon'' \quad (12)$$

$$\tan(\delta) = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (13)$$

- Polarizabilidad (α): Es la tendencia de un material a polarizarse en presencia de un campo eléctrico, es decir, a crear un orden en sus cargas internas. Se define como la razón entre el momento dipolar eléctrico¹ por unidad de campo eléctrico [2].

$$\alpha = \frac{p}{E} [Cm^2/V] \quad (14)$$

- Piezoelectricidad: Es una propiedad que asocia biunívocamente el campo eléctrico a una tensión mecánica. Es decir, a través de una deformación del material se provoca un campo eléctrico y viceversa [15].
- Piroelectricidad: Es una propiedad que asocia biunívocamente el campo eléctrico a un cambio de temperatura. Es decir, al exponer un material a una temperatura distinta a su inicial se provocará un campo eléctrico específico.
- Ferroelectricidad: Es una propiedad de algunos materiales a polarizarse espontáneamente al estar a una temperatura menor a la llamada temperatura crítica T_C , y a comportarse como un material paraeléctrico sobre esa temperatura.

¹ Momento dipolar eléctrico [2]: "Magnitud vectorial con módulo igual al producto de la carga q por la distancia que separa una carga de otra, cuya dirección es la recta que las une y su sentido es dado si la carga es negativa o positiva".

CAPÍTULO 3: COMPILADO DE INVESTIGACIONES SOBRE EL TEMA

Este capítulo tiene como propósito mostrar un compilado de algunas investigaciones más recientes respecto al desempeño de aisladores con contaminación, su estudio en los softwares de simulación y trabajos en altitud sobre 1000 msnm.

3.1 INTRODUCCIÓN DE LA SECCIÓN

En el mercado existen varios modelos de aisladores para ser usados en la industria, estos se diferencian según los parámetros de diseño, tensión de soporte mecánica y eléctrica, caminos de fuga, diámetros, etc., pero también difieren en sus materiales de fabricación, estos pueden ser de porcelana, cerámica, vidrio y poliméricos. La elección de estos dependerá de los factores de estudio del proyecto, presupuestos, consideraciones especiales de la línea, en definitiva, de lo que el proyectista estime conveniente según sus variables de cálculos.

3.2 DISTRIBUCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN EN LA SUPERFICIE DEL AISLADOR

Los aisladores instalados estarán expuestos a condiciones ambientales del entorno; salinidad de las costas, vandalismo, residuos de pájaros, etc., estas y otras condiciones del entorno fueron revisadas por Stefenon et al. [16]. En muchos casos el material externo se depositará en la superficie del camino de fuga del aislador, creando una capa de contaminación que dependerá del tipo y la severidad según el sitio. Si no se ha considerado un método de limpieza para los aisladores, con el tiempo la capa de contaminación puede tomar distintos espesores y conductividades que eventualmente afectarán al rendimiento del aislador.

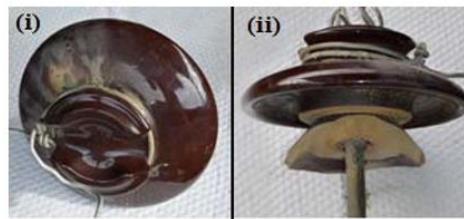


Figura (3.1): Ejemplo de aislador de porcelana retirado del sistema eléctrico, por presencia de quiebre provocado por vandalismo. [16]

En concordancia con Arshad et al. [17], existen ciertos parámetros eléctricos que pueden ser estudiados para analizar el desempeño de los aisladores, como la distribución de potencial y campo eléctrico a lo largo del camino de fuga y, según como se distribuya la contaminación tendrá diferentes incidencias en la intensidad de estos parámetros. Algunos ejemplos de las configuraciones trabajadas son mostrados en la Figura (3.2).

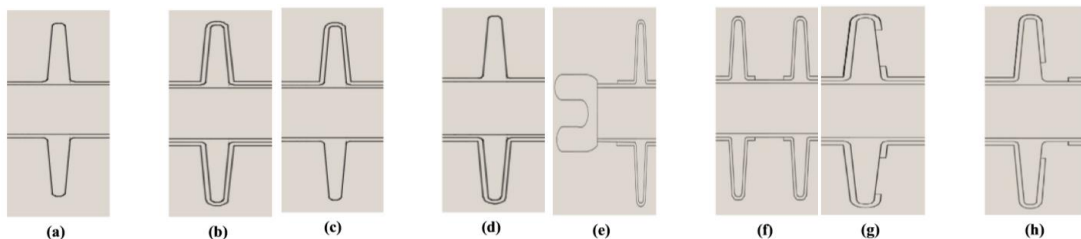


Figura (3.2): Ejemplos de configuraciones de contaminación: a. aislador limpio, b. capa uniforme, c. en el lado superior, d. en el lado inferior, e. cerca del terminal energizado, f. solo en las aletas, g. por tramos 1, h. por tramos 2. [17]

En el caso de las contaminaciones distribuidas uniformemente a lo largo del camino de fuga del aislador, la **acumulación de campo eléctrico se verá en las cercanías de los electrodos de tierra y de tensión**, en cambio para distribuciones donde existen bandas sin contaminación en la superficie del aislador o *dry band*, se crea una concentración de campo eléctrico en las terminaciones de cada una de las capas de contaminación, tal como se aprecia en la Figura (3.3).

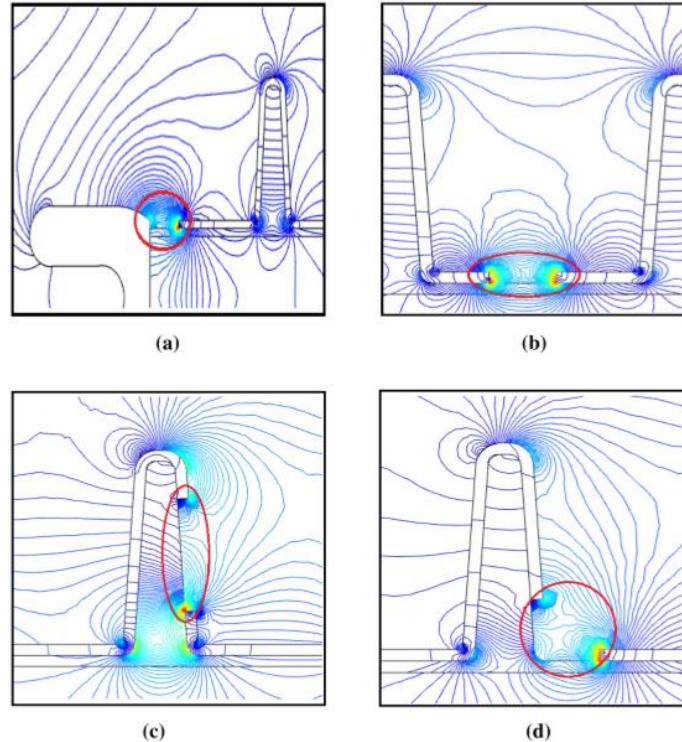


Figura (3.3): Distribución de campo eléctrico para distintas localizaciones de bandas sin contaminación, a. Terminación de la banda cerca del terminal de tensión, b. Terminaciones de las bandas en el cuerpo del aislador, c. Terminación de la banda en una de las aletas del aislador, d. Terminaciones en la parte baja de la aleta del aislador. [17]

3.3 REPRESENTACIÓN DE LA CAPA DE CONTAMINACIÓN EN SOFTWARES DE SIMULACIÓN

Se pueden utilizar herramientas matemáticas para calcular valores y analizar resultados de las distintas configuraciones de contaminación, por ejemplo, una de estas es el método de elementos finito (MEF o FEM), descrito en el capítulo siguiente de este trabajo, pero también existen otros métodos matemáticos como el método de diferencias finitas, método de Monte Carlo, método de momentos, etc.

Existen varios softwares comerciales que permiten aplicar este método matemático entregando buenos resultados en sus simulaciones. Para el caso de los artículos estudiados, fue utilizado el programa COMSOL *Multiphysics* [18]. Como se muestra en el estudio de Volat C. [19], este software tiene la capacidad de realizar modelamientos en 2D y 3D, además permite combinar resultados de físicas distintas, por ejemplo, análisis térmico, eléctrico, químico y mecánico. Para el caso de aisladores, se puede utilizar una configuración 2D simétrica al eje, es decir, una representación del modelo en un plano, el cual al ser rotado formará la figura en 3D. Esto ayudará a disminuir los tiempos que tomará el programa en realizar el proceso. También, para contribuir a la rapidez de la simulación, la **contaminación puede ser considerada como una condición de borde** del sistema en vez de dibujarla como un material más de la malla de elementos finitos, ver Figura (3.4-a). En [19] se simula, en la superficie de un aislador polimérico, una capa de contaminación en dos modalidades, como condición de borde del sistema y como parte de la geometría, tal como se muestra en la

Figura (3.4). Se dice que, al tener una región muy pequeña en comparación con las dimensiones del dibujo principal, se pueden generar errores de divergencia de la solución, en la exactitud de los resultados y también mayores tiempos de simulación.

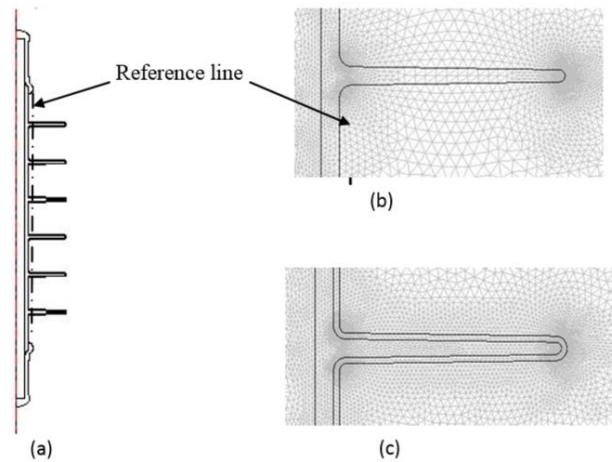


Figura (3.4): a. Configuración eje simétrico de un aislador polimérico tipo barra larga, b. Malla de elementos finitos para contaminación como condición de borde, c. Malla de elementos finitos para contaminación dibujada como material. [19]

Como resultado al comparar los dos métodos de simulación de la capa de contaminación, se obtuvo un incremento del veinticinco por ciento en la cantidad total de elementos finitos de la malla al dibujar la capa, esto generó también un aumento en el tiempo para solución de la simulación. Sin embargo, los resultados obtenidos tuvieron una discrepancia promedio del 0,13 %, lográndose resultados prácticamente iguales, tal como se aprecia en la Figura (3.5).

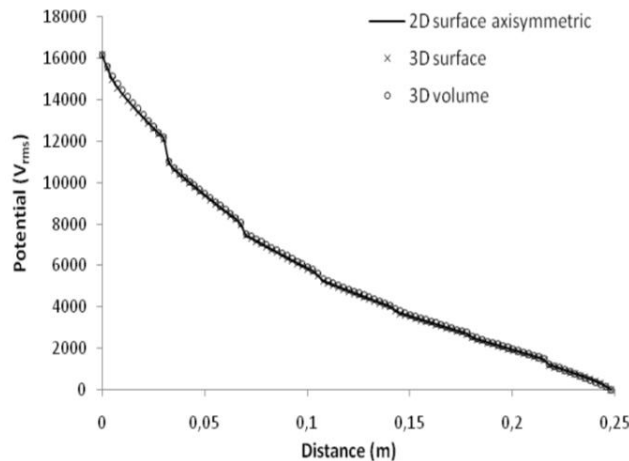


Figura (3.5): Comparación de la distribución de potencial obtenida a lo largo de la contaminación uniforme del aislador, usando una capa dibujada en la superficie (3D surface) y la capa como condición de borde (2D axisymmetric). ($\sigma_v = 1 \mu S/m$ y $\epsilon_r = 80$) [19]

3.4 DISTRIBUCIÓN DE POTENCIAL Y CAMPO ELÉCTRICO EN LA SUPERFICIE AISLANTE

En la investigación realizada por Krzma A. et al. [20], se simuló una capa de contaminación uniforme de 1,5mm de espesor con una conductividad de 0,6mS/m y se analizó la distribución de potencial y campo eléctrico a lo largo del camino de fuga de aisladores de porcelana y vidrio. En los resultados de la Figura (3.6) y Figura (3.7), se pueden apreciar claramente las diferencias en los resultados para aisladores limpios y contaminados. Para

el caso de aisladores con contaminación la distribución de potencial tiende a ser más lineal que sin este material extra. Para la distribución de campo eléctrico el análisis del autor destaca el aumento de la intensidad media a lo largo del camino de fuga cuando hay presencia de contaminación y revela una mejoría en el desempeño del aislamiento de vidrio en contraste con el de cerámica.

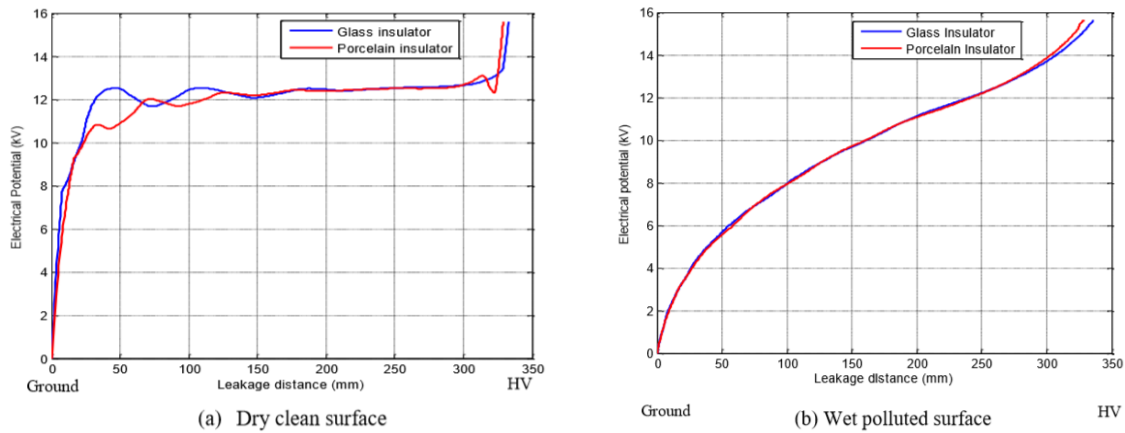


Figura (3.6): Comparación de la distribución de potencial a lo largo del camino de fuga para aisladores de porcelana y vidrio, condición a. Limpios, b. contaminación húmeda. [20]

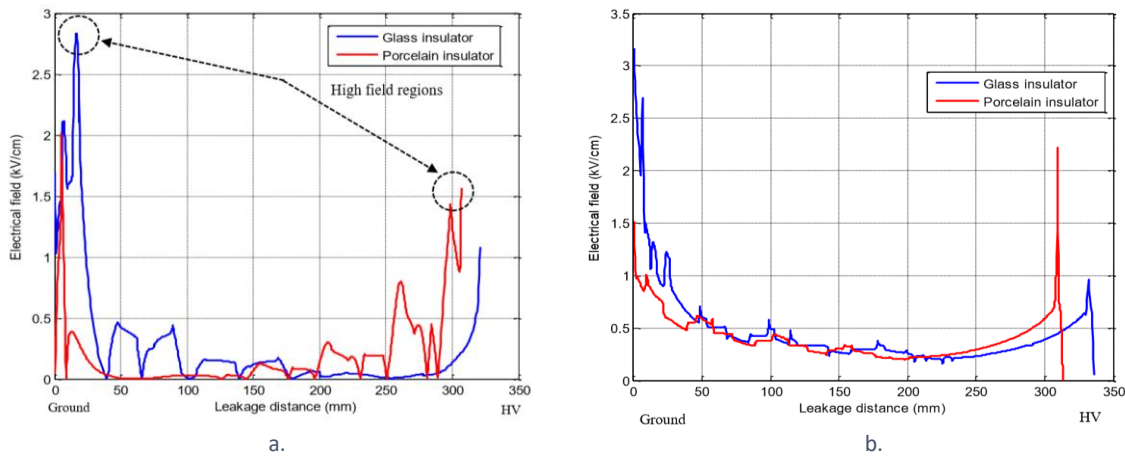


Figura (3.7): Comparación de la distribución de campo eléctrico a lo largo del camino de fuga para aisladores de porcelana y vidrio, condición a. Limpios, b. contaminación húmeda. [20]

En los estudios realizados por Khademi M. et al. [21], se realizaron pruebas similares al estudio anterior, pero sobre un aislador polimérico tipo barra. Para [21] el espesor de la capa de contaminación es de 1mm mientras que la conductividad utilizada fue de 1mS/m . Como se aprecia en la Figura (3.8) la distribución de potencial eléctrico es afectado por la capa de contaminación de tal forma que se obtiene un aumento en el rango de alcance de tensión a través del cuerpo del aislador. Al ver la Figura (3.9), se observa una concentración mayor del campo eléctrico en las puntas de las aletas y en la cercanía de los terminales de tierra y de tensión, para el caso del aislador con contaminación. Estas nuevas condiciones provocan en la superficie del aislador una disminución de la resistencia generando corrientes de fuga que, con el tiempo, ocasionan la degradación del material aislante dejando al aislador sin utilidad.

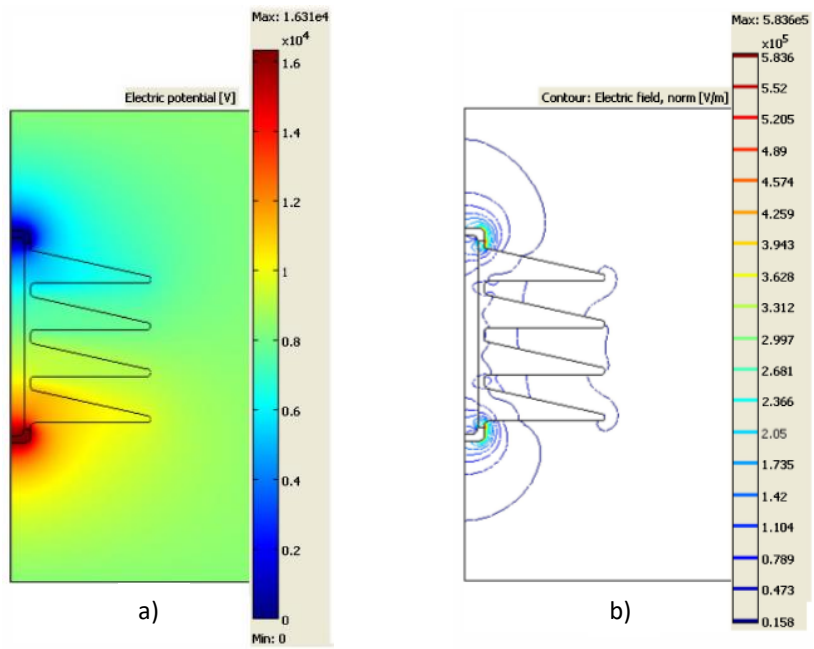


Figura (3.8): a. Distribución de potencial eléctrico sin contaminación, b. Distribución de campo eléctrico sin contaminación. [21]

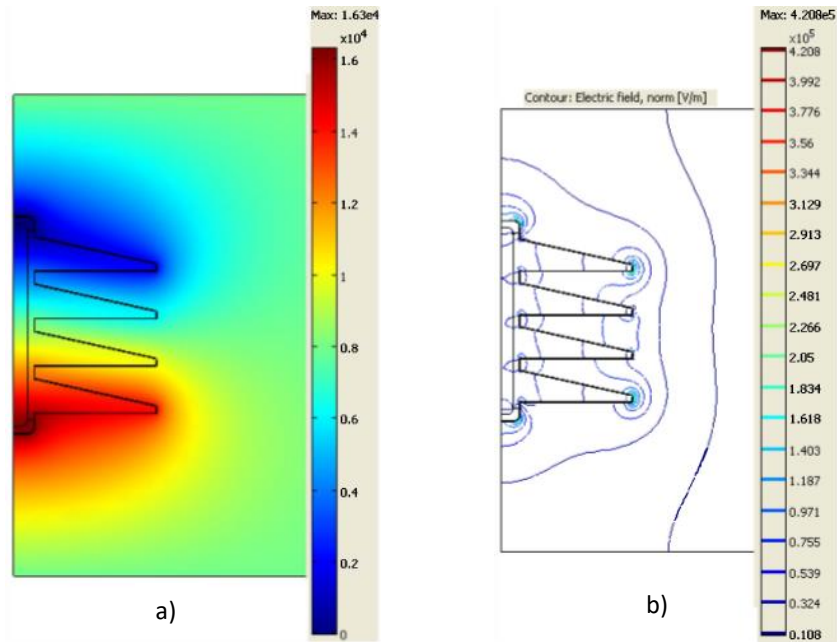


Figura (3.9): a. Distribución de potencial eléctrico con contaminación, b. Distribución de campo eléctrico con contaminación. [21]

3.5 NIVEL DE SEVERIDAD DE LA CONTAMINACIÓN

Las investigaciones tratadas hasta el momento han trabajado con una capa de contaminación con características similares para el espesor y conductividad sin dar más detalle sobre el nivel de contaminación utilizado o el porqué de la elección de estos valores. En una nueva investigación realizada por Arshad et al. [22], se analiza el efecto que produce la variación de espesor y conductividad de la capa de contaminación en la distribución de campo eléctrico. En los resultados se observa un **aumento de la intensidad de campo eléctrico como consecuencia del aumento de la conductividad y el espesor de la capa de contaminación**, como se muestra en la Figura (3.10).

Como resultado común de los estudios revisados, se reconoce que, tanto la distribución de potencial como el campo eléctrico son afectados por la variación del espesor y la conductividad de la capa. Como era de esperar, también se observa un aumento de la intensidad de campo eléctrico en bordes puntiagudos y uniones en comparación con el resto del camino de fuga. Estos aumentos de intensidad se acentúan con el efecto de la contaminación y como se asevera en [17], estas concentraciones comienzan a formar arcos parciales que generan envejecimiento y degradación de la superficie del aislador debido a su naturaleza orgánica.

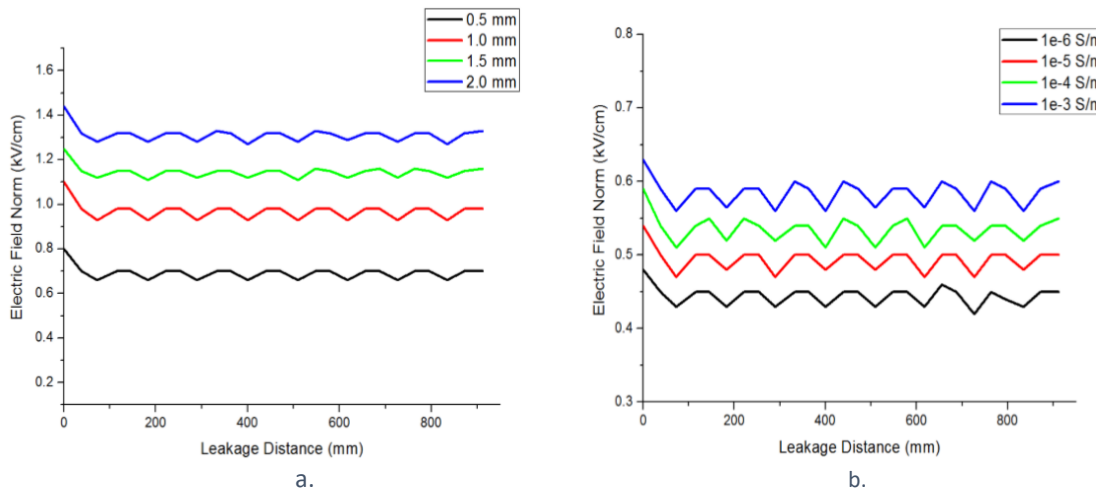


Figura (3.10): Para un aislador polimérico, a. Distribución de campo eléctrico a distintos espesores de contaminación, b. Distribución de campo eléctrico a distintas conductividades de la capa de contaminación. [22]

Como complemento a lo anterior, en la norma IEC 60815-1 [5] se propone un método para el cálculo de ESDD y NSDD, variables que determinan la severidad de la contaminación, esta severidad se clasificará en cinco niveles; Muy leve, Leve, Medio, Fuerte y Muy fuerte, ejemplo de esto se muestra en la Figura (3.11). (En los siguientes capítulos se dará mayor detalle del método, de los indicadores y como calcularlos)

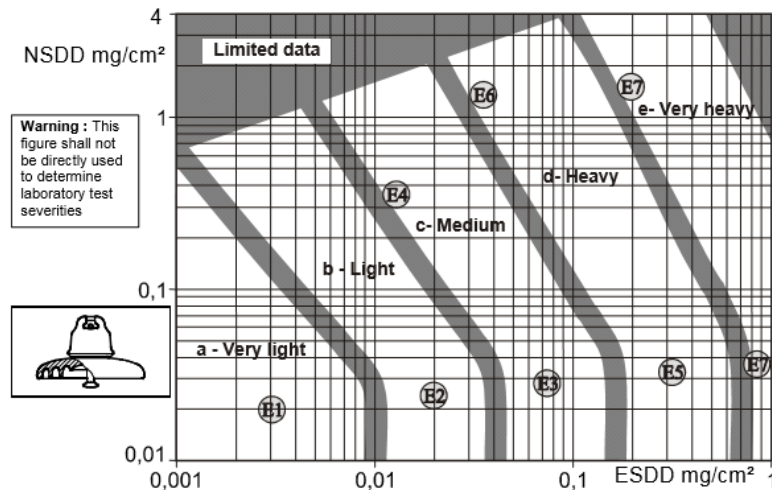


Figura (3.11): Relación entre ESDD, NSDD y severidad de contaminación del entorno tipo A, para aislador estándar tipo campana y pin. [5]

El problema de este método se haya cuando los materiales de la contaminación depositada son muy pesados y/o muy conductivos, superando los límites que se determinan en la norma IEC 60815-1 [5]. Ejemplo de la superación de estos límites es estudiado por Wardman J. et al. [23], donde se analizan la deposición de cenizas volcánicas en discos de prueba. En [23] se muestra que las cenizas volcánicas se componen principalmente por elementos no solubles, con diámetros de partículas de hasta 2 mm , obteniéndose espesores de capa de contaminación después de un evento de erupción volcánica de hasta 10 mm . En presencia de humedad, la conductividad de la capa puede tomar valores por sobre los $0,13\text{ mS/m}$. Los resultados del estudio se pueden ver en la Figura (3.12), donde claramente se aprecia que los valores de NSDD superan los límites propuestos en la norma IEC 60815-1 [5]. A modo de recordar y comparar, el contaminante no soluble que se trabajará en este proyecto de título es el caolín o arcilla blanca, esta tiene una granulometría de hasta $25\mu\text{m}$ según la norma IEC 60507 [24].

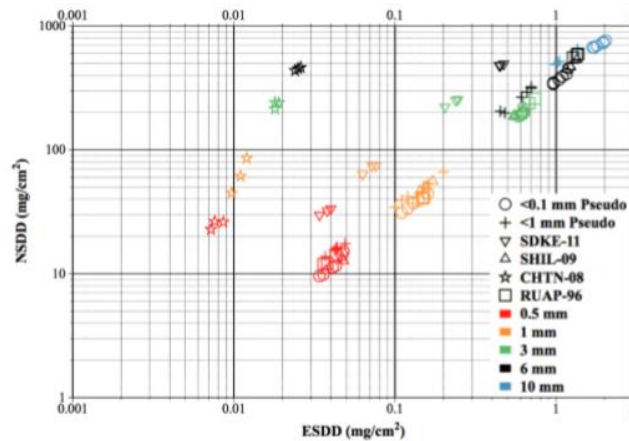


Figura (3.12): Resultados de la relación entre ESDD, NSDD para ceniza volcánica. [23]

3.6 EFECTO DE LA ALTITUD DE OPERACIÓN Y LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA EN AISLADORES CONTAMINADOS

Hasta este instante solo se han mostrado resultados de investigaciones realizadas a condiciones normales de presión y temperatura (CNPT), es decir, a nivel del mar. Sin embargo, existen grupos de estudios que han trabajado el tema del aumento de la altitud para aisladores. En el trabajo realizado por CIGRE 158 [25], se concluye que al aumentar la altitud de trabajo de aislamiento, el contorno aire-aislador sufrirá variaciones por el cambio de presión atmosférica afectando directamente al aire, lo que provoca una disminución de la rigidez dieléctrica en la frontera, siendo propensa a sufrir arcos de ruptura por contorno si no se corrige la tensión de impulso (derrateo) o el camino de fuga.

En la publicación realizada por CIGRE 705 [4], se expone una recopilación de distintas experiencias para la utilización de factores de corrección en altitudes de operación hasta los 6.000 msnm. El objetivo de esta publicación es mostrar una convergencia en las decisiones tomadas para la elección del dimensionamiento del aislador teniendo en cuenta el nivel de contaminación y la altitud de operación.

En [4, 9, 25] se deja en evidencia que las normas eléctricas que tratan sobre el dimensionamiento de aisladores de cerámica, vidrio y poliméricos para sistemas en AC o DC, determinan que la aplicación de factores de corrección por altitud en las distancias de fuga no son necesarios si se ha realizado un aumento en la distancia de arco propuesto por la norma de coordinación de aislamiento IEC 60071-1 [26]. Sin embargo, esta recomendación solo es para el caso de altitudes de operación hasta los 1000 msnm y en algunos casos hasta los 1500 msnm. Al verse superada la altitud, con una presión disminuida, las normas de dimensionamiento sugieren tomar en cuenta los estudios realizados por CIGRE 158 [25].

En CIGRE 705 [4] se explican dos caminos para la obtención de factores de corrección por altitud, según lo que recomienda la IEC 60071-2 [8] mostrado en la ecuación (15), y lo que se recomienda por CIGRE 361 [9] mostrado en la ecuación (16).

$$C_a = e^{m \cdot \left(\frac{H}{8150} \right)}; \quad H: \text{altitud en m} \quad (15)$$

$$E = E_0(1 - nH); \quad H: \text{altitud en km} \quad (16)$$

Según [4, 8], la elección del factor m de la ecuación (15) depende del tipo de tensión del sistema y del nivel de contaminación del entorno SPS, generalmente varía entre 0,35 a 0,8, pero se ha encontrado un buen resultado al utilizar los valores de la segunda columna de la Tabla (3.1). Para darle fuerza a estos resultados, en CIGRE 705 [4] también se muestran estudios desarrollados por universidades chinas respecto a la elección del factor m en función de la altitud y el nivel de contaminación, obteniéndose resultados muy parecidos como se puede ver en la tercera columna de la misma tabla.

