



---

# **INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

---

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica  
Unidad Profesional “Adolfo López Mateos”  
Sección de Estudios de Posgrado e Investigación  
Departamento de Ingeniería Eléctrica

## **OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS DE ATENUACIÓN DE CAMPO ELÉCTRICO EN AISLADORES POLIMÉRICOS DE 115 kV MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTO FINITO**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

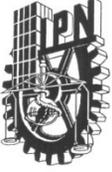
**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

PRESENTA

**DANIEL CRUZ DOMÍNGUEZ**



México D.F., Noviembre de 2011



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

## ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de MÉXICO, D.F. siendo las 14:00 horas del día 14 del mes de Noviembre del 2011 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de la: E. S. I. M. E. ZAC. para examinar la tesis titulada:

**“OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS DE ATENUACIÓN DE CAMPO ELÉCTRICO EN AISLADORES POLIMÉRICOS DE 115 KV MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTO FINITO”**

Presentada por el alumno:

<u>CRUZ</u>	<u>DOMÍNGUEZ</u>	<u>DANIEL</u>
Apellido paterno	Apellido materno	Nombre(s)
Con registro:		
<b>B</b>	<b>0</b>	<b>9 1 5 2 8</b>

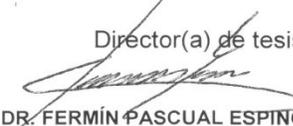
aspirante de:

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

Después de intercambiar opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

### LA COMISIÓN REVISORA

Director(a) de tesis

  
DR. FERMÍN PASCUAL ESPINO CORTÉS

  
DR. DANIEL OLGÚN SALINAS  
Presidente

  
DR. PABLO GÓMEZ ZAMORANO  
Secretario

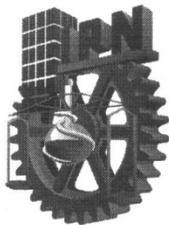
  
DR. GERMAN ROSAS ORTIZ  
Segundo vocal

  
DR. ISAÍAS RAMÍREZ VÁZQUEZ  
Tercer vocal

### PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

  
DR. JAIME ROBLES GARCÍA





# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

## SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

### CARTA DE CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México D.F., el día 14 del mes de Noviembre del año 2011. El que suscribe Daniel Cruz Domínguez, alumno del Programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica con número de registro B091528, adscrito a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME-Zacatenco del IPN, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Fermín Pascual Espino Cortés y cede los derechos del trabajo titulado: Optimización de sistemas de atenuación de campo eléctrico en aisladores poliméricos de 115 kV mediante el método de elemento finito, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, graficas o datos del trabajo sin el permiso del autor y/o director del trabajo. Éste puede ser obtenido escribiendo a las direcciones de correo electrónico: cd\_daniel04@hotmail.com y/o fespino@gmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Daniel Cruz Domínguez

---

## **Agradecimientos**

A Dios por todas las oportunidades que me ha otorgado, por su generosidad y bondad, por permitirme terminar una etapa más en la vida.

A mis Padres por el apoyo incondicional que siempre me han brindado, por sus consejos y ánimos, por ser motivación en mi vida, y ser parte de este logro profesional.

A mis hermanos, por su comprensión.

Al Dr. Fermín Pascual Espino Cortés por sus invaluable consejos y enseñanzas, por brindarme todas las facilidades, interés y confianza no sólo como asesor en este trabajo, sino en mi desarrollo profesional.

A todos los profesores, personal de apoyo y compañeros de la SEPI ESIME ZAC.

A la comisión revisora por sus valiosas observaciones y comentarios.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

## RESUMEN

Los aisladores son considerados elementos de gran importancia para el buen desempeño de los sistemas de transmisión y distribución. Por ello han experimentado continuas modificaciones en cuanto a su diseño y materiales empleados en su fabricación. Dichos cambios tienen el objetivo de minimizar la probabilidad de que los aisladores fallen una vez instalados.

En aisladores poliméricos un problema bien conocido es el campo eléctrico intenso que se presenta en la vecindad de sus extremos. Cuando el campo eléctrico local en estas zonas alcanza un valor superior al requerido para la ionización del aire, aparecen descargas superficiales, cuya presencia contribuye a reducir la vida útil del aislador polimérico. Para tensiones por arriba de 230 kV se recomienda utilizar dispositivos para atenuar el campo eléctrico; sin embargo, fallas con aisladores poliméricos en líneas de 115 kV sugieren que estos sistemas de atenuación pudieran también ser requeridos en aisladores poliméricos a este nivel de tensión.

En este trabajo se analizan dos técnicas de atenuación de campo eléctrico, para aisladores poliméricos de 115 kV del tipo suspensión, mediante simulaciones en dos y tres dimensiones. Ambas técnicas se optimizaron con el objetivo de comparar la reducción máxima de campo eléctrico que se presenta en la superficie del aislador. En la primera técnica el valor de permitividad y la forma de la cubierta polimérica cercana al herraje de potencial fueron los parámetros a optimizar. Como segundo caso se analizó la instalación de un anillo corona, su posición y dimensiones fueron las variables optimizadas. Estas simulaciones se realizaron con el método de elemento finito, mientras que para el proceso de optimización se utilizaron diferentes funciones del Toolbox de MATLAB®.

Primero se resolvieron algunos ejemplos de optimización para sistemas de alta tensión con soluciones conocidas con el objetivo de identificar las características de cada función de optimización usada en este trabajo. La optimización se realizó en dos dimensiones y los resultados se utilizaron en un modelo en tres dimensiones para verificar que los diseños obtenidos siguieran siendo los adecuados.

De acuerdo a los resultados se encontró que el uso de anillos corona en líneas de 115 kV proporciona la máxima reducción de campo eléctrico siempre y cuando su instalación sea la adecuada. Por otro lado, el modificar el perfil cercano a potencial puede producir una reducción considerable del máximo campo eléctrico en aisladores poliméricos de 115 kV, en este caso un diseño de forma del perfil cercano a potencial es propuesto.

## ABSTRACT

Insulators are considered elements of great importance for the proper performance of transmission and distribution power lines. Insulators have experienced continuous changes in terms of design and type of materials used to produce them. These changes are intended to minimize the probability of failure once insulators are installed.

In polymeric insulators the high electric field concentration in the vicinity of both line and ground ends is a well known problem. When the local electric field reaches values above the corona inception field, surface discharges take place, something that has contributed to reduce the life of polymeric insulators. Electric field grading devices are usually recommended in insulators above 230 kV, but recently, problems on insulators of 115 kV transmission lines have brought into question whether these devices are also needed at this voltage level.

In this work two electric stress grading options for 115 kV non-ceramic suspension insulators are analyzed by means of 2D and 3D simulations. Both options were optimized in order to compare the maximum reduction that can be obtained on the electric field at the surface of the insulator. In the first option the shape and permittivity value of the housing material next to the energized end were the optimized parameters. For the second option, the installation of a corona ring, the position and dimensions of the ring were optimized. Electric field simulations were performed with the finite element method (FEM) while for optimization process different functions of the MATLAB<sup>®</sup> optimization toolbox were used.

Some optimization examples of high voltage systems with known solution are first solved in order to identify the features of each optimization function used in this thesis. The optimization in the insulator was performed with 2D FEM simulations and the optimal designs were then used on 3D models, in order to verify that these designs remain as the best option.

According to the results, it was found that the use of a corona ring in 115 kV lines produces the maximum reduction of electric field as long as it is installed in the optimal position. A modification of the housing profile next to the energized end will also produce a significant reduction on the maximum electric field on 115 kV non-ceramic insulators. For this second option a shape design of the housing is proposed.

# CONTENIDO

	Pág.
CAPÍTULO I.Introducción .....	1
1.1. Generalidades .....	1
1.2. Planteamiento del problema .....	2
1.3. Antecedentes .....	4
1.4. Objetivos.....	7
1.4.1. Objetivo general.....	7
1.4.2. Objetivos particulares .....	7
1.5. Justificación.....	8
1.6. Estado del arte .....	9
1.7. Aportaciones.....	13
1.8. Limitaciones y alcances.....	13
1.8.1. Limitaciones .....	13
1.8.2. Alcances.....	13
1.9. Estructura de la tesis .....	14
CAPÍTULO II.Modelado del campo eléctrico en aisladores poliméricos .....	15
2.1. Introducción .....	15
2.2. El campo cuasi-estacionario eléctrico .....	15
2.3. Refracción dieléctrica .....	17
2.4. Campo eléctrico tangencial en un aislador polimérico.....	21
2.5. Uso de anillos corona en 115 kV .....	26
2.6. Modificación de la geometría del aislador .....	27
CAPÍTULO III.Minimización de esfuerzos eléctricos en sistemas de aislamiento .....	31
3.1. Introducción .....	31
3.2. Proceso de optimización.....	32
3.3. Funciones que usan algoritmos convencionales de optimización.....	34
3.3.1. Función de optimización con una variable acotada .....	34
3.3.2. Función de optimización con más de una variable y con restricciones.....	35
3.3.3. Optimización usando algoritmos genéticos.....	35
3.4. Minimización de campo eléctrico mediante optimización.....	37
3.4.1. Radio óptimo del conductor en un arreglo coaxial .....	37
3.4.2. Radio y distancia de ubicación óptimos de los conductores en un arreglo triaxial .....	41

	Pág.
3.4.3. Diseño de un disco espaciador.....	46
CAPÍTULO IV.-Diseño óptimo del sistema de atenuación en el aislador .....	54
4.1. Introducción.....	54
4.2. Modelo del aislador usado para la simulación.....	54
4.3. Análisis paramétrico de la permitividad relativa del material y del ángulo de inclinación del perfil.....	56
4.4. Optimización de $\epsilon_r$ y del ángulo de inclinación del perfil.....	58
4.5. Optimización de la geometría cercana al lado energizado.....	62
4.6. Optimización de un anillo corona .....	65
4.7. Simulación en tres dimensiones de los valores obtenidos en el proceso de optimización en dos dimensiones.....	67
4.8. Simulación del perfil inclinado en 3D .....	70
4.9. Simulación del perfil cóncavo en 3D.....	71
4.10. Simulación de anillo corona en 3D .....	72
4.11. Registro de campo eléctrico fuera de la superficie.....	74
CAPÍTULO V.-Conclusiones.....	78
5.1. Introducción.....	78
5.2. Conclusiones.....	78
5.3. Aportaciones.....	79
5.4. Recomendaciones para trabajos futuros.....	80
Artículos derivados de la tesis .....	82
Referencias.....	84
Apéndice A. Generalidades del aislador polimérico de 115 kV .....	90
Apéndice B. Materiales de alta permitividad.....	96
Apéndice C. Solución analítica de la optimización de un arreglo coaxial.....	98
Apéndice D. Generalidades del código para la optimización del arreglo traixial.....	102

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 Crecimiento de las líneas de transmisión y sub transmisión en el sistema eléctrico Mexicano. ....	3
Figura 1.2 Aisladores poliméricos instalados en líneas de 115 kV.....	3
Figura 2.1 Condiciones Límite.....	18
Figura 2.2 Ley de refracción para campo eléctrico E, en una interfaz con $\epsilon_1 > \epsilon_2$ .....	21
Figura 2.3 Superficie polimérica, en la cercanía del herraje energizado, envejecida en un aislador [23].....	23
Figura 2.4 Campo eléctrico tangencial en la superficie de un aislador polimérico de 115 kV.....	23
Figura 2.5 Descarga corona en la interfaz herraje-Silicón, detectada mediante inspección ultravioleta.....	24
Figura 2.6 Modelo del aislador en COMSOL <sup>®</sup> , a) geometría, b) mallado c) solución.....	25
Figura 2.7 Distribución de líneas equipotenciales en el lado del herraje energizado.....	25
Figura 2.8 Instalación incorrecta de anillos corona en aisladores poliméricos, b) tomada de [23].....	26
Figura 2.9 a)Distribución de líneas de campo eléctrico, b) Comportamiento del Campo eléctrico tangencial con y sin anillo corona.....	27
Figura 2.10 Distribución de líneas equipotenciales a) diseño original, b) sin el primer faldón cercano a potencial, c) con el perfil inclinado del lado energizado.....	28
Figura 2.11 a)Distribución de líneas de campo eléctrico en ausencia del primer faldón, b) Comportamiento del campo eléctrico tangencial en ausencia del primer faldón.....	28
Figura 2.12 a)Distribución de líneas equipotenciales con perfil inclinado, b) Comportamiento del campo eléctrico tangencial con el perfil inclinado.....	30
Figura 3.1 Proceso de optimización.....	33
Figura 3.2 Cable para distribución de energía, alta tensión, 110 kV.....	38
Figura 3.3 Arreglo simple de un cable del tipo coaxial.....	38
Figura 3.4 Distribución de potencial en el arreglo coaxial.....	39
Figura 3.5 Comportamiento del campo eléctrico tangencial de COMSOL <sup>®</sup> .....	40
Figura 3.6 Campo eléctrico tangencial de la optimización.....	40
Figura 3.7 Proceso de optimización del radio del conductor de un arreglo coaxial.....	41
Figura 3.8 Cable para alimentación de energía, media tensión, 15 kV.....	42

	Pág.
Figura 3.9 Arreglo triaxial. ....	42
Figura 3.10 Solución en COMSOL <sup>®</sup> del arreglo triaxial.....	44
Figura 3.11 a) Comportamiento del campo eléctrico tangencial desde el centro del cable, b) Comportamiento del campo eléctrico tangencial desde centros de conductores.....	44
Figura 3.12 Comportamiento del campo eléctrico tangencial optimizado con <i>fminbnd</i> . ....	45
Figura 3.13 Proceso de optimización de las dimensiones para el arreglo triaxial.....	46
Figura 3.14 Líneas aisladas en gas. ....	47
Figura 3.15 Espaciador aislante para líneas aisladas en gas.....	47
Figura 3.16 Espaciador. ....	48
Figura 3.17 Esfuerzo tangencial sobre la superficie del espaciador tipo disco con inclinación de 75° y en un espaciador recto. ....	48
Figura 3.18 Arreglo utilizado para generar la función objetivo. ....	49
Figura 3.19 Comportamiento del campo eléctrico tangencial de la primera solución de COMSOL <sup>®</sup> .....	49
Figura 3.20 Distribución de potencial en línea aislada en gas con el diseño optimo del espaciador. ....	50
Figura 3.21 Distribución de potencial sobre el espaciador en 3D.....	51
Figura 3.22 Comportamiento del campo eléctrico sobre la superficie del espaciador, con dimensiones obtenidas de <i>fmincon</i> . ....	51
Figura 3.23 Comportamiento del campo eléctrico sobre la superficie del espaciador, con dimensiones obtenidas de <i>AG</i> . ....	51
Figura 4.1 Modelo axial simétrico del aislador. ....	55
Figura 4.2 Mallado del modelo axial simétrico del aislador.....	56
Figura 4.3 Solución del modelo axial simétrico del aislador.....	56
Figura 4.4 Análisis paramétrico del ángulo de inclinación. ....	57
Figura 4.5 Análisis paramétrico de la permitividad.....	58
Figura 4.6 Comportamiento del campo eléctrico tangencial en la superficie del aislador (primeros centímetros desde el herraje energizado) encontrado por <i>fminbnd</i> . ....	59
Figura 4.7 Comportamiento del campo eléctrico tangencial en la superficie del aislador (primeros centímetros desde el herraje energizado) encontrado por <i>fmincon</i> . ....	60
Figura 4.8 Comportamiento del campo eléctrico tangencial en la superficie del aislador (primeros centímetros desde el herraje energizado) encontrado por <i>AG</i> . ....	60

	Pág.
Figura 4.9 Comportamiento del campo eléctrico tangencial en la superficie del aislador (primeros centímetros desde el herraje energizado) bajo un impulso de rayo.....	61
Figura 4.10 Comportamiento del campo eléctrico tangencial en la superficie del aislador (primeros centímetros desde el herraje energizado) con perfil cóncavo, modificado con <i>fminbnd</i> . .....	63
Figura 4.11 Comportamiento del campo eléctrico tangencial en la superficie del aislador (primeros centímetros desde el herraje energizado) con perfil cóncavo, modificado con <i>fmincon</i> . .....	64
Figura 4.12 Geometría optima encontrada por AG. ....	64
Figura 4.13 Comportamiento del campo eléctrico tangencial en la superficie del aislador (primeros centímetros desde el herraje energizado) con el perfil cóncavo encontrado con AG. ....	65
Figura 4.14 Dimensiones del anillo corona tomadas como variables para la optimización (R radio del anillo, r radio del tubo del anillo y h posición en el eje vertical).....	66
Figura 4.15 Proceso de optimización de las dimensiones para el anillo corona. ....	67
Figura 4.16 Comportamiento del campo eléctrico tangencial en la superficie del aislador (primeros centímetros desde el herraje energizado) en presencia de un anillo corona. ....	67
Figura 4.17 Modelo en tres dimensiones del aislador polimérico.....	68
Figura 4.18 a) Herraje energizado en el modelo de 3 dimensiones, b) Distribución de campo eléctrico en las cercanías del herraje.....	69
Figura 4.19 Comportamiento del campo eléctrico tangencial en la superficie del aislador (primeros centímetros desde el herraje energizado) en el modelo de tres dimensiones. ....	69
Figura 4.20 Solución del perfil inclinado en 3D. ....	70
Figura 4.21 Comportamiento del campo eléctrico tangencial en la superficie del aislador (primeros centímetros desde el herraje energizado) en el modelo inclinado de 3D. ....	71
Figura 4.22 Solución del perfil cóncavo en 3D.....	71
Figura 4.23 Comportamiento del campo eléctrico tangencial en la superficie del aislador (primeros centímetros desde el herraje energizado) en el modelo cóncavo de 3D...	72

	Pág.
Figura 4.24 Anillo corona en el modelo de 3D.....	73
Figura 4.25 Comportamiento del campo eléctrico tangencial en la superficie del aislador (primeros centímetros desde el herraje energizado) en el modelo con anillo corona en 3D.....	73
Figura 4.26 Campo eléctrico tangencial en la superficie del aislador (primeros centímetros desde el herraje energizado) para diferentes posiciones del anillo corona. ....	74
Figura 4.27 Mediciones fuera de la superficie en el diseño original del aislador.....	75
Figura 4.28 Mediciones fuera de la superficie en el diseño inclinado del aislador. ....	76
Figura 4.29 Mediciones fuera de la superficie en el diseño con anillo corona del aislador. ....	76

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 3.1 Resultados de la optimización para un arreglo coaxial. ....	41
Tabla 3.2 Resultados de la optimización para un arreglo triaxial. ....	46
Tabla 3.3 Resultados de la optimización para el espaciador. ....	50
Tabla 4.1 Resultados de la optimización con la función <i>fminbnd</i> . ....	58
Tabla 4.2 Resultados de la optimización con la función <i>fmincon</i> . ....	59
Tabla 4.3 Resultados de la optimización con la función AG. ....	60
Tabla 4.4 Resultados obtenidos de las funciones de optimización, considerando un impulso de rayo. ....	62
Tabla 4.5 Resultados obtenidos para el perfil cóncavo con <i>fminbnd</i> . ....	62
Tabla 4.6 Resultados obtenidos para el perfil cóncavo con <i>fmincon</i> . ....	63
Tabla 4.7 Resultados obtenidos para el perfil cóncavo con AG. ....	64
Tabla 4.8 Dimensiones óptimas del anillo corona. ....	66

## GLOSARIO

**Actividad corona.** Descarga luminosa debida a la ionización del aire causada por gradientes de tensión que exceden un cierto valor crítico.

**BaTiO<sub>3</sub>.** Titanato de Bario.

**Carga eléctrica.** Es una propiedad intrínseca de algunas partículas subatómicas que se manifiesta mediante atracciones y repulsiones que determinan las interacciones electromagnéticas entre ellas.

**CIGRE.** Consejo Internacional de Grandes Redes Eléctricas.

**Conductividad ( $\sigma$ ).** Es una propiedad física del material que mide la facilidad que presenta un medio al paso de la corriente eléctrica. La conductividad relaciona a la intensidad de campo eléctrico con la densidad de corriente.

**Corriente de fuga.** Corriente que circula sobre la superficie de un aislador cuando se encuentra energizado.

**Descarga parcial.** Es un tipo de descarga localizada resultante de ionización transitoria en un sistema de aislamiento cuando el esfuerzo debido a la tensión excede un cierto valor. La ionización es usualmente localizada sobre una porción de la distancia entre electrodos.

**Dieléctrico.** Medio en el cual es posible mantener un campo eléctrico interno al ser sometido a un campo eléctrico externo, es mal conductor de electricidad, se utiliza como medio aislante.

**Distancia de arco en seco.** Es la menor distancia alrededor de un medio entre dos electrodos, o la suma de las distancias entre electrodos intermedios, la que sea más corta.

**Divergencia ( $\nabla \cdot$ ).** La función divergencia arroja la cantidad de flujo que se produce en el punto donde las dimensiones convergen a cero.

**EPRI.** Electric Power Research Institute.

**Gradiente ( $\nabla$ ).** Es un vector que apunta en la dirección donde la función experimenta el máximo cambio.

**Hidrofobicidad.** Propiedad que tiene la superficie de un aislante para formar gotas de agua en lugar de formar una película continua de agua, cuando existen condiciones de niebla, humedad o lluvia.

**Material compuesto.** Cualquier material constituido por más de un componente.

**Permitividad dieléctrica ( $\epsilon$ ).** Es una propiedad física de la materia que mide la facilidad que presenta un medio para formar dipolos (separación de cargas positivas y negativas), la permitividad mide cuanta carga un medio es capaz de almacenar.

**Polímero.** Material formado por macromoléculas, a su vez formadas por una unión débil de moléculas más pequeñas, monómeros. Los polímeros han sido utilizados exitosamente como aisladores. Las desventajas de las uniones débiles, y la baja temperatura de descomposición se compensan con su característica de hidrofobicidad.