Tipo de sistema	CIGRE: Factor m	Estudio China: Factor m
AC	0,5	0,55 – 0,60
DC	0,35	0,35 – 0,45

Tabla (3.1): Recomendación a considerar del factor m según el tipo de tensión del sistema [4].

Adicionalmente, en el estudio desarrollado por CIGRE 361 [9], se establecen algunos criterios a considerar para seleccionar y dimensionar aisladores en condiciones de contaminación, **se sugiere que para aisladores de cerámica o vidrio la distancia de fuga debe ser aumentada a medida incrementa la altitud, multiplicando**

la distancia de fuga por el cociente E_0/E de la ecuación (16). Además de esto, se indica que la distancia mínima de arco también debe ser aumentada para garantizar el buen desempeño del aislamiento a sobretensiones por rayos atmosféricos o conmutaciones de cargas del sistema.

Para obtener el cociente E_0/E se ha definido el factor n de la ecuación (16) en la página 68 y 69 de CIGRE 158 [25], se dice que este factor depende del tipo de tensión y de la densidad del aire, y tal como se propone en este estudio, se utilizarán los valores de 0,05 para tensión AC y 0,035 para tensiones DC.

3.6.1.1 Factor de corrección por altitud y presión atmosférica

En el trabajo de CIGRE 705 [4], se ha determinado que el factor de corrección de la ecuación (15) se obtiene a partir de las definiciones del factor de corrección por densidad del aire de la norma IEC 60060-1 [27], mostrado en la ecuación (17). Se define como densidad relativa del aire, a una variable dependiente de la presión atmosférica y de la temperatura, como se muestra en la ecuación (18).

$$k_1 = \delta^m \quad (17)$$

$$\delta_{aire} = \frac{p}{p_0} * \frac{273 + t_0}{273 + t} \quad (18)$$

Para determinar el exponente m , en la norma IEC 60060-1 [27] se establecen ciertas relaciones entre el tipo de tensión de ensayo, la mínima distancia de descarga y la densidad relativa del aire, pudiendo variar en el rango de cero y uno. También se define la presión atmosférica en función de la altitud con la ecuación (19).

$$p = p_0 * e^{-\left(\frac{H}{8150}\right)} \quad (19)$$

Al alero de estas ecuaciones, en CIGRE 705 [4] se asumió que las variaciones de temperatura y humedad compensarán sus efectos al aumentar la altitud de operación, bajo esta simplificación se obtiene la ecuación (20) la que finalmente es ocupada para determinar los factores de corrección por altitud.

$$k_a = 1/k_1 = 1/\delta^m = e^{m * \left(\frac{H}{8150}\right)} \quad (20)$$

En el presente trabajo de título se realizará el estudio teórico del rendimiento de un aislador de suspensión de vidrio para una **tensión alterna**, por lo tanto, los factores de corrección para las altitudes a usar son representados en la Tabla (3.2), estos representarán el efecto de la disminución de presión atmosférica y se utilizarán para obtener la distancia de fuga, distancia de arco y el derrateo de la tensión, según sea el caso.

Altitud [m]	$e^{0,5\left(\frac{H}{8150}\right)}$	$\frac{E_0}{E} = \frac{1}{1 - 0,05 * H/1000}$
0	1	1
1000	1,0633	1,053
3000	1,2021	1,176
5000	1,3590	1,333

Tabla (3.2): Obtención de los factores a utilizar de acuerdo con las sugerencias de CIGRE. [Elaboración propia]

CAPÍTULO 4: MARCO TEÓRICO

En este capítulo se mostrará la información teórica utilizada para desarrollar este trabajo de título.

4.1 INTRODUCCIÓN A LA CONTAMINACIÓN DE AISLADORES

La clave para que líneas aéreas de transmisión o distribución y subestaciones eléctricas trabajen correctamente en el sistema, depende del desempeño del aislamiento utilizado. El desempeño del aislamiento se deteriora principalmente por la contaminación que comienza a depositarse en la superficie, formando una capa total o parcialmente conductiva cuando es humedecida, y con el tiempo provocan descargas disruptivas².

El aislamiento no solo debe soportar la tensión de operación del sistema, sino que también se deben considerar sobretensiones y posibles flameos provocados por el entorno. En definitiva, el ambiente también debe ser considerado y estudiado al momento de elegir las características del aislamiento para que se desempeñe de la mejor manera.

En presencia de humedad, el proceso de flameo está relacionado principalmente con las propiedades de la superficie del aislamiento, estas propiedades se pueden identificar como hidrofílico e hidrofóbico. Una superficie hidrofílica está asociada con aisladores de cerámica o vidrio, y se caracterizan ya que al mojarse forman una película electrolítica que cubre gran parte de la superficie de estos. Mientras que las superficies hidrofóbicas, asociadas a aisladores poliméricos, al mojarse forman pequeñas gotitas dispersadas por toda la superficie.

Para este trabajo se utilizará un aislador de vidrio, por lo tanto, se revisará el proceso de flameo en aisladores hidrofílicos representado en la Figura (4.1), se describe con los siguientes pasos [5]:

- a) El aislador se comienza a cubrir por una capa de contaminación que contiene sales solubles, ácidos diluidos o álcalis, y material no soluble.
- b) La superficie del aislador comienza a mojarse completa o parcialmente y la capa de contaminación comienza a ser conductiva.
- c) Cuando el aislador está energizado y cubierto por la capa de contaminación, comienza a fluir una corriente de fuga sobre la superficie, generando calentamiento y secando parcialmente la contaminación.
- d) Las bandas de contaminación seca sobre la superficie, generalmente no uniforme y en cualquier lugar, comienza a interrumpir el flujo de la corriente de fuga.
- e) En las terminaciones de las bandas secas de contaminación comienzan a acumularse campo eléctrico, que provocan ruptura del aire, creando pequeños arcos sectoriales.
- f) Los pequeños arcos comienzan a secar las partes húmedas de la contaminación, y por lo tanto pueden extenderse y abarcar mayor superficie. Esto provoca que la resistencia serie a los arcos disminuya considerablemente generando finalmente el flameo del aislador.

² Descarga disruptiva [44]: "Descarga se produce en la superficie de un dieléctrico sólido rodeado de un gas o de un líquido aislante, entre dos puntos que están a distinto potencial y separados por aquel dieléctrico sólido".

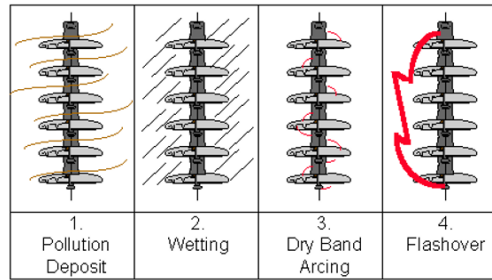


Figura (4.1): Proceso de formación de flaqueo eléctrico en una cadena de aisladores de superficie hidrofílica [25].

4.2 ENFOQUES DE ESTUDIOS PARA LA SELECCIÓN DEL AISLADOR

4.2.1 Introducción a los estudios

Para seleccionar un aislador correctamente es necesario tener en cuenta los requerimientos del sistema y las condiciones ambientales donde se instalará, para eso la norma IEC 60815-1 propone tres propuestas de estudio que ayudarán a seleccionar de la mejor manera el aislador buscado, como se muestra en la Tabla (4.1). La elección de la propuesta a elegir dependerá de los datos disponibles que se dispongan; del sistema, del clima y del presupuesto del proyecto.

El desempeño del aislador elegido está determinado por las interacciones dinámicas que existe con el entorno. Además, la exactitud en la elección de las características del equipo está determinada de cuál de estos enfoques se utiliza.

Enfoque de estudio 1: Este enfoque es el más recomendado cuando se han llevado estudios a lo largo del tiempo de las interacciones que han tenido líneas o subestaciones con el ambiente de operación.

Enfoque de estudio 2: Cuando el estudio de las interacciones con el entorno no lleva mucho tiempo o los datos no son suficientes, se realiza una combinación con resultados obtenidos en ensayos de laboratorios que simularán las condiciones ambientales. Las normas utilizadas para realizar estos ensayos son la IEC 60507 y la IEC61245.

Enfoque de estudio 3: Este enfoque suele ser rápido y económico para el proceso de selección y dimensionamiento, pero puede llevar a subestimaciones de la severidad de contaminación o a un costo extra por el sobredimensionamiento del aislador, por lo que se sugiere preferir, siempre que se pueda, los enfoques 1 y 2. Este enfoque se basa en estimar la severidad de la contaminación del entorno y en base a esto considerar factores de corrección para elegir el aislador.

El éxito de cada uno de los estudios anteriores depende del tiempo que se utilice para la recolección de datos. En la norma IEC 60815-1 [5] se dan algunas sugerencias sobre cuál estudio considerar según el tiempo de experiencia que se tiene en instalaciones eléctricas, laboratorio o ensayos:

- Para líneas en servicio se necesita un tiempo de operación entre cinco y diez años para adquirir experiencia con su comportamiento, este tiempo puede ser más corto o largo dependiendo de los eventos de flaqueo que ocurran por la severidad de contaminación del ambiente, se sugiere utilizar el enfoque de estudio 1.
- La experiencia en estaciones de prueba se adquiere con un tiempo de investigación de dos a cinco años como mínimo, este tiempo puede ser más corto o largo de acuerdo con los protocolos de pruebas y la severidad de contaminación utilizada. Se sugiere utilizar el enfoque de estudio 1.
- Las mediciones enfocadas a obtener la severidad de contaminación del entorno (SPS), se deben realizar con un periodo de al menos un año, utilizar el enfoque 2 o 3.
- Para la estimación de la severidad de contaminación del entorno, es necesario realizar una investigación del clima y del ambiente para identificar y analizar todas las fuentes de contaminación. Por lo tanto, la estimación no es necesariamente un proceso inmediato y puede tomar varias semanas y hasta meses, se sugiere utilizar el enfoque 2 o 3.

- Para ensayos de laboratorios, el tiempo necesario pueden variar de semanas o meses dependiendo del tipo o escalas de los ensayos, utilizar el enfoque 2.

	Enfoque 1 (Experiencia del tiempo)	Enfoque 2 (Ensayos y mediciones)	Enfoque 3 (Mediciones y diseño)
Método	Uso de datos existentes o experiencia de la estación de pruebas para el mismo sitio o a un sitio con condiciones similares.	Medir o estimar la severidad de contaminación del entorno.	Medir o estimar la severidad de contaminación del entorno.
		Seleccionar un aislador candidato y sus características.	Usar estos datos para elegir el tipo y tamaño del aislador.
		Elegir el tipo de ensayo a aplicar según criterio.	
		Ajustar al aislador candidato.	
Datos de entrada	Requerimientos del sistema	Requerimientos del sistema	Requerimientos del sistema
	Condiciones ambientales	Condiciones ambientales	Condiciones ambientales
	Parámetros del aislador	Parámetros del aislador	Parámetros del aislador
	Historial de funcionamiento	Tiempo e investigaciones disponibles	Tiempo e investigaciones disponibles
Decisiones	¿El aislamiento existente satisface los requerimientos del proyecto y se piensa utilizar el mismo diseño?	¿Hay tiempo para medir la severidad de contaminación del entorno?	¿Hay tiempo para medir la severidad de contaminación del entorno?
	Si: Se usa el mismo diseño de aislamiento	Si: Medir	Si: Medir
	No: Se usa diferente diseño, material o tamaño de aislamiento. Usar la experiencia para preseleccionar la nueva solución.	No: Estimar	No: Estimar
		El tipo de contaminación determina el método de prueba de laboratorio	
		La severidad del entorno determina los valores de prueba	
Proceso de selección	Usar una guía de perfil y de fugas para adaptar los parámetros existentes a los nuevos elegidos usando el enfoque 2 o 3	Seleccionar un aislador candidato.	Usar la guía para seleccionar apropiadamente el perfil de acuerdo con el tipo de contaminación y clima.
		Probar si no existe datos del rendimiento ante contaminación	Usar la guía para elegir un material y tamaño según el nivel de contaminación y los factores de corrección para el diseño.
		Si es necesario, ajustar la selección de acuerdo con los resultados de las pruebas	
Precisión	Selección con buena precisión	Precisión varía según el grado de errores o el tipo de acceso a la evaluación de la contaminación y los supuestos o limitaciones de las pruebas de laboratorio elegidas.	Una solución posiblemente demasiado grande o sub dimensionada.
			La precisión varía según el grado de error o el tipo de dato de la contaminación y la aplicabilidad de los factores de corrección.

Tabla (4.1): Tres enfoques de estudio para la selección y dimensionamiento del perfil del aislador. [5].

4.2.2 Variables necesarias para la selección y dimensionamiento de aisladores

Para obtener un resultado exitoso en la selección de aisladores es necesario conocer las condiciones donde trabajará el equipo, es decir, los requerimientos del sistema, condiciones ambientales del sitio y los parámetros de aislamiento del fabricante, como se resume en la Tabla (4.2).

REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA	CONDICIONES AMBIENTALES	PARÁMETROS DEL AISLADOR
Tipo de tensión del sistema	Niveles y tipos de contaminación	Longitud total
Máxima tensión de operación a través del aislamiento	Lluvia, niebla, rocío, nieve y hielo, viento, tormentas, temperatura	Tipo, material, perfil
Parámetros de coordinación de aislamiento	Humedad, Altitud	Distancia de fuga, diámetros
Dimensiones, geometría impuestas, distancias	Rayos, terremotos, vandalismo	Distancia de arco
Línea viva de trabajo y prácticas de mantenimiento	Animales, crecimiento biológico	Diseño eléctrico y mecánico

Tabla (4.2): Parámetros de entrada para la selección y dimensionamiento de aisladores. [5]

4.2.2.1 Requerimientos del sistema:

A continuación, se dará una breve descripción de la información requerida del sistema.

- **Tipo de tensión del sistema (AC o DC):** Para un mismo nivel de contaminación las distancias de fuga necesarias son mayores para sistemas eléctricos en continua que para los alternos.
 - Tensión de operación máxima a través del aislamiento: Según la norma IEC 60038, en sistemas AC se caracteriza como la tensión más alta del equipo a U_m .
 - El aislamiento entre fase y tierra es solicitado por la tensión de fase $U_f = \frac{U_m}{\sqrt{3}}$.
 - El aislamiento entre fases es solicitado por la tensión entre líneas $U_{LL} = U_m$
 - En casos de sistemas en continua, usualmente la tensión máxima es igual a la tensión de línea. Para sistemas mixtos la tensión máxima será el valor R.M.S.
- **Sobretensiones:** Generalmente, no es necesario considerar el efecto de los transientes de las sobretensiones por su corta duración, sin embargo, si lo es cuando se producen sobretensiones temporales por una repentina liberación de carga o fallas en las líneas.
- **Requerimientos impuestos por el funcionamiento del sistema:** En algunos casos los aislamientos deben soportar tensiones más altas, por ejemplo, en las sincronizaciones tienen que soportar hasta 2,5 veces la tensión de fase. Otro ejemplo pueden ser la especificación del número máximo de descargas por contaminación permitidas por estación o por cada 100 km de línea durante un tiempo determinado o un tiempo máximo de interrupción después de un flameo.
- **Geometría impuesta y dimensiones:** Podrían existir condiciones especiales para los tipos y dimensiones de aislamiento, como lo son:
 - Líneas compactas y subestaciones
 - Posición inusual de un aislante
 - Diseño inusual de torres y subestaciones
 - Conductores aislados
 - Líneas o subestaciones con bajo impacto visual o de interiores

Además del dimensionamiento del aislador de acuerdo con las condiciones del sitio, los requisitos impuestos por el sistema podrían convertirse en el factor de control de los parámetros del aislador.

4.2.2.2 Contaminación según las condiciones ambientales

Según [5, 25] se pueden encontrar dos tipos de contaminación según las condiciones ambientales que podrían ocasionar una descarga disruptiva en aisladores, estas son:

- **Tipo A:** Este tipo de contaminación está compuesta, en su mayoría, por sólidos de carácter no solubles que al humedecerse comienzan a ser conductivos. Se caracteriza por la obtención de los indicadores; ESDD/NSDD y DDGIS/DDGIN, que representan el nivel de severidad.

Este tipo de contaminación es asociada con desiertos, áreas de contaminación industrial o lugares alejados de la costa. En algunos casos, la contaminación tipo A también puede encontrarse en áreas costeras donde se ha creado una costra de sal en la superficie del aislador, esta comienza a ser conductiva con el rocío, niebla, bruma o garuga.

La contaminación tipo A se compone por elementos solubles responsable de la conductividad de la capa y elementos no solubles, que crean el camino de baja resistividad.

- Contaminación soluble:
Es dividida entre sales altamente solubles (sales que se disuelven fácilmente con el agua) y sales con baja solubilidad (sales difíciles de disolver). La contaminación soluble es medida en términos de la densidad equivalente de sal depositada, su sigla en inglés ESDD y su unidad mg/cm^2 .
- Contaminación no soluble:
Esta contaminación no se disuelve en presencia del agua, por lo que se realiza una medición del peso en gramos y se representa con la densidad de elementos no solubles depositados, su sigla en inglés NSDD y su unidad es mg/cm^2 . Ejemplos de esta contaminación con la arena, polvo, aceites, etc.
- **Tipo B:** Esta contaminación se caracteriza cuando líquidos electrolitos, con una pequeña cantidad de material no soluble, se depositan sobre la superficie del aislador. Este tipo de contaminación puede ser determinado por las mediciones de corrientes de fuga.

Esta contaminación es asociada con las áreas costeras donde es común que el agua salada o la niebla salina se deposite en la superficie del aislador. Otras fuentes de contaminación tipo B son la lluvia ácida, bruma química, gases de fumigación de cultivos, etc.

En la norma IEC 60815-1 [5] se describen las características típicas de algunos ambientes reconociéndose las fuentes y el tipo de contaminación que las representa;

- **Ambientes desérticos:** Estas áreas son caracterizadas por suelos arenosos o dunas con periodos prolongados en condiciones secas. La característica de esta contaminación es su contenido alto en NSDD con sales poco solubles. La propagación de esta capa de contaminación es el viento y la limpieza natural de esta ocurre tras las lluvias poco frecuentes, estas mismas lluvias como también la presencia de rocío por cambios de temperaturas son responsables del flameo en estos aisladores.
- **Ambientes costeros:** Estas áreas están en la cercanía de las costas, pero en algunos casos dependen de la topografía del terreno ya que hay lugares que pueden estar a 50 km de lejanía al interior siendo afectados por vientos costeros. La contaminación es depositada principalmente por rocío, viento y niebla. El tiempo que toma en depositarse esta contaminación es relativamente corto, como en el caso de la niebla o el rocío, en algunos casos el viento puede retardar el tiempo de deposición de partículas. La característica principal es que estas capas de contaminación contienen sales de disolución rápida con un pequeño grado de componentes no solubles. La limpieza natural de los aisladores afectados por esta contaminación suele ser efectiva por la característica de sus sales.
- **Ambientes industriales:** Estas áreas están ubicadas en la cercanía de fuentes de contaminación industrial, solo afectan a un rango pequeño de instalaciones. La capa de contaminación puede contener partículas de carbón, depósitos metálicos, yeso o gases como NO_x o SO_x . Por lo general la capa contiene un alto

contenido de partículas no solubles y la efectividad de la limpieza natural depende del tipo de contaminación industrial.

- Ambientes de agricultura: Estas áreas están situadas en la cercanía de la actividad agrícola. Se caracterizan por contener partículas del arado o por fumigación de los cultivos. La capa de contaminación depositada contiene una combinación de sales de disolución rápida y lenta, además muchas veces contienen partículas de excrementos de animales. Generalmente el NSDD de este tipo de contaminación es medio-alto pero la limpieza natural es efectiva por el alto contenido de sales de rápida disolución.
- Ambientes de lugares interiores: Estas son áreas de bajo nivel de contaminación, sin una clara identificación de fuentes de contaminación.

4.2.2.3 *Parámetros del aislador:*

Para la elección del tipo de aislador deben considerarse fundamentalmente las características eléctricas y mecánicas. Principalmente los esfuerzos mecánicos corresponden a los pesos de las líneas que deben soportar los aisladores. Desde el punto de vista eléctrico, el aislador debe evitar pasar la corriente del conductor al soporte conectado a tierra.

Las geometrías de los aisladores obedecen ciertos aspectos que pueden ser resumidos a continuación [2]:

- Se deben equilibrar las solicitaciones transversales y longitudinales en la frontera, de modo que ninguna de ellas exagere su nivel. Ello depende básicamente de la **forma del perfil** y de la **permitividad del material aislante**. Como se expone en [2], en la frontera la dirección tangencial del campo eléctrico es igual en el sólido y en el aire, esta componente permite que los puntos de descarga localizada se unan y se logre la ruptura dieléctrica, el equilibrio de las solicitaciones transversales por la forma del aislador mitigaría hasta cierto punto que se ocasione este suceso.
- Se alargan la frontera lo más posible, con el mínimo gasto del material, de esta manera la contaminación tendrá un efecto menos pernicioso si la **distancia de fuga** es larga.
- Con las faldas se aumenta la zona protegida de los aisladores con el fin de mantener algunos puntos libres de contaminación. Además, se permite el rápido escurrimiento del agua, ya que bajo condición de lluvia es necesario evitar la permanencia de la contaminación húmeda sobre la frontera.

Parámetros eléctricos y mecánicos para considerar en la elección de aisladores [6, 7]:

- Parámetros eléctricos
 - Descargas disruptivas o de contorno: se produce en la frontera aislamiento-aire, generalmente se realizan ensayos para saber la tensión máxima en seco y en condiciones de lluvia.
 - Tensión de perforación: Es la tensión capaz de producir la ruptura del aislador en un determinado punto como consecuencia de una descarga transversal a través del material, para eso es necesario diseñar el aislante con un espesor específico según la norma IEC 60383-1 [7].
 - Tensión soportada crítica: Es la tensión en la que comienzan a formarse arcos superficiales entre el conductor y el soporte del aislador.
 - Tensión nominal de servicio: Es la tensión determinada por la red.
- Parámetros mecánicos
 - Carga electromecánica máxima: Es la carga mecánica del conductor capaz de producir en el aislador averías que ocasionan descargas eléctricas.
 - Carga máxima de servicio: Es la carga que soporta el aislador en condiciones normales de funcionamiento de la línea.

4.3 SEVERIDAD DE LA CONTAMINACIÓN

Para determinar la severidad de contaminación del entorno, se deben analizar los componentes que se han acumulado en la superficie del aislador mediante la medición de los siguientes parámetros [5, 24]:

- ESDD y NSDD para la contaminación tipo A
- Salinidad equivalente del entorno (SES) para la contaminación tipo B
- DDGIS y DDGIN para la combinación de ambos tipos de contaminación

Para aisladores contaminados naturalmente la severidad de la contaminación es estudiada en términos de;

- ESDD y NSDD para la contaminación de tipo A
- Conductividad superficial para la contaminación del tipo B

Para ensayos de laboratorios con contaminación artificial, la severidad de contaminación se estudia en términos de;

- SDD y NSDD para el método de capa sólida
- Salinidad de niebla para el método de niebla salina medida en kg/m^3 .

4.3.1 Evaluación de la severidad de la contaminación del entorno SPS

La severidad de la contaminación del entorno o SPS es el máximo valor de ESDD, NSDD, SES, DDGIS y DDGIN, medidos según los métodos mostrados en la norma IEC 60815-1 [5] y registrados por un periodo de tiempo apreciable, es decir, uno o más años con ciertos intervalos de medición, que pueden ser cada mes, cada seis meses, cada año, etc. La frecuencia de medición se puede elegir de acuerdo con el conocimiento del clima y las condiciones ambientales del lugar. Por ejemplo, en el caso que ocurra lluvia en periodos de medición, el procedimiento debería ser repetido por un intervalo apropiado para determinar el efecto del lavado natural. En efecto, el SPS es entonces el mayor valor registrado durante las series de mediciones.

La información de la contaminación del entorno se puede adquirir según los siguientes puntos; [5]

- Mediciones in situ del lugar
- Datos del comportamiento de aisladores que ya están en servicio en líneas y subestaciones.
- Simulaciones que calculan los niveles de contaminación de climas y otros parámetros ambientales.
- Si no existen datos de los tres puntos anteriores, se puede realizar cualitativamente a partir de las indicaciones de la Tabla (4.5)

Para cualquiera de las formas de obtención de la información, se deben medir los datos de lluvia y humedad del entorno utilizando equipos meteorológicos apropiados.

Los eventos de contaminación son a menudo estacionales y están relacionados con el clima, por lo tanto, es necesario un periodo de medición de al menos un año para tener en cuenta todos estos efectos. Es posible que sea necesario periodos más largos para considerar eventos excepcionales de contaminación e identificarlos, como en el caso de áreas desérticas, donde se recomiendan mediciones con un periodo de tiempo mayores a tres años.

4.3.1.1 Mediciones in situ:

1. Para contaminación tipo A: medir los indicadores ESDD y NSDD según lo acumulado en la superficie del aislador. No se requiere equipos costosos y puede realizarse fácilmente tanto en terreno como en laboratorios [23, 24]. Para muchos estudios, la medición del ESDD y NSDD caracterizan la severidad de la contaminación del entorno.
2. Para la contaminación tipo B: medir la corriente de fuga o la conductancia a través de un monitor.
3. Conteo del número total de flameos de aisladores de varias longitudes. Se requiere la instalación de centros de pruebas costosos, pero puede obtenerse información confiable de los aisladores de prueba.
4. Medición de corrientes de fuga o conductancia de los aisladores de muestra.

La precisión de las mediciones depende de la frecuencia de la medición y de la duración del estudio. Sin embargo, la precisión puede mejorarse al utilizar dos o más métodos combinados.

Los dos últimos métodos necesitan una fuente de alimentación y un equipo de grabación especial, estos métodos tienen la ventaja, ya que es posible controlar continuamente los efectos de la contaminación y al relacionar los datos de las pruebas se puede identificar si los niveles de contaminación son seguros o si es necesario un lavado u otro método paliativo. Estos métodos permiten la determinación directa de la distancia de fuga específica unificada o en su sigla en inglés USCD.

4.3.2 Niveles de severidad de la contaminación del entorno

Con propósitos de estandarización, en la norma IEC 60815-1 [5] se definieron cualitativamente cinco niveles de contaminación, desde contaminación muy leve a muy fuerte:

- a. Muy Leve
- b. Leve
- c. Medio
- d. Fuerte
- e. Muy fuerte

4.3.2.1 Contaminación tipo A

En la Figura (4.2) y Figura (4.3) se muestra la distribución gráfica de ESDD y NSDD para aisladores tipo pin/campana y aisladores tipo barra larga respectivamente, identificándose por rangos los niveles de SPS. Esta información fue obtenida por la recopilación de mediciones, experiencias e investigaciones de ambientes, y solo pueden ser aplicados a los aisladores de referencia propuestos en la norma IEC 60815-1 [5], a menos que se tenga bastante información respecto para otros tipos y modelos de aisladores, donde se podrán adaptar las informaciones entregadas en las figuras.

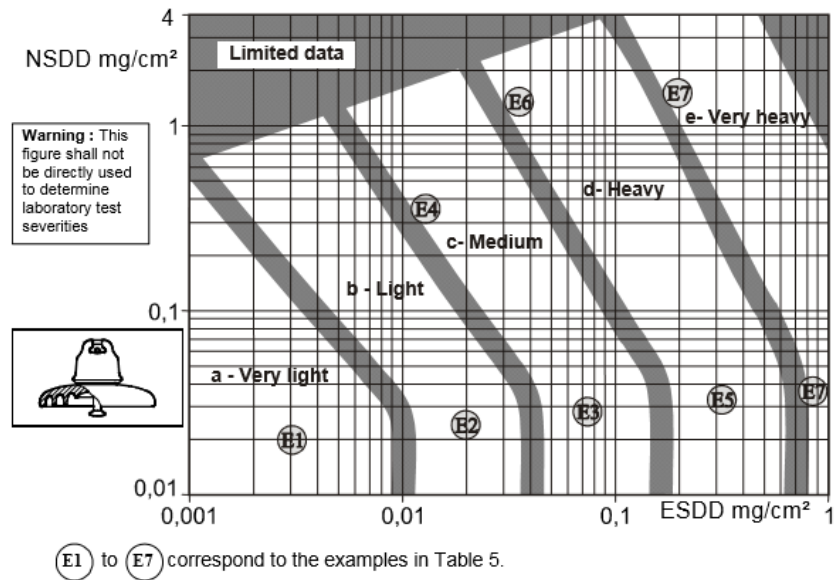


Figura (4.2): Relación entre ESDD/NSDD y el SPS para aislador de referencia tipo pin y campana U120B. [5]

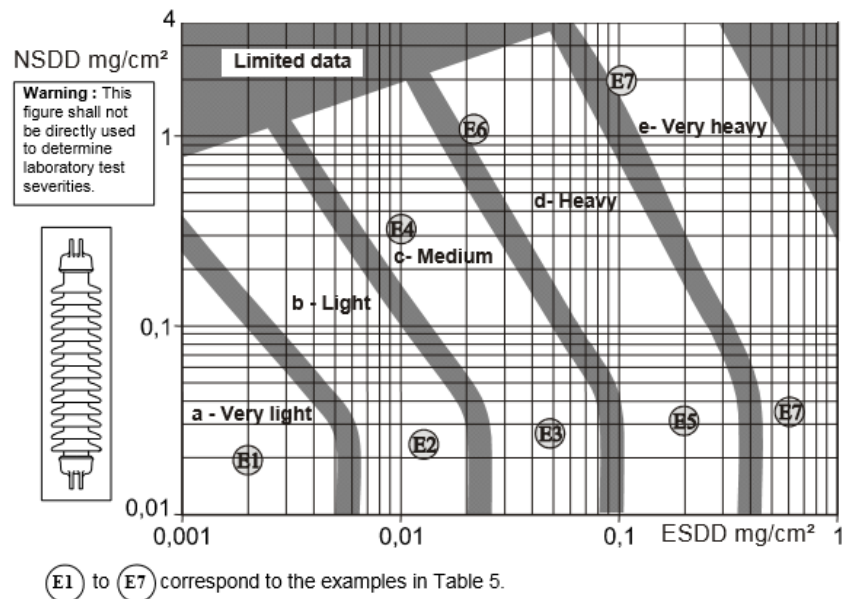


Figura (4.3): Relación entre ESDD/NSDD y el SPS para aislador de referencia tipo barra larga L100. [5]

Para severidades de contaminación extremas no es posible asegurar un desempeño satisfactorio para los aisladores, como se pueden ver en la Figura (4.2) y Figura (4.3), para valores altos del cociente obtenidos dividiendo el NSDD por ESDD existen muy pocos registros, por esta razón han sido sombreadas las esquinas superiores derecha e izquierda. Se recomienda tener criterio al estar trabajando en estas áreas, y es necesario aplicar medidas paliativas.

4.3.2.2 Contaminación tipo B

La norma IEC 60815-1 [5] propone una distribución del SPS según los valores medidos de la salinidad equivalente del entorno (SES), tal como se aprecia en la Figura (4.4). Esta figura se puede aplicar para los aisladores de referencia tipo pin y campana y tipo barra larga.

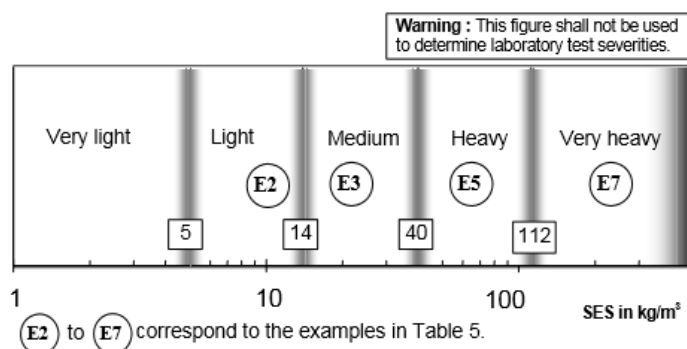


Figura (4.4): Relación entre la salinidad específica del entorno (SES) y el SPS para aisladores de referencia tipo pin, campana y barra larga. [5]

4.3.2.3 Contaminación mixta

Cuando la contaminación es de tipo mixta, es decir una combinación de tipo A y B, la norma IEC 60815-1 [5] propone utilizar una relación entre la medición del DDDG y el SPS como se puede ver en la Tabla (4.3) y Tabla (4.4).

Índice de contaminación del indicador direccional de polvo depositado (DDDG) ($\mu S/cm$), Tomar el valor más alto		Nivel de severidad de contaminación del entorno	
Valor promedio mensual a lo largo de un año	Máximo mensual superior a un año		
< 25	< 50	a	Muy Leve
25 a 75	50 a 175	b	Leve
76 a 200	176 a 500	c	Media
201 a 350	501 a 850	d	Fuerte
> 350	> 850	e	Muy Fuerte

Tabla (4.3): Índice de contaminación del indicador direccional de polvo depositado (DDDG) en relación con los niveles de SPS. [5]

Medidor direccional de polvo depositado NSD (gramos) Tomar el valor más alto		Corrección de la clase de gravedad de la contaminación de entorno
Valor promedio mensual a lo largo de un año	Máximo mensual superior a un año	
< 0,5	< 1,5	Ninguna
0,5 a 1,0	1,5 a 2,5	Aumentar en una clase
> 1,0	> 2,5	Aumentar de una a dos clases y considerar método paliativo

Tabla (4.4): Corrección de los niveles de severidad de contaminación del entorno como función de los niveles de DDDG NSD. [5]

4.3.2.4 Estimación cualitativa del SPS

En la Tabla (4.5) se muestran descripciones de algunos entornos típicos y su relación con el nivel de contaminación. Como se expresa en la norma IEC 60815-1 [5], esta tabla solo debe usarse para tener una clasificación aproximada del entorno, es decir, cuando se quiera utilizar el enfoque de estudio 3 de la Tabla (4.1). Los ejemplos desde E1 a E7 de la Tabla (4.5), son representados en la Figura (4.2), Figura (4.3) y Figura (4.4) con el fin de mostrar los niveles típicos de SPS según el medio.

Ejemplo	Descripción típica del ambiente
E1	> 50 km de distancia del mar, desierto o tierras secas abiertas (a)
	> 10 km de distancia de fuentes de contaminación artificial. (b)
	Para distancias más cortas de las fuentes mencionadas, pero;
	Con viento predominante no directamente de estas fuentes de contaminación.
	Con lavado mensual de lluvia.
E2	De 10 a 50 km de distancia del mar, desiertos o tierras seca abiertas. (a)
	de 5 a 10 km de distancia de fuentes de contaminación artificial. (b)
	Dentro de una distancia menores a E1 de las fuentes de contaminación, pero;
	Con viento predominante no directamente de estas fuentes de contaminación.
	Con lavado mensual de lluvia.
E3	De 3 a 10 km de distancia del mar, desiertos o tierras seca abiertas. (c)
	de 1 a 5 km de distancia de fuentes de contaminación artificial. (b)
	Dentro de una distancia menores a E2 de las fuentes de contaminación, pero;
	Con viento predominante no directamente de estas fuentes de contaminación.
	Con lavado mensual de lluvia.
E4	Más lejos que las fuentes de contaminación que se mencionan en E3, pero;
	Con niebla densa (o llovizna) que menudo ocurre después de una larga estación de acumulación de contaminación seca (semanas o meses).
	Se produce una fuerte lluvia de alta conductividad.
	Hay un nivel alto de NSDD, entre 5 a 10 veces el ESDD.
E5	A 3 km de distancia del mar, un desierto o tierras secas abiertas. (c)
	A 1 km de distancia de las fuentes de contaminación artificial. (b)
E6	Con mayor distancia de las fuentes nombradas en E5, pero;
	Con niebla densa (o llovizna) que menudo ocurre después de una larga estación de acumulación de contaminación seca (semanas o meses).
	Hay un nivel alto de NSDD, entre 5 a 10 veces el ESDD.
E7	Dentro de las mismas distancias de las fuentes de contaminación que se especifican, llamadas áreas "fuertes", y;
	Sometidos directamente a niebla marina o niebla salina densa.
	Directamente sometidos a contaminantes de alta conductividad, polvo tipo cemento con alta densidad y con humedad frecuente provocada por lloviznas o niebla.
	Áreas desérticas con rápida acumulación de arena y sal, con condensación regular.
(a) El ESDD durante una tormenta puede alcanzar niveles más altos	
(b) En la cercanía de una gran ciudad se tendrá una influencia a una distancia mayor, es decir, la distancia especificada para la cercanía del mar, desiertos o tierras secas abiertas.	
(c) Depende de la topografía del área costera y la intensidad del viento	

Tabla (4.5): Estimación del SPS según ambientes típicos. [5]

4.4 DIMENSIONAMIENTO DE LA DISTANCIA DE FUGA SEGÚN SPS

4.4.1 Obtención del RUSCD

Con la información obtenida hasta este punto respecto a los niveles de severidad de contaminación del entorno, se podrá determinar la distancia de fuga unificada de referencia o RUSCD para aisladores de vidrio o cerámica [3]. En la Figura (4.5) se muestra la relación entre el nivel del SPS y la RUSCD.

Para los casos que se utilice el enfoque de estudio 3 de la Tabla (4.1), las barras del gráfico representarán el requisito mínimo para cada nivel de SPS. En los casos que las mediciones del SPS sean exactas (enfoque de estudio 1 y 2) en la norma IEC 60815-2 [3] se recomienda utilizar el RUSCD representado por la curva.

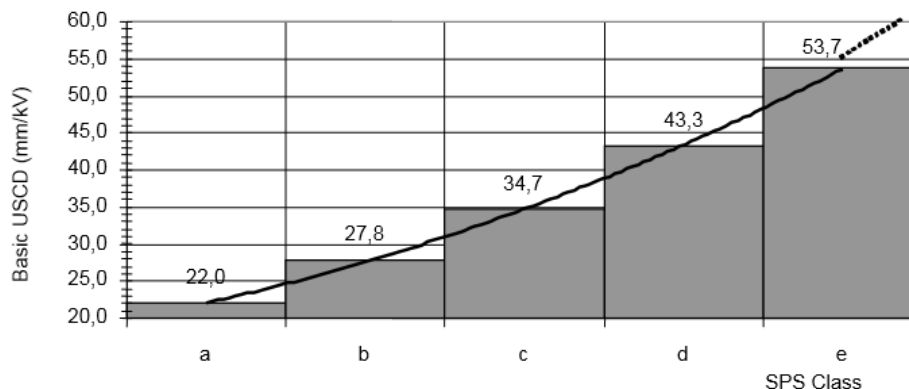


Figura (4.5): Distancia de fuga unificada de referencia o RUSCD respecto al nivel de severidad de contaminación o SPS. [3]

4.4.2 Selección del perfil

La elección y el rendimiento de los aisladores para ambientes contaminados se expresa generalmente en términos de la distancia de fuga necesaria para resistir las condiciones de contaminación bajo una tensión aplicada. Sin embargo, esta característica no representa toda la información necesitada para la selección del aislador, por lo que faltaría determinar, por ejemplo, el número de aisladores en una cadena, la distancia de arco mínima de los aisladores que la componen y el material.

La elección del material del aislante está determinada por las restricciones; ambientales, del sistema, política o económicas del usuario. En este trabajo sólo se revisarán aisladores fabricados con materiales de vidrio y porcelana haciendo reseña a lo que se describen en la norma IEC 60815-2 [3]. En caso de requerir información para aisladores poliméricos se sugiere revisar el trabajo presentado en CIGRE 158 [25].

La elección del perfil del aislador va a depender de la posición del montaje de la unidad o la cadena, la que puede ser vertical u horizontal. Además, se necesita saber cuánto mejor o peor es su comportamiento en ambientes específicos (ver sección 4.2.1.) respecto al perfil estándar de referencia presentado en la Figura (4.6), asumiendo como punto de comparación que tengan; mismas distancias de fuga o mismas longitudes de aislamiento.

A modo de simplificar, en este punto se mostrará sólo el aislador seleccionado por este trabajo de memoria, sin embargo, se ha desarrollado el **apéndice A** para exponer todos los perfiles de aisladores y sus características a la hora de la selección.

4.4.3 Cálculo de la distancia de fuga

La selección del perfil de este trabajo es el estándar de referencia mostrado en la Figura (4.6). Para calcular la distancia de fuga de los aisladores, primero se deben determinar los factores de corrección del RUSCD, factores que dependerán de la forma del perfil y de la altitud de operación [3], para luego calcular según la ecuación (21). Para el perfil de referencia el factor k_a será igual a uno si la altitud de operación es a nivel del mar.

$$USCD = RUSCD * k_a \quad (21)$$

Finalmente, para obtener la distancia de fuga mínima es necesario conocer la tensión del sistema que deberá soportar el aislador. En Chile las tensiones están determinadas por la NSEG 8 E.N. 75 [28] y se clasifican según lo mostrado en la Tabla (4.6).

Tipo de instalación	Tensión máxima de equipos [kV]	Tensión nominal de sistemas [kV]
Media tensión	2,75	2,4
	3,6	3,3
	5	4,16
	7,2	6,6
	15	13,2
	25,8	23
	36	33
	48,3	44
Alta tensión	72,5	66
	123	110
	170	154
	245	220
Extra alta tensión	420	380
	525	500

Tabla (4.6): Clasificación de los niveles de tensión en Chile. [28]

Ahora, la distancia de fuga mínima (D.F.) se obtiene multiplicando el USCD por la tensión requerida del sistema, como se muestra en la ecuación (22).

$$D.F. = V_{m\acute{a}x} * USCD \quad (22)$$

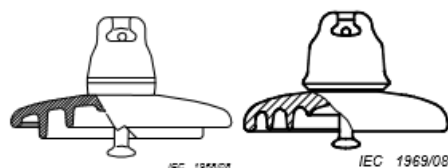


Figura (4.6): Perfil estándar de referencia de aisladores de capa. [3]

4.5 MÉTODO DE CÁLCULO PARA OBTENCIÓN DEL ESDD Y NSDD

4.5.1 Introducción

Como se ha revisado hasta ahora, la severidad de contaminación del entorno para contaminación natural se puede determinar obteniendo la densidad equivalente de sal depositada (ESDD) y la densidad de materiales no solubles depositadas en la superficie del aislador (NSDD).

Los métodos de obtención de estos valores se realizan analizando las muestras que se consiguen de los aisladores contaminados. En el **apéndice B** se muestra el procedimiento de lavado para obtención de la contaminación según la norma IEC 60815-1.

Luego del lavado de los aisladores se procede a realizar el cálculo para determinar los valores de ESDD y NSDD.

4.5.2 Cálculo del ESDD

En primera instancia para realizar este cálculo es necesario conocer los valores de conductividad y temperatura de la muestra de contaminación recogida.

Para medir la conductividad, se necesita agitar por un periodo de tiempo para que las sales que componen la muestra se logren disolver. Siguiendo con el procedimiento se debe realizar una corrección de la conductividad para normalizarla a 20°C, la corrección se realiza de acuerdo con la ecuación (23) obtenida de la norma IEC 60507 [24].

$$\sigma_{20} = \sigma_{\theta} [1 - b(\theta - 20)] \quad (23)$$

Donde;

θ es la temperatura en grados Celsius de la solución [°C]

σ_{θ} es la conductividad volumétrica a temperatura θ en [S/m]

σ_{20} es la conductividad volumétrica a la temperatura de 20° C en [S/m]

b es el factor dependiente de la temperatura θ , obtenida de la ecuación (24) y de la Figura (4.7)

$$b = -3.200 \times 10^{-8} * \theta^3 + 1.032 \times 10^{-5} * \theta^2 - 8.272 \times 10^{-4} * \theta + 3.544 \times 10^{-2} \quad (24)$$

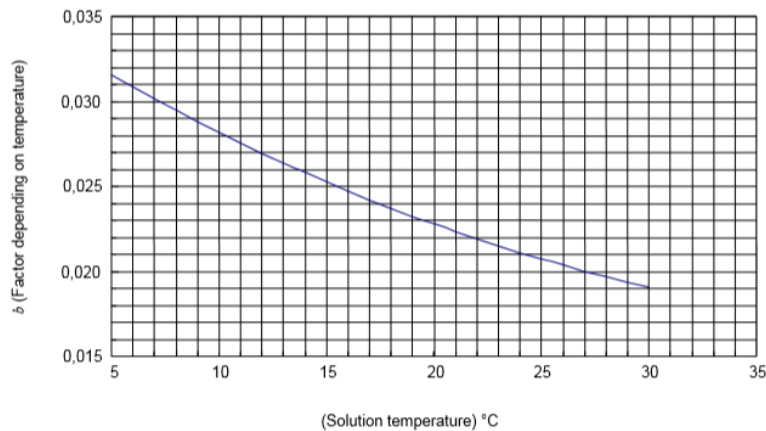


Figura (4.7): Valor de b. [24]

Luego de haber obtenido la conductividad corregida a 20°C es necesario conseguir el valor de la salinidad de acuerdo con la ecuación (25), siempre y cuando la conductividad σ_{20} esté dentro del rango de 0,004 a 0,4 [S/m] según la norma IEC 60507 [24].

$$S_a = (5,7 * \sigma_{20})^{1,03} \quad (25)$$

Una vez obtenido el resultado de la ecuación (25), es posible reemplazarlo en la ecuación (26) para obtener la densidad equivalente de sal depositada (ESDD).

$$ESDD = \frac{S_a * V}{A} \quad (26)$$

Donde;

$ESDD$ es la densidad equivalente de sales depositadas [mg/cm^2]

S_a es la salinidad medida en [kg/m^3]

V es el volumen de agua destilada en [cm^3]

A es el área de la superficie del aislador donde se colectó la contaminación en [cm^2]

4.5.3 Cálculo del NSDD

Después de la medición de ESDD se debe filtrar el agua destilada utilizando un embudo, depositando el sólido en un filtro de papel. Una vez realizada esta operación se debe secar el papel con la contaminación, para finalmente pesar el contenido. El proceso es ilustrado en la Figura (4.8).

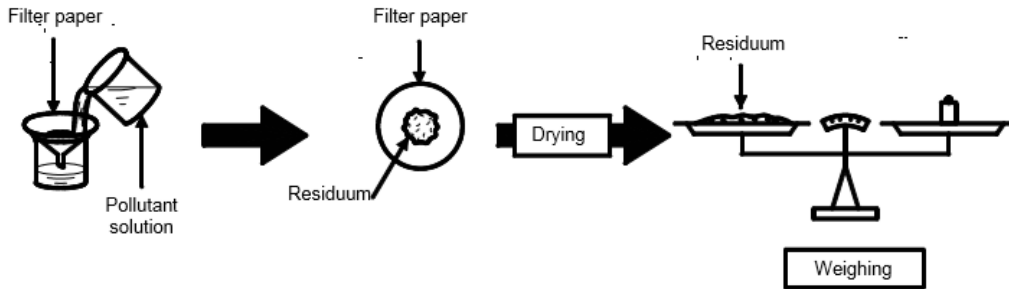


Figura (4.8): Procedimiento para obtener el peso de la contaminación. [5]

Una vez que se tenga el peso del material no soluble se podrá aplicar la ecuación (27) para obtener la densidad de no solubles depositados (NSDD).

$$NSDD = 1000 * \frac{W_f - W_i}{A} \quad (27)$$

Donde;

$NSDD$ es la densidad de no solubles depositados [mg/cm^2]

W_f es la suma del peso del material sólido no soluble y el peso del filtro de papel [g]

W_i es el peso del filtro de papel [g]

A es el área de la superficie del aislador donde se recolectó la contaminación en [cm^2]

En el **apéndice C** se mostrará algunos ejemplos de la medición del ESDD y NSDD de un aislador con contaminación natural y se evaluará la severidad del entorno.

4.6 CONSTRUCCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN TIPO A DE CAPA SÓLIDA PARA ENSAYOS

Para realizar pruebas en laboratorios y simular el comportamiento de la contaminación tipo A, es necesario crear una capa sólida compuesta por la **combinación materiales solubles y materiales inertes o no solubles**, que se depositarán finalmente sobre la superficie del aislador, la que bajo ciertas condiciones ambientales comenzará a conducir una corriente de fuga.

Los materiales solubles generalmente son sales minerales, iones, ácidos o alcoholes, los que al entrar en contacto con el agua se disuelven formando una película conductiva, para el caso de laboratorios se puede utilizar la sal de mesa, la relación con la conductividad de la mezcla dependerá de la concentración de la solución [24].

Según la norma IEC 60507 [24] los principales materiales inertes usados para realizar pruebas de laboratorio para la contaminación tipo A son el Kieselguhr, Caolín y el Tonoko. En la Tabla (4.7) se puede apreciar las características de la composición de cada uno de estos materiales.

Tipo de material inerte	Porcentaje de la composición del peso [%]				Granulometría (Distribución acumulativa) [μm]			Conductividad volumétrica σ_{20} [S/m]
	SiO_2	Al_2O_3	FE_2O_3	H_2O	16%	50%	85%	
Kieselguhr	70 a 90	5 a 25	0,5 a 6	7 a 14	1 a 10	10 a 20	20 a 50	0,0015 a 0,02
Kaolin	40 a 50	30 a 40	0,3 a 2	7 a 14	0,5 a 2	2 a 8	8 a 25	0,0015 a 0,02
Tonoko	60 a 70	10 a 20	4 a 8	-	1 a 3	5 a 10	15 a 30	0,002 a 0,01

Tabla (4.7): Principales características de los materiales inertes usados para la capa sólida en suspensión. [24]

Para el caso del presente trabajo el material no soluble a utilizar es el **caolín o arcilla blanca**, ya que este se puede encontrar fácilmente en los mercados y es económicamente accesible.

4.7 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS PARA PROBLEMAS ELECTROSTÁTICOS

4.7.1 Introducción

El MEF o método de elementos finitos es un método de aproximación para solucionar problemas continuos representados por ecuaciones diferenciales y sus condiciones de frontera. El modelo, llamado continuo, es dividido en un número finito de elementos físicos que poseen las características del medio, esta división es conocida como proceso de discretización. Al tener el continuo discretizado, se crea una ecuación matricial en función de los valores de los nodos de cada elemento finito, esta ecuación regirá la característica del sistema y la solución a determinar será la suma de todas las soluciones parciales.

En resumen, los pasos para la resolución del MEF son los siguientes [29]:

1. Dividir el modelo continuo en elementos finitos: Triángulos (3 nodos), tetraedros (4 nodos), etc.
2. Deducir la ecuación que describe el potencial dentro de un elemento finito.
3. Plantear las ecuaciones que dan las condiciones de ajuste de las soluciones en las fronteras de los elementos finitos.
4. Calcular los potenciales en los nodos de cada elemento mediante algunos de los métodos que luego se mencionarán.
5. Resolver las ecuaciones algebraicas planteadas.

4.7.2 Discretización del modelo

Para el caso de este trabajo se considerarán elementos triangulares para la discretización del modelo continuo como se puede ver en la Figura (4.9).

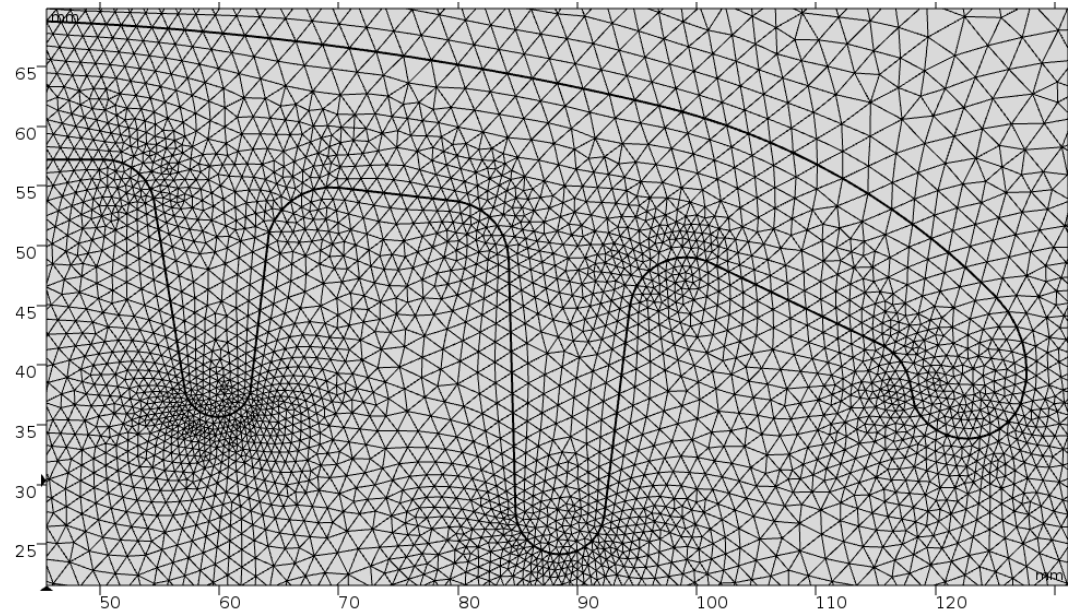


Figura (4.9): Malla de elementos finitos formada por elementos triangulares [Elaboración propia]

Cada elemento “e”, tendrá dentro un potencial eléctrico ϕ^e , el cual estará completamente definido por la suma de los potenciales de sus nodos, representado por la ecuación (28) e ilustrado en la Figura (4.10). Mediante aproximaciones de primer orden, se obtienen ecuaciones lineales para cada nodo de los elementos.

$$\phi^e(x, y) = \sum_{m=1}^l \phi_m^e(x, y) \quad (28)$$

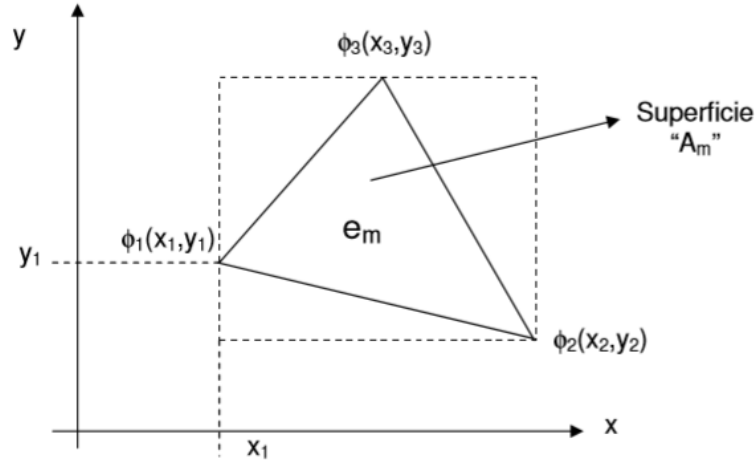


Figura (4.10): Representación elemento finito triangular. [29]

Los nodos de cada elemento tendrán un potencial en el plano x-y de la forma de la ecuación (29), con las constantes β_i^{em} no nulas y distintas para todos los elementos;

$$\phi_m^e(x, y) = \beta_1^{em} + \beta_2^{em}x + \beta_3^{em}y \quad (29)$$

Después de un desarrollo algebraico para encontrar las constantes y los potenciales en los nodos se obtiene la siguiente relación matricial del potencial eléctrico dentro del elemento finito “e”, representada en la ecuación (30);

$$\phi^e = [N^e] * [\phi_m^e] \quad (30)$$

Donde $[N^e]$ es llamada matriz de factores de forma, a este proceso se le llama **discretización del modelo**.

4.7.3 Aplicación del cálculo variacional

Para la aplicación del cálculo variacional, se realizará una minimización de la energía potencial almacenada (ecuación (31)) sobre cada elemento del modelo discretizado de punto anterior, entonces esta expresión pasará a ser llamada “funcional”. Mediante este proceso se obtendrá el recorrido del potencial eléctrico para toda la región de cálculo. [29, 30]

La funcional para caso electrostático, se obtiene al relacionar la energía almacenada con el campo eléctrico representado con el gradiente del potencial de la ecuación (32). En coordenadas cartesianas, al elevar al cuadrado el campo eléctrico, se transforma en el Laplaciano del potencial tal como se muestra en la ecuación (33).

$$W_e = \int_S \frac{1}{2} \epsilon \vec{E}^2 dS \quad (31)$$

$$\vec{E} = -\nabla\phi \quad (32)$$

$$E^2 = \frac{\partial^2\phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial y^2} \quad (33)$$

Ahora, al desarrollar algebraicamente el reemplazo de las ecuaciones (30) y (33) en (31), se obtiene finalmente la funcional del problema electrostático, representado en la ecuación (34) [30].

$$W_e = \frac{1}{2} \varepsilon [\phi^e]^t [K] [\phi^e] \quad (34)$$

Aplicando el cálculo variacional sobre la funcional W_e , se buscarán los mínimos de la energía que hay en cada elemento, esto se obtiene al derivar por el diferencial del potencial del elemento ϕ^e e igualar a 0, como se muestra en la ecuación (35).

$$\frac{\partial W_e}{\partial \phi_k} = 0, k = 1, 2, \dots, n \quad (35)$$

4.7.4 Condiciones de borde

Con el proceso anterior de minimización se obtendrán las ecuaciones algebraicas que serán empleadas para encontrar las soluciones de los potenciales de cada elemento cuando sean igualadas con las condiciones de borde. El problema de borde del sistema puede ser de tipo Dirichlet, es decir, conociendo un valor de potencial, o de tipo Neumann en donde la condición se satisface automáticamente al desarrollar el cálculo variacional [29]. Para el caso específico de este proyecto, el cual trata de un problema electrostático, se utilizarán las condiciones de borde tipo Dirichlet, con valor conocido ϕ_0 , como se puede apreciar en la igualdad (36).

$$R(\phi) = \phi_0 \quad (36)$$

Finalmente, será expresado el sistema de ecuaciones de la forma matricial de la ecuación (37), donde $[\phi_f]$ son los potenciales no conocidos o libres, $[K_{ff}]^{-1}[K_{fp}]$ es la matriz que contiene las características del medio y $[\phi_p]$ son los potenciales conocidos por las condiciones de borde.

$$[\phi_f] = [K_{ff}]^{-1}[K_{fp}][\phi_p] \quad (37)$$

CAPÍTULO 5: DEFINICIÓN DE PARÁMETROS

En este capítulo se desarrollan los conceptos modulares de este proyecto.

5.1 MODELOS Y DISEÑOS DE AISLADORES

5.1.1 Introducción

La cantidad de tipos de aisladores es variada tanto en los materiales constructivos como en los parámetros de diseño, como se puede ver en la Figura (5.1) existen aisladores tipo suspensión de campana, tipo pin, tipo barra, etc. Además, los materiales del aislamiento pueden ser de porcelana, cerámica, vidrio o poliméricos.

Los parámetros constructivos de cada uno de estos modelos son regidos por normas internacionales, como ANSI e IEC, que determinan las clases del aislamiento según características mecánicas y eléctricas.