**Spline.** Es una curva definida en porciones mediante polinomios, los splines se utilizan para aproximar formas complicadas.

**Tensión de flameo.** Tensión eléctrica necesaria para producir una ruptura lo suficientemente ionizada para mantener un arco eléctrico.

## Nomenclatura

$D_{1n}$	Componente normal de la densidad de campo eléctrico en el material 1
$D_{1t}$	Componente tangencial de la densidad de campo eléctrico en el material 1
$D_{2n}$	Componente normal de la densidad de campo eléctrico en el material 2
$D_{2t}$	Componente tangencial de la densidad de campo eléctrico en el material 2
$\bar{E}_1$	Campo eléctrico en el material 1
$\bar{E}_{1n}$	Componente normal de campo eléctrico en el material 1
$\bar{E}_{1t}$	Componente tangencial de campo eléctrico en el material 1
$\bar{E}_2$	Campo eléctrico en el material 2
$\bar{E}_{2n}$	Componente normal de campo eléctrico en el material 2
$\bar{E}_{2t}$	Componente tangencial de campo eléctrico en el material 2
$\bar{J}_c$	Corriente de conducción
$\bar{B}$	Densidad de flujo magnético
$\bar{D}$	Densidad de flujo eléctrico
$\bar{E}$	Intensidad de campo eléctrico
$E_{max}$	Campo eléctrico máximo
$\bar{H}$	Intensidad de campo magnético
$J^e$	Densidad de corriente externa
$q_t$	Carga eléctrica total
$Q_j$	Fuente de corriente puntual
$f'()$	Primera derivada de la función
$f''()$	Segunda derivada de la función
$\alpha_1$	Angulo entre $\bar{E}_1$ y el eje de las ordenadas
$\alpha_2$	Angulo entre $\bar{E}_2$ y el eje de las ordenadas
$\rho_v$	Densidad volumétrica de carga
$\Delta h$	Incremento en h
$\Delta w$	Incremento en w
$\nabla$	Operador gradiente
$\nabla \cdot$	Operador divergencia
$\nabla \times$	Operador rotacional
°	Grados
2D	Dos dimensiones
3D	Tres dimensiones
AG	Algoritmo genético
CA	Corriente alterna
CD	Corriente directa
MEF	Método de elemento finito
SEP	Sistema eléctrico de potencia
SF <sub>6</sub>	Hexafluoruro de azufre

$\epsilon_0$	Permitividad del espacio vacío
$\epsilon_1$	Permitividad del material 1
$\epsilon_2$	Permitividad del material 2
$\epsilon_r$	Permitividad relativa
$\sigma$	Conductividad
$\omega$	Frecuencia
$e$	Constante de Napier
$d\bar{s}$	Diferencial de superficie
$dl$	Diferencial de longitud
$\rho$	Densidad de carga
$\rho_s$	Densidad de carga superficial
$\partial t$	Derivada con respecto al tiempo



---

---

# CAPÍTULO I. Introducción

## 1.1. Generalidades

La creciente demanda de energía eléctrica a nivel mundial ha generado un crecimiento rápido de los sistemas eléctricos de potencia (SEPs). Junto con el incremento en la complejidad de los SEPs se han elevado los criterios de calidad en el suministro de energía. La calidad de la energía está referida en buena parte a la continuidad del servicio, la cual es afectada considerablemente por salidas provocadas por fallas de líneas de transmisión y distribución.

Las líneas de transmisión y distribución se diseñan de tal forma que los aisladores soporten mecánicamente a los conductores de fase, aislándolos eléctricamente de la estructura aterrizada. Después de las descargas atmosféricas se ha considerado a la contaminación en aisladores como la segunda causa de fallas en líneas eléctricas. Esto ha llevado a considerar a los aisladores como elementos de gran importancia para el buen desempeño de los sistemas de transmisión y distribución de energía eléctrica. Como consecuencia los aisladores han experimentado continuas modificaciones en cuanto a su diseño y tipo de materiales empleados. Dichos cambios siempre buscan reducir al máximo la probabilidad de que los aisladores fallen una vez instalados.

Los aisladores cerámicos y de vidrio son los de uso más común, principalmente debido a la gran experiencia adquirida en su fabricación, instalación y de su bien conocido comportamiento en campo. Sin embargo, problemas con el uso de aisladores cerámicos o de vidrio llevaron a la necesidad de buscar otro tipo de diseño que pudiera ser una mejor alternativa. Una de estas opciones es el uso de aisladores poliméricos [1].

Algunas ventajas de los aisladores poliméricos, adicionales a la de su bajo peso, se evidenciaron conforme se fueron utilizando. Su resistencia al vandalismo, su menor costo y su mejor desempeño en ambientes con contaminación severa, son ventajas que han generado un gran interés por los aisladores poliméricos a nivel mundial. Las compañías

suministradoras de energía eléctrica ven esta alternativa como una muy buena opción, aunque en la mayoría de los casos solo los utilizan en puntos de alta contaminación donde los aisladores cerámicos presentan fallas continuas. Algo que ha limitado el reemplazo de los aisladores cerámicos por aisladores poliméricos puede adjudicarse al proceso de envejecimiento del polímero. La pérdida gradual de propiedades, como lo es la hidrofobicidad superficial, por la exposición prolongada a la contaminación, a la radiación ultravioleta o a descargas eléctricas superficiales, puede afectar considerablemente el desempeño de los aisladores poliméricos. Aún así las ventajas significativas de los aisladores poliméricos con respecto a los cerámicos han generado un gran interés por resolver los problemas todavía existentes.

En este capítulo se plantea el problema existente en el control del campo eléctrico en aisladores poliméricos de 115 kV, se describe y justifica el objetivo de la tesis y se dan antecedentes de trabajos previos.

## **1.2. Planteamiento del problema**

En años recientes diversas empresas encargadas del servicio eléctrico en E.U.A. han presentado reportes de fallas prematuras en aisladores poliméricos en líneas de 115 kV y 138 kV [2]. Encuestas realizadas por el EPRI, indican que de las fallas reportadas en aisladores poliméricos son causadas en un 60% por descargas eléctricas superficiales que provocan el deterioro y envejecimiento del material. El EPRI se ha interesado en identificar las causas de estas fallas y en recomendar algunas medidas de acción, para asegurar la confiabilidad de líneas con estos niveles de tensión. En nuestro país, las líneas de 138 kV prácticamente están en desuso mientras que las de 115 kV siguen incrementando considerablemente su longitud [3], como se observa en la Figura 1.1. En México la red de 115 kV es considerada como una red de sub transmisión, junto con la de 138, 85 y 69 kV. La Figura 1.1 muestra la tasa de crecimiento de las líneas de 115, 230 y 400 kV. Actualmente la red de 115 kV tiene una longitud de 42700 km, y es la línea de mayor extensión. En la expansión de la red de 115 kV el uso de aisladores poliméricos se ha hecho presente, como se muestra en la Figura 1.2, por sus ya conocidas ventajas, sin embargo también se han presentado fallas en estos aisladores.

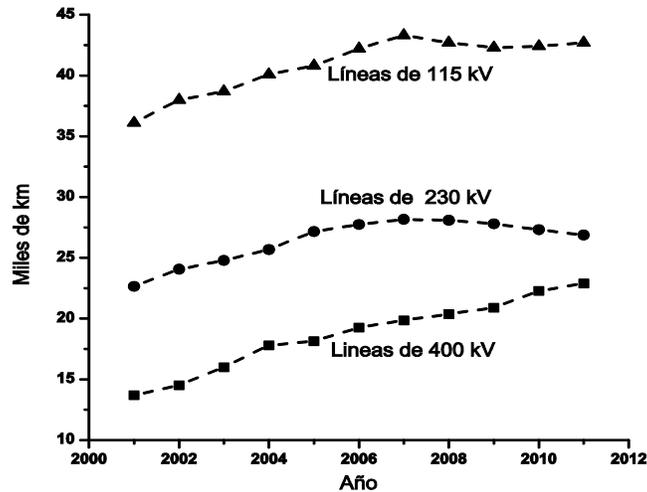


Figura 1.1 Crecimiento de las líneas de transmisión y sub transmisión en el sistema eléctrico Mexicano [3].



Figura 1.2 Aisladores poliméricos instalados en líneas de 115 kV.

Las fallas que se han reportado en aisladores para 115 kV se deben principalmente a la presencia de un campo eléctrico intenso en los extremos del aislador, el cual es capaz de alcanzar e incluso superar los 22 kVrms/cm [4,5] que se necesitan para que se genere una descarga parcial (descarga corona). La descarga corona llega a causar la erosión completa del material polimérico exponiendo el núcleo de fibra de vidrio a la humedad, lo que usualmente acelera el proceso de falla. Este problema había sido asociado a niveles de tensión iguales o mayores a 230 kV, por lo que las normas existentes para la aplicación de aisladores poliméricos no especifican como una obligación el uso de algún sistema de atenuación de campo para tensiones menores de 230 kV. Sin embargo, como se verá más adelante, mediante el resultado de simulaciones, la intensidad de campo eléctrico en

aisladores poliméricos a este nivel de tensión en el lado energizado supera el valor de referencia para el inicio de actividad corona.

Por la importancia de las líneas en 115 kV en nuestro país y por el uso cada día mayor de los aisladores poliméricos en éstas, en este trabajo se busca responder a la pregunta de si es necesario controlar el campo eléctrico en este tipo aisladores. Si es así, verificar si el uso de anillos corona, técnica que ha ofrecido buenos resultados en tensiones superiores a 230 kV, es la única solución o de lo contrario proponer y analizar alguna otra técnica de atenuación alternativa al uso del anillo corona.

### **1.3. Antecedentes**

La experiencia en el uso de aisladores poliméricos ha sido en general buena. Estos han sido utilizados en líneas de transmisión y distribución. Algunos de ellos han estado en servicio por más de 25 años. El uso aisladores poliméricos se propuso desde los 60s y con ello surgió el interés por su comportamiento en campo. Las primeras investigaciones realizadas en este tipo de aisladores fueron encaminadas hacia el estudio de distintos materiales para su fabricación y a verificar su comportamiento en ambientes contaminados. Este tipo de aisladores no estuvo exento de fallas, las primeras fueron de origen mecánico y reportadas en los 70s. También se observó un rápido envejecimiento en algunos de los materiales utilizados en los aisladores poliméricos, este problema fue asociándolo al efecto de rayos ultravioleta y descargas eléctricas locales entre otras causas [6]. Así una de las primeras grandes líneas de investigación relacionada con aisladores poliméricos fue la mejora de los materiales [7]. Por otro lado, también existe un trabajo extenso relacionado con el diseño de los aisladores. En muchos casos con el diseño de los aisladores se busco reducir la presencia de altos campos eléctricos, reduciendo así la probabilidad de descargas superficiales [8]. El uso de diferentes técnicas para el cálculo de campo eléctrico ayudó a obtener los primeros diseños. Las herramientas computacionales siguen mejorando y nuevos trabajos relacionados con el cálculo de campo eléctrico han sido publicados en los últimos años. Una descripción de los trabajos más recientes relacionados al modelado en aisladores se presenta en la sección 1.6.

La experiencia del uso de aisladores en líneas de transmisión se reportó primeramente

en tres estudios realizados, dos de ellos por el CIGRE y uno más por el EPRI. Los dos primeros reportaron el desempeño de aisladores poliméricos en sistemas de corriente alterna (CA) en 1989. El tercer estudio, reportado por el CIGRE en 1994, describe experiencias en sistemas de corriente directa (CD) [9].

El trabajo realizado por el EPRI indica que los aisladores poliméricos son utilizados en un amplio rango de tensiones en sistemas de E.U.A.; éstos son utilizados en diferentes estructuras y ante diferentes niveles de contaminación. El reporte indica que el desempeño de los aisladores fue considerado bueno en un 78%, aceptable en 18%, y malo en 4%. De las fallas el 17% fueron reportadas como fallas eléctricas, 17% como mecánicas, más del 60% de las fallas fueron reportadas por problemas de degradación, y 2% fueron ocasionadas por vandalismo. El reporte de las fallas eléctricas incluye descargas ocasionadas por contaminación superficial, depósitos de sal y desechos de aves [2].

Los estudios indican que en el caso de aisladores poliméricos de suspensión, 53% fueron instalados en tensiones menores a 200 kV, 27% fueron instalados en sistemas menores de 500 kV y 4% en sistemas de 500 kV. Entre las conclusiones que obtuvo el reporte están, que la mayoría de las fallas involucra aisladores que fueron mal construidos y producidos durante los años 80. Desde entonces los fabricantes han mejorado sus diseños y calidad en el control de construcción de aisladores. Los usuarios también han modificado sus criterios para la utilización de estas unidades [2].

De acuerdo al EPRI, desde 2006 diversas compañías han reportado que el número de fallas en aisladores poliméricos se ha incrementado en líneas de 115 y 138 kV. Investigaciones han mostrado que estas fallas son debidas a la presencia de alto campo eléctrico en los extremos del aislador. Como conclusión de estas nuevas investigaciones, se ha sugerido el uso de anillos corona [27].

Un informe en 2008, también del EPRI, concluyó que existe un problema con la degradación del polímero aislante para 115 kV y 138 kV en configuraciones y diseños específicos del aislador. De esta forma indicó que la confiabilidad del servicio puede verse afectada si las compañías no adoptan medidas para minimizar las descargas corona en el material y herrajes [27].

Al ser evidentes las fallas presentadas en este tipo de aisladores, una empresa de servicio eléctrico, PSE &G Newark de Nueva Jersey en E.U.A. se dedicó a investigar el origen de las descargas eléctricas sobre estas unidades. A través de una cámara DayCor<sup>®</sup>, sólo confirmaron la presencia de actividad corona [27].

Un equipo de investigación del EPRI examinó cinco fallas en aisladores de tres diferentes compañías en líneas de 115 y 138 kV, entre junio de 2006 y agosto de 2007. Las fallas fueron en el mismo diseño de aislador, fabricados entre 1993 y 1999, todos ellos fallaron debido a esfuerzos eléctricos y corrosión. El estudio indicó que todas las fallas podrían atribuirse directamente a actividad corona en condiciones secas; la cubierta de polímero se encontraba agrietada permitiendo que la humedad entrara en contacto con la barra de fibra de vidrio, dando lugar a la falla por fragilidad de la barra [27].

En los últimos dos años empresas públicas en colaboración con el EPRI, han iniciado una serie de actividades específicas para evaluar el riesgo de falla en aisladores poliméricos de 115 kV y 138 kV. Para entender el mecanismo de falla y determinar la forma de mitigarlo, el equipo del proyecto EPRI está utilizando herramientas obtenidas en la última década. Estas herramientas incluyen la inspección corona durante el día (DayCor<sup>®</sup>), modelado tridimensional de campo eléctrico y mediante estudio en laboratorio de la degradación de aisladores fallados [27].

En México, se sabe de fallas en aisladores poliméricos instalados en líneas de 115 kV en la zona del Bajío; sin embargo, no se sabe que existen estadísticas y menos un estudio sobre las posibles causas.

Con la finalidad de retrasar el envejecimiento de los materiales poliméricos en aisladores, existen trabajos que buscan incrementar la resistencia de estos materiales ante las descargas ocasionadas por un alto campo eléctrico, mientras que otra opción es el utilizar algunos sistemas para la atenuación del campo eléctrico, opción que es la que se aborda en esta investigación [9].

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo general**

Analizar, optimizar y comparar distintas técnicas de atenuación de campo eléctrico para aisladores poliméricos de 115 kV, mediante el uso del método de elemento finito y funciones matemáticas de optimización.

### **1.4.2. Objetivos particulares**

- Obtener un diseño de aislador polimérico de 115 kV con geometría óptima, que minimice la componente tangencial de campo eléctrico en la superficie, mediante el uso del MEF en dos dimensiones.
- Obtener las dimensiones y ubicación óptimas para minimizar la componente tangencial de campo eléctrico en un aislador polimérico de 115 kV mediante el uso del MEF en dos dimensiones.
- Simular y validar los resultados óptimos obtenidos en dos dimensiones, mediante una simulación de un modelo en tres dimensiones.
- Comparar y analizar los resultados ofrecidos por las técnicas de atenuación estudiadas.

## 1.5. Justificación

Evitar la degradación del material polimérico en aisladores ha sido de gran interés en años recientes, debido a que se considera una de las principales causas de falla en los aisladores poliméricos. Una de estas causas es la presencia de descargas parciales en la superficie del aislador, las cuales que se originan por los niveles elevados de campo eléctrico que pueden llegar a presentarse en la cercanía de los herrajes. Las medidas encaminadas a reducir la degradación en el aislador se pueden clasificar en dos grandes líneas: reducir la intensidad del campo eléctrico en la superficie del aislador por debajo del valor de inyección de las descargas y modificar las propiedades de los materiales poliméricos, mediante la adición de rellenos inorgánicos para incrementar su resistencia a las descargas superficiales. En el primer caso se encuentra el uso de anillos corona, el cual es recomendado en normas internacionales para aisladores instalados en sistemas mayores a 230 kV; sin embargo, para líneas de 115 kV el uso de anillos corona se deja al criterio de los fabricantes de acuerdo a los requerimientos de la instalación. Esta incertidumbre dejada por las normas ha derivado en que la mayoría de los fabricantes no recomienden el uso de anillos corona para niveles de tensión por debajo de 230 kV. Lo anterior es básicamente para no incrementar el costo y hacer su producto más competitivo económicamente.

Por otro lado, reportes de fallas en líneas de 115 kV han captado la atención de centros de investigación relacionados con el sector eléctrico, ya que en muchos países este nivel de tensión presenta la tasa de crecimiento más alta en relación con otros niveles de tensión. Además, muchas de las nuevas líneas son diseñadas con aisladores poliméricos.

Aunque pudiera considerarse que el uso de anillos corona es la solución lógica para este problema, es importante considerar que existen algunos problemas con estos dispositivos, como la reducción de la distancia de arco en seco. Lo anterior resulta de importancia sobre todo cuando las líneas se encuentran instaladas en altitudes por arriba de los 1000 metros sobre el nivel del mar. En este caso se debe de incrementar la longitud del aislador, situación que puede complicar su remplazo directo cuando sus dimensiones no están estandarizadas.

En este trabajo, el uso de anillos corona en líneas de 115 kV es evaluado y comparado con otra posible alternativa que también puede ser utilizada para reducir la intensidad de campo eléctrico en la superficie del aislador. Esta segunda alternativa consiste en la modificación del diseño geométrico del aislador en la vecindad del herraje energizado.

Se considera que el poder definir si, aparte del uso de anillos corona, existe o no otra alternativa para atenuar los niveles de campo eléctrico en aisladores de 115 kV puede ser de gran interés para los fabricantes de aisladores y por supuesto para los comités técnicos de normalización.

## **1.6. Estado del arte**

El interés por disminuir los efectos ocasionados por un alto campo eléctrico en aisladores poliméricos, ha sido tema de un gran número de investigaciones en las cuales se han analizado diversas técnicas de atenuación. Una de estas técnicas es el uso de anillos corona, sobre lo cual en años recientes se han publicado varios trabajos que han buscado determinar su adecuada localización y construcción para así minimizar el campo eléctrico tangencial. Algunos de estos trabajos se describen enseguida.

En 2004, W. Sima et al [10] mostraron que se puede obtener un diseño óptimo de un anillo corona el cual minimiza el campo eléctrico en un aislador de 230 kV. En su trabajo presentan los resultados obtenidos de un método para optimizar la localización y las dimensiones de un anillo corona en un aislador polimérico usando un software basado en el método de elemento finito, FEMLAB. Además de mostrar que en procesos de optimización se pueden trabajar simultáneamente más de dos variables, consideraron la presencia de un plano aterrizado para simular el efecto de la torre. Sin embargo, este trabajo se limitó a una simulación en dos dimensiones.

En 2006, W. Sima et al [11] presentaron un diseño de anillo corona pero esta vez para un aislador polimérico de 800 kV en CD. Este trabajo presenta un modelo en 3D en el cual se estudia el comportamiento del campo eléctrico. Además de considerar la presencia de la torre, presentan la optimización del diseño de un anillo corona, y concluyen que los resultados en 3D son más aproximados que los obtenidos de modelos en simetrías axiales

en 2D. Sin embargo, no presentan una comparación entre modelos en 2D y 3D.

En 2011, Suat Ilhan et al [12] publicaron los resultados de una optimización de un anillo corona para tensiones de 380 kV en CA. Sus resultados fueron corroborados no sólo por una simulación en 3D, sino también con pruebas en laboratorio. Cabe mencionar que esta investigación fue desarrollada para una cadena de aisladores cerámicos.

Sin embargo, el uso de un anillo corona no ha sido la única técnica estudiada para minimizar la presencia de campo eléctrico sobre la superficie de aisladores. Se han presentado trabajos que buscan un diseño de aislador que ofrezca una mejor distribución de campo eléctrico.

En 2009, Hongwei Mei et al [13] propusieron la instalación de una cubierta de goma sobre el conductor de la línea de transmisión para mejorar el rendimiento del aislador de línea. Sus conclusiones indican que se puede mejorar el comportamiento del aislador cambiando la capacitancia de la cubierta de goma, alterando el grosor de la misma. Sin embargo la selección óptima de la capacitancia de la vaina y sus parámetros relacionados necesitan ser examinados para diferentes aisladores ya que en su investigación sólo se probó una cadena de aisladores de 220 kV.

En 2009, Edson G. da Costa et al [14] publicaron el resultado de una investigación experimental que permite la correlación de temperaturas internas y externas en un aislador. Esta metodología fue realizada con una cámara infrarroja y una cámara ultravioleta. Además, evaluaron la influencia de un anillo corona; sus experimentos fueron simulados usando el método de elemento finito.

En 2009, Paredes O. Myriam et al [15] escribieron los resultados obtenidos de una investigación con materiales compuestos de alta permitividad para atenuar el campo eléctrico en aisladores poliméricos. Este trabajo muestra materiales compuestos de hule de silicón y polvo de  $\text{BaTiO}_3$  caracterizados para poder obtener valores distintos de permitividad dieléctrica. Los valores encontrados se utilizaron para modelar la distribución de campo eléctrico en un aislador polimérico de 115 kV. Los resultados obtenidos muestran que con un diseño adecuado del aislador y con un valor de permitividad del  $\text{BaTiO}_3$  sin

dopar, la reducción de campo eléctrico es importante.

En 2010, R Abd Rahman et al [16] mostraron los resultados de un trabajo realizado para controlar el esfuerzo eléctrico en aisladores poliméricos, en el cual usaron un material con propiedades no lineales para la atenuación de esfuerzo eléctrico en aisladores. Este material fue modelado introduciendo una relación no lineal entre el nivel de campo eléctrico y conductividad. Esta relación fue definida en un software basado en el MEF. La comparación con los estudios del campo reveló que un material con una conductividad eléctrica no lineal apropiada puede ser un método efectivo para disminuir el esfuerzo en aisladores poliméricos. Los altos picos de campo presentes sobre el aislador, especialmente en el punto triple, fueron reducidos significativamente, hasta en un 60%.

También en 2010, Yang Qing et al [37] presentaron una técnica para la atenuación de campo eléctrico en aisladores poliméricos. El trabajo que presentaron consiste en la adición al aislador polimérico de uno o dos platos cerámicos. Independientemente de la técnica propuesta, su trabajo es de gran interés pues es de los pocos que presentan una simulación en 3 dimensiones usando el MEF. Los resultados de esta propuesta muestran que efectivamente el campo eléctrico es reducido. Sin embargo, una de las desventajas es la necesidad de incluir platos cerámicos que incrementan el peso del aislador.

En 2011, T Doshi et al [17] presentaron los resultados de una simulación en 3D de la distribución de campo eléctrico en aisladores poliméricos hasta 1200 kV. Analizaron el impacto del uso de anillos corona con dimensiones óptimas, tanto para un aislador sobre una fase y el efecto sobre 2 aisladores con un anillo corona individual y otro compartido. Cabe destacar que en sus resultados hacen mención a que las dimensiones óptimas del anillo corona ayudan a un mejor rendimiento de la línea. Estas dimensiones fueron estimadas modificando a la vez cada variable propuesta en el trabajo, y no utilizado un algoritmo de optimización.

Como se ha mostrado, existe un gran interés por tratar de controlar la intensidad de campo eléctrico en áreas críticas de los aisladores poliméricos. Algunas de las investigaciones realizadas han ofrecido buenos resultados adicionando al aislador algunos componentes que, sin embargo, elevan su precio y el precio de su instalación. Algunos

autores que se han dedicado al estudio de este fenómeno sugieren niveles de campo eléctrico dentro y fuera del aislador, a los cuales se puede considerar que el aislador operará sin ver acelerado su envejecimiento. Sin embargo, la mayoría de estos trabajos se han enfocado a estudiar el problema de alta concentración de campo eléctrico en aisladores para sistemas de más de 230 kV. Sólo algunas publicaciones han advertido sobre las fallas por alto campo eléctrico en líneas de 115 y 138 kV en las cuales, hasta hace poco, el control del campo eléctrico no se consideraba.

En la SEPI ESIME Zacatenco se han desarrollado trabajos sobre aisladores poliméricos. En 2002, Enrique Pérez Ruiz [18] presentó resultados de un trabajo sobre el impacto de la lluvia ácida en este tipo de aisladores. Estudió el comportamiento de un aislador de 15 kV tipo suspensión ante un ambiente ácido y midió tensiones de flameo y corrientes de fuga bajo condiciones de contaminación, aplicando el método de niebla limpia como lo indica la norma IEC 507 para evaluar la hidrofobicidad superficial, además de determinar el grado de envejecimiento aplicando la técnica de medición del ángulo de contacto.

También en 2002, Alberto Rafael Portillo Méndez [19] presentó resultados del efecto de la altitud y la humedad relativa de las tensiones de flameo en aislamientos poliméricos, concretamente analizó el efecto de una densidad de aire reducida y del cambio en la humedad relativa. Mostró que el incremento de la humedad en niveles de contaminación ligeros y medios provocan que la tensión de flameo tienda a disminuir. Sin embargo, cuando la contaminación es alta, los cambios de humedad no afectan a la tensión de flameo.

Si bien los trabajos presentados en la SEPI ESIME Zacatenco son importantes y de gran interés para otros autores y trabajos de investigación, en la sección no se han realizado trabajos de tesis relacionados con el diseño de aisladores que busquen mejorar su desempeño.

## 1.7. Aportaciones

- Se obtiene un diseño de aislador polimérico de 115 kV en dos dimensiones, en el cual la intensidad de campo eléctrico tangencial en el lado energizado es mínima.
- Se obtienen las dimensiones adecuadas y la ubicación correcta de un anillo corona para aisladores poliméricos de 115 kV en una simulación en dos dimensiones.
- Se realiza la simulación de los valores óptimos obtenidos en dos dimensiones y en tres dimensiones, considerando elementos que no se pueden tomar en cuenta en dos dimensiones.
- Se comparan los resultados obtenidos y se muestra que los resultados óptimos obtenidos en 2D son computacionalmente más rápidos de obtener que los de tres dimensiones y con valores muy cercanos.

## 1.8. Limitaciones y alcances

### 1.8.1. Limitaciones

- Los resultados fueron obtenidos sólo para un aislador polimérico de 115 kV del tipo suspensión y no para otro tipo de configuraciones.
- La optimización fue realizada en dos dimensiones.
- No se validan los resultados experimentalmente.

### 1.8.2. Alcances

- Se implementa una simulación del tipo axial simétrica en COMSOL<sup>®</sup> que permite analizar el comportamiento del campo eléctrico tangencial y minimizarlo a través de una interfaz con funciones de optimización en MATLAB<sup>®</sup>.

- Se obtienen resultados de geometría del aislador así como valores de permitividad que minimizan la componente tangencial de campo eléctrico.
- Se obtienen dimensiones óptimas para la construcción de anillo corona para un aislador polimérico de 115 kV.
- Se realizan simulaciones en tres dimensiones con elementos que no se han tomado en cuenta en trabajos previos, tales como, el efecto del conductor energizado, la torre aterrizada y el herraje completo.
- Se realiza una comparación de resultados obtenidos en dos dimensiones con una simulación en tres dimensiones.

## 1.9. Estructura de la tesis

Capítulo I, *Introducción*, describe los objetivos, justificación, antecedentes, limitaciones y alcances de este trabajo, además de que se presenta el estado del arte sobre el tema.

Capítulo II, *Modelado del campo eléctrico en aisladores poliméricos*, describe el tipo de fenómeno electromagnético considerado para el análisis del campo eléctrico y se describen las técnicas de atenuación utilizadas para minimizar el esfuerzo eléctrico en aisladores.

Capítulo III, *Minimización de esfuerzos eléctricos en sistemas de aislamiento*, muestra el uso de las técnicas de optimización mediante una interfaz COMSOL<sup>®</sup> – MATLAB<sup>®</sup>, y se presentan ejemplos de optimización de fenómenos electromagnéticos con resultados conocidos.

Capítulo IV, *Diseño óptimo del sistema de atenuación en el aislador*, presenta los resultados obtenidos en la optimización del diseño de un aislador polimérico y dimensiones y ubicación del anillo corona. Además, se corroboran los resultados en una simulación en tres dimensiones.

Capítulo V, *Conclusiones*, resume los principales resultados y logros del trabajo, además de las recomendaciones para trabajos que puedan realizarse relacionados con optimización y diseño de aisladores poliméricos.

---

---

# CAPÍTULO II. Modelado del campo eléctrico en aisladores poliméricos

## 2.1. Introducción

En este capítulo se presenta una clasificación de los fenómenos electromagnéticos, de los cuales el campo cuasi estacionario se describe con mayor detalle ya que, como se muestra más adelante, es la base de las simulaciones de campo eléctrico en el aislador polimérico. Posteriormente, se analiza el efecto de dos métodos de atenuación del campo eléctrico en aisladores poliméricos de 115 kV: la modificación del perfil del aislador en la cercanía del herraje energizado y el uso del anillo corona.

## 2.2. El campo cuasi-estacionario eléctrico

Partiendo de la teoría electromagnética, específicamente de las ecuaciones de Maxwell, se tiene que el comportamiento de los campos electromagnéticos se describe por cuatro ecuaciones diferenciales fundamentales que son:

$$\nabla \times \bar{H} = \bar{J}_c + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \bar{D} = \rho_v \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \bar{B} = 0 \quad (2.4)$$

De las ecuaciones anteriores, la ecuación 2.1 es conocida como La ley de Ampere-Maxwell, la ecuación 2.2 es la Ley de Faraday, la ecuación 2.3 es la Ley de Gauss para campos eléctricos y la ecuación 2.4 es la Ley de Gauss de continuidad del campo magnético.

Este sistema de ecuaciones puede ser simplificado para ciertos tipos de fenómenos electromagnéticos como es el caso del campo cuasi-estacionario. El campo cuasi-estacionario magnético es aquel que se presenta en materiales conductores y ferromagnéticos operando a baja frecuencia, de 60 Hz al orden de cientos de kHz. En este tipo se incluyen los problemas relacionados con corrientes eddy y se considera que la corriente de conducción es mucho mayor que la corriente de desplazamiento, que se puede considerar despreciable, y por lo tanto no existe fenómeno de propagación y radiación de ondas [20,21].

Un fenómeno cuasi-estacionario eléctrico es aquel en donde se tienen materiales dieléctricos o de baja conductividad, la inducción magnética no es considerada, y por lo tanto los campos eléctricos existentes no son inducidos. Las frecuencias involucradas son también de unos cuantos Hz hasta cientos de kHz.

Para dar solución a cualquier tipo de campo electromagnético se busca desacoplar de las ecuaciones de Maxwell el campo eléctrico del campo magnético. Se observa que en las ecuaciones 2.3 y 2.4 los campos están separados, mientras que en la ecuación 2.2, si la inducción magnética es despreciable queda en función solo del campo eléctrico, por lo tanto la ecuación que necesita ser desacoplada es la ecuación 2.1, la ley de Ampere-Maxwell. Aplicando la divergencia en ambos lados de la ecuación, se tiene:

$$\nabla \cdot (\nabla \times \bar{H}) = \nabla \cdot \left( \bar{J}_c + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \right) = 0$$

Ya que la divergencia del rotacional es siempre cero. Por lo tanto se puede reescribir esta ecuación como:

$$\nabla \cdot \left( \bar{J}_c + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \right) = 0$$

Considerando que  $\bar{J} = \sigma \bar{E}$  y que los materiales son homogéneos:

$$\sigma(\nabla \cdot \bar{E}) + \varepsilon \left( \frac{\partial}{\partial t} \nabla \cdot \bar{E} \right) = 0 \quad (2.5)$$

La ecuación 2.5 es la ecuación de difusión que necesita ser resuelta para fenómenos donde se tengan materiales dieléctricos de baja conductividad eléctrica, la cual no puede ser despreciada por su efecto en la atenuación de campo eléctrico. La ecuación 2.5 se puede comparar con la ecuación que presenta COMSOL<sup>®</sup> para ser resuelta mediante el MEF. La ecuación 2.6 es la ecuación a resolver en el software, para campos cuasi estacionarios en el dominio del tiempo:

$$-\nabla \cdot \frac{\partial}{\partial t} (\epsilon_0 \epsilon_r \nabla V) - \nabla \cdot (\sigma \nabla V - J^e) = Q_j \quad (2.6)$$

ó en el dominio de la frecuencia:

$$-\nabla \cdot ((\sigma + j\omega\epsilon_0\epsilon_r)\nabla V - J^e) = Q_j \quad (2.7)$$

Siendo  $J^e$ , una densidad de corriente externa y  $Q_j$  una fuente de corriente puntual, si se considera que en la simulación no existe una fuente de corriente externa ni fuentes puntuales de corriente, la ecuación 2.7 se reescribe quedando de la misma forma que la ecuación 2.5:

$$-\nabla \cdot ((\sigma + j\omega\epsilon_0\epsilon_r)\nabla V) = 0$$

### 2.3. Refracción dieléctrica

Una de las opciones para atenuar el campo eléctrico en la vecindad del herraje energizado que se analiza en este trabajo es la modificación del perfil del material polimérico. Al modificar la forma del perfil se modifica la magnitud del campo tangencial en la interfaz polímero-aire. Para analizar el comportamiento de campo eléctrico en interfazs, se puede partir de la Ley de Faraday y la Ley de Gauss para campos eléctricos como se muestra enseguida. Las condiciones de límite del campo eléctrico  $\vec{E}$  que existen en una región formada por dos dieléctricos diferentes, caracterizados por  $\epsilon_1 = \epsilon_{r1} \epsilon_0$  y  $\epsilon_2 = \epsilon_{r2} \epsilon_0$ , se muestran en la Figura 2.1.  $\vec{E}_1$  y  $\vec{E}_2$  en los medios 1 y 2, respectivamente, pueden descomponerse como:

$$\vec{E}_1 = E_{1t} + E_{1n}$$

$$\bar{E}_2 = E_{2t} + E_{2n}$$

Siendo  $E_{1n}$  y  $E_{1t}$  las componentes normal y tangencial, respectivamente, en el material 1 y  $E_{2n}$  y  $E_{2t}$  las componentes normal y tangencial, respectivamente, en el material 2.

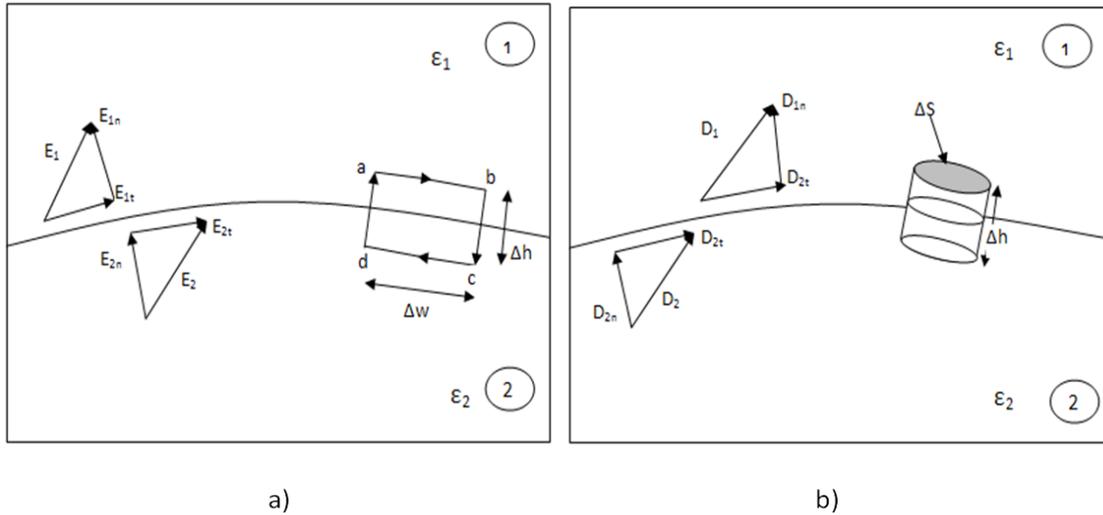


Figura 2.1 Condiciones Límite.

La Ley de Faraday en forma integral, está dada por:

$$\oint_{abcd} \bar{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t} (\bar{B} \cdot d\vec{s}) \quad (2.8)$$

Si la ecuación 2.8 se aplica a la trayectoria cerrada  $abcd$  de la Figura 2.1a), suponiendo que la trayectoria es muy pequeña con respecto a la variación de  $\bar{E}$  en la interfaz, se considera que  $\bar{E}_1$  y  $\bar{E}_2$  son prácticamente constantes a lo largo  $\Delta w$ , así obtenemos:

$$E_{1t}\Delta w - E_{1n}\frac{\Delta h}{2} - E_{2n}\frac{\Delta h}{2} - E_{2t}\Delta w + E_{2n}\frac{\Delta h}{2} + E_{1n}\frac{\Delta h}{2} = -\frac{\partial}{\partial t} \bar{B} \cdot (\Delta w \cdot \Delta h)$$

Considerando que  $\Delta h \rightarrow 0$  mucho más rápido que  $\Delta w$ , la ecuación anterior se convierte en:

$$\bar{E}_{1t} = E_{2t} \quad (2.9)$$

Se observa de la ecuación 2.9, que las componentes tangenciales de  $\bar{E}$  son las mismas en los dos lados de la interfaz. En otras palabras,  $E_t$ , no sufre cambio alguno en la interfaz y se dice que esta componente es continua de un lado a otro. De la ecuación anterior, se tiene que:

$$\frac{D_{1t}}{\varepsilon_1} = \frac{D_{2t}}{\varepsilon_2} \quad (2.10)$$

Es decir,  $D_{1t}$  experimenta cierto cambio de un lado a otro de la interfaz dependiendo de los valores de permitividad de ambos materiales. Por lo tanto, se dice que  $D_t$  es discontinua a través de la interfaz.

Por otro lado se sabe que en cualquier situación, e independientemente de la forma de la distribución de carga que produce el campo, el flujo eléctrico de este campo pasando a través de una superficie cerrada es proporcional a la carga total contenida en el interior del volumen. Esta definición es la expresada por la Ley de Gauss, ecuación 2.11:

$$\oint_S \bar{E} \cdot d\bar{s} = \frac{q_t}{\varepsilon_0} \quad (2.11)$$

El lado izquierdo de la ecuación es la descripción matemática del flujo eléctrico, esto es el número de líneas de campo eléctrico pasando a través de una superficie cerrada [20], mientras que el lado derecho es la carga total contenida en la superficie dividida por  $\varepsilon_0$ . La ley de Gauss en forma integral es de gran importancia para deducir otras propiedades de campo eléctrico en contextos particulares. Con lo que respecta al fenómeno que se estudia en este trabajo, en el que intervienen medios dieléctricos, la podemos reescribir como:

$$\oint_S \bar{D} \cdot d\bar{s} = \int_{\Delta S} \rho \cdot d\bar{s}$$

Siendo  $S$  la superficie total del volumen cilíndrico que se presenta en la Figura 2.1b), y si se divide en las superficies superior, inferior y lateral. Considerando que  $\Delta h \rightarrow 0$  más rápido que  $\Delta w$ , además si  $\Delta S$  es muy pequeña,  $\bar{D}$  se puede considerar constante dentro de  $\Delta S$ , por lo tanto:

$$D_{1n} = D_{2n} = \rho s$$

En donde  $\rho s$  es la densidad de carga libre colocada deliberadamente en la frontera. Debe tenerse presente que la ecuación anterior se basa en la suposición de que  $\bar{D}$  está dirigida de la región 2 a la región 1, y que debe aplicarse en forma congruente. Si no existen cargas libres en la interfaz (es decir, cargas que no hayan sido puestas allí en forma deliberada),  $\rho s=0$  y la ecuación anterior se convierte en:

$$D_{1n} = D_{2n} \quad (2.12)$$

En consecuencia, la componente normal de  $\bar{D}$  es continua a través de la interfaz; es decir  $D_n$  no experimenta cambio en la frontera:

$$\varepsilon_1 E_{1n} = \varepsilon_2 E_{2n} \quad (2.13)$$

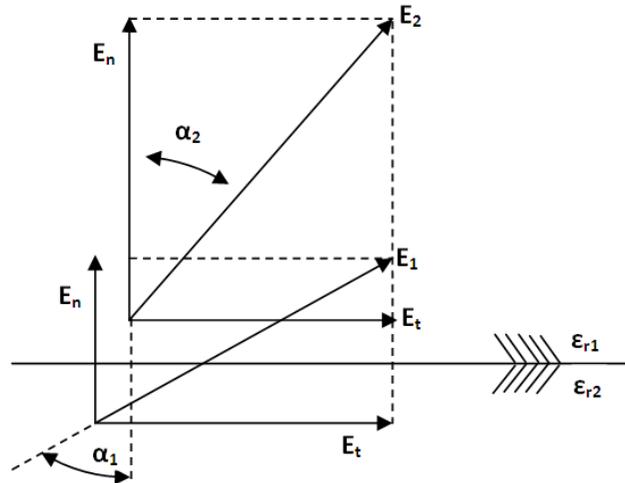
La ecuación 2.13 indica que la componente normal de  $\bar{E}$  es discontinua en la frontera, las ecuaciones 2.9 y 2.12 se conocen en forma colectiva como condiciones limite; éstas deben ser satisfechas por un campo eléctrico situado en la frontera que separa a los dos dieléctricos diferentes. Estas condiciones suelen aplicarse para determinar el campo eléctrico de un lado de la interfaz si se conoce el campo del otro lado. Además de esto pueden usarse para explicar el fenómeno de refracción de campo eléctrico a través de la interfaz. Considérese  $\bar{D}_1$  ó  $\bar{E}_1$  y  $\bar{D}_2$  o  $\bar{E}_2$  formando los ángulos  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  con la normal a la interfaz, como se ilustra en la Figura 2.2. Si se aplica la ecuación 2.9 y 2.12 se obtiene:

$$\bar{E}_1 \text{sen } \theta_1 = \bar{E}_2 \text{sen } \theta_2 \quad (2.14)$$

$$\varepsilon_1 \bar{E}_1 \cos \theta_1 = \varepsilon_2 \bar{E}_2 \cos \theta_2 \quad (2.15)$$

Si las ecuaciones anteriores se dividen, 2.14 entre 2.15 tenemos:

$$\frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_2} = \frac{\varepsilon_{r1}}{\varepsilon_{r2}} \quad (2.16)$$



**Figura 2.2** Ley de refracción para campo eléctrico  $E$ , en una interfaz con  $\epsilon_1 > \epsilon_2$ .

En general, una interfaz entre dos dieléctricos produce un cambio de líneas de flujo como resultado de cargas de polarización desiguales que se acumulan en los lados de la interfaz [22]. La componente de campo eléctrico más importante en este análisis es la tangencial, ya que se considera que las descargas se generan y se propagan de manera más fácil sobre la superficie. Aprovechando el fenómeno de la refracción es posible modificar la magnitud de la componente tangencial, ya sea mediante un cambio en permitividad y/o mediante un cambio de la orientación de la interfaz, como lo describen las ecuaciones 2.9, 2.12 y 2.16.