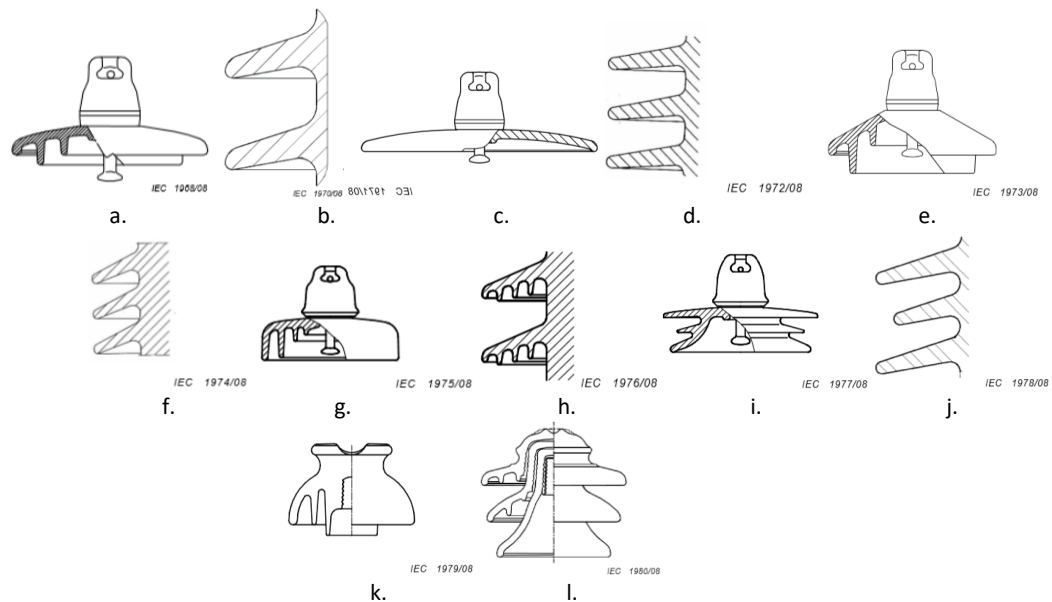


Figura (5.1): Tipos de perfiles de aisladores eléctricos para tensiones sobre 1kV, a. suspensión estándar tipo capa, b. Barra larga de aleta estándar, c. Aerodinámico, d. Barra larga aleta aerodinámica, e. Antiniebla, f. Barra larga con aleta antiniebla, g. Falda profunda, h. Barra larga de aleta con falda profunda, i. Disco de aletas alternadas, j. Barra larga con aletas largo alternado, k. Pin de pieza única, l. Pin multi piezas. [3]

5.1.2 Norma eléctrica para el diseño de aisladores de suspensión para tensiones sobre 1kV

En este proyecto de título se utilizará la norma IEC 60305 [6] para diseñar un aislador de vidrio de suspensión con anclaje de bola tipo campana. Los parámetros elegidos son mostrados en la Tabla (5.1) y Figura (5.2).

En la columna **Denominación de la clase** se identifica mediante un código los parámetros del diseño, la letra U quiere decir unidad, le sigue un número que indica la carga mecánica o electromecánica máxima de falla en kilonewtons. Las letras B o C especifican si el aislador es de tipo bola (Ball) o grillete (Clevis), respectivamente. Continúa con una letra S o L, que especifica si la distancia de arco es corta (Short) o larga (Long), finalmente la letra P indica si la distancia de fuga es aumentada como método paliativo para áreas de contaminación. Estas características pueden ser ubicadas en la Figura (5.2).

Denominación de la clase	Carga mecánica o electromecánica máxima de falla kN	Diámetro nominal máximo de la parte aislante D mm	Espaciamiento nominal P mm	Distancia de fuga nominal mínima mm	Acoplamiento estándar de acuerdo con la IEC 60120 d1
U 120 B	120	255	146	295	16
U 120 B P	120	280	146	440	16

Tabla (5.1): Parámetros elegidos del aislador de referencia en base a la norma IEC 60305. [6]

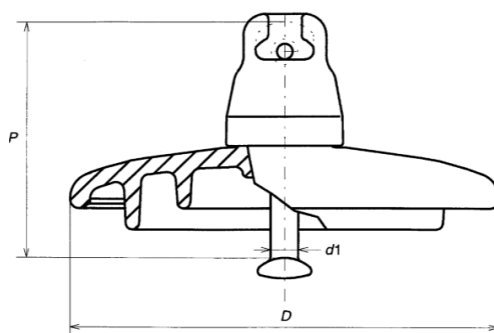


Figura (5.2): Aislador tipo campana de suspensión de bola. [6]

5.1.3 Diseños de aisladores por fabricantes

A continuación, se expondrán las características principales que ofrecen algunos fabricantes de aislamientos en el mercado para el aislador de clase U120B de la Tabla (5.1). Como se aprecia en la Tabla (5.2) se pueden contrastar algunas diferencias constructivas entre fabricantes de la segunda columna y las dos últimas, esto ocurre por el tipo de norma utilizada, pero todos finalmente diseñan tomando características bases [31, 32, 33].

Características constructivas	Fabricante GAMMA	Fabricante GRANTEL	Fabricante SGD
Clase	ANSI C29.2: 52.3	IEC 60305: U 120 B	IEC 60305: U 120 B
Carga mínima de rotura mecánica [kN]	111	120	120
Datos dimensionales			
Paso (S) [mm]	146	146	146
Diámetro (D) [mm]	255	255	255
Distancia de fuga [mm]	300	330	330
Valores eléctricos según ensayos			
Tensión soportada a impulso atmosférico [kV]	125	100	100
Tensión soportada en seco [kV]	80	70	70
Tensión soportada bajo lluvia [kV]	50	40	40
Tensión de perforación a frecuencia industrial [kV]	110	130	130

Tabla (5.2): Comparación y compilado de valores constructivos del aislador diseñado según fabricante para distintas normas de diseño. [31, 32, 33]

5.1.4 Cálculo de la tensión máxima según la distancia de fuga y RUSCD.

Dentro del punto 4.4. se expusieron los temas sobre el dimensionamiento de la distancia de fuga de los aisladores según el nivel de severidad de contaminación del entorno. Basándonos en esta información es necesario determinar el valor del RUSCD y la tensión a utilizar para poder definir la distancia de fuga.

Entre los parámetros del perfil del aislador seleccionado para este trabajo de la Tabla (5.1), se puede ver que está determinada una distancia de fuga mínima para la clase. Sin embargo, en la Tabla (5.2) se aprecia que los fabricantes utilizan una distancia de fuga superior. Por lo tanto, en este punto se ha decidido utilizar las distancias eléctricas del aislador entregadas por los fabricantes de las columnas 3 y 4 de la Tabla (5.2).

En vista de esto, se propondrá determinar la tensión máxima en la que estará expuesta el aislador manteniendo la distancia de fuga (D.F.) de 330mm y variando el RUSCD de la Figura (4.5): Distancia de fuga unificada de referencia o RUSCD respecto al nivel de severidad de contaminación o SPS. según la ecuación (38).

$$V_{\text{máx}} = DF / \text{RUSCD} \quad (38)$$

De la ecuación (38) se obtiene la Tabla (5.3).

SPS	RUSCD [mm/kV]	Tensión máxima [kV]
Muy Leve	22,0	15,000
Leve	27,8	11,870
Medio	34,7	9,510
Fuerte	43,3	7,621
Muy fuerte	53,7	6,145

Tabla (5.3): Tensiones máximas permitidas para el aislador clase U120B, según el nivel de SPS. [Elaboración propia]

5.1.5 Dibujo del prototipo a utilizar

Con los datos obtenidos del punto anterior se procede a dibujar el modelo del aislador en el software comercial Autocad [34]. El dibujo se realizará en 2D simétrico al eje como se muestra en la Figura (5.3), este representará al aislador utilizado en este trabajo y con el objetivo de ocupar la información descrita en el capítulo 4, se modela según el aislador estándar de referencia de la IEC 60815-1 [5]. La distribución de los materiales de este diseño se realizó en base a dibujos encontrados en catálogos de fabricantes y otras fuentes [7, 35].

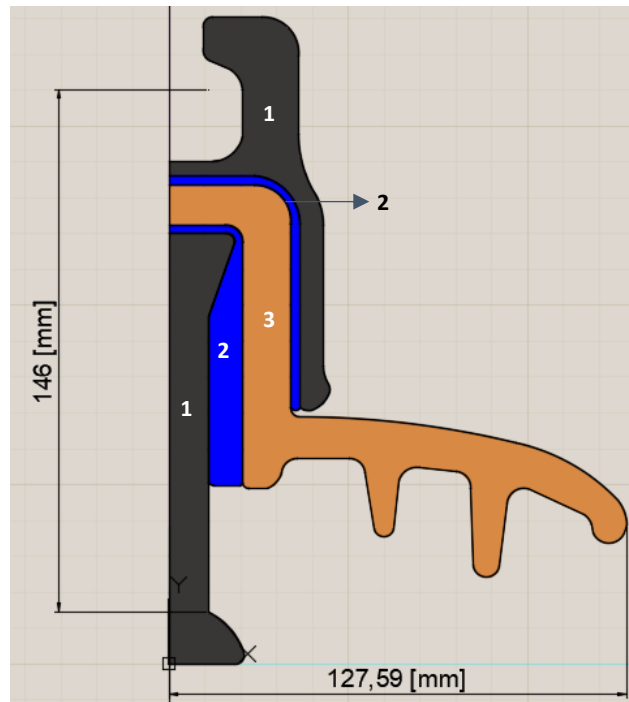


Figura (5.3): Dibujo del diseño según características de U120B de la Tabla (5.2), 1. Acero stainless (Caperuza y perno), 2. Cemento portland, 3. Vidrio Pirex (Aislador). [Elaboración propia]

5.2 CONSTRUCCIÓN DE LA CAPA DE CONTAMINACIÓN

5.2.1 Material soluble

Como se revisó en el capítulo 4, el cálculo del ESDD está en función de la salinidad de la parte soluble del material contaminante, el volumen de la solución y el área del aislador. Basándose en las normas [5, 24], la ecuación para obtención de la salinidad es válida para un rango de valores de la conductividad, específicamente desde 0,004 a 0,4 S/m.

Los valores de ESDD a trabajar en este documento serán elegidos de tal forma que se puedan obtener todos los niveles del SPS, como se muestra en la Tabla (5.4) y Figura (4.2).

SPS	ESDD [mg/cm^2]
Muy Leve	0,003
Leve	0,01
Medio	0,04
Fuerte	0,1
Muy Fuerte	0,35

Tabla (5.4): Valores de la conductividad a utilizar. [Elaboración propia]

5.2.2 Material inerte no soluble

Para simular la capa de contaminación, en primera instancia se realiza un barrido de los espesores utilizados en las investigaciones revisadas, se obtienen valores desde los 0.5mm hasta 10mm. Sin duda, estos valores entregan resultados de NSDD arbitrarios dependientes del tipo de contaminación estudiada en cada investigación y en algunos casos no comparables con la norma.

Por el motivo anterior se decide utilizar un material inerte con características normalizadas para poder simular la contaminación. Al realizar la revisión de la norma IEC 60507 [24] se obtiene que, para hacer una simulación de la contaminación en ensayos de laboratorios es sugerido el uso de caolín como material no soluble. Por esto se decide investigar los parámetros eléctricos de este material, datos mostrados en la Tabla (5.5).

Material	Permitividad relativa ϵ_r	Conductividad eléctrica σ [S/m]
Caolín o arcilla blanca	≈ 4	$\approx 0,001$

Tabla (5.5): Parámetros eléctricos del Caolín o arcilla blanca. [36]

5.2.3 Espesor de la capa de contaminación

No fue fácil encontrar registros de ensayos que trabajaran con contaminación simulada de caolín y relacionaran el espesor, peso y NSDD. Con la falta de datos y la posibilidad de conseguir caolín en tiendas, se decide realizar un pequeño ensayo de laboratorio que ayude a relacionar finalmente el espesor de la capa de contaminación con el NSDD. El procedimiento fue el siguiente:

5.2.3.1 Obtención del espesor de la capa de contaminación mediante medición de masa y volumen de caolín.

- Elementos a utilizar:
 - Horno para secado
 - Pesa electrónica
 - Vaso precipitado
 - 500 ml de Agua destilada
 - 300 gramos de arcilla blanca



a.



b.

Figura (5.4): a. Pesa electrónica y vaso precipitado, b. Muestras de 10g cada uno de caolín seco. [Elaboración propia]

- **Procedimiento:**
 - a. Secar 300g de arcilla blanca en el horno por 60 minutos a 200 °C para eliminar el agua que trae el producto.
 - b. Dividir la arcilla seca en trozos de 10 g.
 - c. Verter 200 ml de agua destilada en el vaso precipitado.
 - d. Sobre la pesa digital de la Figura (5.4-a), poner como referencia 0 el peso del vaso precipitado con el agua.
 - e. Introducir los trozos de arcilla de la Figura (5.4-b) al vaso precipitado. Anotar la masa y el volumen que representa de la muestra.
 - f. Crear un gráfico de los datos obtenidos del volumen en función de la masa.
- **Resultados**
Una vez realizado el procedimiento se logra obtener una función del volumen en relación con la masa como se muestra en la Figura (5.5) respecto a la Tabla (5.6).

Masa caolín	Lectura del volumen [ml]
15	12,5
50	25
80	37,5
115	50
145	62,5
175	75
200	87,5
230	100
260	112,5

Tabla (5.6): Resultados de la medición del volumen respecto a la masa de caolín. [Elaboración propia]

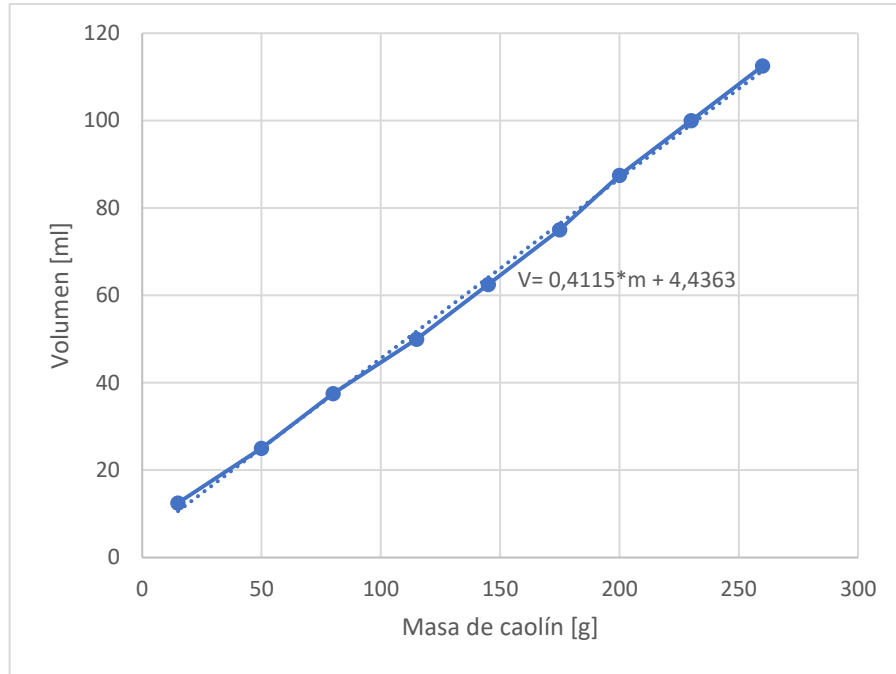


Figura (5.5): Relación del volumen respecto a la masa de caolín. [Elaboración propia]

Teniendo la ecuación (39) se podrá relacionar cualquier valor de NSDD obtenido de la ecuación (26) con el volumen específico de caolín en cm^3 . Al dividir el volumen obtenido por la superficie total del camino de fuga del aislador en cm^2 , resultará el espesor en cm como se puede apreciar en la ecuación (40).

$$V_{caolín} = 0,4115 * m_{caolín} + 4,4363 \quad (39)$$

$$e = \frac{0,4115 * \left(NSDD * \frac{A}{1000} \right) + 4,4363}{A} \quad (40)$$

5.2.4 Cálculo de la superficie del aislador

Medir el área de un aislador es un proceso complejo por la forma irregular que tiene el perfil de los distintos modelos de aisladores vistos al comienzo de este apartado. En [37] se ha utilizado la ecuación (41) para la obtención del área en la sección de “*parámetros y características de aisladores*”. Como se puede apreciar en la ecuación, el área es una función general para la variación del radio según se avanza por el camino de fuga (CF). Para conocer el radio en función de CF superior e inferior se podrían utilizar métodos de aproximación de funciones mediante el análisis numérico.

$$A_{aislador} = \int_0^L 2\pi * r(l) dl \quad (41)$$

En el caso de este trabajo la ecuación (41) no será utilizada, en su equivalente se propondrá un método aproximado para la obtención del área. Se dividirá el camino de fuga en dos secciones; la parte superior e inferior del aislador. Como se puede notar en la Figura (5.2) y Figura (5.3), la parte superior del CF es formado desde el término de la caperuza hasta el punto máximo del diámetro, mientras que la parte inferior se caracteriza por la forma irregular de la falda, desde el punto máximo del diámetro hasta el comienzo del perno.

Una vez definida cual es la distancia de fuga de la parte superior e inferior, se estiran y se revolucionan para formar discos, como se puede ver en la Figura (5.6) y Figura (5.7).

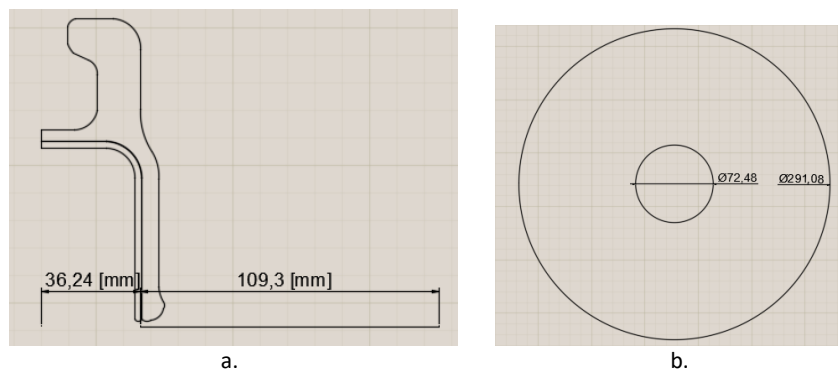


Figura (5.6): a. Parte superior del aislador, b. Vista superior del disco formado por revolución de la parte superior del aislador. [Elaboración propia]

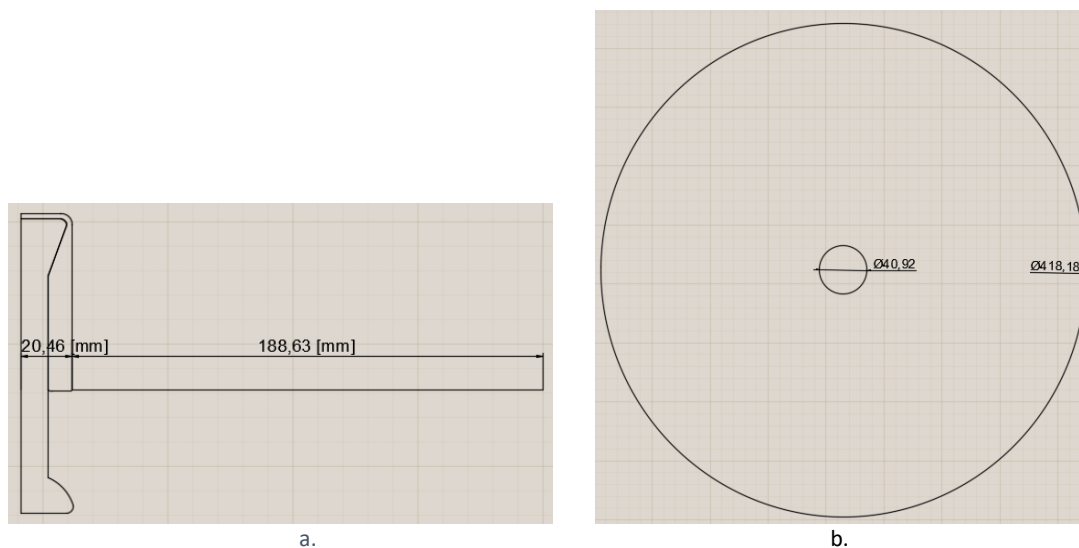


Figura (5.7): a. Parte inferior del aislador, b. Vista superior del disco formado por revolución de la parte inferior del aislador. [Elaboración propia]

Según la vista superior de la Figura (5.6-b) y Figura (5.7-b), se obtendrán los valores de las superficies superior e inferior del CF siguiendo la ecuación (42), al restar el área del círculo de diámetro menor d_{int} al área del círculo de diámetro mayor D_{ext} , se obtienen los resultados mostrados en la Tabla (5.7):

$$A = \pi * \frac{D_{ext}^2 - d_{int}^2}{4} \quad (42)$$

Áreas	[cm ²]
Superior	623,56
Inferior	1359,04
Total	1982,6

Tabla (5.7): Resultados de las áreas calculadas. [Elaboración propia]

5.2.5 Valores finales para la capa de contaminación a simular

Con los procedimientos realizados en los puntos anteriores, ya se pueden definir los valores que se utilizarán en este trabajo. Para relacionar los espesores y la conductividad de la capa de contaminación con los valores de NSDD y ESDD, respectivamente, se utilizarán las ecuaciones (43) y (44). Además, como se puede ver en la Tabla (5.8) los valores obtenidos se obtendrán según el nivel de SPS.

$$e = \frac{0,4115 * \left(NSDD * \frac{1982}{1000} \right) + 4,4363}{1982} \quad (43)$$

$$\sigma_{20} = e^{\frac{\ln\left(ESDD * \frac{1982}{300}\right)}{1.03} - \ln(5.6)} \quad (44)$$

En la Tabla (5.8) se muestran las relaciones y valores obtenidos:

SPS	ESDD [mg/cm^2]	NSDD [mg/cm^2]	Conductividad σ_{20} [S/m]	Δw_{f-i} [g]	Espesor [mm]
Muy leve	0,003	0,04	0,0040	0,0792	0,0226
Leve	0,01	0,1	0,0128	0,198	0,023
Medio	0,04	0,3	0,0490	0,594	0,024
Fuerte	0,1	1	0,1193	1,98	0,027
Muy fuerte	0,35	4	0,4	7,92	0,04

Tabla (5.8): Valores finales a utilizar para simular la capa de contaminación a distintos niveles de severidad de contaminación. [Elaboración propia]

5.3 TENSIONES DE SERVICIO SEGÚN ALTITUD DE OPERACIÓN

5.3.1 Introducción

Las tensiones de servicio en Chile son regidas, hasta el momento, por la norma NSEG 8 E.N. 75 [28]. Estas tensiones mostradas en la Tabla (5.3) son valores fijos e indiferentes a los cambios de altitud. Al aumentar la altitud sobre el nivel del mar se generan variaciones físicas en el aire, como disminución de la presión atmosférica, la densidad, la permitividad eléctrica, en otros efectos [38]. Todos estos cambios se traducen en sobredimensionamiento de las distancias a la hora de diseñar elementos o equipos eléctricos.

5.3.2 Cálculo de las tensiones de simulación según altitud de operación

Según lo revisado en [2], se explica mediante la ley de Paschen una prueba de placas paralelas, donde, para una misma distancia se genera una disminución de la rigidez dieléctrica del aire al disminuir la presión atmosférica. Uno de los métodos usados para corregir este efecto es el derrateo, en el que se busca obtener un aislamiento superior en dimensiones, para mitigar el nuevo esfuerzo eléctrico de la misma tensión a la nueva altitud.

En este trabajo de título se analizará el efecto de la disminución de la rigidez dieléctrica y se comparará cuantitativamente la mejoría que presentan las correcciones en las dimensiones del aislador. **Para representar el efecto de la disminución de la rigidez dieléctrica, se ha propuesto utilizar en las simulaciones de este trabajo un proceso inverso al derrateo de la tensión**, tal como se utiliza en la coordinación de aislamiento de la norma IEC 60071-2 [8], pero en vez de aplicar el factor en las tensiones de impulso para corregir el largo de la cadena, se aplicará en la tensión de simulación.

El aumento de la tensión se realizará utilizando los factores de corrección obtenidos en el capítulo 3 en el análisis del trabajo desarrollado por CIGRE 705 [4]. Los factores se aplicarán sobre la tensión de servicio del aislador con el mínimo valor del nivel de contaminación de la Tabla (5.3), finalmente los resultados se muestran en la Tabla (5.9).

Altitud de operación [m]	Factor de corrección	Tensión de servicio equivalente [kV]
0	1	15,000
1000	1,0633	15,950
3000	1,2021	18,032
5000	1,3590	20,385

Tabla (5.9): Tensión equivalente a utilizar para representar el efecto de aumento de altitud. [Elaboración propia]

5.4 CONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS EN EL SOFTWARE DE SIMULACIÓN

5.4.1 Introducción

Hasta ahora ya se han definido todos los parámetros para realizar la simulación del modelo, solo falta ingresarlos al software de simulación a utilizar. En este trabajo se usará el software comercial COMSOL *Multiphysics* 5.3 [18] y a través del método de elementos finitos se obtendrán los resultados de la simulación.

Al ingresar al programa se debe precisar la dimensión del espacio de trabajo tal como se muestra en la Figura (5.8), en este caso se elegirá el bloque 2D axisimétrico o simétrico al eje, tal como se ha definido en la sección 5.1.2.



Figura (5.8): Primer paso para configuración del espacio de trabajo en COMSOL *Multiphysics*. [Elaboración propia]

Luego de la elección de la dimensión del trabajo, el programa configura su interfaz en tres ventanas principales y una barra de tarea, como se aprecia en la Figura (5.9).

La primera ventana muestra los módulos de construcción del modelo, es decir, definiciones globales y parciales, geometría, materiales, físicas del modelo, malla de elementos finitos, tipo de estudio y los resultados. La segunda ventana muestra las características de cada módulo y da al usuario la facultad de configurarlos según su necesidad. La tercera y última ventana es el espacio gráfico del modelo, permitirá al usuario elegir las partes del modelo que estarán involucradas en el estudio.

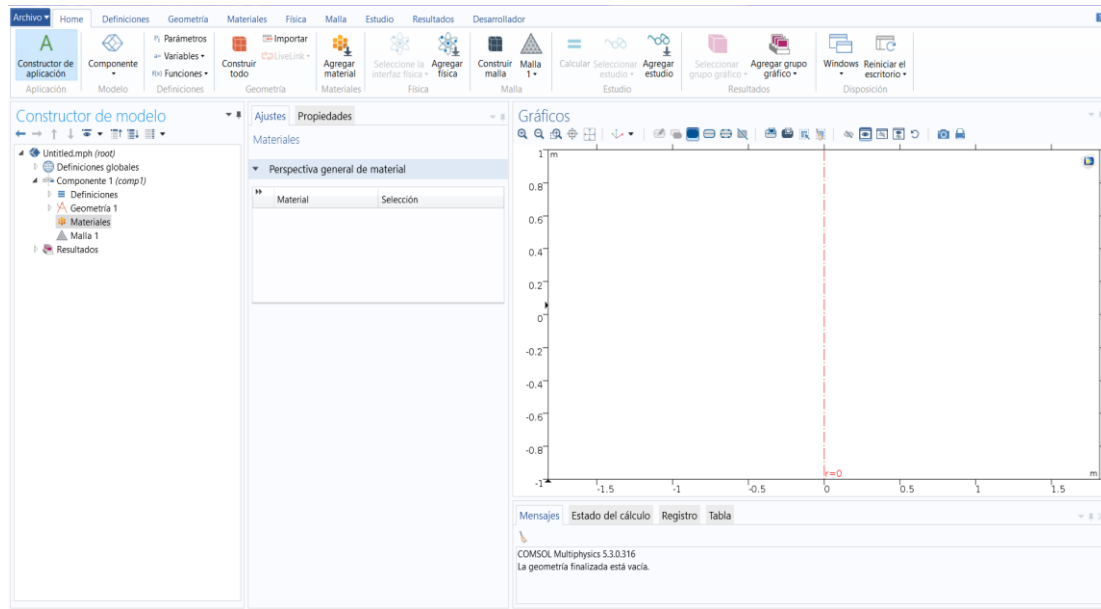


Figura (5.9): Interfaz gráfica básica de COMSOL Multiphysics. [Elaboración propia]

5.4.2 Elección del estudio

La física del modelo para este trabajo se configurará con los módulos de “Electrostática, (es)” y “Corrientes eléctricas de corteza, (ecs)”. Los módulos se desglosan como se puede ver en la Figura (5.10-a), también es posible configurarlos si se revisan las características de cada uno.

Además de los módulos de la física, es necesario definir el tipo de estudio que tendrá el espacio del modelo. Para el caso de este trabajo se realizará un estudio en el dominio de la frecuencia, como se muestra en la Figura (5.10-b).

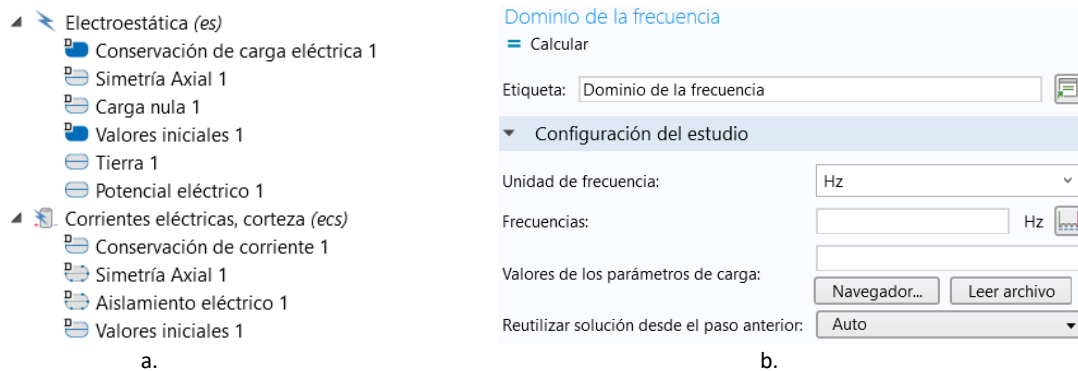


Figura (5.10): a. Elección de módulos según el tipo de física, b. Elección del estudio en el dominio de la frecuencia. [Elaboración propia]

5.4.3 Geometría

El módulo de geometría le permite al usuario utilizar herramientas de dibujo configurables dentro del mismo programa, pero también da la opción de importar un archivo en otro formato. Como se revisó en la sección 5.1 el aislador dibujado de clase U120B fue hecho utilizando el software de dibujo Autocad, este será importado a COMSOL *Multiphysics* en formato DXF.

Finalmente, la ventana del espacio gráfico del modelo mostrará el dibujo importado como se ve en la Figura (5.11).

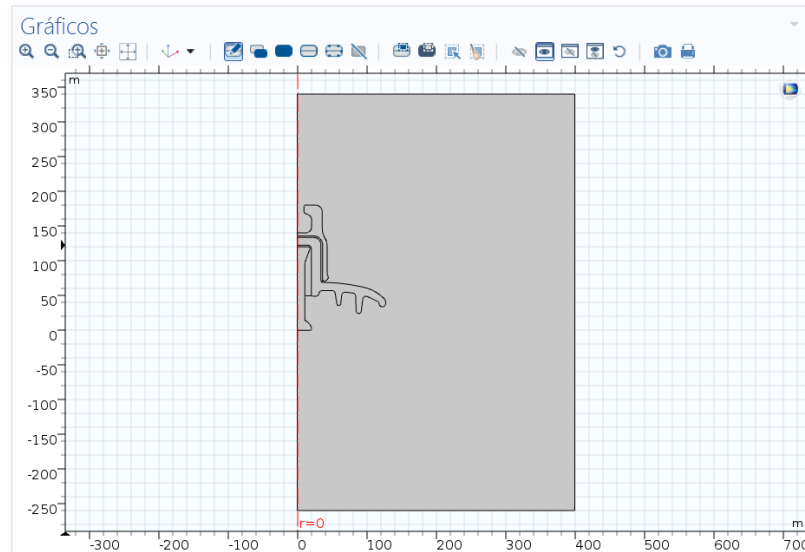


Figura (5.11): Geometría del modelo importado a COMSOL *Multiphysics*. [Elaboración propia]

5.4.4 Materiales

Con el modelo ingresado en el espacio de trabajo se procederá a determinar los materiales a utilizar y asociarlos a cada parte del dibujo. La librería de materiales de COMSOL *Multiphysics* es amplia pero no contienen todos los parámetros eléctricos necesarios para la utilización de los módulos elegidos, por lo tanto, se ingresarán en forma manual. En resumen, los materiales a utilizar en el software deben tener los valores de los parámetros de la Tabla (5.10).

Material	Permitividad relativa ϵ_r	Conductividad σ [S/m]	Resistividad eléctrica [$\Omega \cdot m$]	Rigidez dieléctrica [kV/mm]	Referencia
Aire	1	10^{-12}	10^{12}	3	[38]
Acero galvanizado	1	$1,45 \cdot 10^6$	$6,9 \cdot 10^{-7}$	-	[39]
Cemento (seco)	7	10^{-8}	10^8	10	[40]
Vidrio Pirex	8	10^{-14}	10^{14}	14	[41] [42]
Caolín	4	$2 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^3$	4	[36, 43]

Tabla (5.10): Parámetros eléctricos a utilizar para los materiales. [Elaboración propia]

A continuación, se mostrará cómo quedará finalmente la asociación de materiales con respecto a las partes del modelo. Para asociar simplemente se debe elegir el material y luego pulsar el botón izquierdo del ratón sobre la parte del dibujo.

En la Tabla (5.11) se determinarán los materiales para cada parte del dibujo:

Parte del modelo a trabajar	Material	Figura
Entorno	Aire	Figura (5.12)
Caperuza y perno	Acero galvanizado	Figura (5.13)
Pegamento	Cemento	Figura (5.14)
Aislante	Vidrio pirex	Figura (5.15)

Tabla (5.11): Determinación de materiales a cada parte del modelo del aislador. [Elaboración propia]

Para el caso de la contaminación, se ha decidido determinarla como condición de borde y no dibujarla en el modelo. Como ya se ha explicado, el dibujar la capa con un espesor muy pequeño significaría un aumento innecesario en la cantidad de elementos de la malla, por lo tanto, un aumento en el tiempo de simulación. Por este motivo la capa de contaminación se configurará en un módulo independiente proporcionado por el mismo programa.

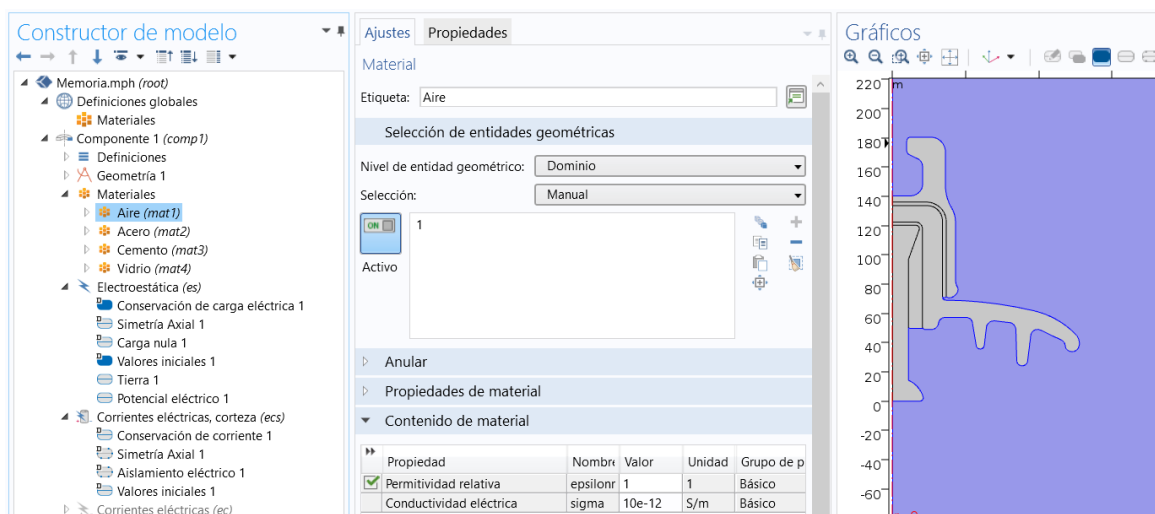


Figura (5.12): Asociación del entorno como material de aire en COMSOL Multiphysics. [Elaboración propia]

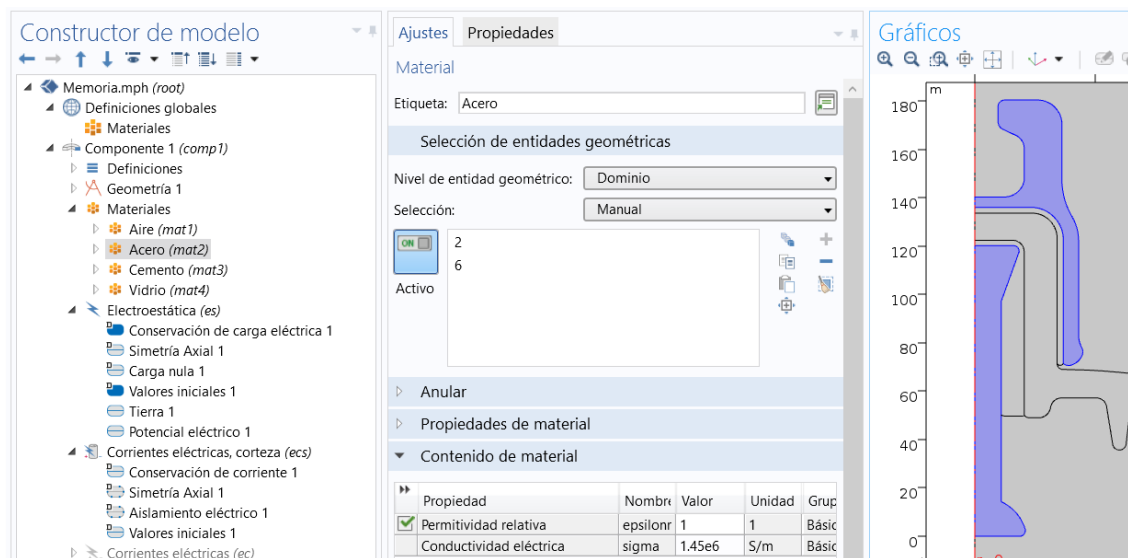


Figura (5.13): Asociación de la caperuza y el perno de bola como partes de acero en COMSOL Multiphysics. [Elaboración propia]

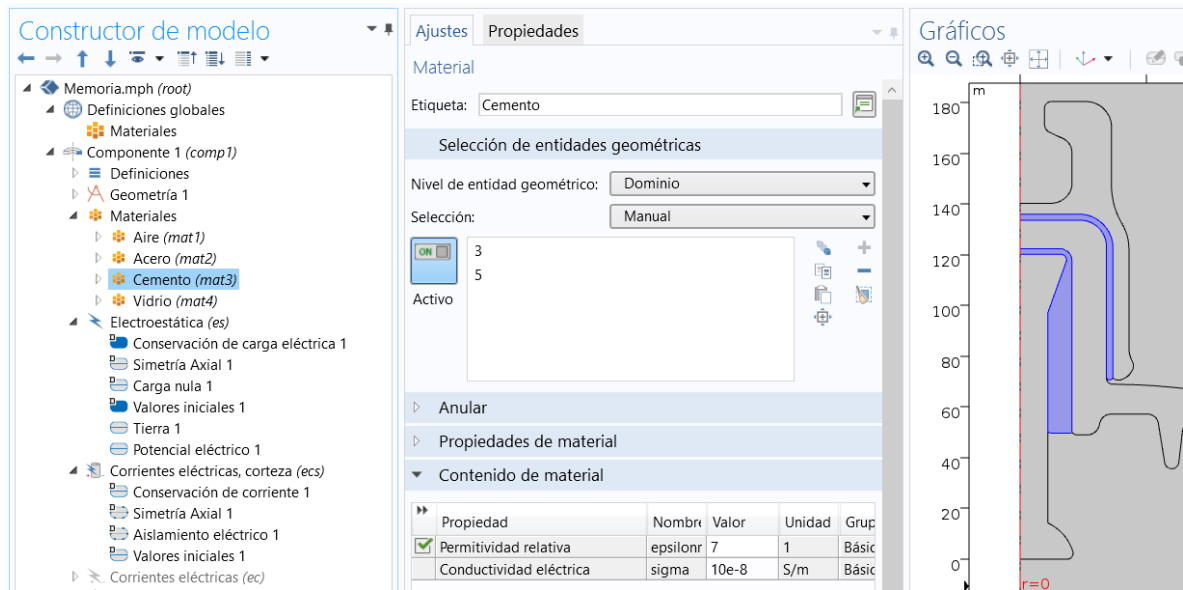


Figura (5.14): Asociación de las partes de cemento en COMSOL Multiphysics. [Elaboración propia]

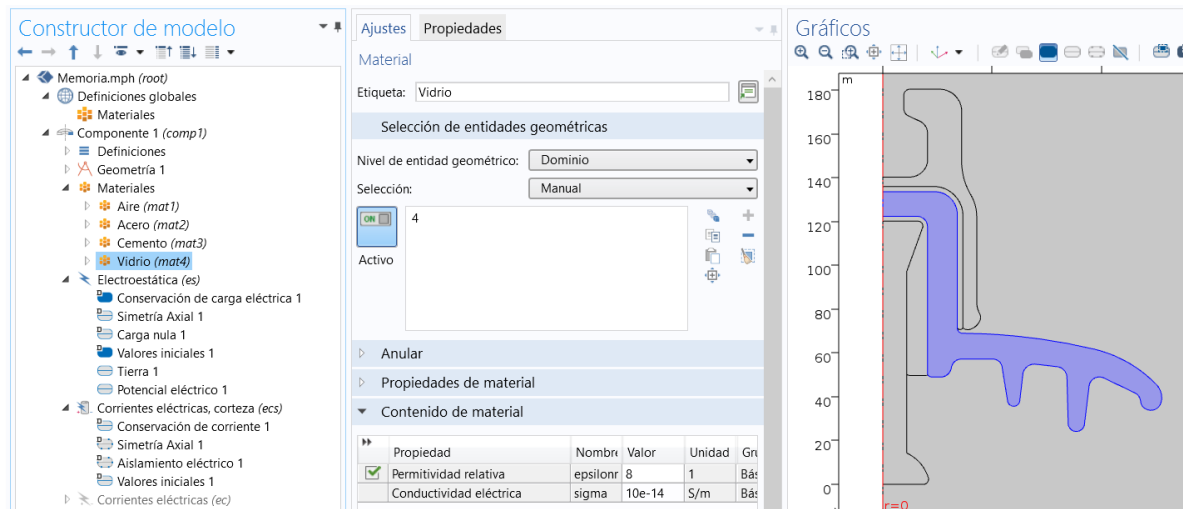


Figura (5.15): Asociación de la parte aislante como vidrio en COMSOL Multiphysics. [Elaboración propia]

5.4.5 Módulo de física electrostática

El módulo seleccionado para simular el funcionamiento de un aislador se basa en la teoría electrostática, donde las cargas se encuentran estacionarias e interactúan entre ellas.

Las ecuaciones que rigen el comportamiento electrostático del modelo son las siguientes:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v \Rightarrow \nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho_v}{\epsilon} \quad (45)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad (46)$$

La ecuación (45) describe la ley de Gauss, donde el campo eléctrico se relaciona con la densidad de carga volumétrica, lo que significa que la carga es generadora del campo eléctrico en el espacio y su distribución determina la magnitud en todo punto. La ecuación (46) indica que la intensidad de campo eléctrico determina la distribución del potencial eléctrico en el espacio con signo contrario, ambas ecuaciones refieren la conservación de carga en el espacio electrostático.

La configuración de este módulo se realizará en primera instancia seleccionando todas las superficies del modelo, incluyendo el aire, para dejar solo a la contaminación como lugar propicio al flujo de carga. Como se verá en la configuración del módulo de corrientes eléctricas de corteza o revestimiento.

La tensión inicial de todo el sistema será ingresada en la sección **valores iniciales** de la configuración del módulo (Figura (5.16-a)), por defecto es $V = 0$ [V].

Los bordes del sistema que estarán con potencial de cero volts serán; la caperuza del aislador y el contorno del aire (Figura (5.16-b)). El borde del sistema que estará con la tensión aplicada será el perno del aislador (Figura (5.16-c)).

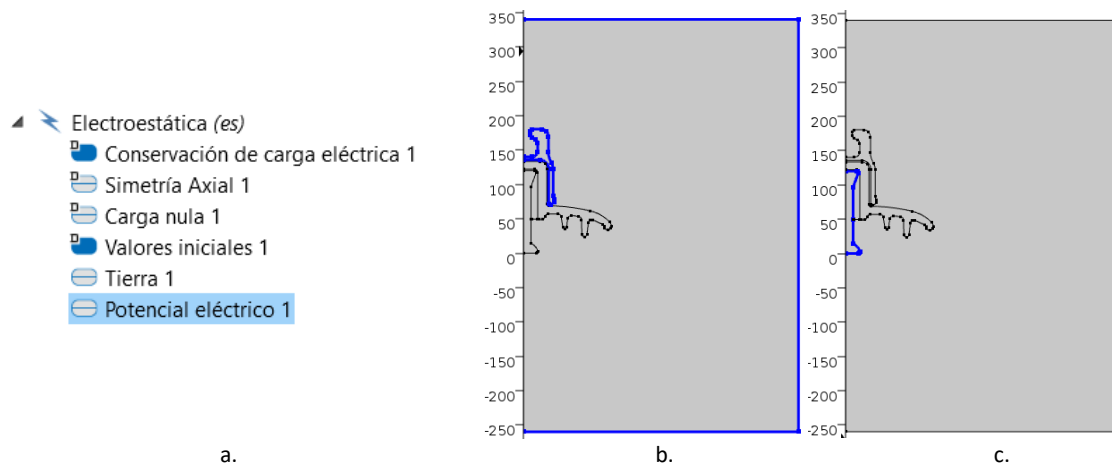


Figura (5.16): a. Acceso a la configuración del módulo, b. Selección de bordes conectadas a tierra, c. Selección de bordes conectadas a tensión V. [Elaboración propia]

5.4.6 Módulo de corrientes eléctricas de revestimiento o corteza

Este módulo es utilizado para ingresar la capa de contaminación como condición de borde del sistema, pudiendo ingresar el espesor, conductividad y permitividad relativa según la necesidad del usuario, como se aprecia en la Figura (5.17-a).

Las ecuaciones que gobiernan este módulo son las siguientes:

$$\nabla_T \cdot (d_s J) = d_s Q_{J-v} \quad (47)$$

$$J = \sigma E + j\omega D + J_e \quad (48)$$

$$E = -\nabla_T V \quad (49)$$

La ecuación (47) indica que la divergencia tangencial de la densidad de corriente está determinada por la magnitud de la carga en todo punto del espacio multiplicada por el espesor d_s de la capa. También en la ecuación (48) se determina la ley de Kirchhoff de corriente la que nos indica la conservación de la energía del sistema. Finalmente, la ecuación (49) indica que la intensidad de campo eléctrico determina la distribución tangencial de potencial con signo contrario.

La selección del borde será sobre el camino de fuga del aislador, tal como se muestra en la Figura (5.17-b).

Los valores de los espesores y conductividades para configurar la capa de contaminación se encuentran en la Tabla (5.8) de la sección 5.2.5. La Permitividad relativa del material a utilizar se encuentra en la Tabla (5.10) de la sección 5.4.4.

Grosor de lámina

Grosor de lámina:

d_s

1[cm]

m

Corriente de conducción

Conductividad eléctrica:

σ

Definido por el usuario

0

S/m

Isotrópico

Campo eléctrico

Relación constitutiva:

Permitividad relativa

$D = \epsilon_0 \epsilon_r E$

Permitividad relativa:

ϵ_r

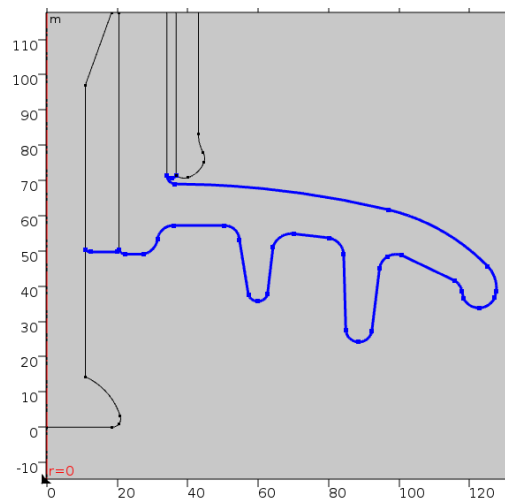
Definido por el usuario

1

1

Isotrópico

a.



b.

Figura (5.17): a. Configuración de valores de la capa, b. Selección del borde de la capa de contaminación. [Elaboración propia]

5.4.7 Malla de elementos finitos

Dentro del programa existe una sección para la construcción de la malla, la que puede ser controlada automáticamente según las necesidades de la física o puede ser ingresada por el usuario.

Los elementos disponibles para el plano 2D son cuadrículas o triángulos, en este caso se elegirá una malla con elementos triangulares. El tamaño de estos elementos varía desde extremadamente fina a extremadamente gruesa con 7 tamaños intermedios. Para este trabajo se utilizará el mínimo tamaño que permite el programa para aprovechar de analizar secciones muy pequeñas del modelo como uniones, secciones con curvaturas muy cerradas, etc., tal como se muestra en la Figura (5.18-b).

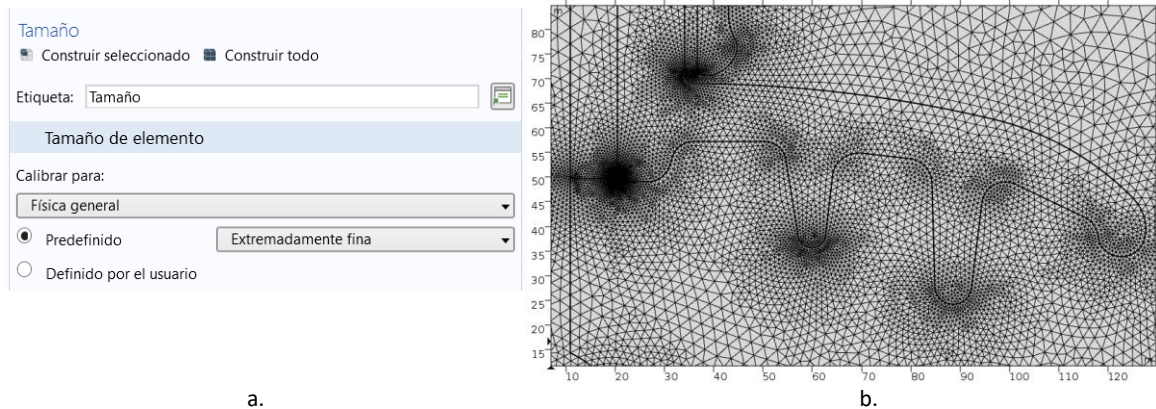


Figura (5.18): a. Configuración del tamaño de los elementos de la malla, b. Malla extremadamente fina con elemento triangulares. [Elaboración propia]

CAPÍTULO 6: SIMULACIONES Y RESULTADOS

6.1 DIAGRAMA DE FLUJO

A continuación, se muestra un diagrama de flujo para seleccionar correctamente las características eléctricas de la unidad o cadena de aisladores en función de la severidad del ambiente y la altitud de operación. Es importante destacar que la elección final depende de la evaluación de las características eléctricas y mecánicas en los requerimientos del sistema eléctrico y del ambiente.

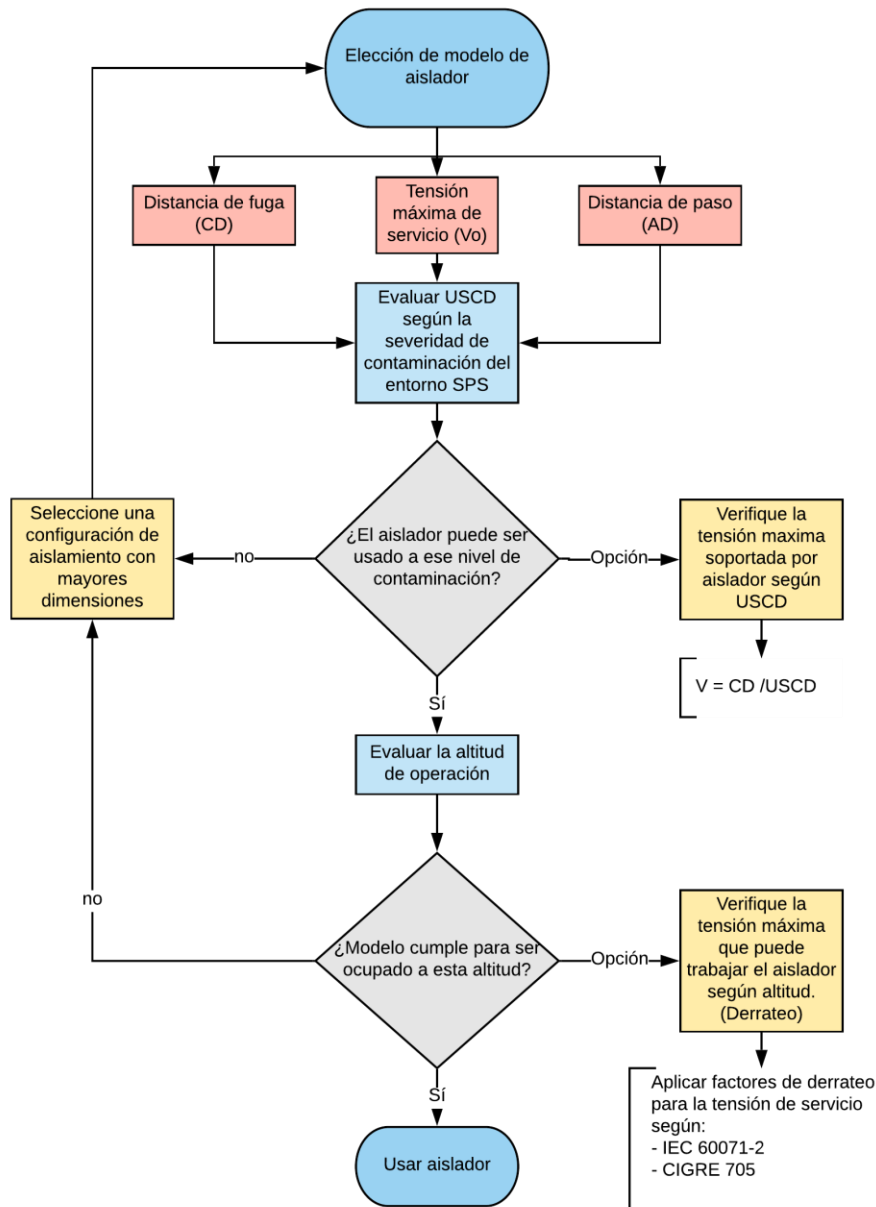


Figura (6.1): Diagrama de flujo para la elección del modelo. [Elaboración propia]

6.2 VARIACIÓN DEL ESPESOR DE LA CAPA DE CONTAMINACIÓN

Los resultados de esta sección se realizaron manteniendo la conductividad de la capa en un valor de $0,04 \text{ S/m}$ y se hizo variar el espesor según los resultados obtenidos en Tabla (5.8). Bajo estas condiciones se podrá estudiar el efecto que tiene la acumulación del material no soluble en la superficie del aislador.

6.2.1 Distribución de potencial eléctrico

Como se puede ver en la Figura (6.2) la distribución de potencial por el camino de fuga no es afectado a simple vista al variar el espesor de la capa, por lo que se podrá decir que el aumento de espesor no determina un cambio en la distribución de potencial.

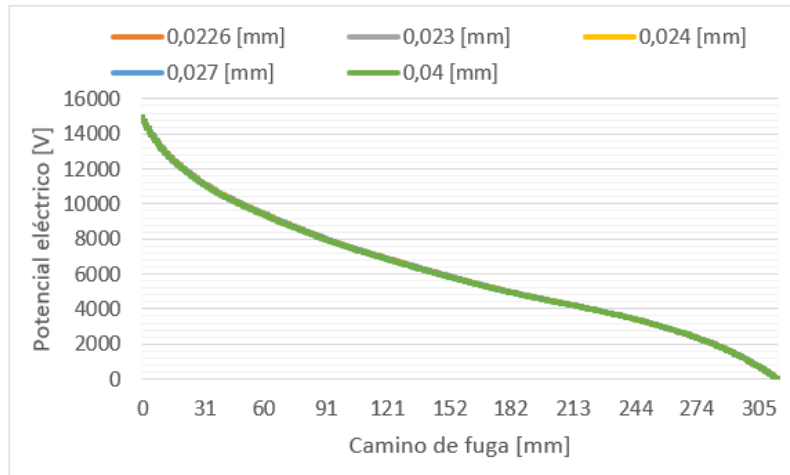


Figura (6.2): Distribución de potencial eléctrico a distintos espesores de la capa. [Elaboración propia]

6.2.2 Distribución de campo eléctrico tangencial

De la Figura (6.3), el campo eléctrico tangencial aparentemente no presenta variación al aumentar el espesor de la capa. Sin embargo, al hacer una revisión de los valores máximos del campo eléctrico tangencial como se muestra en la Figura (6.4), se aprecia una **relación entre el aumento de espesor y la concentración de campo eléctrico tangencial dentro de la capa de contaminación**. Esto ocurre porque el material que se va agregando para aumentar el espesor, en este caso el caolín, presenta parámetros eléctricos distintos y menores al vidrio, a esto también se suma la modificación de la forma del contorno, por lo que en conclusión la rigidez dieléctrica de este disminuye, lo que significa que a un mismo nivel de tensión provoque una variación en la intensidad de campo eléctrico.

En la Figura (6.4), se realiza la diferencia entre el valor más alto y el más bajo cuyo resultado son apenas $3,5 \text{ V/m}$, es decir, no es realmente una variación notoria tal como se aprecia en la Figura (6.3), sin embargo da un indicio de que el aumento del material inerte podría provocar la ruptura eléctrica por el contorno.

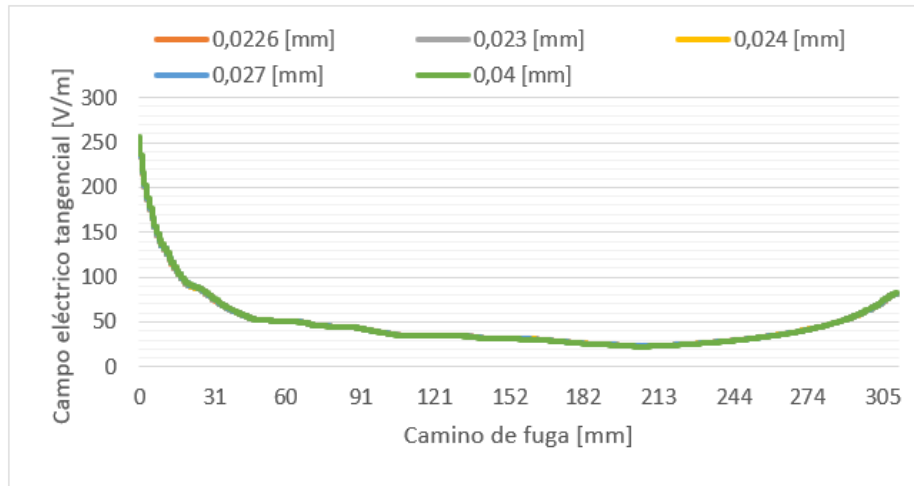


Figura (6.3): Campo eléctrico tangencial a distintos espesores de la capa de contaminación. [Elaboración propia]

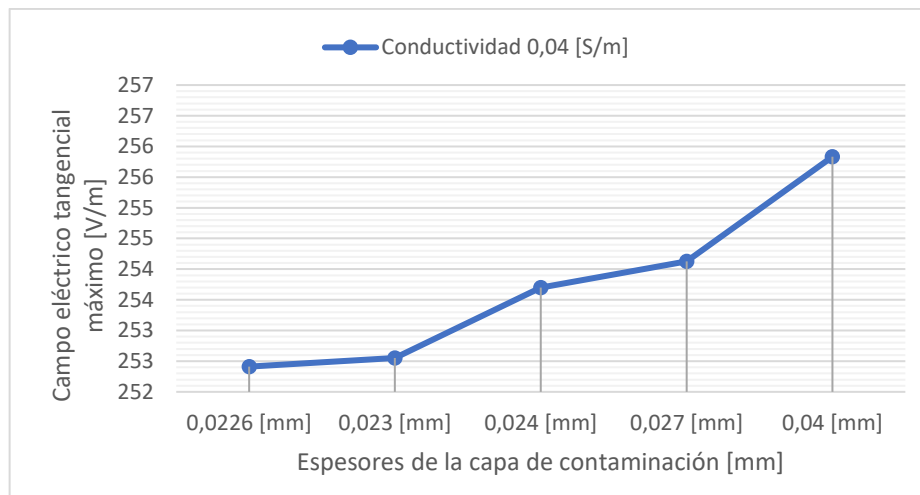


Figura (6.4): Campo eléctrico tangencial máximo a distintos espesores de la capa de contaminación. [Elaboración propia]

6.3 VARIACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD DE LA CAPA DE CONTAMINACIÓN

Los resultados de esta sección se realizaron variando las conductividades según la Tabla (5.8) y manteniendo el espesor de la capa en un valor de $0,024 \text{ mm}$. Bajo estas condiciones se analizará el efecto que tiene el aumento del material soluble en la superficie del aislador.