#### 2.4. Campo eléctrico tangencial en un aislador polimérico

La distribución de campo eléctrico sobre la superficie y dentro de un aislador polimérico es función de varios parámetros entre los cuales está el diseño del aislador, la configuración de la torre y si cuenta o no con sistema de atenuación [4]. En el caso de aisladores cerámicos, la tensión es distribuida gradualmente a lo largo de su superficie gracias a que la capacitancia entre platos es distribuida uniformemente a lo largo de la cadena. Esta distribución de potencial ayuda a reducir el campo eléctrico en los extremos del aislador. Sin embargo, esta situación no se presenta en aisladores poliméricos, cuya capacitancia no está uniformemente distribuida por ser hechos de una sola pieza y además porque su permitividad es baja, propiciando un campo eléctrico intenso en la vecindad de los herrajes.

Cuando se trata de analizar la distribución de campo eléctrico sobre un aislador polimérico, existen algunas regiones en el aislador de gran importancia. Estos puntos de interés son el herraje de potencial (e incluso el de tierra para algunos niveles de tensión) [23,24], dentro de la barra de fibra de vidrio [25], y entre la superficie y el aire que rodea a los primeros faldones desde los herrajes. Si la magnitud de campo eléctrico en alguna de estas regiones excede los valores críticos se puede iniciar actividad corona.

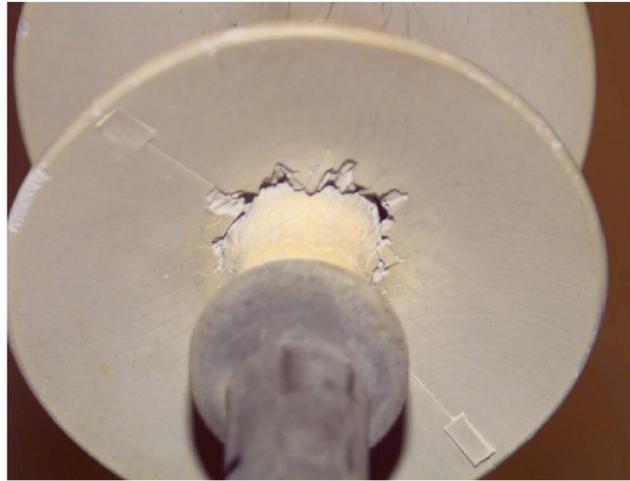
El campo eléctrico en un aislador polimérico usualmente presenta un valor alto sobre la superficie en él conocido como punto triple (herraje-aire-polímero). Este alto campo eléctrico cuando rebasa el valor necesario para la ionización del aire da lugar a descargas superficiales que aceleran el envejecimiento del material polimérico, la Figura 2.3 muestra la superficie polimérica de un aislador envejecida por descargas en el punto triple.

Como ya se ha comentado, la necesidad de evitar la degradación en esta zona del aislador ha motivado la búsqueda de técnicas para reducir la magnitud del campo eléctrico. Una de las técnicas más utilizadas es el uso de los llamados anillos corona, que son anillos metálicos que se encuentran al mismo potencial que el herraje y que por la posición en la que se instalan, modifican la distribución de campo eléctrico.

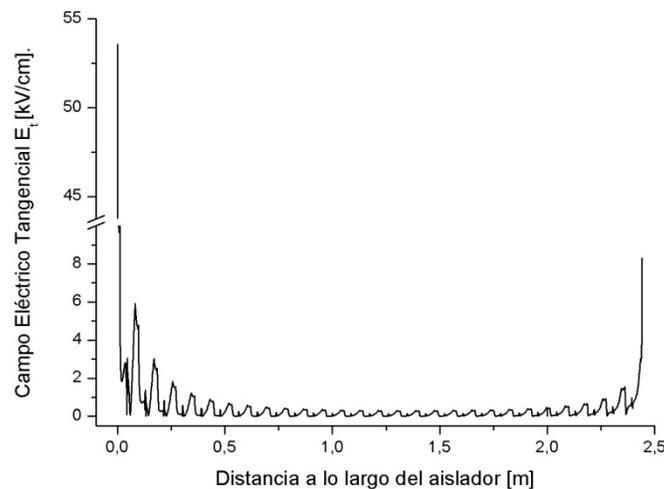
Un diseño de aislador polimérico en el que se pueda controlar la intensidad de campo eléctrico sin necesidad de anillos corona, resultaría bastante atractivo ya que no habría necesidad de reducir la distancia de arco en seco. En algunos trabajos se ha propuesto el uso de materiales compuestos de hule silicón con partículas de carburo de silicio u óxido de zinc (del utilizado en varistores) para atenuar el campo eléctrico [15]. Estos materiales presentan una conductividad eléctrica dependiente de la intensidad de campo eléctrico, por lo que en las zonas de mayor campo su conductividad incrementa reduciendo la componente tangencial. Otra opción es la de modificar la geometría del aislador para que con ayuda del fenómeno de refracción se modifiquen las componentes normal y tangencial del campo eléctrico [15].

La Figura 2.4 muestra el comportamiento del campo eléctrico tangencial sobre la superficie de un aislador polimérico de 115 kV. En esta figura se puede observar que la intensidad de campo es mayor en los extremos; sin embargo, el lado cercano a potencial

supera los 50 kV/cm. Como ya se ha mencionado investigaciones indican que el valor al que la actividad corona puede dar inicio es alrededor de 22 kVrms/cm [1].



**Figura 2.3** Daño de la cubierta polimérica en la cercanía del herraje energizado [26].



**Figura 2.4** Campo eléctrico tangencial en la superficie de un aislador polimérico de 115 kV.

El aislador polimérico que sirve como referencia en este trabajo cuenta con 28 faldones, y fue energizado en el laboratorio de Alta tensión de ESIME Zacatenco. Con la ayuda de una cámara de detección de actividad ultravioleta, se observó la presencia de actividad corona en el extremo energizado del aislador, como se muestra en la Figura 2.5. El cuadro en color rojo en el lado inferior izquierdo muestra el color seleccionado en los ajustes de la cámara para indicar la presencia de luz ultravioleta.

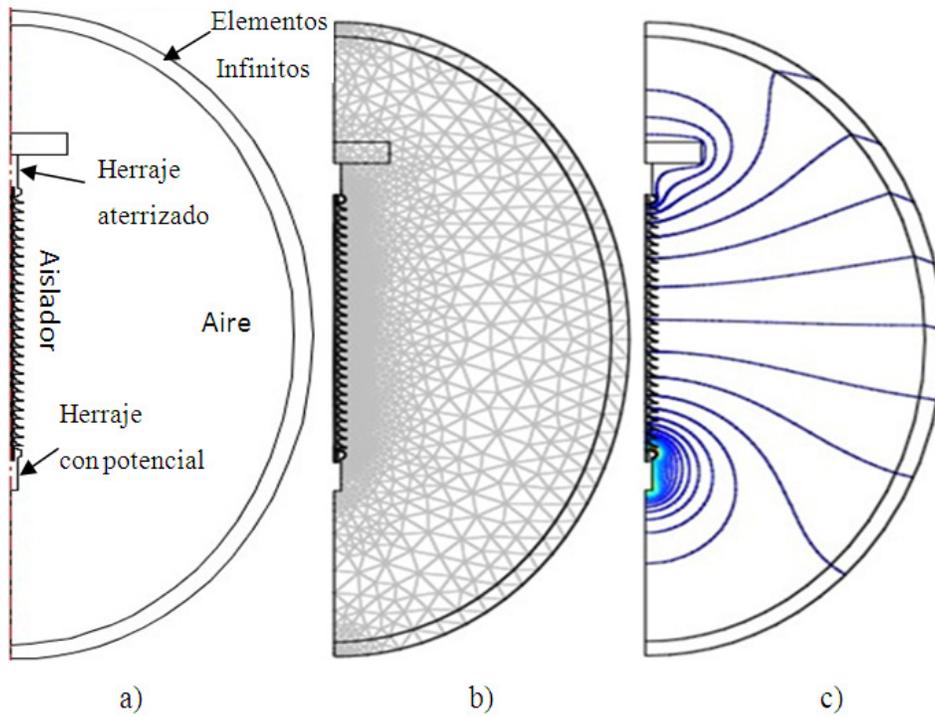


**Figura 2.5** Descarga corona en la interfaz herraje-silicón, detectada mediante inspección ultravioleta (en color rojo).

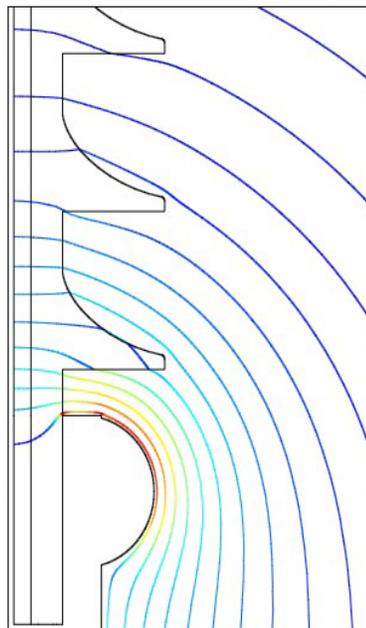
El modelo de dos dimensiones utilizado en COMSOL<sup>®</sup> se muestra en la Figura 2.6, de la cual la Figura c) muestra el problema de alto campo eléctrico en la cercanía del herraje energizado (alta concentración de líneas equipotenciales) en los extremos del aislador.

La Figura 2.7 es un detalle donde se muestra la acumulación de campo eléctrico entre el herraje y el primer faldón. Esta concentración se debe a la distribución no uniforme de campo eléctrico. Como se observa en la Figura 2.7, las líneas equipotenciales se encuentran más cercanas entre sí donde el esfuerzo eléctrico es mayor.

El modelo presentado en las figuras anteriores es modificado agregando en un caso el anillo corona y en el otro cambiando el perfil del material polimérico en la cercanía del herraje energizado. En la siguiente sección se muestran estas modificaciones y su efecto en la distribución de campo eléctrico en la superficie del aislador.



**Figura 2.6** Modelo del aislador en COMSOL®, a) Geometría, b) Mallado c) Solución.



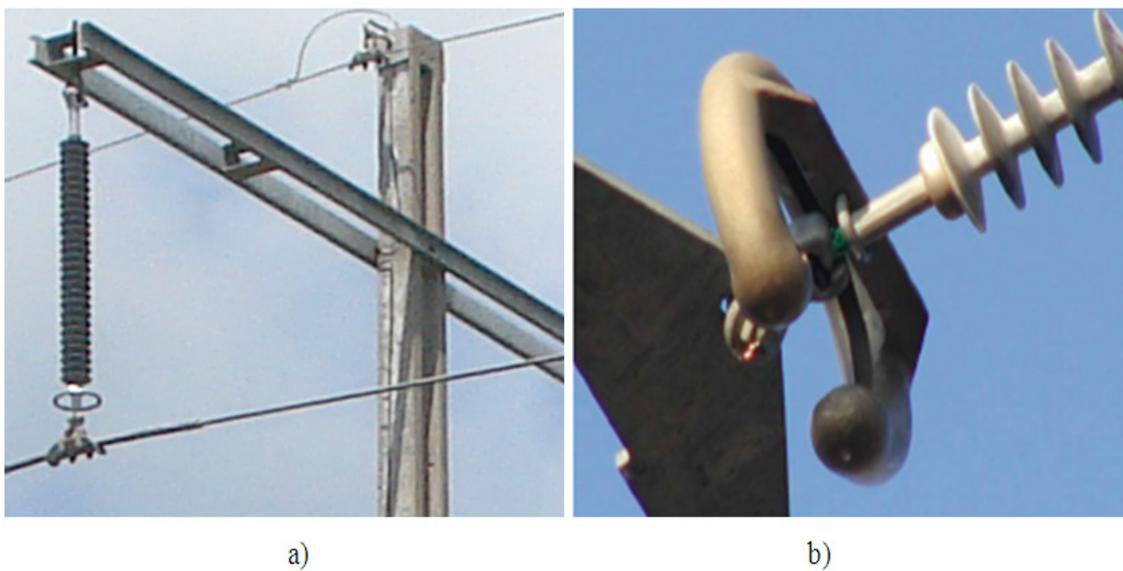
**Figura 2.7** Distribución de líneas equipotenciales en el lado del herraje energizado.

## 2.5. Uso de anillos corona en 115 kV

La actividad corona en aisladores es una fuente de ruido, corrosión e interferencia electromagnética, particularmente en el caso de aisladores poliméricos. Otros efectos negativos son la pérdida de hidrofobicidad y envejecimiento del material.

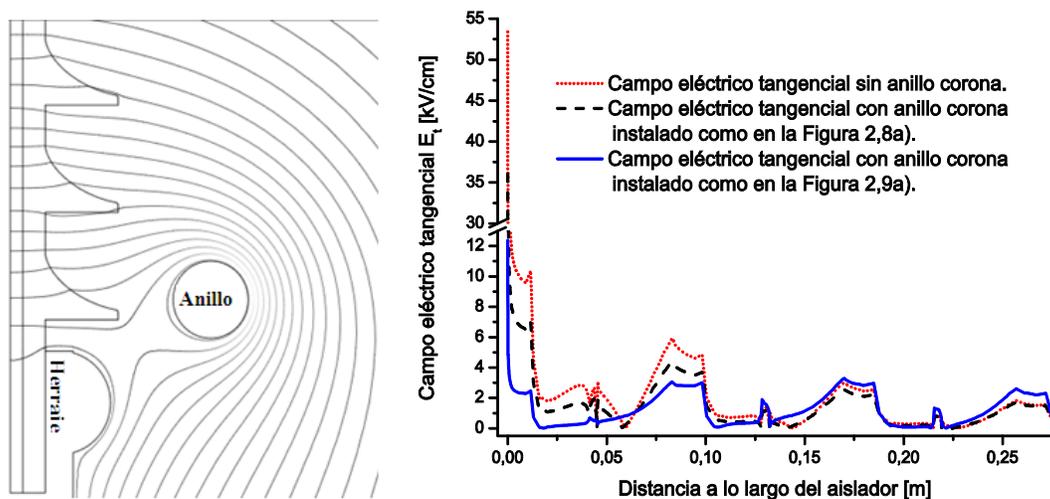
En consecuencia a lo anterior, trabajos recientes han buscado proponer alternativas para evitar la degradación del material polimérico, reduciendo la componente tangencial de campo eléctrico en la zona indicada. Una técnica bien conocida es el uso de anillos corona. Sin embargo, esta técnica no es aplicada en 115kV debido a que la norma no lo indica, dejándolo a criterio del fabricante [27].

Los anillos corona se usan para mejorar la distribución de campo eléctrico en las cercanías de los extremos del aislador y así eliminar la presencia de descargas parciales [1]. Sin embargo el dimensionamiento e instalación del anillo corona debe de ser realizado correctamente, ya que de otra manera puede reducirse considerablemente su efectividad. En la Figura 2.8a) se observa el uso de anillo corona sobre un aislador polimérico de 115 kV, con base a la ubicación de este dispositivo en la imagen, se realizó una simulación del comportamiento del campo eléctrico tangencial sobre la superficie del aislador. La Figura 2.8b) muestra claramente la mala instalación del toroide.



**Figura 2.8** Instalación incorrecta de anillos corona en aisladores poliméricos, b) Tomada de [26].

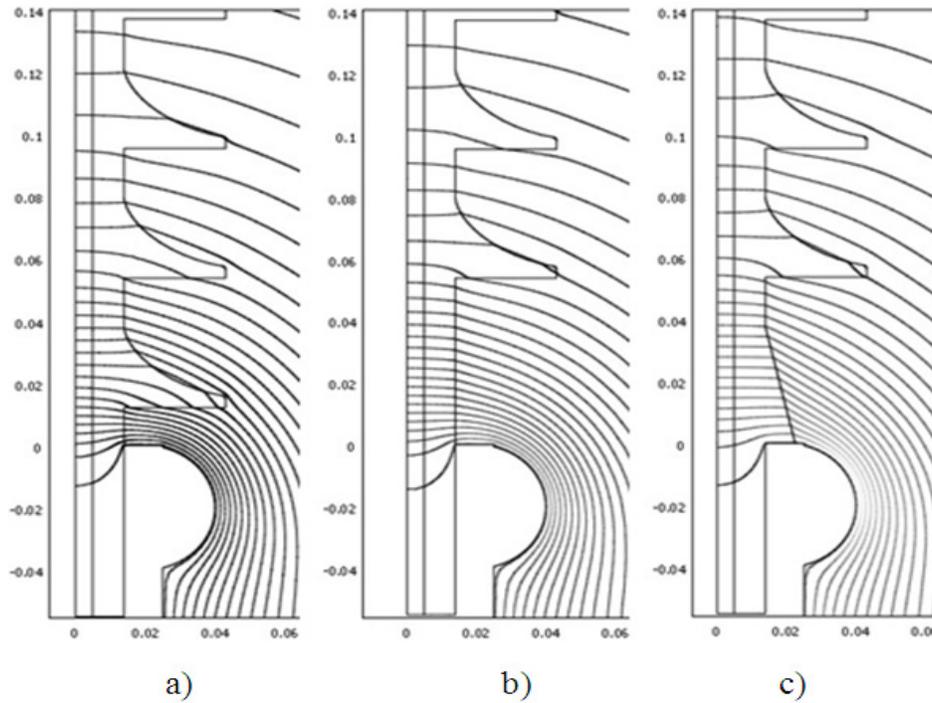
La Figura 2.9a) muestra la distribución de líneas equipotenciales cuando el anillo corona es colocado en una posición diferente a los casos mostrados en la Figura 2.8. La Figura 2.9b) muestra el comportamiento del campo eléctrico tangencial sobre la superficie del aislador en presencia de un anillo corona en una posición como la de la Figura 2.8a) y en la posición de la Figura 2.9a). De la Figura 2.9b) se observa la importancia de colocar el anillo en una posición adecuada, y si el diseño del anillo es el correcto, el campo eléctrico tangencial sobre la superficie polimérica puede reducirse aún más. Es probable que la instalación de la manera en que se presenta en la Figura 2.8 pretenda no reducir la distancia de fuga pero no se considera útil para prevenir los problemas en el punto triple en aisladores poliméricos, razón para la cual es instalado.



**Figura 2.9** a) Distribución de líneas de campo eléctrico y b) Comportamiento del Campo eléctrico tangencial con y sin anillo corona.

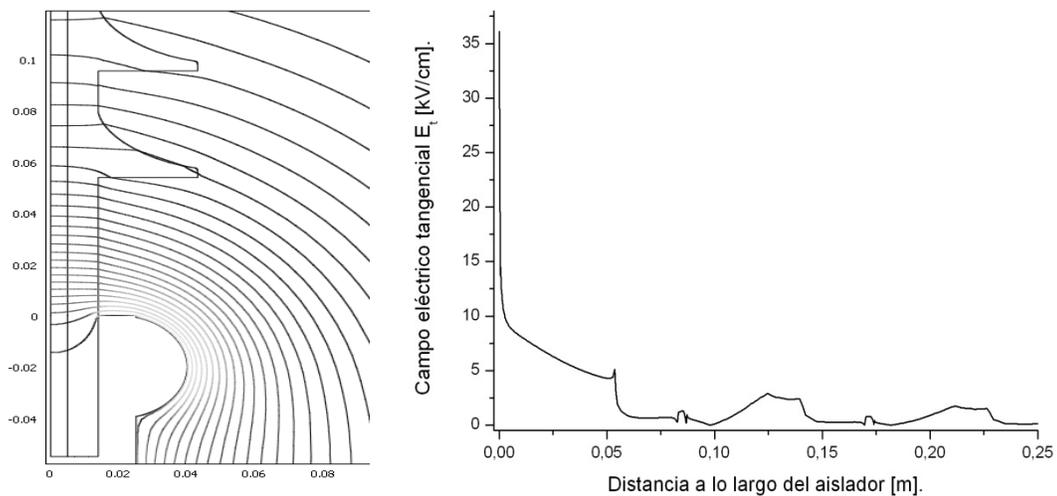
## 2.6. Modificación de la geometría del aislador

Otra técnica que ha sido de interés para tratar de atenuar el esfuerzo eléctrico en la superficie del polímero es la eliminación del primer faldón, como se muestra en la Figura 2.10b). El inclinar el perfil del faldón cercano al potencial es otra técnica que se ha considerado, debido al fenómeno de refracción, tal como se observa en la Figura 2.10c), ya que existe una mejor distribución de líneas equipotenciales. En la Figura 2.10a) se muestra la acumulación de líneas con el mismo potencial en los primeros centímetros superficiales del lado energizado en un diseño común del aislador.



**Figura 2.10** Distribución de líneas equipotenciales a) Diseño original, b) Sin el primer faldón cercano a potencial, c) Con el perfil inclinado del lado energizado.

Eliminar el primer faldón del lado de potencial, redistribuye la concentración del esfuerzo bajo el primer faldón. Esta propuesta, de alterar la geometría del aislador se puede observar en la Figura 2.11a).