6.3.1 Distribución de potencial eléctrico

La variación de conductividad de la capa genera un efecto evidente sobre la distribución de potencial en la superficie del aislador, tal como se puede ver en la Figura (6.5). La distribución de potencial en la superficie limpia genera un contraste comparado con las otras distribuciones con contaminación, además, se puede ver un comportamiento marcado por las ecuaciones que gobiernan al módulo de corrientes eléctricas de corteza del punto 5.4.6, ya que cuando se empieza a aumentar la conductividad de la capa se obtiene una disminución en las distribuciones de potenciales.

Como se observa, la distribución de potencial sobre la superficie limpia tiene una caída de pendiente muy fuerte dentro de los primeros 50 mm del camino de fuga, luego varía dentro de un rango acotado y cae a cero en los últimos 10 mm , este comportamiento obedece a lo esperado de una superficie completamente

capacitiva. Al comparar con los aisladores contaminados, las distribuciones de potenciales tienen una tendencia casi lineal de nodo a nodo, característico del comportamiento resistivo que va entregando la capa. **Esto se debe a que internamente en la capa contaminada comienzan a aparecer pequeñas diferencias de potencial a lo largo del camino de fuga que no existían con la superficie limpia, esto ayuda a redistribuir el potencial eléctrico por la superficie.**

En la Figura (6.6) se muestra de forma más explicativa la distribución de potencial en el espacio, mostrando en cada caso el nivel de tensión en color mientras se avanza por la superficie del aislador, relacionando así las curvas obtenidas en Figura (6.5). En la Figura (D 1) y Figura (D 2) del **apéndice D** se podrá revisar las distribuciones de potencial en 3D.

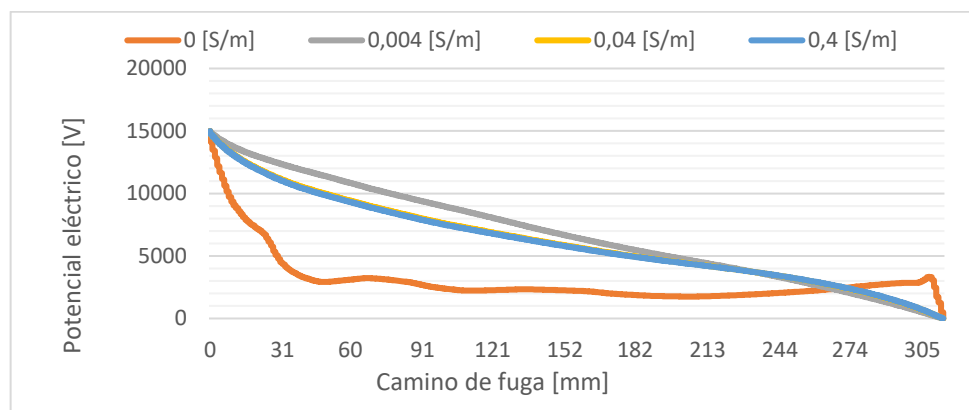


Figura (6.5): Distribución de potencial eléctrico a distintas conductividades de la capa de contaminación. [Elaboración propia]

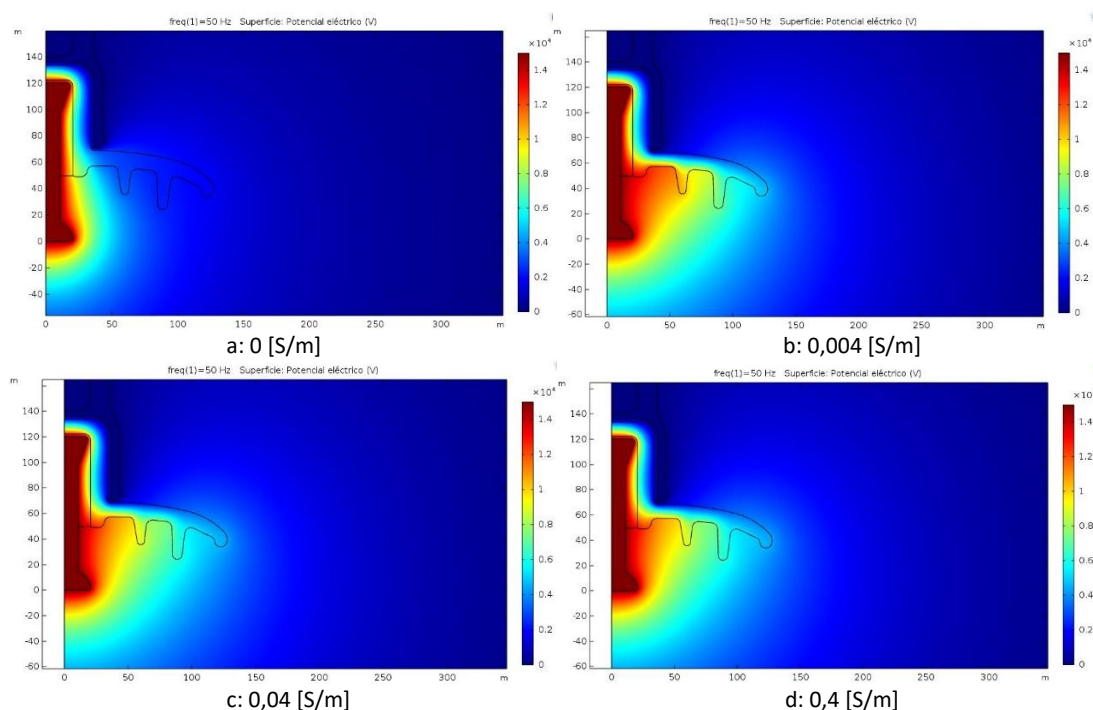


Figura (6.6): Distribución de potencial en el espacio al aumentar la conductividad de la capa de contaminación. a. 0 S/m, b. 0,004 S/m, c. 0,04 S/m, d. 0,4 S/m. [Elaboración propia]

6.3.2 Distribución de campo eléctrico tangencial

En este punto se mostrará la variación del campo eléctrico tangencial cuando aumenta la conductividad de la capa. Se puede apreciar en la Figura (6.7) que la distribución de campo eléctrico tangencial aumenta al incrementar la conductividad de la contaminación. La Figura (6.8) muestra que la intensidad tangencial máxima del campo va aumentando al aumentar la conductividad.

En la Figura (6.7) se puede ver que la intensidad del campo cercana a los terminales de tierra y tensión, dentro de los primeros y últimos 50mm, es más intensa al aumentar la conductividad de la capa, además cuando aumenta la conductividad se puede observar que la distribución de campo eléctrico va tomando una única forma como si estuviese limitada a seguir aumentando. Este aumento de intensidad limitado se debe tanto al perfil, al nivel de tensión y a la conductividad de la capa.

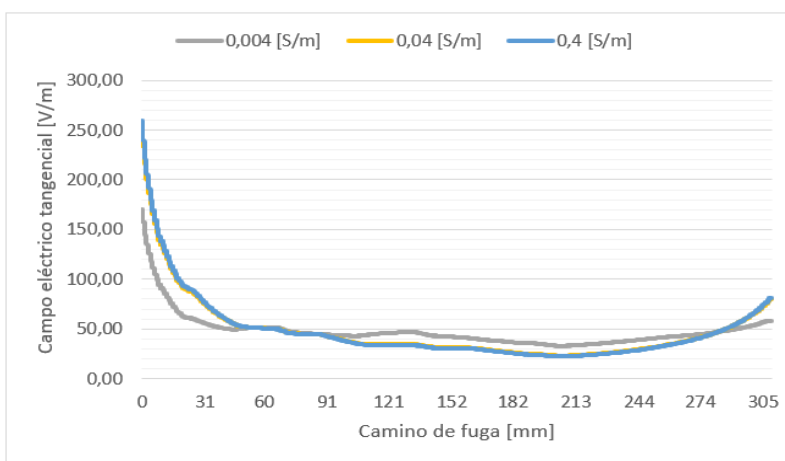


Figura (6.7): Distribución de campo eléctrico tangencial a distintas conductividades de la capa de contaminación.
[Elaboración propia]

Como se puede ver en la Figura (6.8) hay una relación entre la conductividad y la intensidad de campo eléctrico tangencial máximo, ya que **al aumentar la conductividad de la capa también aumenta la intensidad de campo eléctrico tangencial**, esto significa que en cierto punto el aumento de la conductividad de la capa podría provocar la ruptura. Esta relación está gobernada por la ecuación (48) del módulo utilizado.

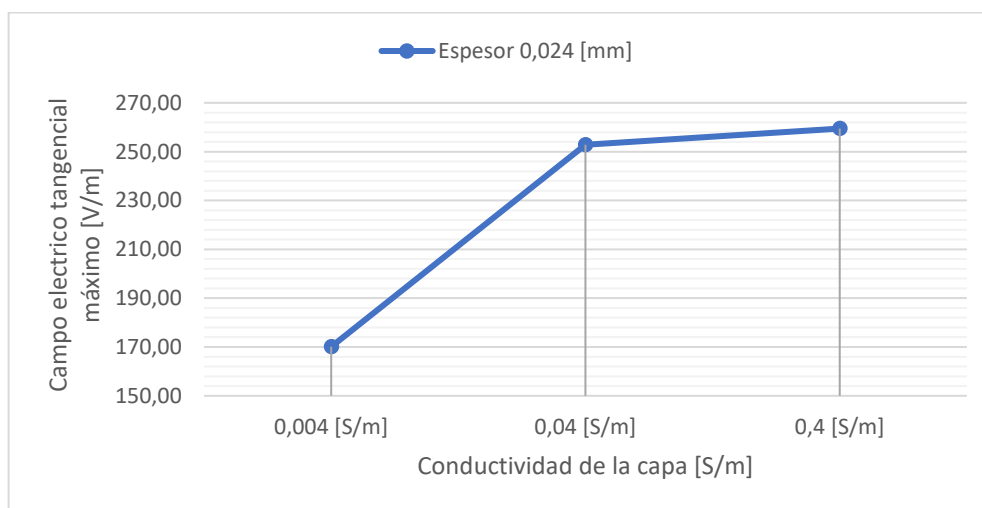


Figura (6.8): Campo eléctrico tangencial máximo al aumentar la conductividad de la capa de contaminación.
[Elaboración propia]

En el conjunto de imágenes en la Figura (6.9) se muestran las curvas de nivel para el campo eléctrico distribuido en el espacio. Al aumentar la conductividad en la capa de contaminación se refleja un aumento en la densidad de líneas de campo, como también un cambio en la distribución de estas por el espacio. Tal como se representa en la Figura (6.7) en las dos últimas conductividades simuladas tienen un comportamiento similar respecto a las curvas de nivel de campo eléctrico.

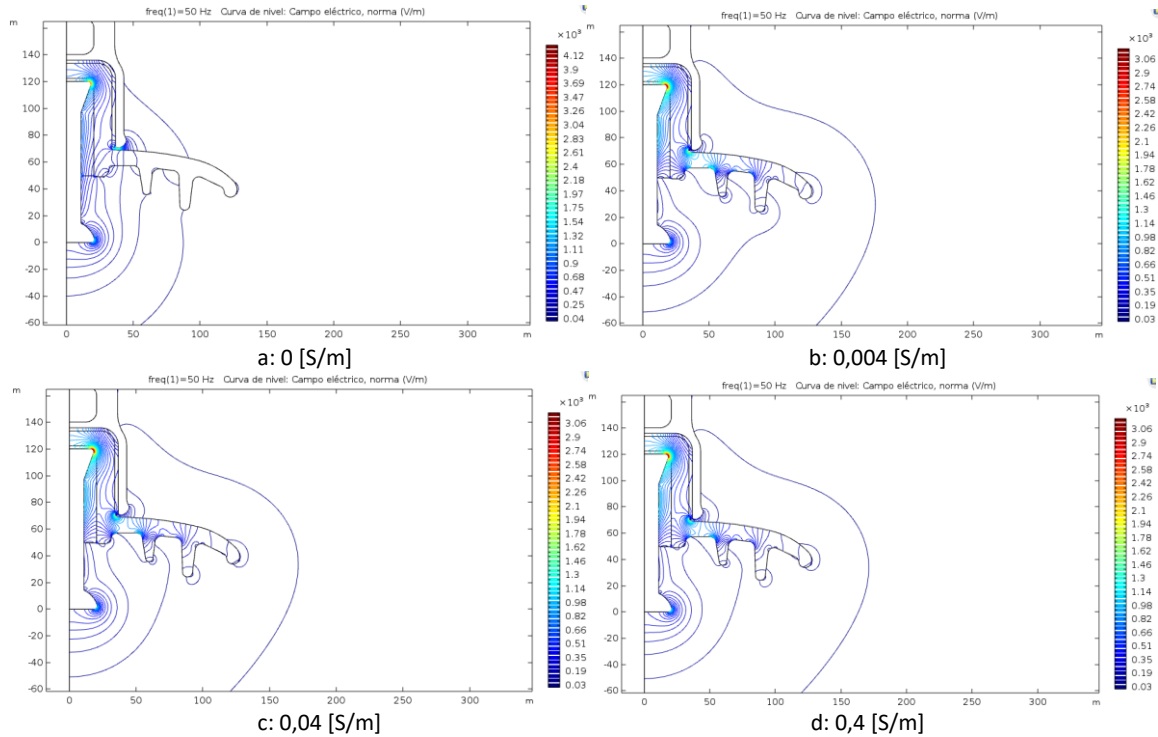


Figura (6.9): Distribución de líneas de campo eléctrico al aumentar la conductividad de la capa de contaminación; a. 0 S/m, b. 0,004 S/m, c. 0,04 S/m, d. 0,4 S/m. [Elaboración propia]

6.4 VARIACIÓN DEL NIVEL DE SEVERIDAD DE CONTAMINACIÓN DEL ENTORNO (SPS)

En este punto se variarán en conjunto la conductividad y el espesor de la capa de acuerdo con los niveles de contaminación del entorno obtenidas en la Tabla (5.8).

6.4.1 Distribución de potencial eléctrico

A medida aumenta el nivel de contaminación del entorno la distribución de potencial a lo largo del camino de fuga disminuye, tal como se puede ver en la Figura (6.10). La forma de la distribución de potencial, por lo que se puede apreciar, depende del aumento de la conductividad y es representativo en su forma al carácter resistivo por su casi linealidad. Al igual que el análisis realizado en el punto anterior donde se aumentó sólo la conductividad de la capa, se presenta también la existencia de un límite en la distribución de potencial, acontecimiento que depende de las ecuaciones que gobiernan la simulación del módulo de corrientes eléctricas de revestimiento.

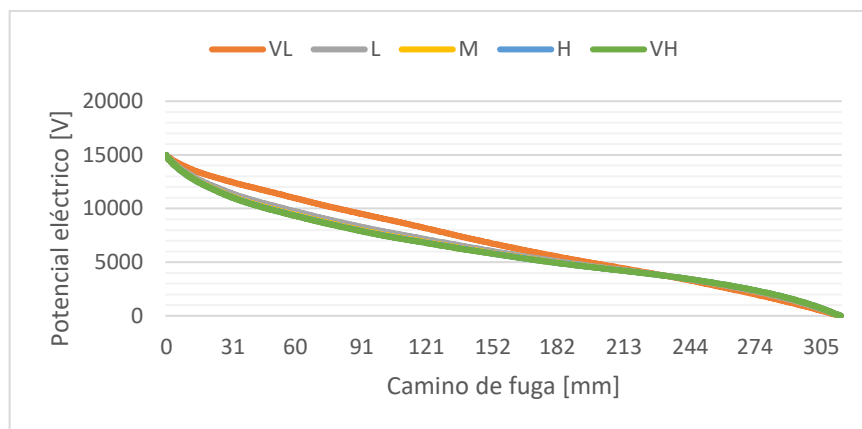


Figura (6.10): Distribución de potencial eléctrico variando el nivel de contaminación del entorno. [Elaboración propia]

6.4.2 Distribución de campo eléctrico tangencial

En este punto se muestra que a medida el nivel de severidad de contaminación aumenta, incrementa el campo eléctrico tangencial en los puntos críticos cercanos a los terminales de tierra y tensión, como se ve en la Figura (6.11). Desde la Figura (D 3) a la Figura (D 7) del **apéndice D** se presentan ilustraciones de campo eléctrico como curvas de nivel según el aumento del nivel del SPS. Al igual que el punto 6.3.2, las líneas de campo eléctrico en el espacio aumentan su densidad y se redistribuyen a medida aumenta el nivel severidad.

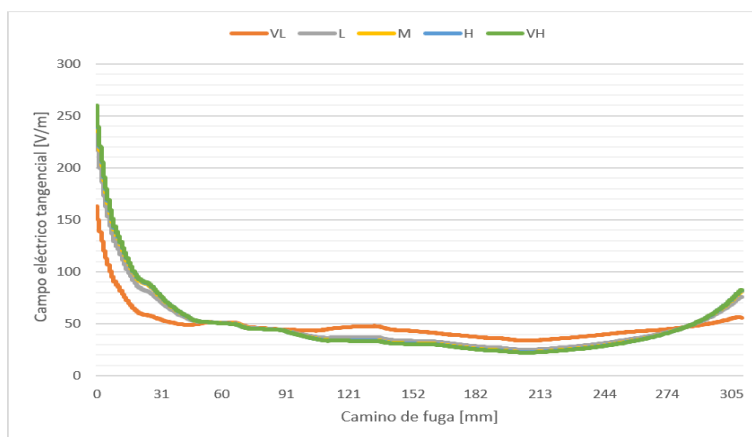


Figura (6.11): Campo eléctrico tangencial a distintos niveles de contaminación del entorno. [Elaboración propia]

Por lo visto se puede decir que **la tendencia de la intensidad de campo eléctrico es aumentar al incrementar el nivel de la severidad de la contaminación.**

Con los resultados obtenidos hasta este punto, se ha podido notar que el aumento de intensidad de campo eléctrico tangencial máximo tiene una tendencia asintótica cercana a los 260 [V/m] a medida aumenta el nivel de SPS, como se aprecia en la Figura (6.12). El valor límite se podría interpretar como el máximo valor de campo eléctrico que se puede producir por el nivel de tensión para el perfil de aislador elegido y las condiciones impuestas de conductividad máxima. Sin embargo, este valor límite de campo puede ser modificado al aumentar o disminuir la tensión, como también aumentando la distancia de paso o de fuga del perfil, en el **apéndice E** se muestran algunos ejemplos utilizados para mejorar el rendimiento del aislamiento bajo contaminación.

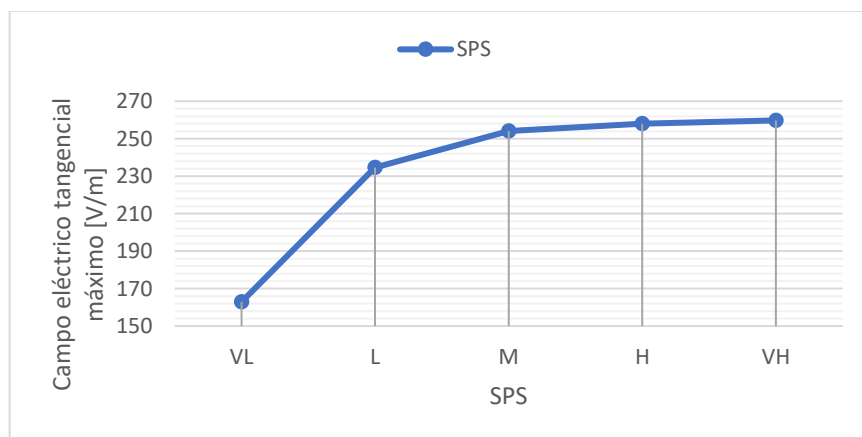


Figura (6.12): Campo eléctrico tangencial máximo según el aumento del nivel de contaminación del entorno.
[Elaboración propia]

6.5 VARIACIÓN DE LA ALTITUD DE OPERACIÓN

Para este caso se utilizarán las tensiones obtenidas en la Tabla (5.9) para representar el efecto de la disminución de la presión atmosférica por el aumento de la altitud en la operación. Los datos del espesor y la conductividad a utilizar en este punto serán los correspondientes al nivel de SPS medio, es decir, $0,024\text{ mm}$ y $0,0490\text{ S/m}$.

6.5.1 Distribución de campo eléctrico tangencial

Al aumentar la altitud de operación se puede notar en la Figura (6.13) una representación del aumento de intensidad de campo eléctrico tangencial para la tensión de 15 kV llevada a las diferentes altitudes mediante la multiplicación por el factor de altitud, lo que significa que es muy probable que sobrepase la rigidez dieléctrica del contorno, sobre todo al nivel de contaminación que se está trabajando.

Además, se puede apreciar que la distribución de campo eléctrico a los 1000 msnm es muy similar a la de 0 msnm, por lo que la aseveración que se comenta en las normas IEC 60815-2 e IEC 60071-2 [3, 8] de no necesitar corrección de altitud para las distancias de fuga y de paso hasta los 1000 msnm comienza a tomar sentido por su similitud en su distribución como se muestra en la Figura (6.13), sin embargo todo esto va a depender de los factores ambientales y de la información que exista respecto a la contaminación.

Para altitudes que superan los 1000 metros, la intensidad de campo eléctrico tangencial máximo comienza a tomar valores muy elevados respecto a la altitud de 0 msnm como se muestra en Figura (6.14), estos valores podrían causar el flameo sobre el aislador, más aún si no se realiza una selección adecuada de las distancias del perfil. Se recuerda que estos resultados se obtuvieron como consecuencia de la multiplicación de factores de altitud obtenidos por la Tabla (5.9) a la tensión de operación con la intención de forzar las nuevas condiciones.

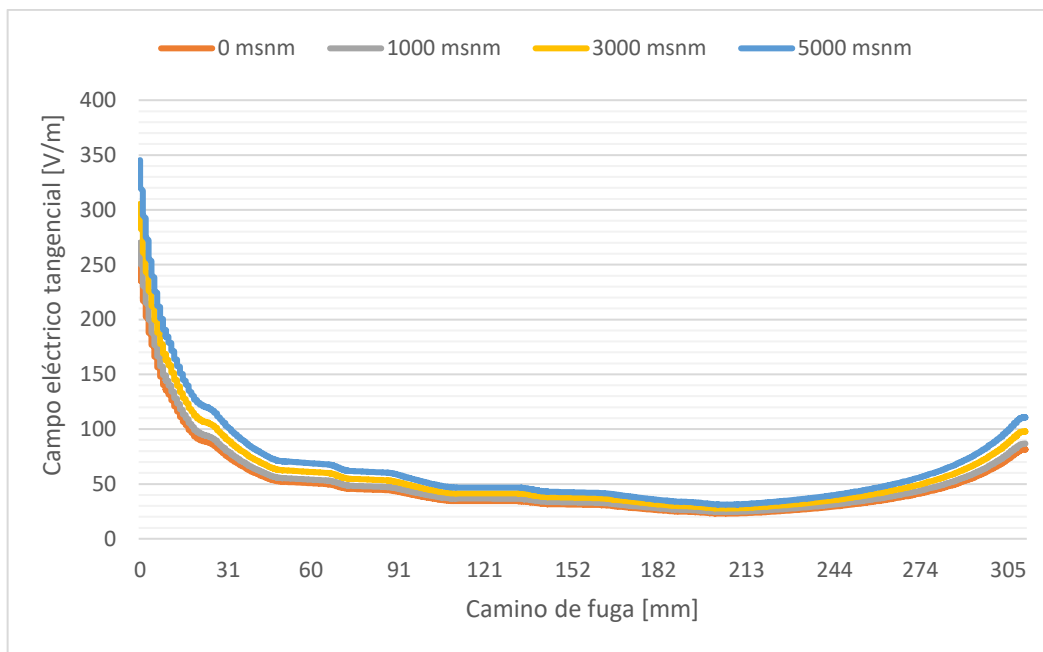


Figura (6.13): Campo eléctrico tangencial a distinta altitud de operación. [Elaboración propia]

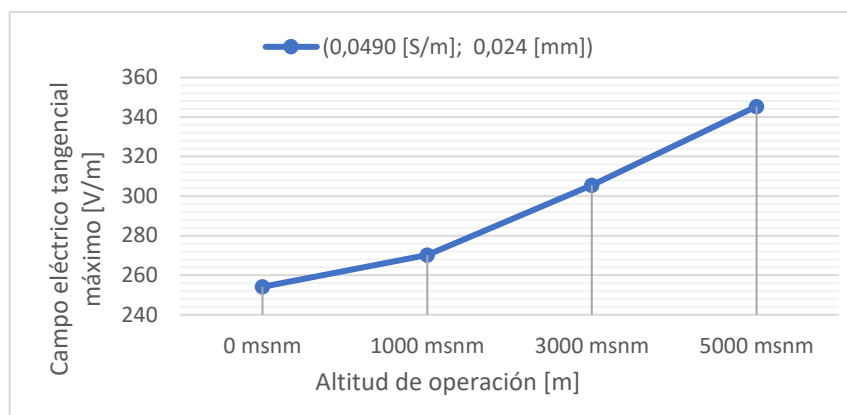


Figura (6.14): Campo eléctrico tangencial máximo a distintas altitudes de operación. [Elaboración propia]

6.5.2 Métodos para mejorar el rendimiento del aislador por el aumento de altitud de operación

Al aumentar la altitud de operación el aislador tendrá una rigidez dieléctrica de frontera menor, este efecto actuará como gatillo para rupturas dieléctricas por el empeoramiento del rendimiento.

Para que el aislamiento mejore el rendimiento ante los efectos producidos por el aumento de altitud existen alternativas de corrección, entre las que se consideran el aumento las distancias de fuga, aumento las distancias de arco o paso, o simplemente disminuir la clase de aislamiento bajando la tensión de operación del equipo o elemento. En este trabajo se utilizarán los tres métodos, se comparará en el rendimiento del aislador respecto a la disminución de la intensidad de campo tangencial máximo.

6.5.2.1 Aumento de las distancias de fuga

El método sugerido por CIGRE 361 y 705 [4, 9] se basa en aumentar la distancia de fuga mediante el factor de corrección obtenido por el cociente E_0/E de la ecuación (16). Para generalizar y considerar el nivel de contaminación, se ha utilizado este factor en la ecuación (21) para obtener el USCD de acuerdo con el nivel de SPS.

Finalmente, se obtiene en la Tabla (6.1) las distancias de fuga necesarias para soportar la tensión de 15kV con un nivel de contaminación muy leve en función de la altitud. Para el caso de este trabajo se aumentará la distancia de fuga sobre el mismo diseño de aislador U120B como se puede apreciar en la Figura (6.15). Las distancias a utilizar serán las normalizadas por la norma IEC 60305 [6], ya que como se aprecia en la cuarta columna de la Tabla (6.1) se obtuvieron valores similares.

Manteniendo la tensión de operación de 15 [kV]				
Altitud de operación [m]	Factor de corrección por altitud	USCD [mm/kV]	Distancia de fuga corregida [mm]	Distancia de fuga normalizada [mm]
0	1	22	330	330
1000	1,053	23,166	347,49	350
3000	1,176	25,872	388,08	390
5000	1,333	29,326	439,89	440

Tabla (6.1): Distancias de fuga necesarias para soportar la tensión 15kV en función de la altitud de operación. [Elaboración propia]

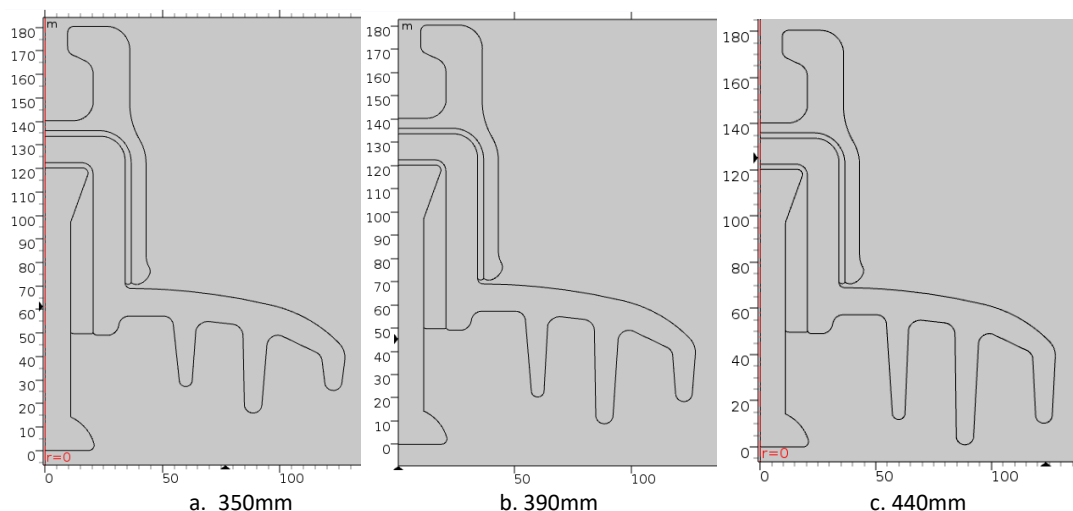


Figura (6.15): Aisladores con distancia de fuga corregida por altitud. a. Distancia de fuga 350mm, b. Distancia de fuga 390mm, c. Distancia de fuga 440mm. [Elaboración propia]

6.5.2.2 Aumento de la distancia de paso del aislador

En [3, 5] se comenta que, el aumento de la distancia de paso del aislamiento mediante la corrección por altitud en la tensión de impulso según la norma IEC 60071-2 entrega valores de distancias de fuga más que suficiente para esa altitud, por lo que no se tendrían que corregir. Según la norma IEC 60071-2 [8], esta corrección se efectúa multiplicando el factor de corrección de altitud a las tensiones de impulso para que finalmente se represente en el aumento del largo de la cadena de aisladores.