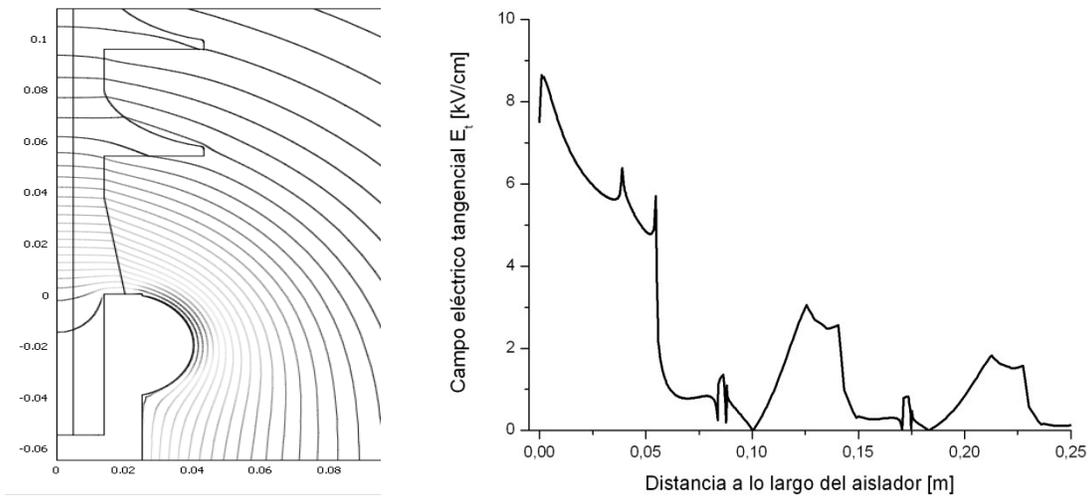


**Figura 2.11** a) Distribución de líneas de campo eléctrico en ausencia del primer faldón, b) Comportamiento del campo eléctrico tangencial en ausencia del primer faldón.

Bajo la condición de la Figura 2.11a), la intensidad de la componente tangencial de campo eléctrico se ve reducida, pero aún no por debajo del valor al cual la actividad corona se presenta como se muestra en la Figura 2.11b). En base a la refracción de campo eléctrico, se ha propuesto en otros trabajos la inclinación del perfil de la cubierta cercana a potencial. Esta inclinación busca reducir la componente tangencial hasta un valor de campo por debajo del requerido para que no se presente actividad corona en condiciones secas. La Figura 2.12a) muestra un perfil inclinado a  $75^\circ$ , mientras que el comportamiento del campo eléctrico tangencial sobre este perfil se observa en la Figura 2.12b), donde ahora el máximo campo eléctrico tangencial se ha desplazado unos milímetros del punto triple. La intensidad de campo está por debajo del nivel al cual pudiera producir un envejecimiento prematuro del polímero. De esta forma se observa que la atenuación de campo eléctrico se puede lograr sin la necesidad de usar un anillo corona para este nivel de tensión.

En el presente trabajo el aislador fue considerado en condiciones secas y sin capas de contaminante que pudieran modificar la distribución de campo eléctrico. Sin embargo se considera que al reducir la intensidad de campo eléctrico en la vecindad del herraje con un sistema de atenuación, el incremento del campo eléctrico por la presencia de una capa semiconductor de contaminante o gotas de agua en la zona cercana al herraje energizado, será menor que el que podría ocurrir en el diseño original.

En las técnicas de atenuación descritas, ni la posición del anillo ni el ángulo de inclinación del perfil fueron seleccionados de acuerdo a algún criterio definido, por lo que es de interés verificar si existe una geometría del aislador y una posición del anillo corona, que aseguren el mínimo campo eléctrico. Con este propósito en el siguiente capítulo se presentan técnicas de optimización utilizadas para minimizar esfuerzos eléctricos en sistemas de aislamiento con soluciones conocidas, para posteriormente utilizarlas en el problema de la atenuación de campo en el aislador.



**Figura 2.12** a) Distribución de líneas equipotenciales con perfil inclinado, b) Comportamiento del campo eléctrico tangencial con el perfil inclinado.

---

---

# CAPÍTULO III. Minimización de esfuerzos eléctricos en sistemas de aislamiento

## 3.1. Introducción

La optimización se puede definir como la determinación del mejor resultado, o solución óptima de un problema, el cual siempre está restringido por las limitaciones del mundo físico. De esta forma, un problema de optimización debe equilibrar el funcionamiento y las limitaciones [28]. Matemáticamente, la optimización univariable es la búsqueda ya sea del mínimo o del máximo. El óptimo es el punto donde la curva es plana, lo cual corresponde al valor de  $x$  donde la derivada  $f'(x)$  es cero [29]. Además, la segunda derivada,  $f''(x)$  indica si el óptimo es un máximo o un mínimo.

Problemas relacionados con el diseño de sistemas de aislamiento en equipos eléctricos de alta tensión usualmente buscan minimizar los esfuerzos dieléctricos. El asegurar que el sistema de aislamiento de un equipo estará sometido al menor esfuerzo eléctrico es un factor importante que puede verse reflejado en una vida útil más larga. Este tipo de diseños puede ser obtenido mediante procesos de optimización en los cuales se deben de encontrar dimensiones o propiedades óptimas de materiales que aseguren el mejor diseño.

En este Capítulo se hace uso de funciones de optimización para minimizar la presencia de campo eléctrico en sistemas de aislamiento, modificando las dimensiones y geometrías de los sistemas usados como ejemplos. Se da una introducción al uso de la interfaz entre COMSOL<sup>®</sup> y MATLAB<sup>®</sup>, así como generalidades de las funciones de optimización utilizadas.

### 3.2. Proceso de optimización

En diversos problemas de diferentes áreas no se dispone de procedimientos que proporcionen soluciones del mismo, sin embargo es posible formular condiciones sobre propiedades que debería cumplir la solución si es que existe alguna. Estas condiciones pueden expresarse en el sentido de que se optimiza, maximiza o minimiza una determinada función objetivo [30].

En general, cuando se requiere solucionar un problema mediante funciones de optimización, se deben identificar tres componentes importantes para este proceso: la función objetivo, las variables dependientes y las variables independientes. Siendo las variables dependientes y la función objetivo determinadas por las variables independientes.

Un problema de optimización se encuentra restringido por límites superiores e inferiores, los cuales podrían ser en algunos casos restricciones físicas. Este tipo de problemas puede ser formulado matemáticamente como:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

Con

$$\underline{x}_i \leq x_i \leq \overline{x}_i \quad (i = 1, \dots, n)$$

$$\underline{g}_j \leq g(x_1, x_2, \dots, x_n)_j \leq \overline{g}_j \quad (j = 1, \dots, m)$$

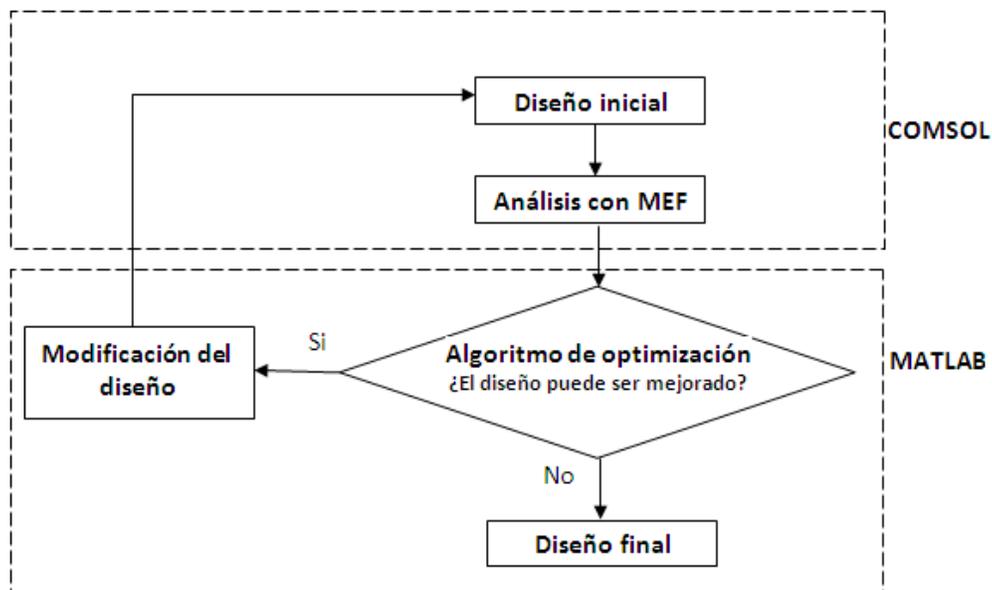
donde  $\underline{x}_i$ ,  $\overline{x}_i$ ,  $\underline{g}_j$  y  $\overline{g}_j$  son límites inferiores y superiores de la variable independiente y dependiente respectivamente, y donde  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  es el conjunto de variables que definen la solución de un problema. Por lo tanto, se trata de encontrar los valores que optimizan a la función objetivo  $f(x)$ , tomando en cuenta que:

- Si la función es convexa en un punto estacionario, entonces éste es un mínimo local.
- Si la función es cóncava en un punto estacionario, entonces éste es un máximo local.

- Si la función no tiene carácter definido en un punto estacionario, entonces éste se denomina un punto de silla y no constituye un extremo local.

Los métodos del gradiente, con sus múltiples variantes, y el método de algoritmos genéticos, son algunas técnicas básicas para resolver este tipo de problemas. Además estos problemas pueden presentar variantes como lo son problemas sin restricciones o problemas con restricciones.

En este trabajo se obtiene la función objetivo de la solución de un problema cuasi estacionario eléctrico en COMSOL<sup>®</sup>, software basado en método del elemento finito (FEM), para después hacer uso de algunas funciones de optimización del toolbox de MATLAB<sup>®</sup> y minimizar a la función objetivo considerando una o más variables. El proceso de solución a través de la interfaz se describe en la Figura 3.1.



**Figura 3.1** Proceso de optimización.

Para encontrar el resultado óptimo, se obtiene una primera solución del problema con ayuda del MEF, en COMSOL<sup>®</sup>, se guarda esta solución como una extensión de MATLAB<sup>®</sup>, (.mat), y se establece como la función objetivo, dejando el valor de salida como variable dependiente y los valores de entrada como variables independientes, como se describe en el apéndice D. Esta función objetivo se incluye dentro de la estructura de las funciones de optimización del toolbox de MATLAB<sup>®</sup> que se utilizan, siendo la variable independiente la

variable a optimizar. Una vez definidas las variables, la función objetivo, los límites y/o restricciones, se resuelve nuevamente el problema con el MEF desde MATLAB®. La función de optimización se encarga de comparar el nuevo valor de la variable dependiente con el valor anterior de la misma. Si el algoritmo de optimización define que el valor se puede reducir, la función de optimización asigna nuevos valores a las variables independientes, resuelve y compara nuevamente. Esto se repite hasta que se determine que no es posible mejorar el diseño.

### **3.3. Funciones que usan algoritmos convencionales de optimización**

Las funciones de optimización que MATLAB® incorpora en su toolbox son varias, en todas se pueden especificar opciones para ajustar el proceso de convergencia, en la mayoría de ellas el proceso de optimización consiste en un proceso de minimización de la función objetivo [29]. En esta sección solo se describen tres de ellas, debido a que son las que se encontraron más adecuadas para resolver el problema de minimizar el campo eléctrico. En este trabajo estas funciones minimizan la función objetivo, con el valor de campo eléctrico máximo como variable dependiente y dimensiones o propiedades físicas como variables independientes. A continuación se presenta una breve descripción de las funciones utilizadas, con la finalidad de dar una idea general del uso de ellas.

#### **3.3.1. Función de optimización con una variable acotada**

La minimización de una función con una variable acotada en un intervalo, se resuelve a través de la búsqueda dicotómica. La función en MATLAB® que permite esta minimización es *fminbnd*, esta función se basa en la búsqueda de la sección dorada, y en interpolación parabólica, debe tener solo una variable y ésta debe de ser continua. La forma de invocar a esta función es:

$$x = \text{fminbnd}(\text{fun}, x_1, x_2) \quad (3.1)$$

Donde *fun* es el nombre de la función,  $x_1$  y  $x_2$  son los límites inferior y superior respectivamente. La función *fun* debe tener como argumento la variable escalar sobre la cual se realiza la iteración; en este caso fueron dimensiones físicas del aislador polimérico.

### 3.3.2. Función de optimización con más de una variable y con restricciones

En este caso se busca resolver el problema de minimización de la función objetivo de una forma no lineal sometida a restricciones lineales y no lineales. La función en MATLAB<sup>®</sup> que permite este tipo de minimización es *fmincon*. Esta función se basa en una optimización con restricción no lineal o en modelos de programación no lineal. Al igual que *fminbnd* esta función tiene una mayor posibilidad de converger en un mínimo local. La forma de invocar esta función es:

$$x = \text{fmincon}(\text{fun}, x_0, [ ], [ ], [ ], [ ], A, B) \quad (3.2)$$

donde *fun* es el nombre de la función,  $x_0$  el vector de valores iniciales, A y B los vectores frontera, en [ ] se incluyen las restricciones no lineales.

### 3.3.3. Optimización usando algoritmos genéticos

La optimización con algoritmos genéticos ayuda a evitar la convergencia de la función en un mínimo local, como podría suceder en el caso de las funciones antes descritas, y con la combinación de un segundo proceso de optimización convencional se encuentra el mínimo global.

Los algoritmos genéticos corresponden a la clase de métodos estocásticos de búsqueda, es decir, estos algoritmos operan sobre una población de soluciones. Este método se basa en la selección natural, el proceso que define la evolución biológica. La idea básica es que el contenido genético de una población contiene potencialmente la solución. A diferencia de los métodos usados en las funciones presentadas anteriormente, las cuales iniciaban la solución desde un punto en el espacio de interés, el método de algoritmos genéticos inicia el proceso de optimización con un grupo inicial de puntos o una población de soluciones individuales las cuales son seleccionadas aleatoriamente. Esta solución puede estar inactiva porque la combinación genética adecuada está diseminada entre varios individuos.

El algoritmo genético continuamente modifica la población de soluciones individuales para seleccionar aleatoriamente las soluciones que serán los padres usados para producir la siguiente generación. Cada individuo es un punto que puede ser usado para evaluar la función objetivo. Los individuos también son conocidos como genomas y las variables de entrada (vector) son conocidas como genes [29]. De esta forma una población es un arreglo de individuos; cada población está construida como una matriz de individuos por el número de variables en cada individuo. Cada población, mediante un proceso, producirá una nueva población, que es conocida como una nueva generación.

Para crear la nueva generación desde la generación presente, los algoritmos genéticos siguen básicamente tres reglas:

- Regla de selección: es usada para seleccionar individuos, los cuales contribuyen a generar la siguiente generación. Estos padres contribuyen con los genes (las entradas de los vectores) y ellos son seleccionados de acuerdo al mínimo valor obtenido de la función objetivo.
- Regla de mezcla, o crossover, entre individuos para generar individuos híbridos que tiene partes mezcladas de sus progenitores. Cada entrada (o gen) del nuevo vector creado es seleccionado aleatoriamente desde uno de los padres con la misma coordenada.
- Regla de mutación: es aplicada aleatoriamente para cambiar a los padres del nuevo individuo a ser creado. La mutación en el nuevo individuo es obtenida aleatoriamente cambiando los genes de la población: esta característica ayuda a reducir la posibilidad de una rápida convergencia en un óptimo local. Después de un número sucesivo de generaciones se espera que la población evolucione a una solución óptima.

Sin adentrarse en la construcción interna de los algoritmos genéticos, de sus muchas variantes, y del estudio detallado de los procedimientos de optimización, ya que son objeto de otras disciplinas y caen fuera del objetivo de este trabajo, nos limitaremos a hacer uso de las herramientas proporcionadas por MATLAB®.

### 3.4. Minimización de campo eléctrico mediante optimización

Para ejemplificar el uso de las funciones descritas anteriormente, y además de verificar su exactitud, se presentan tres problemas que involucran esfuerzos eléctricos. En uno de ellos la solución analítica es conocida y puede ser alcanzada mediante procesos de optimización, mientras que en los otros dos se optimiza la forma de la geometría. En todos los ejemplos la variable dependiente en la función objetivo es el campo eléctrico máximo, las variables independientes son radios y puntos que definen la forma de conductores y aislamientos. El objetivo en los tres casos es minimizar  $\bar{E}$ .

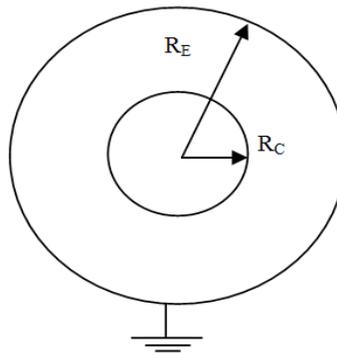
#### 3.4.1. Radio óptimo del conductor en un arreglo coaxial

El primer problema consiste en determinar el radio óptimo del conductor central en un arreglo coaxial que minimice el campo eléctrico en el medio aislante. En este caso el radio óptimo es bien conocido y tiene una solución analítica. De esta forma se pueden construir por ejemplo cables, sin la necesidad de sobredimensionar el aislamiento. Este tipo de arreglos se pueden encontrar en la distribución de energía eléctrica en media y alta tensión (hasta 400 kV), a través de cables extruidos blindados que forman con el aislante un arreglo coaxial, o también en barras aisladas en SF<sub>6</sub>. La Figura 3.2 muestra un ejemplo de este tipo de geometrías en cables extruidos. Para este ejemplo se consideró el arreglo coaxial más simple, en el cual sólo se toma en cuenta una frontera aterrizada (pantalla semiconductor extruida sobre el aislante) y el conductor interno que se encuentra a potencial.

La Figura 3.3 muestra el arreglo base de esta simulación, donde  $R_E$  es el radio del cable hasta la pantalla semiconductor,  $R_C$  es el radio del conductor (incluyendo la pantalla semiconductor extruida sobre el conductor) y variable a optimizar.



**Figura 3.2** Cable para distribución de energía, alta tensión, 110 kV.



**Figura 3.3** Arreglo simple de un cable del tipo coaxial.

En este caso se sabe que el máximo campo eléctrico se presenta en la superficie del conductor, como se explica en el Apéndice C. La solución de este problema es bien conocida, y el valor mínimo de campo eléctrico máximo depende de la relación entre  $R_C$  y  $R_E$  [30,31], el cual está dado por la ecuación 3.3.

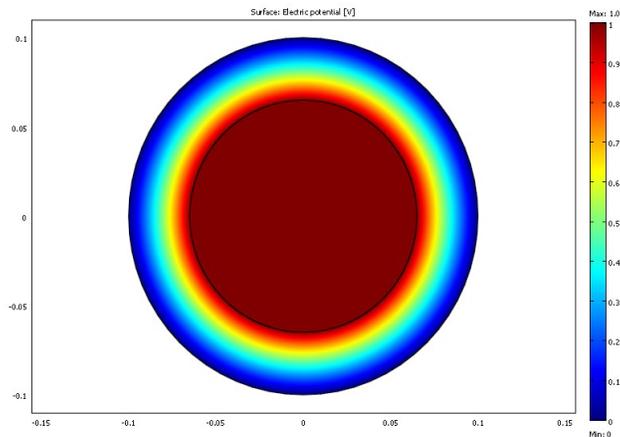
$$E_{\max} = \frac{V}{R_C \ln\left(\frac{R_E}{R_C}\right)} \quad (3.3)$$

La minimización de la ecuación anterior con respecto a la relación  $R_E/R_C$  se encuentra cuando se cumple la relación dada en la ecuación 3.4.

$$\frac{R_E}{R_C} = e = 2.71828 \quad (3.4)$$

Siguiendo el diagrama de flujo de la Figura 3.1, este problema primeramente se resuelve en COMSOL<sup>®</sup> para obtener una solución y de esta forma generar la función objetivo, para después con las funciones de optimización de MATLAB<sup>®</sup> buscar el radio óptimo. En este caso *fminbnd* es una función adecuada, dado que solo se tiene una variable a optimizar.

Con la finalidad de hacer este ejemplo válido para cualquier dimensión de arreglo, en COMSOL<sup>®</sup> el radio inicial de la funda del cable fue considerado como 0.1 m., el radio inicial del conductor fue propuesto como 0.06 m, y la tensión del conductor interno como 1 V. La Figura 3.4 es la solución obtenida con COMSOL<sup>®</sup> para los radios iniciales y muestra la distribución de potencial en el arreglo coaxial.



**Figura 3.4** Distribución de potencial en el arreglo coaxial.

La Figura 3.5 muestra el comportamiento del campo eléctrico de la primera solución, de la cual se aprecia que el campo eléctrico máximo se encuentra sobre la superficie del conductor y tiene una magnitud de 35 V/m.

Mediante la función *fminbnd* se busca la relación óptima de radios que asegure la mínima intensidad de campo. Para esto la variable es el radio del conductor y como salida de la función objetivo se tiene el campo en la superficie del conductor. El valor encontrado por la función de optimización de MATLAB<sup>®</sup> después de 22 iteraciones es un radio de 0.0367m, por lo tanto este resultado en la ecuación 3.4 es:

$$\frac{R_E}{R_C} = \frac{0.1}{0.03672} = 2.72271\text{m}$$

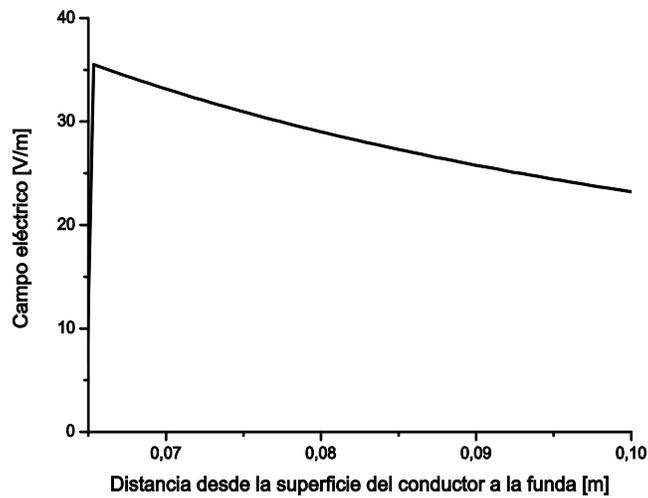


Figura 3.5 Comportamiento del campo eléctrico tangencial de COMSOL®.

Esto significa que existe un error menor a 0.001% con respecto a la solución analítica. La Figura 3.6 muestra que el campo eléctrico máximo con el valor de radio óptimo obtenido es de 26 V/m.

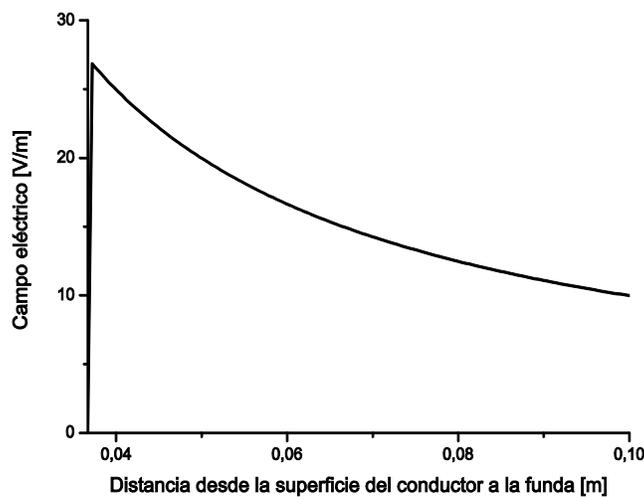
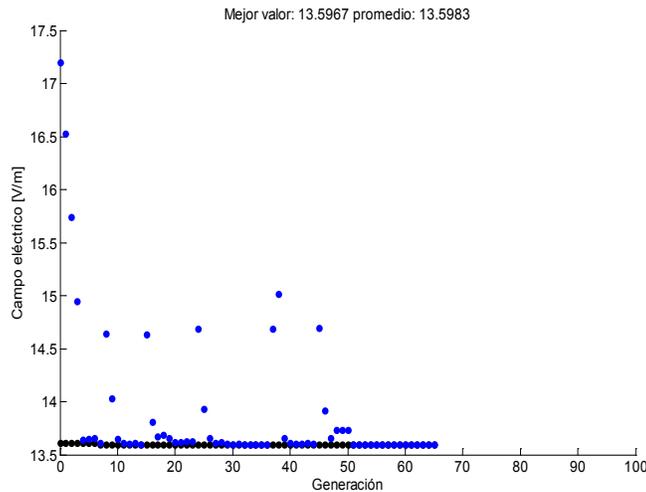


Figura 3.6 Campo eléctrico tangencial de la optimización.

El tiempo que toma la función fminbnd para llegar al valor óptimo es de 50 segundos. Este mismo problema se resolvió mediante una función basada en algoritmos genéticos del toolbox de MATLAB®. A pesar de que converge al mismo resultado, 0.0367 m, el tiempo de procesamiento es mucho mayor ya que tiene que realizar más iteraciones debido a su

naturaleza. En este caso se consideró una población de 5 individuos y la solución fue encontrada después de 64 generaciones, como se muestra en la Figura 3.7, es decir, el problema fue resuelto 320 veces, tomando varios minutos para encontrar el resultado, como se observa en la Tabla 3.1.



**Figura 3.7** Proceso de optimización del radio del conductor de un arreglo coaxial, por medio de AG.

Este ejemplo muestra claramente que existen problemas sencillos que tienen sólo un mínimo, y para los cuales es mucho más rápido aplicar una función de optimización convencional, como *fminbnd*, en lugar de la función de algoritmos genéticos. La Tabla 3.1 muestra los resultados obtenidos en ambos casos.

**Tabla 3.1** Resultados de la optimización para un arreglo coaxial.

Función de optimización	Radio óptimo [m]	No. de iteraciones	Tiempo estimado [s]
<i>fminbnd</i>	0.0367	22	51
<i>AG</i>	0.0367	320	600

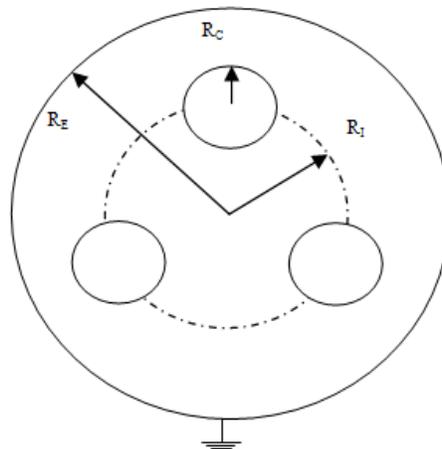
### 3.4.2. Radio y distancia de ubicación óptimos de los conductores en un arreglo triaxial

Los cables del tipo triaxial son usados comúnmente en media tensión, hasta 15 kV, en lugares especiales en donde se requiera que el riesgo de propagación de incendio sea

mínimo, reducir emisión de humos opacos, gases tóxicos y corrosivos, como en buques, en zonas residenciales o industriales. Pueden ser instalados en ductos o directamente enterrados. Estos cables presentan pérdidas dieléctricas bajas ante cambios de carga repentinos. La Figura 3.8 muestra la construcción física de un cable triaxial para alimentación, utilizado en aplicaciones marinas. La optimización del radio de los conductores de un arreglo triaxial, en conjunto con la distancia del centro del cable al centro de los conductores, es otro ejemplo de minimización de esfuerzo eléctrico, siempre con la finalidad de reducir costos y dimensiones del arreglo. La Figura 3.9 muestra el arreglo usado, donde  $R_C$  es el radio del conductor,  $R_E$  es el radio del cable y  $R_I$  es la distancia desde el centro del cable al centro del conductor. Para resolver este problema nuevamente la funda es aterrizada, y dos variables son consideradas como entradas para la función objetivo: el radio del conductor  $R_C$  y el radio  $R_I$  al cual se posicionan las tres fases.



**Figura 3.8** Cable triaxial para alimentación de energía, media tensión, 15 kV.



**Figura 3.9** Arreglo triaxial.

Al igual que en el caso anterior, se busca reducir la intensidad del campo eléctrico máximo. Las variables  $R_C$  y  $R_I$  son las variables independientes para optimizar en la función objetivo. Este problema es resuelto para el caso en el cual los conductores son alimentados con 1:-0.5:-0.5V para la fase a, b y c respectivamente, caso instantáneo más crítico, y considerando el valor de  $R_E=1m$ . Una de las funciones del toolbox de MATLAB<sup>®</sup> que nos permite trabajar con más de una variable, además de incluir restricciones, es la función *fmincon*. En este caso esta función se declaró como lo muestra la ecuación 3.5.

$$x = \text{fmincon}(fun, x0, A, B, [ ], [ ], [L_i], [L_s], options) \quad (3.5)$$

donde  $x_0$  es el vector de valores iniciales, A y B son restricciones físicas que cumplen con las ecuaciones 3.6 a y b.

$$R_C + R_I < R_E \quad (3.6a)$$

$$-R_i + R_C > 0.0 \quad (3.6b)$$

De las ecuaciones anteriores se tiene que el radio del conductor más la distancia desde el centro del cable al conductor, no debe superar el radio total del cable. De la misma forma la suma del negativo de la distancia desde el centro del cable a uno de los conductores, más el radio del conductor no debe ser mayor de cero, de lo contrario esto implicaría que el conductor esté sobrepuesto con otro conductor. Al igual que en el caso anterior, partiendo de la Figura 3.1, la función objetivo se genera a partir de una primera solución mediante el MEF en COMSOL<sup>®</sup> como se puede ver en la Figura 3.10.

Nuevamente se sabe que  $E_{max}$  se presenta sobre la superficie del conductor cuyo potencial es mayor, sin embargo a diferencia del caso anterior, el valor de campo eléctrico no es uniforme en la periferia del conductor con potencial positivo, debido a la presencia de los otros dos conductores. Por ello la solución de la función objetivo se obtendrá de comparar el  $E_{max}$  del centro del conductor energizado con 1V al centro de cualquiera de los otros dos conductores, con el  $E_{max}$  desde el centro del cable a la funda, pasando por el conductor energizado con potencial positivo. Las líneas de color negro, sobre la Figura 3.10, muestran las rectas donde se registra de campo eléctrico. El comportamiento de  $E_t$  sobre las rectas trazadas en la Figura 3.10, se observa en la Figura 3.11 a) y Figura 3.11 b).

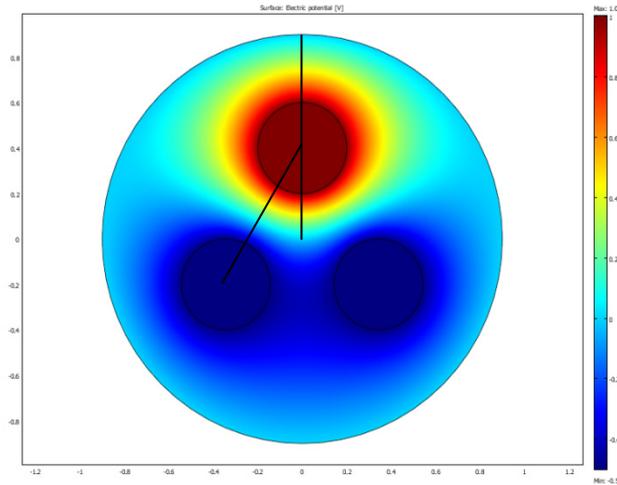


Figura 3.10 Solución en COMSOL<sup>®</sup> del arreglo triaxial.

De la Figura 3.11a) se observa que el máximo campo eléctrico en el arreglo triaxial con las dimensiones iniciales de  $R_c=0.2\text{m}$  y  $R_i=0.4\text{m}$  se encuentra sobre la superficie del conductor energizado, ubicado en la línea recta que parte del centro del cable a la funda, con un valor de  $7.269\text{ V/m}$ . Este valor de campo es la primera referencia para empezar la búsqueda de las dimensiones que lo minimicen. En cada iteración se hace la comparación para localizar el máximo valor de campo eléctrico en el arreglo completo.

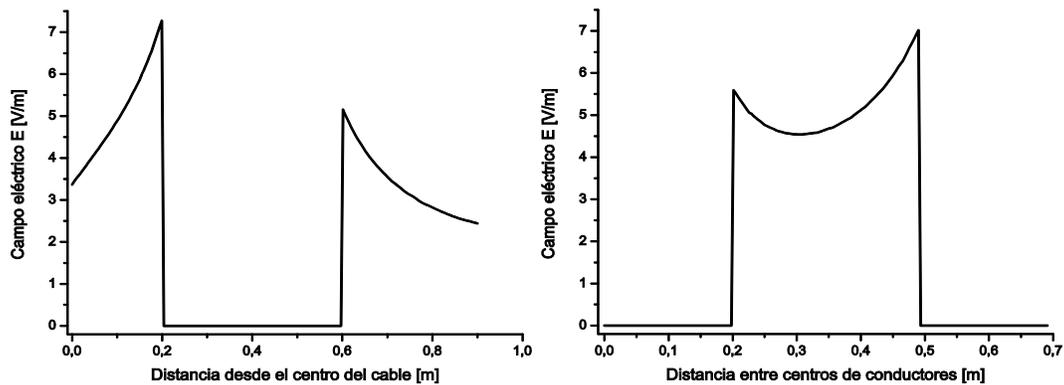


Figura 3.11 a) Comportamiento del campo eléctrico tangencial desde el centro del cable, b) Comportamiento del campo eléctrico tangencial desde centros de conductores.

La función *fmincon*, después de 12 iteraciones y 792 soluciones, en un tiempo de 661.58 segundos (alrededor de 11 minutos), encuentra que el valor óptimo para  $R_i=0.506\text{ m}$  y para  $R_c=0.175\text{ m}$ , los cuales son similares a los que se han reportado en [32,33]. La Figura 3.12 muestra el comportamiento del campo eléctrico, con las dimensiones óptimas encontradas por *fmincon*.

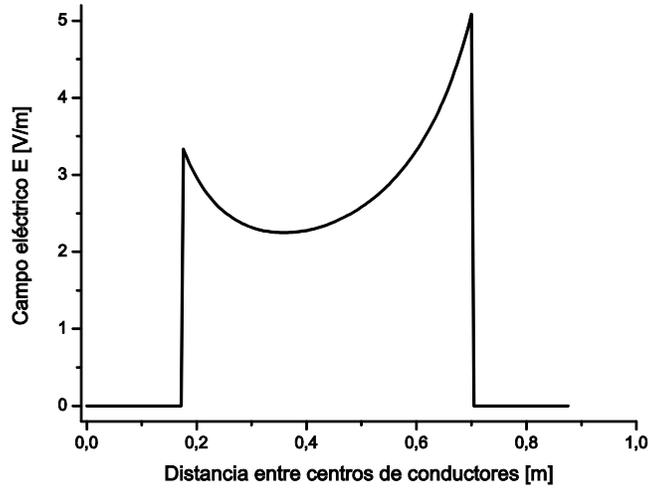


Figura 3.12 Comportamiento del campo eléctrico tangencial optimizado con *fminbnd*.

La Figura 3.12 muestra que el máximo campo eléctrico es menor que el que se muestra en la Figura 3.11, pero a diferencia de la Figura 3.11 ahora el máximo campo eléctrico se encuentra en la superficie del conductor alimentado positivamente pero con dirección hacia el centro del otro conductor.

Este problema también fue resuelto con algoritmos genéticos. La Figura 3.13 muestra que para este problema se encontró una solución después de 102 generaciones, 510 soluciones y más de media hora de cómputo. Sin embargo, el resultado ofrece una solución a la función con valor de campo eléctrico un poco menor al encontrado por *fmincon*, como se observa en la Tabla 3.2.

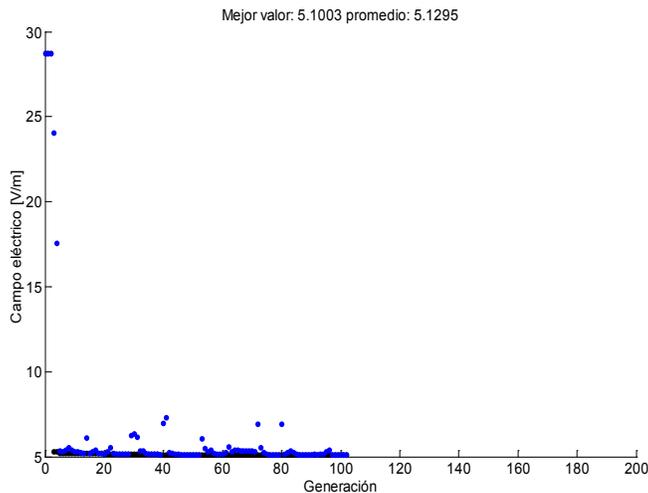


Figura 3.13 Proceso de optimización de las dimensiones para el arreglo triaxial por medio de AG.

**Tabla 3.2** Resultados de la optimización para un arreglo triaxial.

Función de optimización	Radio óptimo $R_I$ [m]	Radio óptimo $R_C$ [m]	No. de soluciones	Tiempo estimado [s]	E [V/m]
<i>fmincon</i>	0.506	0.175	22	661.58	5.133
<i>AG</i>	0.512	0.165	510	1900	5.1003

### 3.4.3. Diseño de un disco espaciador

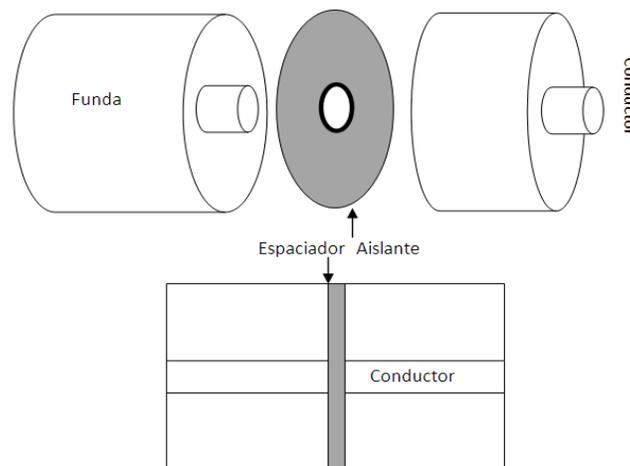
Las líneas coaxiales aisladas en gas, la extensión de los buses de una subestación aislada en SF<sub>6</sub> [34], permiten la conducción de altas tensiones desde los bancos de transformadores, como se puede ver en la Figura 3.14. Los espaciadores aislantes, como el que se observa en la Figura 3.15, son una parte inherente de estos sistemas, sin embargo su presencia reduce considerablemente el nivel de aislamiento. Esto se debe a que el espaciador facilita el inicio y la propagación de descargas superficiales en su interfaz con el gas [35], por lo cual son considerados el principal punto débil de este tipo de sistemas. Algunos trabajos han encontrado que modificar la distribución del esfuerzo tangencial mediante el cambio de la geometría del perfil da buenos resultados en la búsqueda de evitar descargas superficiales, basándose en el principio de refracción [36].

**Figura 3.14** Líneas aisladas en gas.



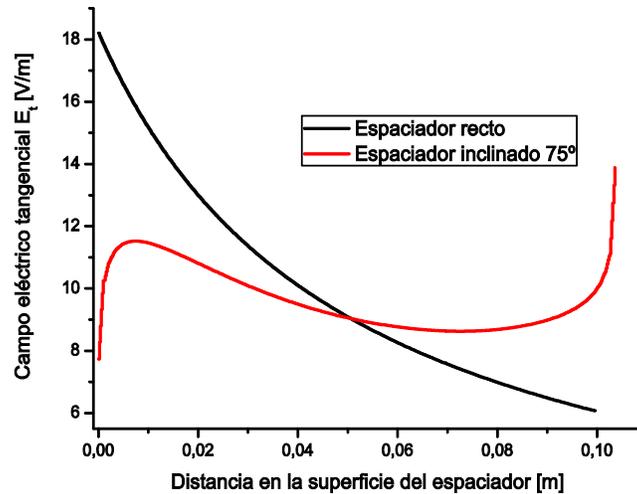
**Figura 3.15** Espaciador aislante para líneas aisladas en gas.

Hasta ahora los ejemplos mostrados sólo dependían del radio de los conductores, es decir, la geometría ha permanecido con la misma forma. El ejemplo del espaciador busca encontrar a través de las funciones de optimización la geometría adecuada para reducir el esfuerzo eléctrico tangencial que se presenta en el punto triple (unión conductor, gas y espaciador). La Figura 3.16 muestra el arreglo en el que se basa esta simulación, un espaciador de tipo disco recto de un arreglo coaxial.



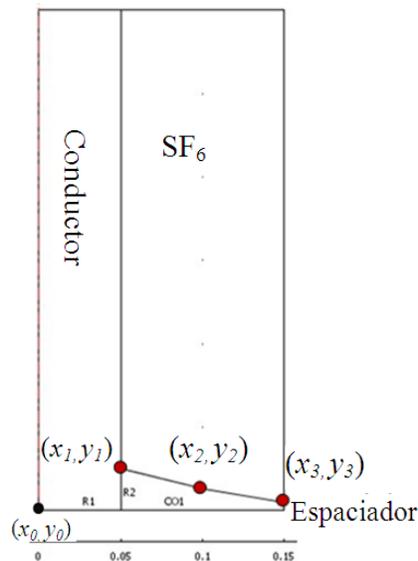
**Figura 3.16** Espaciador.

Algunos reportes han mostrado que el otorgarle un perfil inclinado al espaciador reduce el esfuerzo eléctrico sobre la superficie; estos trabajos indican que la inclinación adecuada se encuentra a  $75^\circ$ . La Figura 3.17 muestra el comportamiento del campo eléctrico tangencial en la superficie de un espaciador tipo recto y otro con una inclinación de  $75^\circ$ .



**Figura 3.17** Esfuerzo tangencial sobre la superficie del espaciador tipo disco con inclinación de 75° y en un espaciador recto.

Esta simulación se realiza en un modelo axial simétrico para hacer más simple la solución y, a diferencia de los casos anteriores, ahora se incluyen cuatro variables, tres en el eje vertical ( $y_1$ ,  $y_2$ ,  $y_3$ ), y una más en el eje horizontal ( $x_2$ ), como se observa en la Figura 3.18.  $x_1$  y  $x_3$  tienen valores fijos.



**Figura 3.18** Arreglo utilizado para generar la función objetivo.

El comportamiento del campo eléctrico tangencial con la geometría del espaciador que se muestra en la Figura 3.18 como diseño inicial se observa en la Figura 3.19. Para esta simulación se alimenta el conductor con 1V, además la relación entre el radio del conductor

y el radio de la funda aterrizada obedece a la ecuación 3.4, y se considera que la relación entre la permitividad del gas y del dieléctrico es  $\frac{\epsilon_d}{\epsilon_g} = 5$ .