Con motivos de comparación y utilización de esta técnica, se aumentará la distancia de paso del aislador unitariamente multiplicándola directamente por el factor de corrección de la altitud y se verá el efecto que tiene este aumento en el rendimiento respecto a los otros métodos. El factor de corrección a utilizar será el propuesto en la ecuación (15), este se multiplicará a la distancia de paso del diseño U120B como se aprecia en la Tabla (6.2). En la norma IEC 60305 [6] se muestran distancias ya definidas, por lo que se decide utilizar estas para cada caso como ve en las imágenes de la Figura (6.16).

Altitud de operación [m]	Factor de corrección por altitud	Distancia de paso del aislador [mm]	Distancia de paso normalizado [mm]
0	1	146,0	146
1000	1,0633	155,2	170
3000	1,2021	186,6	195
5000	1,359	253,6	240 ³

Tabla (6.2): Distancias de paso necesarias para soportar la tensión de 15kV en función de la altitud de operación. [Elaboración propia]

³ Valor máximo de paso para la unidad de aislador según la IEC 60305 [6]

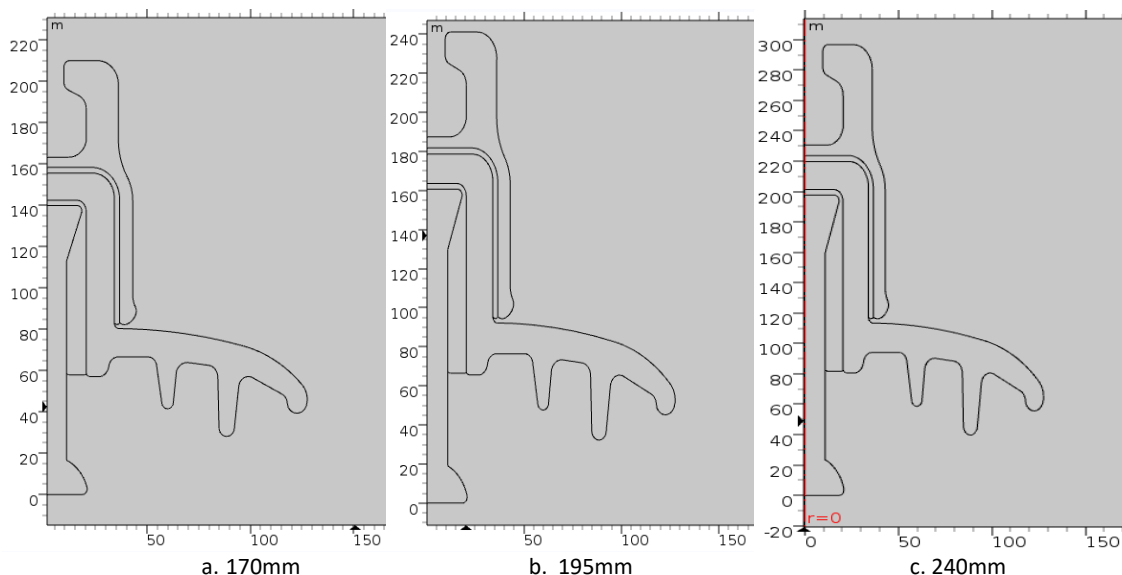


Figura (6.16): Aisladores con paso aumentado para mitigar efectos de la altitud. a. Longitud del paso de 170mm, b. Longitud del paso de 195mm, c. Longitud del paso de 240mm. [Elaboración propia]

6.5.2.3 Derrateo de la tensión

Normalmente en la industria, cuando se requiere un equipo que opere a cierta altitud se aplica el derrateo en las tensiones de diseño en equipos de clases superiores, para así lograr cumplir con las distancias de fuga y de paso necesarias para esa nueva condición de altitud, así suplir con las necesidades inmediatas de clientes.

El factor de derrateo aplicado es el obtenido por cociente de la unida sobre la ecuación (15) como se representa en la Tabla (6.3). Se puede ver que el aislador U120B está habilitado operar a las tensiones de la tercera columna en función de la altitud, sin embargo, independientemente que pueda ser utilizado para las tensiones calculadas es necesario verificar si las distancias de fuga cumplen para los posibles niveles de contaminación.

Altitud de operación [m]	Factor de derrateo	Tensión de “derrateo” para la unidad [kV]
0	1,000	15,0
1000	0,940	14,1
3000	0,832	12,5
5000	0,736	11,0

Tabla (6.3): Factores de derrateo de la tensión en función de la altitud de operación. [Elaboración propia]

6.5.3 Aplicación de factores de corrección por altitud

Después de modificar las distancias en el aislador U120B, Figura (6.15) y Figura (6.16), se realizará una comparación por medio del campo eléctrico tangencial máximo y se analizará gráficamente la mejora en el rendimiento en el aislador.

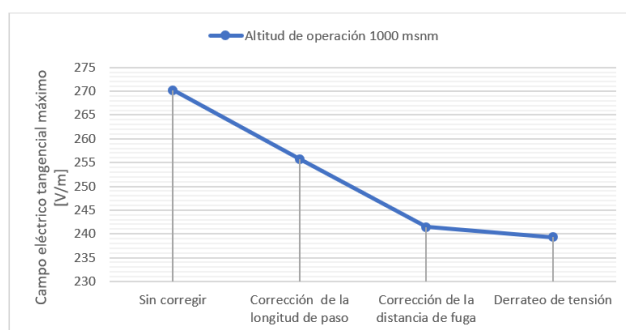
Para todas las altitudes se considerará, adicionalmente, el nivel medio de la severidad de contaminación sobre la superficie del aislador, haciendo caso omiso a la corrección del RUSCD.

A continuación, se mostrarán para cada altitud, el rendimiento del aislador mediante el campo eléctrico tangencial máximo comparando la utilización de todos los métodos descritos anteriormente. Como se puede apreciar en la Figura (6.17), existe evidentemente una mejora en el rendimiento del aislador con cualquier método utilizado. Se ve claramente que la utilización del derrateo en la tensión de operación del equipo da

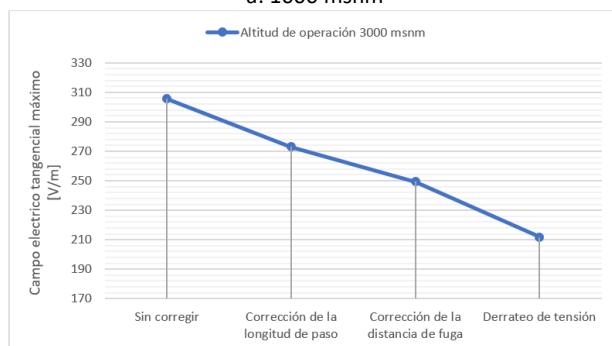
virtualmente mejor rendimiento respecto a los otros métodos, sin embargo, no hay que olvidar que fue forzado a bajar la tensión de operación, una mejor comparación hubiera sido haber ocupado aisladores de clases superiores y haberles derrateado la tensión en cada caso.

Sin considerar el derrateo de tensión, el método que mejoró en mayor medida al rendimiento del aislador fue la corrección de la distancia de fuga de hasta un 35,3%, además esta distancia deberá aumentar si se realiza la corrección del RUSCD por contaminación. En el caso del aumento del paso del aislador se puede decir que podría haber mostrado un mejor rendimiento si se hubieran formado cadenas de aisladores, ya que de esta forma también se hubieran aumentado las distancias de fuga.

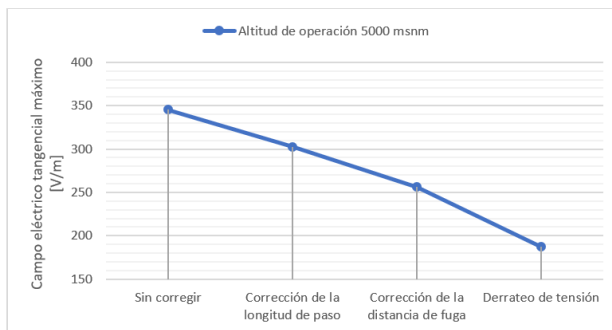
Finalmente, por los resultados obtenidos en este trabajo se sugiere utilizar aisladores que cumplan con las distancias de fuga obtenidas por la corrección sugerida en CIGRE 361 [9] aplicadas al cálculo de USCD de la norma IEC 60815-2 [3], ya que de esta forma se podrán obtener distancias que consideren las condiciones ambientales, así cuando se realice el aumento de paso por corrección de altitud de la norma IEC 60071-2 [8] se podrá verificar si realmente se cumplen o no con las distancias necesarias.



a: 1000 msnm



b: 3000 msnm



c: 5000 msnm

Figura (6.17): Comparación de los métodos de corrección de altitud, a: 1000 msnm, b: 3000 msnm y c: 5000 msnm. [Elaboración propia]

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

7.1 CONCLUSIONES

Este trabajo se desarrolló para simular el comportamiento de un aislador de vidrio bajo condiciones de contaminación atmosféricas tipo A, para así verificar el efecto que ellas producen en las variables eléctricas que representan al rendimiento del aislador.

El aumento del espesor de la capa de contaminación provocó un aumento en la intensidad de campo eléctrico tangencial, sin embargo, no muestra un gran efecto en la distribución de campo eléctrico a lo largo del camino de fuga alcanzando una diferencia máxima de $3,6 [V/m]$, que representa menos de un 2% de variación de sus valores máximos. En otras palabras, la acumulación de material no soluble contribuye a la disminución de la rigidez dieléctrica de la superficie del aislador, pero no es un agente importante para la ruptura superficial.

El aumento de conductividad de la capa de contaminación provoca un empeoramiento en el rendimiento del aislador, apreciándose un aumento de la intensidad de campo eléctrico tangencial máximo de un 52,6 % entre el caso de $0,004 [S/m]$ y $0,4 [S/m]$. Por lo tanto, al aumentar el material soluble depositado en la superficie del aislador contribuirá a la disminución de la rigidez dieléctrica de la frontera aire-aislador y aumentará la fuerza eléctrica sobre las cargas libres.

Los resultados muestran que al aumentar el nivel de contaminación del entorno (SPS) aumenta también la intensidad de campo eléctrico sobre la superficie, en este trabajo se obtuvo un aumento del 59,4% entre los niveles **Leve** y **Muy fuerte**, lo que ratifica que las condiciones ambientales son causantes del empeoramiento del rendimiento del aislador, y que eventualmente provocaría la conducción de corrientes de fuga al superar la rigidez dieléctrica del contorno. Por lo que se recomienda dimensionar el aislamiento respecto a las distancias de fuga obtenidas por el nivel de SPS.

Al aumentar la tensión de simulación por la multiplicación con los factores de corrección por altitud se forzaron las simulaciones para que el campo eléctrico tangencial incremente su intensidad sobre la superficie del aislador, este aumento de intensidad alcanzó un 35,8% para la altitud de 5000 msnm, dicho resultado en comparación con el 59,4% alcanzado para un nivel de SPS muy fuerte, se puede decir que la contaminación representa una mayor contribución a la disminución del rendimiento del aislador.

Al aumentar la distancia de fuga y la distancia de paso como método de corrección por altitud del aislamiento, se obtuvo hasta un 35,3% de mejoría en el rendimiento, sin embargo, a pesar de existir una mejoría respecto a los casos sin corregir para todas las altitudes simuladas, es necesario siempre corroborar si las distancias de fuga obtenidas por la corrección de altitud satisfacen a las necesitadas para la corrección por el nivel de severidad de la contaminación (SPS).

En este trabajo se pudo entender cuantitativamente cómo el rendimiento del aislamiento es empeorado bajo condiciones ambientales de contaminación y altitud, por lo que es necesario realizar estudios para conocer el dinamismo que tienen estos efectos para poder entregar un dimensionamiento óptimo del aislamiento. Además, con las herramientas computacionales utilizadas se podría llegar a anticipar ciertas condiciones que dentro de un ensayo experimental no se podrían observar por no tener los equipos, el tiempo, el dinero o las condiciones adecuadas.

7.2 TRABAJOS FUTUROS

Los resultados obtenidos motivan a que se realice y compruebe de forma experimental los valores logrados en este trabajo, tanto para aisladores de cerámica o vidrio como ampliarlo para aisladores poliméricos.

Además, sería interesante analizar experimentalmente el rendimiento del aislador con el efecto de la contaminación tipo B y ver las diferencias con los resultados obtenidos para la contaminación tipo A. También, sería de gran ayuda comprobar el efecto que tiene el material no soluble y soluble, por separados, sobre la superficie del aislador y así verificar si los gráficos entregados por la norma IEC 60815-1 son efectivamente correctos para el modelo de aislador de referencia o si se requiere una modificación.

Otro punto de interés sería comprobar experimentalmente la ecuación que relaciona el espesor de la capa de contaminación distribuida uniformemente con el valor del NSDD, quizás ampliar el resultado y estudiar la relación que existe con la contaminación del entorno.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Masoud y F. William, *Insulators for icing and polluted environments*, New Jersey, EEUU: John Wiley & Sons Inc. Hoboken., 2009.
- [2] J. L. Dinamarca, *Técnicas de alta tensión: Teoría y aplicaciones*, Valparaíso, Chile: UTFSM, 2007.
- [3] IEC_60815-2, *Selection and dimensioning of high voltage insulators intended for use in polluted conditions - Part 2: Ceramic and glass insulators for a.c. systems*, 2008.
- [4] WG_D1.44, *CIGRE 705: Guidelines for altitude correction of pollution performance of insulators*, CIGRE, 2017.
- [5] IEC_60815-1, *Selection and dimensioning of high voltage insulators intended for use in polluted conditions - Part 1: Definitions, information and general principles*, vol. 1, 2010.
- [6] IEC_60305, *Insulators for overhead lines with a nominal voltage above 1000 V - Ceramic or glass insulator units for a.c. systems- Characteristics of insulator units of the cap and pin type*, 1995.
- [7] IEC_60383-1, *Insulators for overhead lines with a nominal voltage above 1000 V - Ceramic or glass insulator units for a.c. systems- Definitions, test methods and acceptance criteria*, 1993.
- [8] IEC_60071-2, *Insulation coordination. Part 2: Application guide*, 3 ed., vol. 12, IEC, 1996.
- [9] WG_C4.303, *CIGRE 361: Outdoor insulation in polluted conditions: Guidelines for selection and dimensioning - Part 1: General principles and the AC case*, CIGRE, 2008.
- [10] Haus, A. Hermann y J. R. Melcher, «Maxwell's Integral law in free space,» de *Electromagnetic Fields and Energy*, New Jersey, Prentice-Hall, 1989, pp. 1-53.
- [11] S. Khan, «Campo eléctrico,» 2006. [En línea]. Available: <https://es.khanacademy.org/science/electrical-engineering/ee-electrostatics/ee-electric-force-and-electric-field/a/ee-electric-field>. [Último acceso: 29 4 2019].
- [12] P. Tipler y G. Mosca, *Physics for Scientist and Engineering*, 6 ed., vol. 2, New York: W. H. Freeman and company, 2008.
- [13] S. Khan, «Potencial eléctrico,» 2006. [En línea]. Available: <https://es.khanacademy.org/science/electrical-engineering/ee-electrostatics/ee-fields-potential-voltage/a/ee-electric-potential-voltage>. [Último acceso: 30 5 2019].
- [14] B. T. Martin y F. A. Serrano, «Electrostática,» Octubre 2014. [En línea]. Available: <http://www2.montes.upm.es/dptos/digfa/cfisica/electro/potencial.html>. [Último acceso: 29 Mayo 2019].
- [15] W. González-Viñas y H. Mancini, *Ciencia de los materiales*, vol. 2, Navarra: Grupo planeta (GBS), 2003.
- [16] S. F. Stefenon, J. P. Américo, L. H. Meyer, R. B. Grebogi y A. Nied, «Analysis of the electric field in porcelain pin-type insulators via finite elements software,» *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, pp. 2505-2512, 2018.
- [17] A. Arshad, S. Nekahi, G. McMeekin y M. Farzaneh, «Numerical computation of electric field and potential along silicone rubber insulators under contaminated and dry band conditions,» *3D Research Center*, vol. 7, nº 3, pp. 1-10, 2016.
- [18] COMSOL, *Introduction to COMSOL Multiphysics*, COMSOL Multiphysics 5.3, 2017.
- [19] C. Volat, «Comparison between the use of surface and volume conductivity to compute potential distribution along an insulator in presence of a thin conductive layer,» *IEEE electrical insulation conference (EIC)*, vol. 1, pp. 409-413, 2013.

- [20] A. Krzma y M. Khamaira, «Comparative analysis of electric field and potential distributions over porcelain and glass insulators using finite element method,» *Conference for engineering sciences and technology*, vol. 1, pp. 176-184, 2018.
- [21] M. M. Khademi, A. Arjomand y S. H., «Dynamic calculation of leakage current and electric field of distribution polymeric insulator under pollution layer,» *20th Conference on electrical power distribution networks conference (EPDC)*, vol. 20, pp. 173-178, 2015.
- [22] A. Arshad, G. Scott y F. Masoud, «Effect of pollution layer conductivity and thickness on electric field distribution along a polymeric insulator,» 2015. [En línea]. Available: https://www.comsol.com/paper/download/289991/arshad_paper.pdf. [Último acceso: 26 6 2019].
- [23] J. Wardman, T. Wilson y B. P., «Volcanic ash contamination: Limitations of the standard ESDD method for classifying pollution severity,» *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 20, nº 2, pp. 414-420, 2013.
- [24] IEC_60507, Artificial pollution tests on high voltage ceramic and glass insulators to be used on a.c. systems, 2014.
- [25] Taskforce_33.04.01, CIGRE 158: Polluted insulators: A review of current knowledge, CIGRE brochure N°158, 2000.
- [26] IEC_60071-1, Insulation coordination, Definitions, principles and rules, 1993.
- [27] IEC_60060-1, High-voltage test techniques. Part 1: General definitions and test requirements, Bruselas: CENELEC, 2010.
- [28] G. Chile, «Superintendencia de electricidad y combustible,» [En línea]. Available: http://www.sec.cl/pls/portal/docs/PAGE/SECNORMATIVA/electricidad_normastecnicas/NSEG8_75.pdf. [Último acceso: 10 7 2019].
- [29] E. Kisielowsky y A. Lichtig, «Método de elementos finitos- Teoría de campos,» 2010.
- [30] F. Roman, «El metodo de elementos finitos para el cálculo de campos electrostáticos,» *Ingeniería e investigación, Universidad Nacional de Colombia*, Vols. %1 de %2ISSN_2248-8723, nº 4, pp. 35-42, 1982.
- [31] GAMMA, «Catálogo de productos,» [En línea]. Available: <https://www.gamma.com.co/productos/u120b1ss1-suspension-vidrio-tipo-bola-socket-std-iec-u120bs-120kn/>. [Último acceso: 15 01 2019].
- [32] L. GRANTEL, «Catálogo de aisladores de vidrio de suspensao,» [En línea]. Available: <https://grantelequipamentos.com.br/wp-content/uploads/2015/02/catalogo-disco-vidro.pdf>. [Último acceso: 20 10 2018].
- [33] Isolators, «Aisladores de vidrio SGD,» [En línea]. Available: <http://www.comercialaragon.cl/assets/tienda/images/lagranja.pdf>. [Último acceso: 18 6 2019].
- [34] Autodesk, Manual del usuario, 2010.
- [35] P. C. Silva, «Modelo de mantenimiento para aisladores contaminados en la línea 220 kV Cóndores-Parinacota,» Departamento de Electricidad, Universidad Técnica Federico Santa María, Santiago de Chile, 2018.
- [36] S. Aquil y D. Schmitt, «Dielectric permittivity of clay adsorbed water: Effect of salinity,» 2010. [En línea]. Available: https://www.geoconvention.com/archives/2010/0623_GC2010_Dielectric_permittivity_of_clay_adsorbed_water.pdf. [Último acceso: 26 06 2019].
- [37] A. Phillips y C. Engelbrecht, «Insulation for power frequency voltage,» de *EPRI AC Transmission line reference book- 200kV and above.*, vol. 3, California, EPRI, Inc., 2005, pp. 198-299.

- [38] E. Seran, M. Godefroy, E. Pili, N. Michielsen y S. Bondiguel, «What we can learn from measurements of air electric conductivity in ^{222}Rn -rich atmosphere,» *Earth and space science, american geophysical union*, vol. 4, nº 2, pp. 91-106, 2017.
- [39] J. Wales y L. Sanger, «Electrical resistivity and conductivity,» Wikipedia, 2019. [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_resistivity_and_conductivity. [Último acceso: 25 6 2019].
- [40] D. J. McGraw, «The measurement of the dielectric constant of three different shapes of concrete blocks,» *IJRRAS*, vol. 25, nº 3, pp. 82-102, 2015.
- [41] J. Wales y L. Sanger, «Relative Permittivity,» Wikipedia, 2011. [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Relative_permittivity. [Último acceso: 25 6 2019].
- [42] J. Golubovskaya, «The Physics Factbook,» Glenn Elert, 2004. [En línea]. Available: <https://hypertextbook.com/facts/2004/JaneGolubovskaya.shtml>. [Último acceso: 25 6 2019].
- [43] S. Nasejje y S. O. Kinyera, «Dependency of dielectric strength of kaolin on processing method,» *Jurnal of Scientific research and reports*, vol. 4, nº 4, pp. 306-312, 2015.
- [44] RAI, «Real Academia de Ingeniería,» 2012. [En línea]. Available: <http://diccionario.raing.es/es/lema/descarga-disruptiva>. [Último acceso: 05 7 2019].
- [45] C. Antilao y S. Zumarán, «Medición del grado de contaminación en aisladores,» Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, 2018.
- [46] D. Hermosilla, A. Valdivia y W. Yévenes, «Medición del grado de contaminación en aisladore,» Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, 2017.

APÉNDICE A: ELECCIÓN DEL PERFIL DEL AISLADOR SEGÚN IEC 60815-2

Introducción

Este apéndice se usará como complemento de la elección los perfiles de aisladores revisados en el capítulo 5, basados en la norma IEC 60815-2 [3].

La elección del perfil del aislador se determina por el rendimiento que tenga a la contaminación según la posición del montaje, la que puede ser vertical u horizontal, y por el nivel de resistencia a la contaminación característica del ambiente comparado con el aislador estándar de referencia.

Presentación de los perfiles de aisladores

- Perfiles estándar

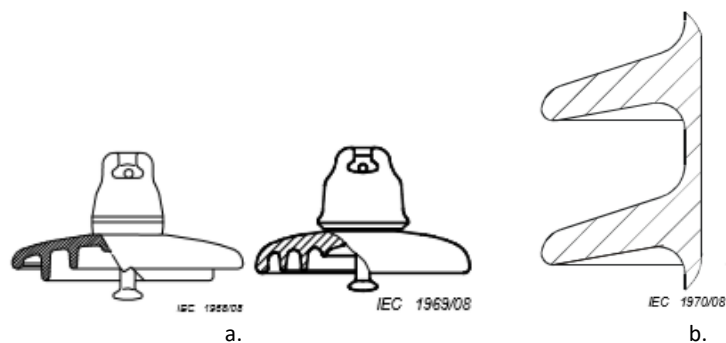


Figura (A 1): Perfiles estándar típicos. a. Aisladores estándar de disco tipo capa, b. Perfil de aleta estándar para aisladores de barra larga- tipo post- tipo hueco. [3]

- Perfiles abiertos

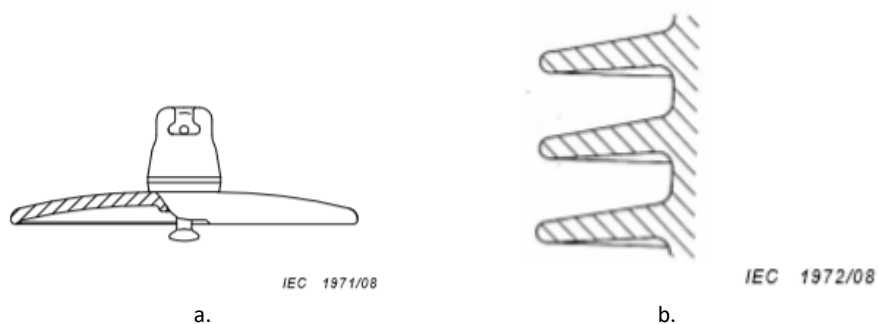


Figura (A 2): Perfiles abiertos típicos. a. Aislador aerodinámico de disco, b. Perfil de aleta aerodinámica para aisladores de barra larga- tipo post- tipo hueco. [3]

- Perfiles antiniebla

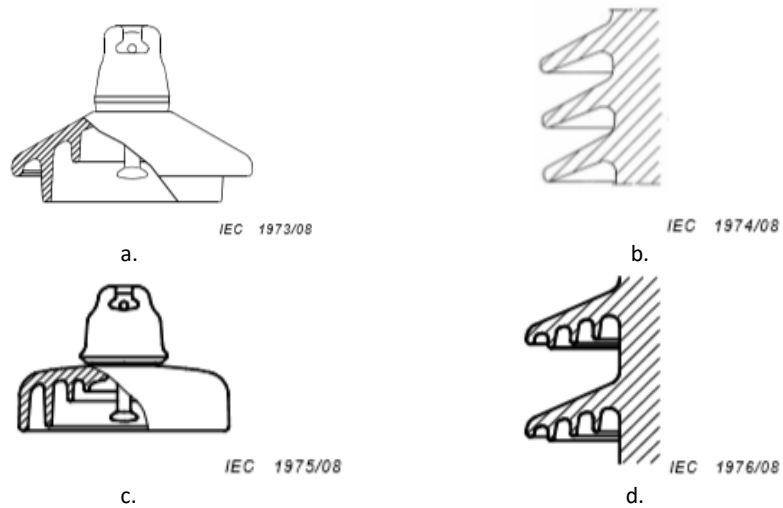


Figura (A 3): Perfiles antiniebla típicos. a. Aislador escarpado de disco, b. Perfil escarpado para aisladores de barra larga- tipo post- tipo hueco. [3]

- Perfiles alternativos



Figura (A 4): Perfiles alternativos típicos. a. Aislador de disco con aletas, b. Perfil de aleta alternativa para aisladores de barra larga- tipo post- tipo hueco. [3]

- Perfiles tipo pin

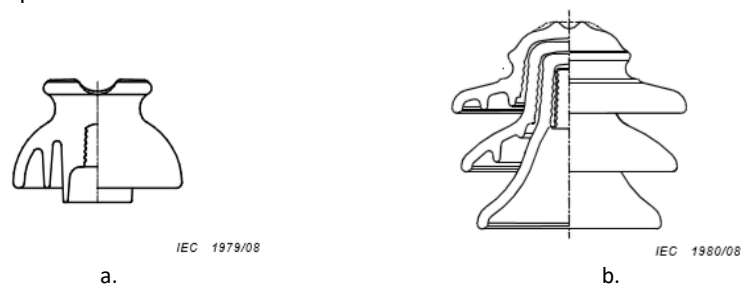


Figura (A 5): Perfiles típicos para aisladores tipo pin. a. Aislador de una pieza tipo pin, b. Aislador de multi elementos tipo pin. [3]

Ventajas y desventajas por la posición del montaje

A continuación, se mostrarán en la Tabla (A 6) las ventajas y desventajas de los perfiles según la posición de montaje y su rendimiento con la contaminación.

Montaje		Perfiles estándares	Perfiles abiertos	Perfiles antiniebla	Perfiles de aleta alternativos
Vertical	+	Buen desempeño para niveles de SPS Muy suaves y Media . Uso en lugares donde no se requiere una distancia de fuga larga o un perfil aerodinámico	Se deposita menos contaminación debido al perfil aerodinámico. Posee una buena limpieza natural	Evita que se moje todo el lado inferior durante la lluvia, niebla, etc. Posee una distancia de fuga larga.	Representa las ventajas y desventajas de todos los perfiles por individual: Estándar, abierto, antiniebla. Además, posee: Mayor distancia de fuga por unidad. Buena capacidad de resistencia bajo lluvia pesada. Buena capacidad de resistencia bajo hielo.
	-	No evita la acumulación de contaminación transportadas por el viento	La superficie total acumula más contaminación en condiciones de tormenta, tifones, etc. Se requieren cadenas más largas. Existe una buena experiencia en clases de SPS Muy suaves y Media donde se requiere un perfil aerodinámico.	Se acumula mayor contaminación en las partes inferior debido al viento y la no limpieza natural	
Horizontal	+	Se deposita menos contaminación debido a la limpieza natural por humedecimiento	Se deposita menos contaminación debido al perfil aerodinámico. Posee una buena limpieza natural	Larga distancia de fuga por unidad	
	-	La superficie total se contamina, pero cada punto es accesible a la limpieza natural	La superficie total acumula más contaminación en condiciones de tormenta, tifones, etc. Se requieren cadenas más largas.	El depósito debido al viento se acumula en las superficies más profundas debido a la poca limpieza natural.	

Tabla (A 6): Principales ventajas (+) y desventajas (-) de los aisladores de referencia. [3]

Aceptabilidad del perfil según la contaminación característica del ambiente

A continuación, se mostrará en la Tabla (A 7) la aceptabilidad relativa de los perfiles según la contaminación característica del ambiente respecto al perfil estándar.