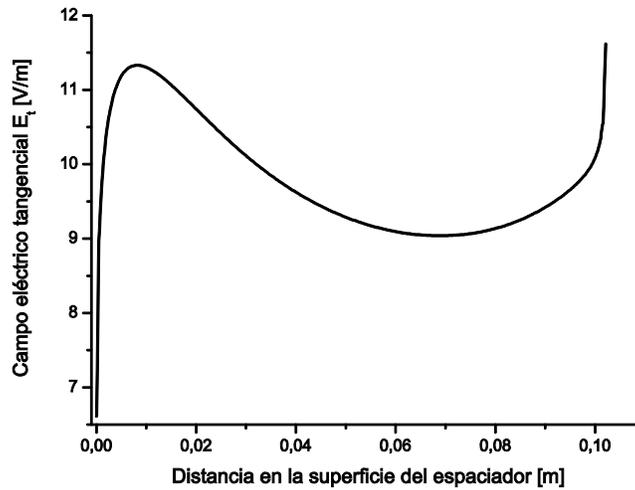


Figura 3.19 Comportamiento del campo eléctrico tangencial de la primera solución de COMSOL®.

De la Figura 3.19 se observa que existe alto campo tanto en el lado del punto triple, como en el extremo inmediato a la funda en el espaciador. Por ello se busca una geometría que minimice niveles de esfuerzo eléctrico sobre todo el perfil del disco aislante.

Esta optimización se realizó con la ayuda de la función *fmincon* y algoritmos genéticos, los resultados se muestran en la Tabla 3.3. La Figura 3.20 muestra la solución encontrada por la función de algoritmo genético. En ella se aprecia la distribución de potencial en el cable y la geometría óptima para el espaciador. La Figura 3.21 muestra la distribución de potencial sobre el espaciador en un modelo de 3D.

Tabla 3.3 Resultados de la optimización para el espaciador.

Función de optimización	X <sub>2</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	E [V/m]
<i>fmincon</i>	0.09885	-0.14281	-0.13015	-0.14899	11.52632
<i>AG</i>	0.10669	-0.13984	-0.11091	-0.14601	9.86437
<i>Diseño recto</i>	-----	-----	-----	-----	18
<i>Diseño 75°</i>	-----	-----	-----	-----	15

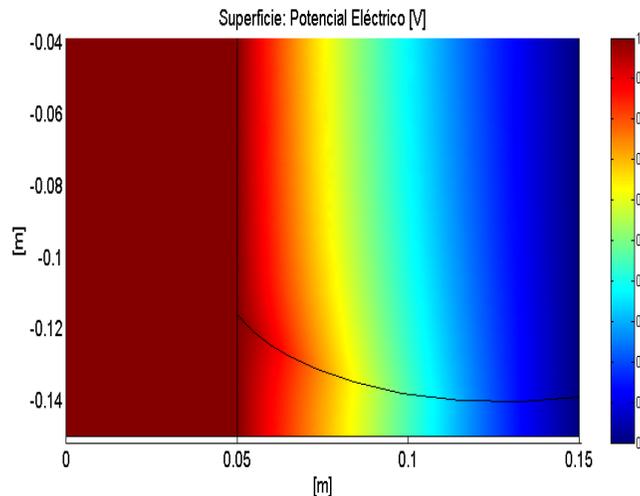


Figura 3.20 Distribución de potencial en línea aislada en gas con el diseño óptimo del espaciador.

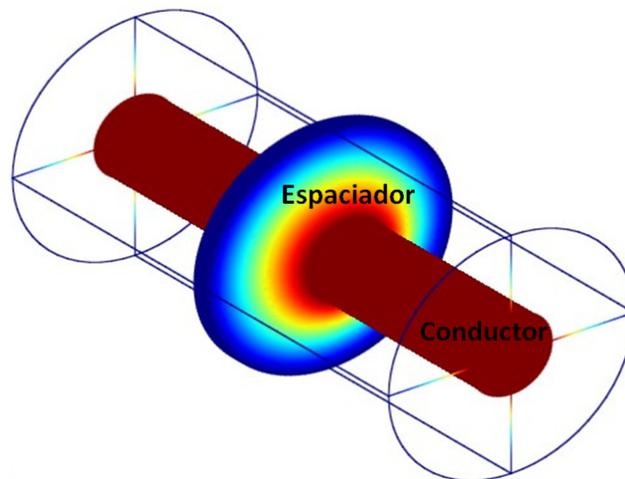


Figura 3.21 Distribución de potencial sobre el espaciador en 3D.

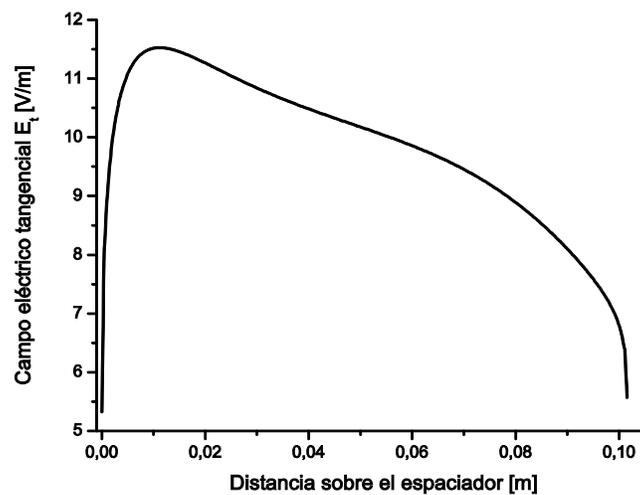
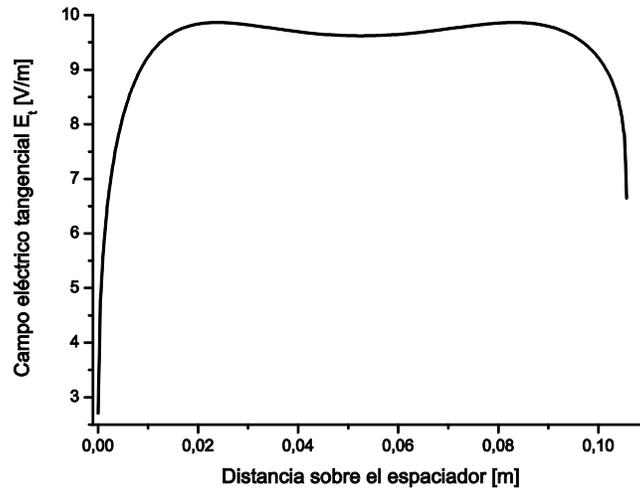


Figura 3.22 Comportamiento del campo eléctrico sobre la superficie del espaciador, con dimensiones obtenidas de *fmincon*.



**Figura 3.23** Comportamiento del campo eléctrico sobre la superficie del espaciador, con dimensiones obtenidas de *AG*.

Este ejercicio es un claro ejemplo de que en ocasiones las funciones convencionales de optimización pueden caer en un mínimo local, como se ve de la Tabla 3.3 y de la Figura 3.22, la función *fmincon* minimizó el campo eléctrico sólo en un extremo del espaciador, siendo el lado cercano al conductor el que presenta aún similar intensidad de esfuerzo que en el diseño original.

En estos casos el uso de algoritmos genéticos aumenta la probabilidad de la convergencia en el mínimo global. La Tabla 3.3 muestra que aunque la función *fmincon* encontró una solución al problema, no es el mínimo valor que puede presentar el campo eléctrico, mientras que el valor que alcanza la convergencia con algoritmo genético se considera el mínimo global de la función objetivo, lo cual se puede observar en la Figura 3.23 donde la distribución de esfuerzo se ve más uniforme sobre la superficie del espaciador.



---

---

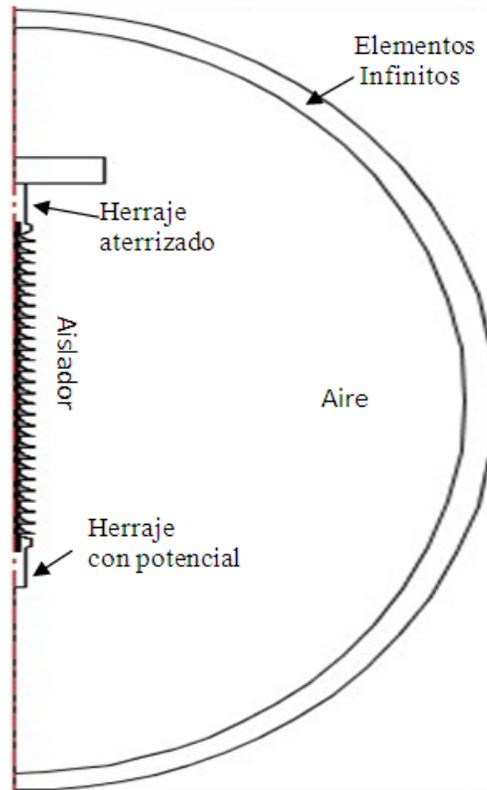
# CAPÍTULO IV. Diseño óptimo del sistema de atenuación en el aislador

## 4.1. Introducción

Ya se ha mencionado el daño que causa sobre el material polimérico la presencia de un campo eléctrico intenso, así como lo importante que es reducir la componente tangencial del campo para evitar descargas superficiales. También se presentaron algunas medidas que han reportado trabajos recientes para atenuar la concentración de esfuerzo eléctrico, mediante modificaciones de la geometría del aislador, cambio en la permitividad dieléctrica o conductividad del material y la colocación de un anillo corona del lado energizado del aislador. El uso de técnicas de optimización para encontrar una solución óptima a un problema que involucra el minimizar el campo eléctrico en sistemas de aislamiento se mostró para diferentes casos y utilizando diferentes técnicas. En este capítulo se muestran los resultados obtenidos luego de establecer una función objetivo mediante el MEF en COMSOL<sup>®</sup>, e incorporarla a las funciones de optimización en MATLAB<sup>®</sup> para encontrar dimensiones y propiedades óptimas de un aislador polimérico de 115 kV.

## 4.2. Modelo del aislador usado para la simulación

El modelo de aislador usado en este trabajo corresponde a un aislador polimérico de 115 kV como el que se muestra en el Apéndice A. En el modelo considerado en COMSOL<sup>®</sup> se aprovecha la forma axial simétrica del aislador para reducir el problema a dos dimensiones y así encontrar una solución rápida y con una buena aproximación. Los elementos tomados en cuenta en este modelo son el herraje de potencial, el herraje aterrizado y una sección de aire limitada por una frontera de elementos infinitos, como se muestra en la Figura 4.1. El uso de elementos infinitos como frontera del modelo es con la finalidad de aproximar el campo eléctrico a un valor más real con fronteras abiertas sin necesidad de extender excesivamente el subdominio correspondiente al aire que rodea al aislador.



**Figura 4.1** Modelo axial simétrico del aislador.

El mallado en este modelo fue mejorado en la zona cercana al herraje como se muestra en la Figura 4.2, ya que esta zona es en la cual el gradiente de potencial es más pronunciado. Una solución presentada en forma de líneas equipotenciales como la que se muestra en la Figura 4.3 permite verificar las zonas de mayor esfuerzo por medio de espaciamiento entre estas líneas; a menor espaciamiento mayor intensidad de campo eléctrico. El comportamiento del campo eléctrico tangencial de esta solución se mostró en la Figura 2.4, donde se observa claramente el problema que se presenta en el lado energizado del aislador, específicamente en el punto triple, donde convergen el herraje de potencial, el aire y el material polimérico.

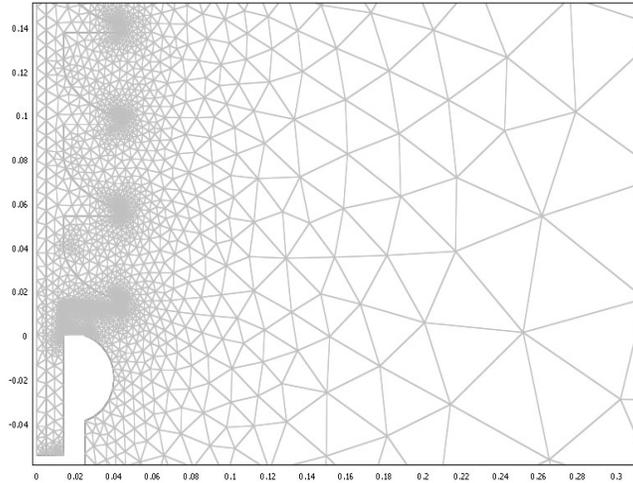


Figura 4.2 Mallado del modelo axial simétrico del aislador.

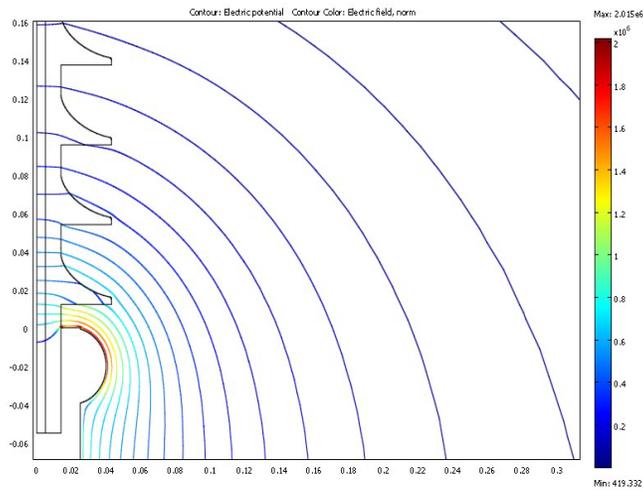


Figura 4.3 Solución del modelo axial simétrico del aislador.

### 4.3. Análisis paramétrico de la permitividad relativa del material y del ángulo de inclinación del perfil

Se considera que la componente  $E_t$  es la que determina la posible existencia de descargas superficiales en el aislador. Por ello, y con base en la teoría de refracción del campo eléctrico, se busca mediante la modificación de la geometría la reducción de dicha componente. De las técnicas analizadas en el Capítulo 2 se observa de la Figura 2.12 que al otorgarle un cierto ángulo de inclinación al perfil cercano a potencial se presenta una mejor redistribución de líneas equipotenciales dentro y fuera del material polimérico. De esta forma la componente tangencial es reducida considerablemente. La inclinación propuesta

en la Figura 2.12 se eligió como  $75^\circ$ , ya que se hace mención en trabajos previos que para algunas geometrías éste es el valor adecuado para minimizar  $E_t$  [15].

En este caso la simulación con el MEF se realiza considerando las propiedades del hule de silicón como material aislante ( $\epsilon_r = 3$ ). A partir de este modelo se establece la función objetivo, en la cual sólo se considera como variable el ángulo de inclinación. La Figura 4.4 muestra que para  $76^\circ$  de inclinación la magnitud de  $E_t$  es la mínima. Esto se obtuvo haciendo un barrido del valor del ángulo de inclinación desde 74 hasta 87 grados y registrando el máximo campo eléctrico en la superficie del aislador.

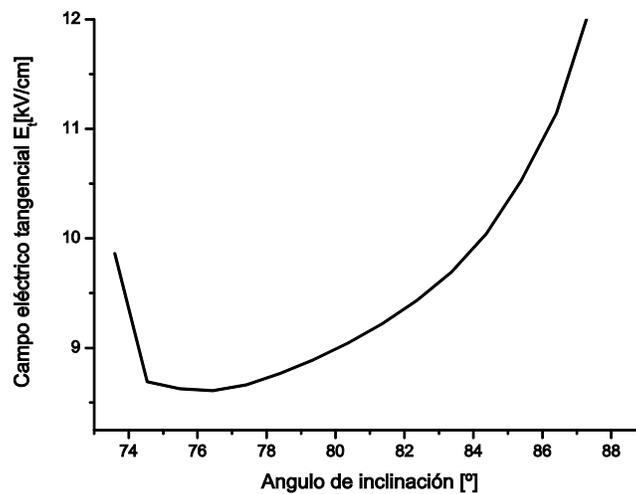


Figura 4.4 Análisis paramétrico del ángulo de inclinación.

Trabajos de investigación han mostrado que se puede atenuar el campo eléctrico incorporando materiales semiconductores a la matriz de silicón, que es el material aislante mayormente utilizado en la fabricación de aisladores poliméricos. Publicaciones recientes han trabajado en la atenuación de campo eléctrico utilizando como material aislante silicón RTV 615 [15], de General Electric, cuya  $\epsilon_r$  es 2.7.

Al silicón RTV 615 se le incorpora polvo de  $\text{BaTiO}_3$  con una  $\epsilon_r = 154$ , luego de un proceso de caracterización pueden obtenerse materiales con constantes de permitividad altas, como se puede ver en el Apéndice B, de los cuales se espera que reduzcan la intensidad de campo eléctrico. De estas propuestas, y tomando en cuenta la condición de inclinación obtenida previamente, se busca obtener un valor de  $\epsilon_r$  que permita la distribución de las líneas equipotenciales en una manera más uniforme en la superficie del

aislador reduciendo la intensidad de campo eléctrico.

La Figura 4.5 muestra el barrido de permitividad, de la cual se puede ver que para un valor de 4 y con la inclinación de  $76^\circ$  la presencia de  $E_t$  se reduce hasta 7.4 kV/cm sobre la superficie del aislador, mientras que en el caso de la Figura 4.4 el valor mínimo del máximo campo es de 8.5 kV/cm.

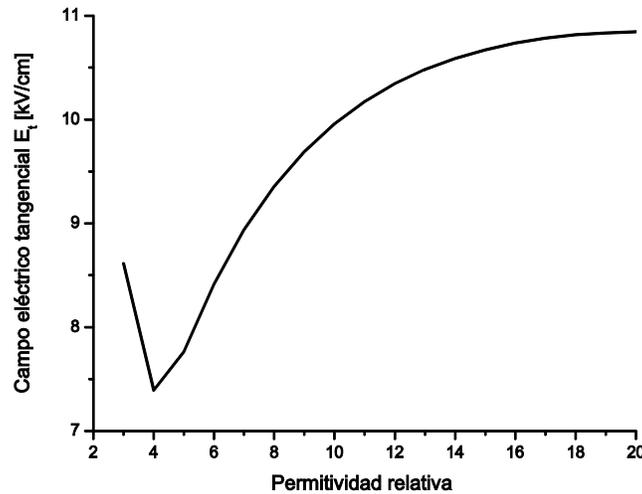


Figura 4.5 Análisis paramétrico de la permitividad.

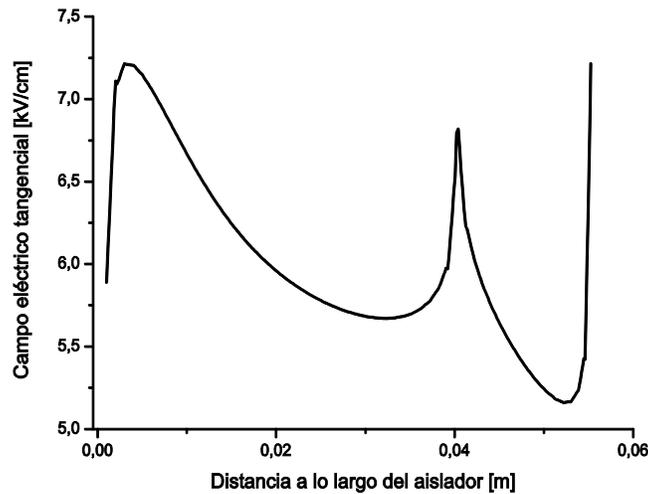
#### 4.4. Optimización de $\epsilon_r$ y del ángulo de inclinación del perfil

Del análisis anterior se observa que existen valores que en conjunto pueden atenuar la presencia de campo eléctrico. Como segundo caso, las funciones de optimización de MATLAB<sup>®</sup> son utilizadas para la minimización de esfuerzo eléctrico, en este caso se usa *fminbnd*, y al igual que en el análisis paramétrico, se optimiza sólo una variable a la vez. Primero se busca el ángulo de inclinación adecuado, para después buscar el valor de  $\epsilon_r$  que ofrezca el menor campo eléctrico máximo, encontrando como valores óptimos los que se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Resultados de la optimización con la función *fminbnd*.

Función de optimización	Ángulo de inclinación [°]	Permitividad relativa $\epsilon_r$	$E_{max}$ [kV/cm]
<i>fminbnd</i>	76.5	4.2	7.2

La Figura 4.6 muestra el comportamiento del campo eléctrico tangencial sobre la superficie polimérica con la inclinación y permitividad encontrados por la función. En esta figura se observa que el máximo campo eléctrico se ha alejado unos milímetros del punto triple.



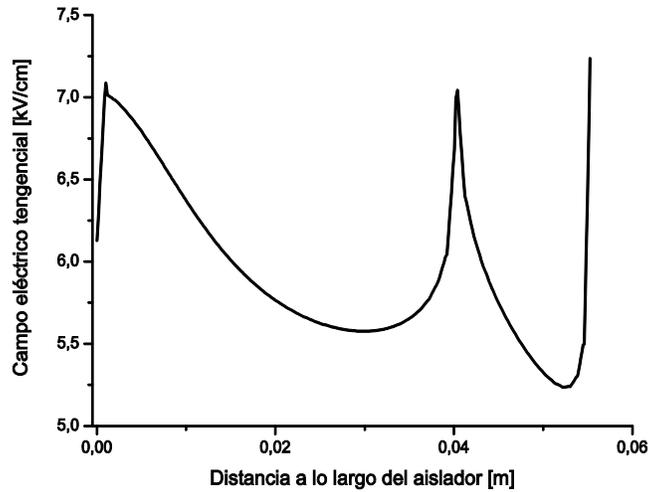
**Figura 4.6** Comportamiento del campo eléctrico tangencial en la superficie del aislador (primeros centímetros desde el herraje energizado) encontrado por *fminbnd*.

Con la función *fmincon* tanto el valor del ángulo de inclinación, como el de permitividad son optimizados al mismo tiempo. Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 4.2.