Ambientes	Aceptabilidad del perfil	Perfil estándar. Todos los tipos (a)	Perfil abierto. (b)		Perfiles antiniebla. Todos los tipos
			Disco/ barra larga	Post/ huecos	
Desértico	++				
	+		○		
	0	○□	□	○□	□(Ambos) ○(Vertical)
	-				○(Horizontal)
	--				
Costero	++				□(Vertical)
	+				○(Vertical)
	0	○□	○	○□	○□(Horizontal)
	-		□		
	--				
Industrial	++				
	+		○		
	0	○□	□	○□	□
	-				○
	--				
Agrícola	++				
	+				
	0	○		○	
	-		○		○(Vertical)
	--				○(Horizontal)
Interiores (baja contaminación)	++				
	+				
	0	○	○	○	○
	-				
	--				
Claves.		a. El perfil estándar se toma como el nivel de referencia "0". Esto no significa que este perfil sea automáticamente adecuado para todos los ambientes, ya que en ciertos casos no se puede suministrar una distancia de fuga necesaria dentro de la longitud de aislamiento requerida. b. Las configuraciones alternativas de aletas son consideradas en la clasificación de los perfiles abiertos. c. Para las áreas onde se existe una contaminación rápida por eventos de tormentas, tifones o eventos similares, los perfiles abiertos se contaminarán más rápido depositándose mayor cantidad de contaminantes que un perfil estándar o antiniebla.			
Contaminación tipo A: ○					
Contaminación tipo B: □					

Tabla (A 7): Aceptabilidad de los perfiles relativos al perfil estándar, para aisladores de porcelana y vidrio asumiendo la misma distancia de fuga por unidad o de cadena. [3]

Ambientes	Aceptabilidad del perfil	Perfil estándar. Todos los tipos (a)	Perfil abierto. (b)		Perfiles antiniebla. Todos los tipos
			Disco/ barra larga	Post/ huecos	
Desértico	++		○		
	+		□	○□	○ (Horizontal) □ (Ambos)
	0	○□			○ (Vertical)
	-				
	--				
Costero	++				○ (Vertical) □ (Vertical)
	+		○		○ (Horizontal) □ (Horizontal)
	0	○□	□	○□	
	-				
	--				
Industrial	++				
	+		○		○ (Vertical) □ (Ambos)
	0	○□	□	○□	○ (Horizontal)
	-				
	--				
Agrícola	++				
	+				○ (Vertical)
	0	○	○	○	
	-				○ (Horizontal)
	--				
Interiores (baja contaminación)	++				
	+				
	0	○	○	○	○
	-				
	--				
Claves.		d. El perfil estándar se toma como el nivel de referencia "0". Esto no significa que este perfil sea automáticamente adecuado para todos los ambientes, ya que en ciertos casos no se puede suministrar una distancia de fuga necesaria dentro de la longitud de aislamiento requerida.			
Contaminación tipo A: ○		e. Las configuraciones alternativas de aletas son consideradas en la clasificación de los perfiles abiertos.			
Contaminación tipo B: □		f. Para las áreas onde se existe una contaminación rápida por eventos de tormentas, tifones o eventos similares, los perfiles abiertos se contaminarán más rápido depositándose mayor cantidad de contaminantes que un perfil estándar o antiniebla.			

Tabla (A 8): Aceptabilidad de los perfiles relativos al perfil estándar, para aisladores de porcelana y vidrio asumiendo la misma longitud de arco. [3]

APÉNDICE B: TOMA DE MUESTRAS PARA DETERMINACIÓN DE NIVEL DE CONTAMINACIÓN SEGÚN IEC60815-1

Tal como se ha escrito en el capítulo 4, la severidad de la contaminación del sitio (SPS) puede ser obtenida a partir de la medición de la densidad equivalente de sal depositada (ESDD) y la densidad equivalente de no solubles depositados (NSDD) del material contaminante obtenido de la superficie del aislador. La información conseguida de estas mediciones servirá para seleccionar aisladores con las dimensiones correctas según el SPS obtenido.

Equipamiento necesario para medir el nivel de contaminación

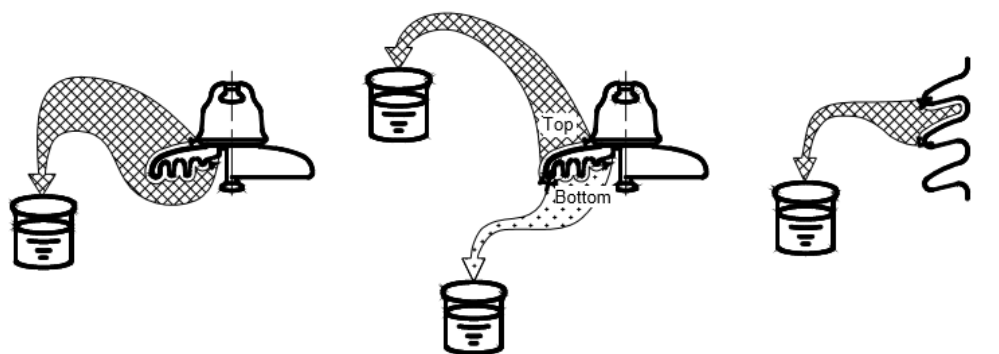
A continuación, se enlistarán los equipamientos necesarios para la medición de ESDD y NSDD.

- | | |
|--|------------------------------|
| ○ Agua destilada/ agua desmineralizada | ○ Medidor de conductividad |
| ○ Tubo de ensayo | ○ Termómetro |
| ○ Guantes quirúrgicos | ○ Filtros de papel |
| ○ Película plástica (film plástico) | ○ Embudo |
| ○ Vaso rotulado | ○ Horno para secado |
| ○ Valde para lavado | ○ Balanza o pesa electrónica |
| ○ Algodón absorbente o cepillo o esponja | |

Método del algodón para la recolección de la contaminación

Primero que todo, es necesario que las superficies de los aisladores a ocupar no sean tocadas por nada para que no haya pérdida de material. Además, es preciso que todos los implementos sean lavados para que al medir no aporten variables en la medición.

- Verter en un recipiente entre 100 a 300 cm^3 (o más si se requiere) e introducir el algodón absorbente.
- Medir la conductividad del agua con el algodón, esta debe ser inferior a 0,001 S/m.
- Con el algodón limpiar cuidadosamente la superficie del aislador, excluir las piezas metálicas. En caso de aisladores de tipo caperuza-perno, se puede medir por separado las superficies superior e inferior tal como se muestra en la Figura (B 1). En casos de barra larga los contaminantes se deben recolectar de una parte de los cobertizos.
- El algodón con contaminante se debe volver a colocar en el recipiente.
- Disolver los contaminantes agitando el agua y apretando el algodón en el agua
- La limpieza se repetirá hasta que no queden más contaminantes en la superficie del aislador tal como se muestra en la Figura (B 1). Si quedan contaminantes, incluso después de limpiarlos varias veces, los contaminantes se eliminarán con una espátula y se colocarán en el agua que contiene los contaminantes.
- Se debe tener cuidado de no perder agua, es decir, la cantidad inicial no debe cambiar mucho después de recoger el material contaminante.



IEC 1958/08

Figura (B 1): Limpieza de las superficies del aislador. [5]

Método del enjuague del aislador

Este método consiste en los siguientes pasos:

- Cubrir las partes metálicas del aislador con envoltura de film plástico.
- Asegurarse que el recipiente que se utilizará para lavar los aisladores esté limpio.
- Medir entre 500 y 1000 cm^3 (o más si es necesario) de agua destilada o desmineralizada ($\sigma < 0,001 S/m$) y verter en el recipiente.
- Colocar el aislador en el recipiente y lavar la superficie con movimientos suaves desde la caperuza hasta el borde con orientación al agua.
- Colocar el mismo aislador sujetado del perno y lavar suavemente la superficie inferior.
- Verter el agua del lavado en un recipiente distinto y limpio teniendo cuidado de no dejar depósitos en el recipiente anterior. [44]

APÉNDICE C: EJEMPLOS DE APLICACIONES PARA OBTENCIÓN DE SPS

En este apéndice se mostrarán los resultados obtenidos en la búsqueda del nivel de severidad de la contaminación del entorno realizado por alumnos de la universidad Técnica Federico Santa María [45] [46].

Obtención del área

Para ambos trabajos se utilizaron aisladores tipo suspensión, en [46] se usa el modelo U160BS según la denominación de la IEC 60305. En [45] se utiliza un aislador tipo pin de dos niveles. Las áreas de los respectivos trabajos están dadas en la Tabla (C 1).

Año	Grupo	Área Superior cm^2	Área Inferior cm^2	Área total cm^2
2017	[46]	591.6	813.7	1409.8
2018	[45]	-	-	4848.17

Tabla (C 1): Áreas utilizadas en los informes de laboratorios. [Elaboración propia]

Obtención de valores de la capa de contaminación

En la Tabla (C 2) se muestran los valores iniciales sin contaminación, temperatura de la muestra, conductividad del agua destilada con el algodón (Conductividad inicial) y el peso del filtro de papel.

Año	Grupo	$\sigma_{Inicial}$ [S/m]	Peso papel filtro [g]
2017	[46]	0.00027	32.3311
2018	[45]	0.00071	28.1745

Tabla (C 2): Valores iniciales sin contaminación. [Elaboración propia]

Ahora en la Tabla (C 3) se muestran los valores obtenidos con contaminación.

Año	Grupo	Temperatura de la muestra $^{\circ}C$	$\sigma_{Muestra}$ [S/m]	Peso de la muestra [g]	σ_{20} [S/m]
2017	[46]	23.1	0.0442	0.2252	0.04126
2018	[45]	22	0.01559	0.0940	0.01559

Tabla (C 3): Valores finales de la muestra de contaminación. [Elaboración propia]

Con los datos de la Tabla (C 3) y siguiendo el procedimiento descrito en el capítulo 4, se obtendrán los valores de NSDD y ESDD, clasificando el nivel de severidad como se muestra en la Tabla (C 4).

Año	Grupo	NSDD [mg/cm^2]	ESDD [mg/cm^2]	SPS
2017	[46]	0.1597	0.047	Medio
2018	[45]	0.0194	0.0045	Muy suave

Tabla (C 4): Valores de NSDD y ESDD. [Elaboración propia]

APÉNDICE D: ILUSTRACIONES

Este apéndice es realizado para mostrar algunas ilustraciones complementarias a los resultados del capítulo 6.

Distribución de potencial eléctrico

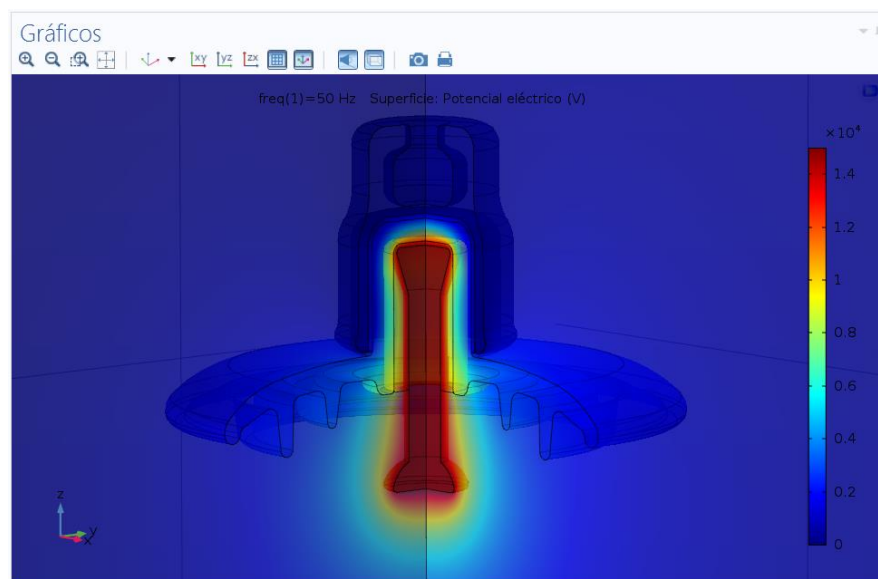


Figura (D 1): Representación 3D del modelo 2D axisimétrico para la distribución de potencial eléctrico en el espacio del aislador limpio a nivel del mar. [Elaboración propia]

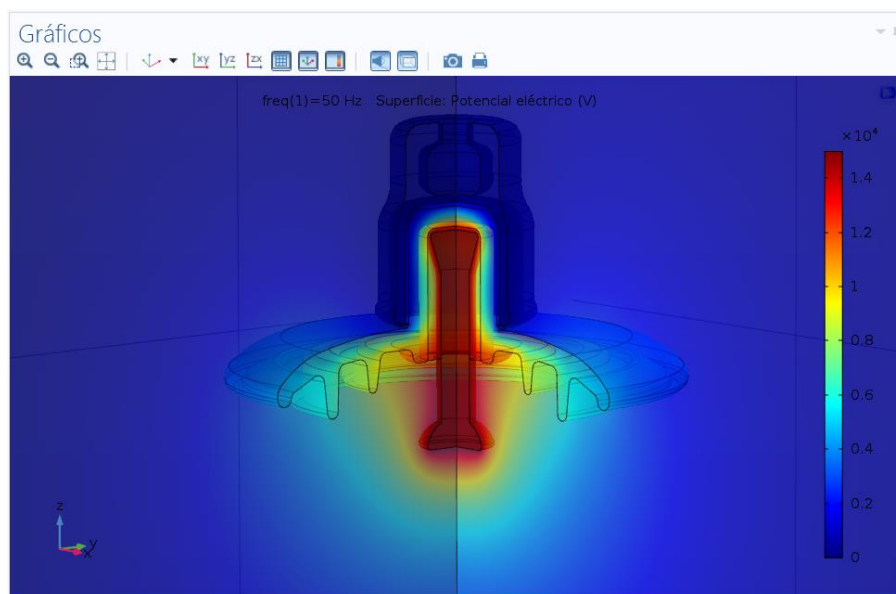


Figura (D 2): Representación 3D del modelo 2D axisimétrico para la distribución de potencial eléctrico en el espacio del aislador con SPS Medio a nivel del mar. [Elaboración propia]

Representación de campo eléctrico con curvas de nivel según nivel de SPS

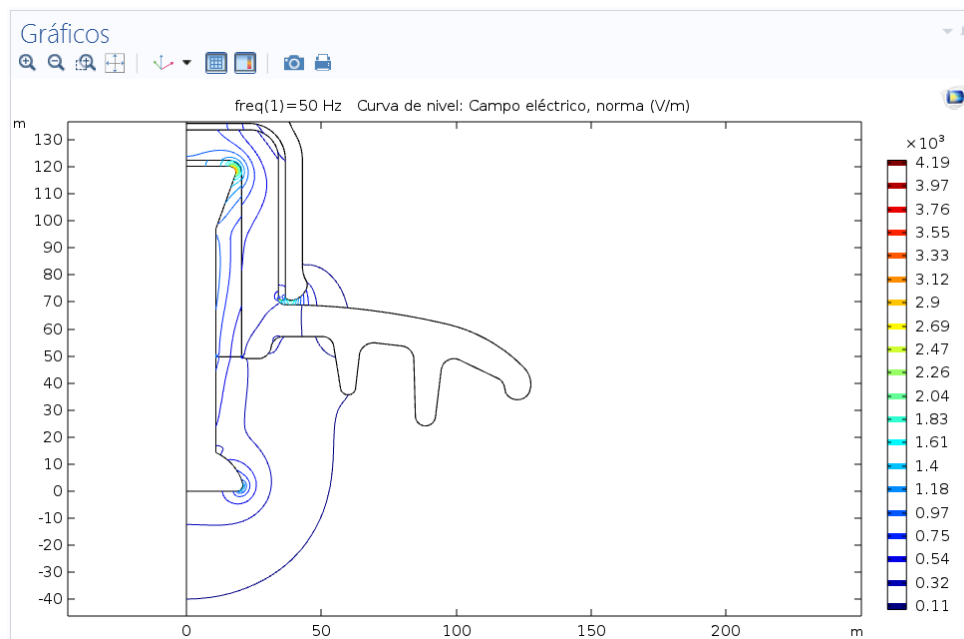


Figura (D 3): Representación del campo eléctrico por curvas de nivel del aislador sin contaminación. [Elaboración propia]

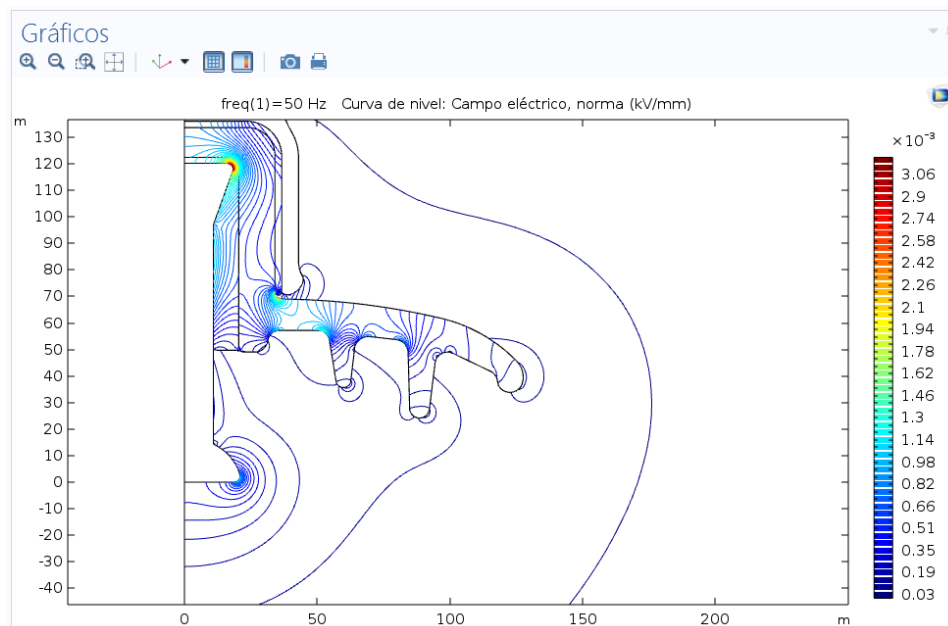


Figura (D 4): Representación del campo eléctrico por curvas de nivel del aislador con SPS Leve. [Elaboración propia]

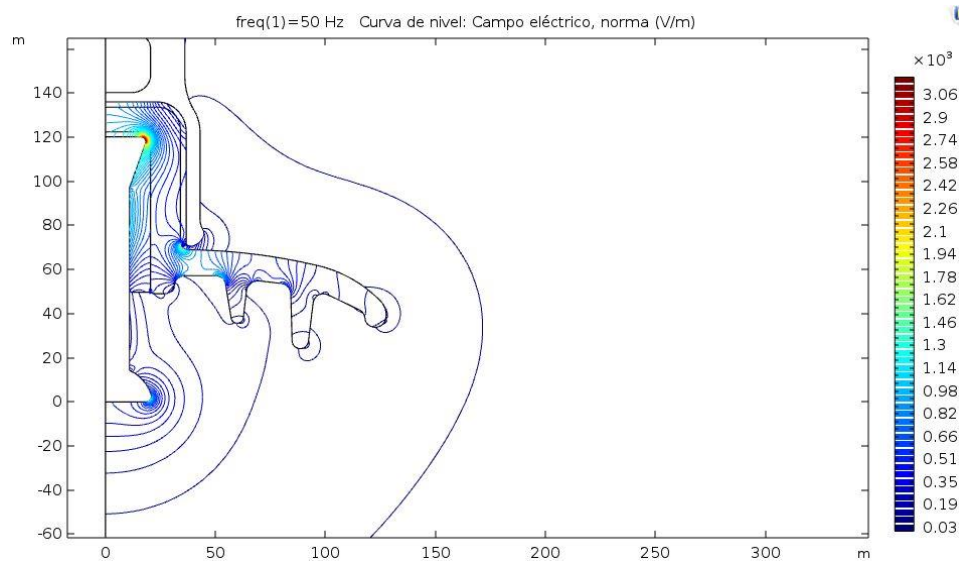


Figura (D 5): Representación del campo eléctrico por curvas de nivel del aislador con SPS Medio. [Elaboración propia]

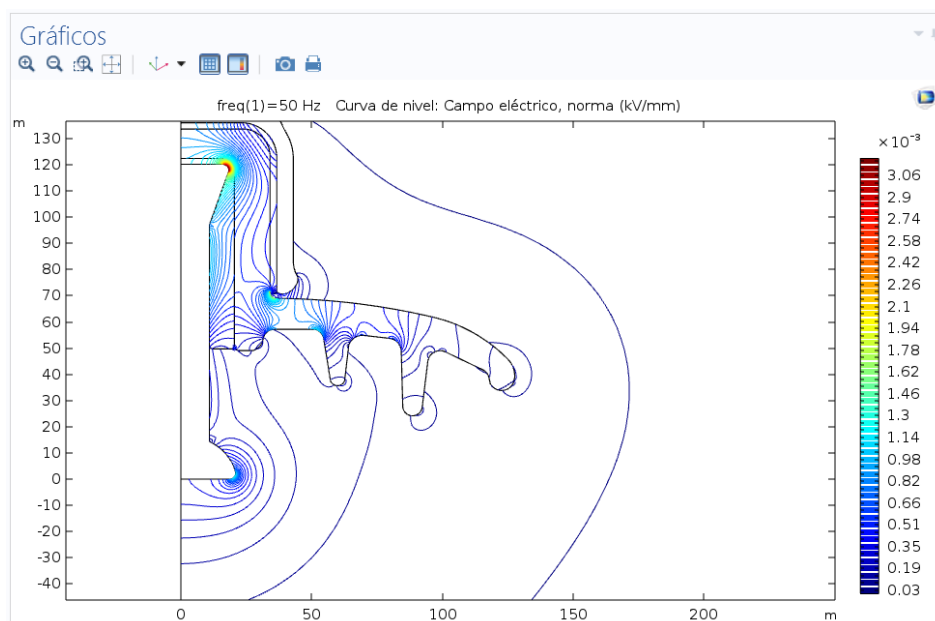


Figura (D 6): Representación del campo eléctrico por curvas de nivel del aislador con SPS Fuerte. [Elaboración propia]

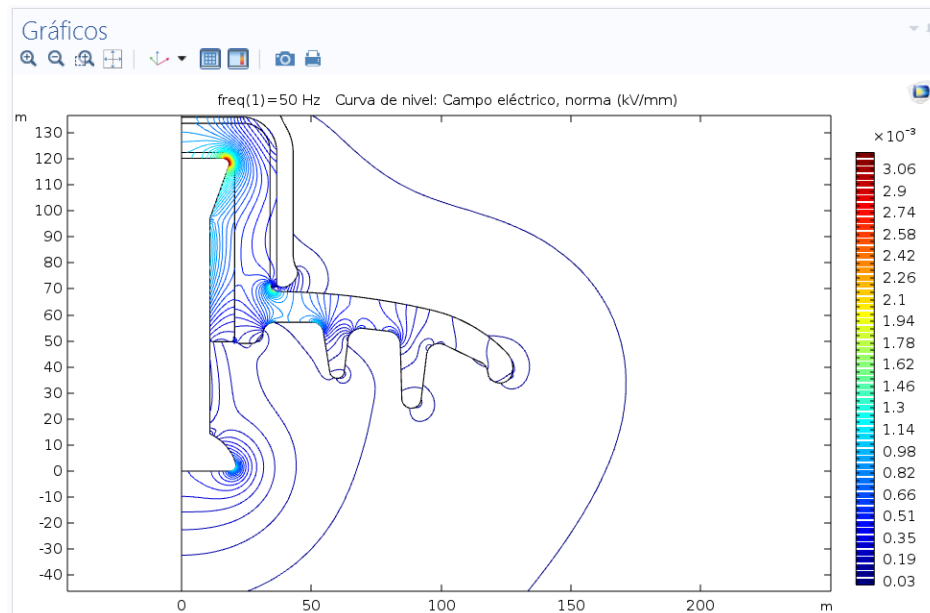


Figura (D 7): Representación del campo eléctrico por curvas de nivel del aislador con SPS Muy fuerte. [Elaboración propia]

APÉNDICE E: EJEMPLO DE APLICACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE AISLAMIENTO PARA CASOS DE CONTAMINACIÓN

Selección de la distancia de fuga según el nivel de SPS

Este apéndice tiene como intención mostrar un ejemplo de la coordinación de aislamiento obtenidas por las normas IEC 60071-2 e IEC 60815-2 [3, 8] para el caso trabajado en esta memoria.

En el capítulo 4 se determinaron las relaciones entre el nivel de la severidad de contaminación del sitio y la obtención de la distancia de fuga unificada. Además, en el capítulo 5 se define el perfil y modelo de aislador a utilizar, el cual depende de características constructivas propuestas por la norma IEC 60305 [6].

Dentro de las características se considera una distancia de fuga de 330mm, según el SPS muy suave, esta distancia corresponde a una tensión máxima del aislador de 15kV de acuerdo con la ecuación (38).

Siguiendo esta lógica, si la tensión de operación se mantiene fija y la multiplicamos por los USCD obtenidos según el nivel de severidad de contaminación del sitio, se obtendrá la distancia de fuga necesaria para soportar la tensión impuesta de operación a un nivel de contaminación dado, como se aprecia en la Tabla (E 1).

Para cumplir con las distancias de fuga requeridas es posible **utilizar un aislador con parámetros mayores** al utilizado en este trabajo o **formar una cadena de aisladores** que juntos sumen la distancia total necesaria.

Manteniendo tensión de operación de 15 [kV]		
SPS	USCD [mm/kV]	Distancia de fuga [mm]
Muy suave	22	330
Suave	27,8	417
Medio	34,7	520,5
Fuerte	43,3	649,5
Muy fuerte	53,7	805,5

Tabla (E 1): Distancias de fuga según nivel de SPS calculadas para una tensión de operación de 15kV. [Elaboración propia]

Tensión máxima de la unidad según nivel del SPS

Con la intención de conocer la tensión máxima soportada del aislador estándar de referencia U120B, respecto al nivel de severidad de contaminación, se obtiene la Tabla (E 2). En esta tabla se puede notar el efecto que tiene la contaminación sobre el aislador, disminuyendo la tensión a soportar hasta en un 60% para nivel más severo.

Manteniendo el largo de la distancia de fuga de 330 [mm]		
SPS	USCD [mm/kV]	Tensión máxima de la unidad [kV]
Muy suave	22	15
Suave	27,8	12
Medio	34,7	10
Fuerte	43,3	8
Muy fuerte	53,7	6

Tabla (E 2): Tensiones máximas a soportar del aislador U120B según nivel de SPS. [Elaboración propia]

A continuación en la Figura (E 3), se mostrarán las comparaciones de las distribuciones de campo eléctrico tangencial del aislador solicitado a la tensión máxima de diseño de 15kV y a las tensiones obtenidas de la Tabla (E 2) para todos los niveles de contaminación. Como se puede apreciar, la intensidad de campo eléctrico debe

disminuir al haber mayor contaminación, **por esta razón, es importante elegir el perfil o la longitud de paso correcto de acuerdo con el nivel de contaminación del ambiente para asegurar un buen funcionamiento.**

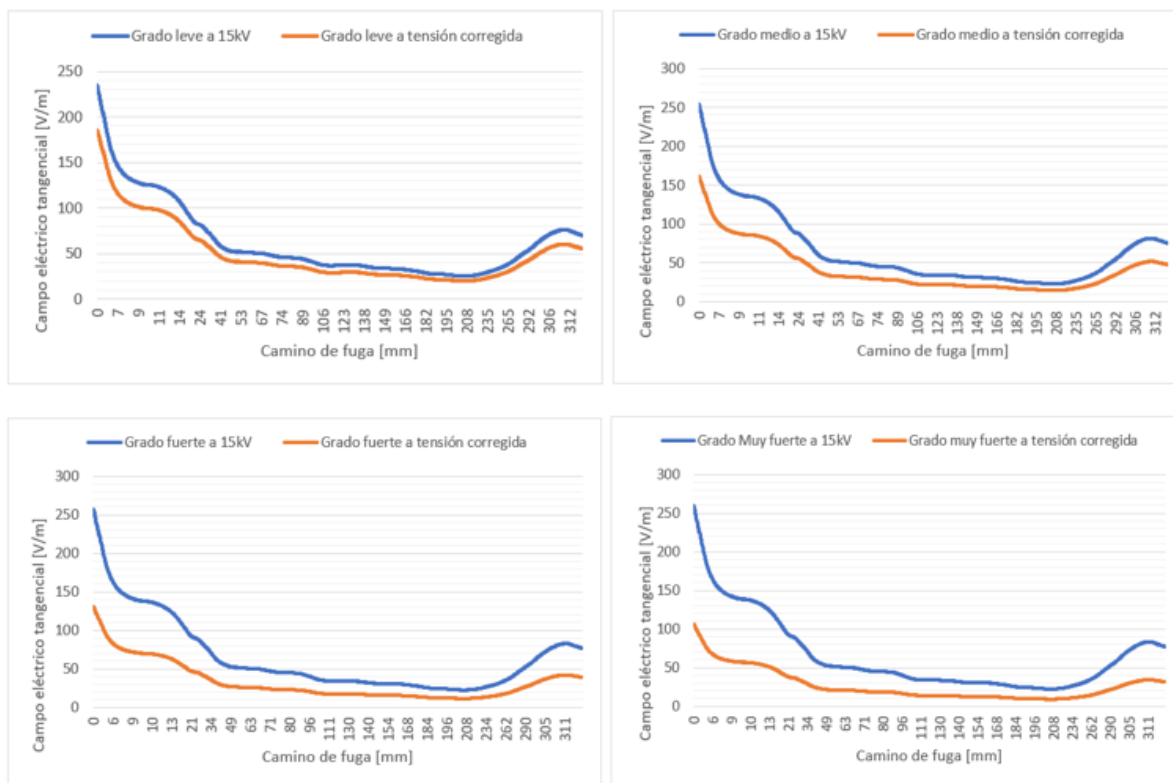


Figura (E 3): Corrección de la tensión máxima del aislador contaminado por distintos niveles de contaminación.
[Elaboración propia]