**Tabla 4.2** Resultados de la optimización con la función *fmincon*.

Función de optimización	Angulo de inclinación [°]	Permitividad relativa $\epsilon_r$	$E_{max}$ [kV/cm]
<i>fmincon</i>	74.3	4.1	7.2

El comportamiento de  $E_t$  con los valores obtenidos por *fmincon* tanto para permitividad como inclinación se observa en la Figura 4.7, de la cual se aprecia que el máximo campo eléctrico tangencial se encuentra fuera del punto triple al igual que en el caso anterior, pero ahora en el extremo más alejado del herraje energizado; sin embargo, es de un valor muy cercano al obtenido por la función *fminbnd*.

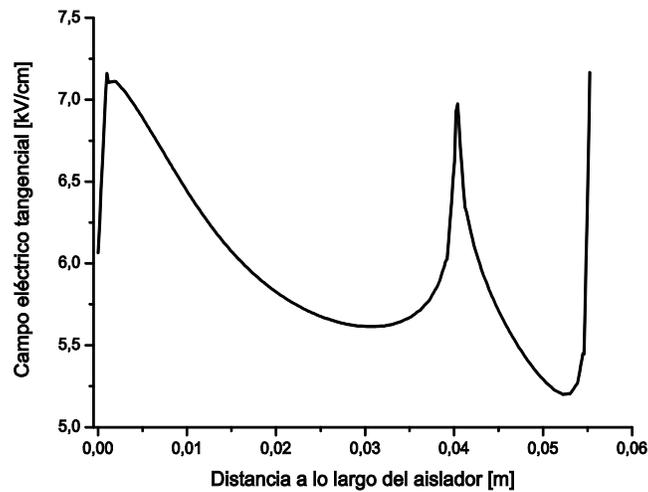


**Figura 4.7** Comportamiento del campo eléctrico tangencial en la superficie del aislador (primeros centímetros desde el herraje energizado) encontrado por *fmincon*.

Con los resultados obtenidos hasta ahora, es posible obtener un diseño óptimo. Para asegurar que las funciones anteriores no hayan convergido en un mínimo local, se realiza la búsqueda de los valores adecuados mediante una función de algoritmos genéticos, obteniendo como resultados los mostrados en la Tabla 4.3.

**Tabla 4.3** Resultados de la optimización con la función AG.

Función de optimización	Angulo de inclinación [°]	Permitividad relativa $\epsilon_r$	$E_{max}$ [kV/cm]
AG	74.9	4.1	7.15



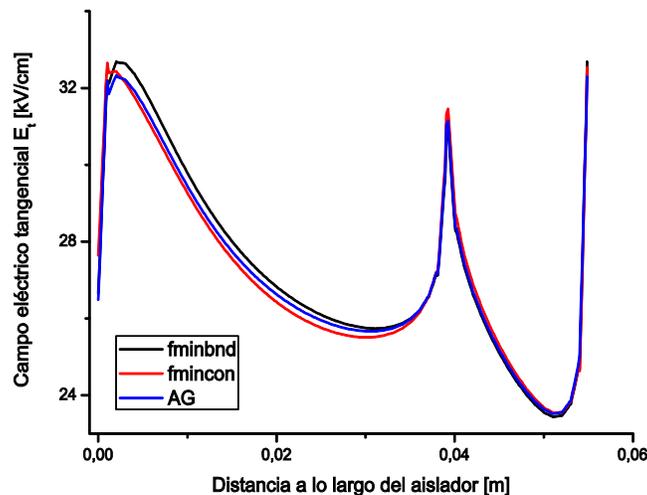
**Figura 4.8** Comportamiento del campo eléctrico tangencial en la superficie del aislador (primeros centímetros desde el herraje energizado) encontrado por AG.

La Figura 4.8 muestra el comportamiento del campo eléctrico bajo estas nuevas condiciones, De ella se observa que los valores encontrados con esta función ofrecen un esfuerzo eléctrico superficial ligeramente menor al encontrado tanto por *fminbnd* como *fmincon*.

Sin embargo, estas condiciones de minimización podrían no comportarse de la misma forma bajo diferentes condiciones de operación, por ello se prueba el arreglo ante la presencia de un impulso de rayo de la forma de la ecuación 4.1.

$$V_{\text{imp}} = -450000 \times \left( 1.0257 \times \left( e^{\left( -\frac{t}{0.255 \times 10^{-6}} \right)} - e^{\left( -\frac{t}{68.5 \times 10^{-6}} \right)} \right) \right) \quad (4.1)$$

El comportamiento del campo eléctrico tangencial bajo la condición del impulso de rayo y con cada una de las funciones de optimización que se obtuvieron a frecuencia nominal, se muestra en la Figura 4.9.



**Figura 4.9** Comportamiento del campo eléctrico tangencial en la superficie del aislador (primeros centímetros desde el herraje energizado) bajo un impulso de rayo.

La Tabla 4.4 muestra los resultados obtenidos, de la cual se observa que aunque los valores de campo eléctrico son mucho mayores por el nivel de tensión aplicado, éstos guardan la misma proporción que bajo la tensión nominal a 60 Hz. Se observa que el resultado de AG es el que logra encontrar un mejor resultado. La diferencia de resultados bajo impulso de rayo y frecuencia nominal se puede atribuir al cambio de las corrientes de desplazamiento en el dieléctrico con la alta frecuencia equivalente presente en un pulso rápido.

**Tabla 4.4** Resultados obtenidos de las funciones de optimización, considerando un impulso de rayo.

Función de optimización	Angulo de inclinación [°]	Permitividad relativa $\epsilon_r$	$E_{max}$ [kV/cm]
<i>fminbnd</i>	76.5	4.3	32.6
<i>fmincon</i>	75.1	4.1	32.6
<i>AG</i>	76.3	4.3	32.3

#### 4.5. Optimización de la geometría cercana al lado energizado

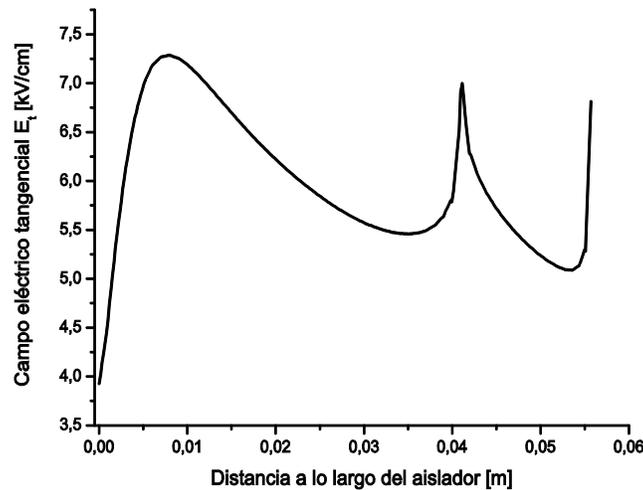
El modificar el perfil cercano a potencial de forma recta con un ángulo de inclinación es de gran ayuda en la atenuación de campo eléctrico, pero como se pudo ver en el ejemplo de espaciador de la sección 3.5, el uso de un perfil cóncavo puede mejorar la reducción en el campo máximo. En este caso se busca modificar la misma geometría del aislador pero ahora en forma cóncava, para lo cual se realiza una modificación a la función objetivo para poder incluir como variables las coordenadas de un par de puntos en el perfil, dejando constante la permitividad relativa inicial ( $\epsilon_r=3$ ). Los puntos son unidos por curvas de tipo spline de las cuales sus coordenadas determinan la geometría óptima en la cual el esfuerzo eléctrico se reduce. Primeramente se realiza la búsqueda de una variable a la vez con la función *fminbnd*, los resultados se muestran en la Tabla 4.5.

**Tabla 4.5** Resultados obtenidos para el perfil cóncavo con *fminbnd*.

Función de optimización	X1	Y1	X2	Y2
<i>Fminbnd</i>	0.2	0.19	0.2	0.005

$E_{max}=7.3$  kV/cm

La Figura 4.10 muestra el comportamiento del campo eléctrico tangencial sobre el perfil modificado en forma cóncava con los valores de la Tabla 4.5. Ahora el campo eléctrico tangencial máximo se encuentra más alejado del punto triple, pero sin llegar al extremo contrario de potencial sobre el perfil analizado.



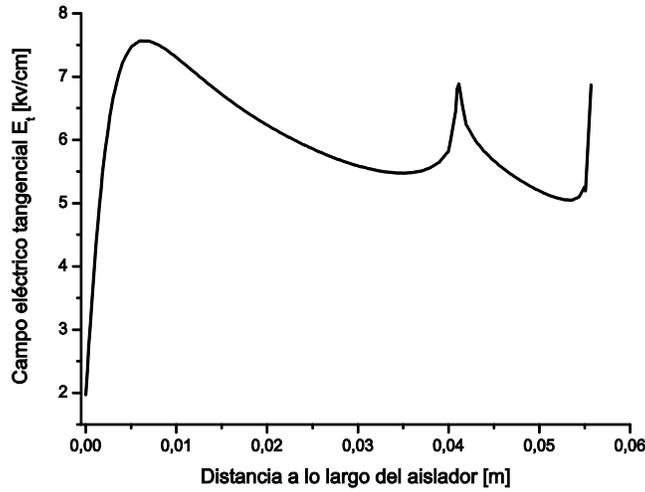
**Figura 4.10** Comportamiento del campo eléctrico tangencial en la superficie del aislador (primeros centímetros desde el herraje energizado) con perfil cóncavo, modificado con *fminbnd*.

De la misma forma que para el perfil inclinado, se hace uso de la función *fmincon* para la búsqueda simultánea de las coordenadas que definen el perfil cóncavo. Los resultados encontrados se muestran en la tabla Tabla 4.6, mientras que la Figura 4.11 muestra el comportamiento del campo eléctrico tangencial con el perfil definido por la función *fmincon*.

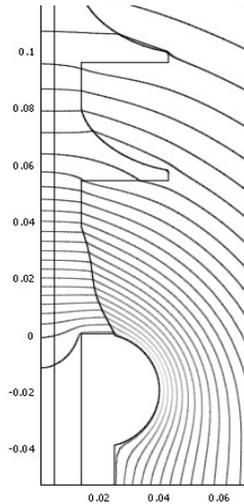
**Tabla 4.6** Resultados obtenidos para el perfil cóncavo con *fmincon*.

Función de optimización	X1	Y1	X2	Y2
<i>fmincon</i>	0.020	0.018	0.199	0.005
$E_{\max}=7.5 \text{ kV/cm}$				

Como se observó de los casos presentados en el Capítulo 3, la función basada en algoritmos genéticos es la que encuentra valores que ofrecen un mejor resultado, ya que tiene mayor posibilidad de converger hacia el mínimo global. La Figura 4.12 muestra el perfil resultante de la optimización obtenida de AG. La Tabla 4.7 muestra los valores encontrados para el par de puntos que definen la forma cóncava, así como el valor de  $E_t$  máximo.



**Figura 4.11** Comportamiento del campo eléctrico tangencial en la superficie del aislador (primeros centímetros desde el herraje energizado) con perfil cóncavo, modificado con *fmincon*.

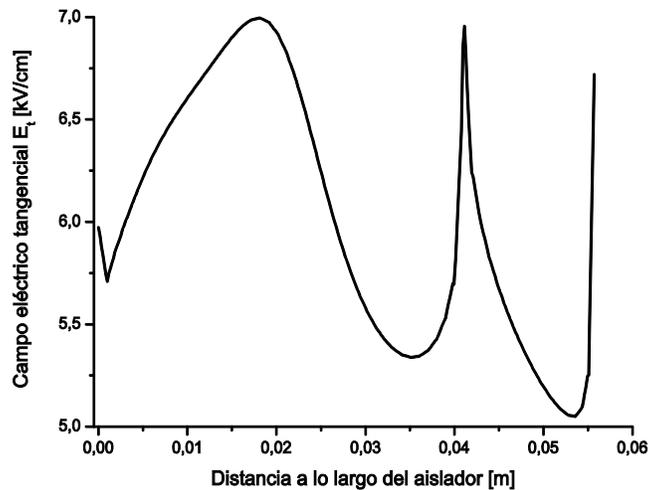


**Figura 4.12** Geometría óptima encontrada por AG.

**Tabla 4.7** Resultados obtenidos para el perfil cóncavo con AG.

Función de optimización	X1	Y1	X2	Y2
AG	0.020	0.018	0.013	0.019
$E_{\max}=6.9$ kV/cm				

La Figura 4.13 muestra el comportamiento del campo eléctrico tangencial cuando se evalúa sobre la superficie del perfil que se obtiene de la función de AG.

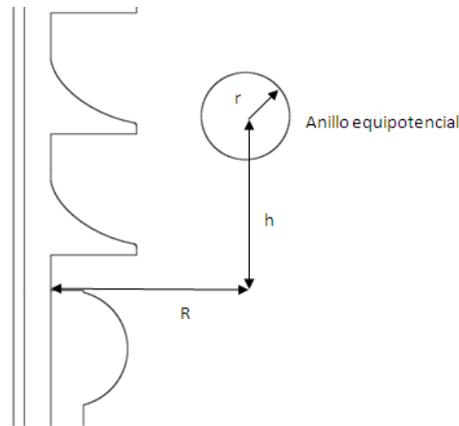


**Figura 4.13** Comportamiento del campo eléctrico tangencial en la superficie del aislador (primeros centímetros desde el herraje energizado) con el perfil cóncavo encontrado con AG.

Hasta ahora la modificación del perfil del aislador muestra que es posible reducir la intensidad de campo eléctrico muy por debajo del valor al cual puede iniciarse actividad corona. Sin embargo, como se comentó previamente, el uso de anillo corona puede ser de gran ayuda en el aislador para tratar de atenuar la intensidad de campo, principalmente en donde los aisladores poliméricos ya han sido instalados con un diseño parecido al empleado inicialmente en este trabajo. De esta forma es más barato sólo agregar el dispositivo para ayudar a reducir la probabilidad de descargas superficiales. En la siguiente sección se optimiza la posición y dimensiones de un anillo corona, para luego comparar la reducción con la que se obtiene con la modificación del perfil.

#### 4.6. Optimización de un anillo corona

Para las dos técnicas anteriores, el mejor diseño fue el obtenido por el método de AG, por lo cual la optimización de las dimensiones y posición de un anillo corona se realiza únicamente con AG. En este caso tres son las variables a considerar para obtener el mejor resultado: el radio del tubo del anillo, el radio del anillo, y su posición en el eje vertical. Estas variables se pueden ver en la Figura 4.14.



**Figura 4.14** Dimensiones del anillo corona tomadas como variables para la optimización (R radio del anillo, r radio del tubo del anillo y h posición en el eje vertical).

Para encontrar el diseño adecuado de anillo equipotencial, AG realizó más de 50 generaciones con 20 individuos por generación, esto quiere decir que el problema se resolvió más de 1000 veces. Las dimensiones encontradas después de este proceso se muestran en la Tabla 4.8.

**Tabla 4.8** Dimensiones óptimas del anillo corona.

Variable	Valor óptimo
Radio del anillo corona	0.1 [m]
Radio del tubo del anillo corona	0.03 [m]
Posición en el eje vertical	0.053 [m]
$E_t=4.1$ [kV/cm]	

Es importante mencionar que el radio óptimo encontrado para el anillo corona coincide con el radio del anillo sugerido en [27] como el adecuado para aliviar el campo eléctrico intenso en este tipo de aisladores. La Figura 4.15 muestra el desarrollo del comportamiento del máximo campo eléctrico en cada generación obtenida con AG. El comportamiento del  $E_t$  sobre la superficie del aislador se muestra en la Figura 4.16. De los resultados obtenidos de la simulación y optimización del anillo corona para 115 kV se puede decir que el uso de este dispositivo se debe considerar en aisladores poliméricos en 115 kV que ya han sido instalados y presenten alto campo eléctrico superficial.

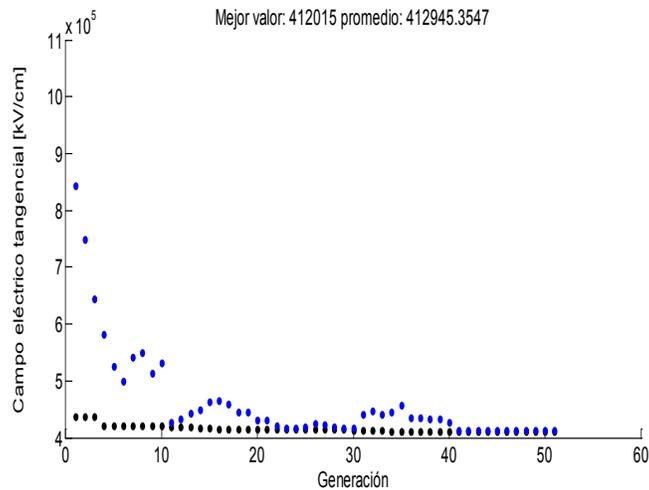


Figura 4.15 Proceso de optimización de las dimensiones para el anillo corona por medio de AG.

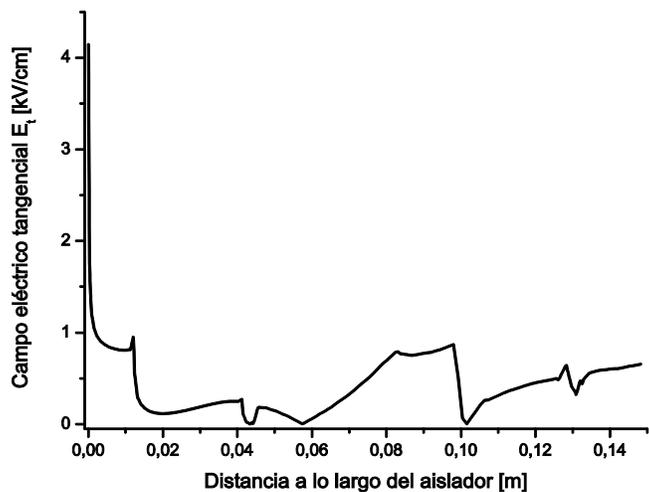


Figura 4.16 Comportamiento del campo eléctrico tangencial en la superficie del aislador (primeros centímetros desde el herraje energizado) en presencia de un anillo corona.

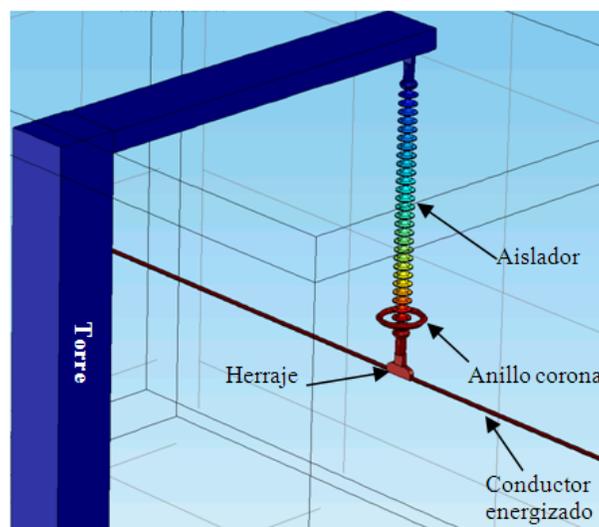
#### 4.7. Simulación en tres dimensiones de los valores obtenidos en el proceso de optimización en dos dimensiones

Esta simulación se realiza con la finalidad de verificar si los diseños obtenidos mediante el proceso de optimización considerando una simetría axial en 2D siguen siendo válidos en 3D. Para ello se toman los valores encontrados en la simulación en 2D que presentan el mínimo campo eléctrico en cada técnica analizada y con estos valores se construye el modelo en 3D.

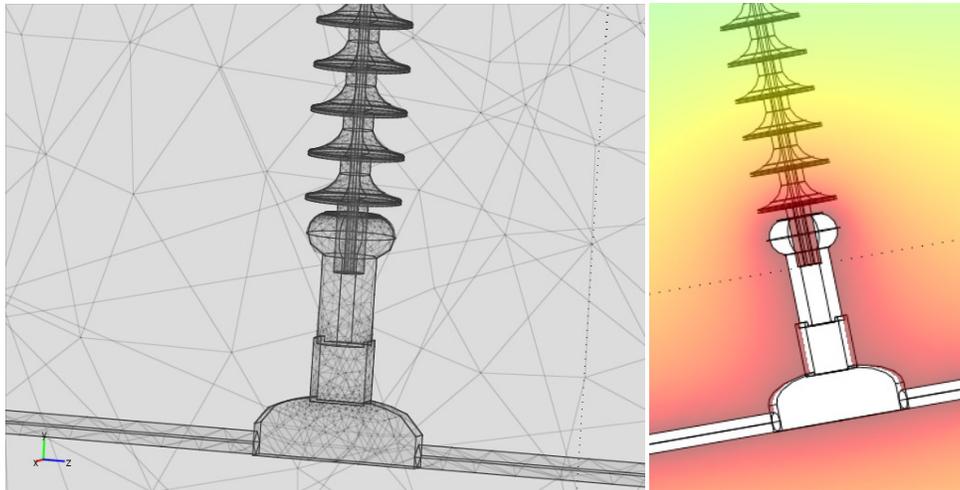
A diferencia de la simulación en dos dimensiones, en tres dimensiones se toman en cuenta elementos como son: la torre, una sección del conductor energizado, y la geometría completa de los herrajes. De esta manera se puede analizar el efecto de estos elementos sobre el campo eléctrico. En esta parte del trabajo el mallado del modelo presenta un número mayor de elementos que en dos dimensiones por el tamaño del modelo, pero conservando el tamaño de elemento en los faldones cercanos al área de interés igual que en el caso de 2D, con un tamaño de 0.001m. En esta simulación el número de elementos supera los tres millones, mientras que en la simulación en dos dimensiones fueron alrededor de 250 mil elementos. El número de elementos de malla es importante en el MEF para mantener la exactitud similar en ambos casos.

La Figura 4.17 muestra el modelo completo en tres dimensiones. La Figura 4.18a) muestra un acercamiento a la zona de interés en el modelo de tres dimensiones para el diseño original.

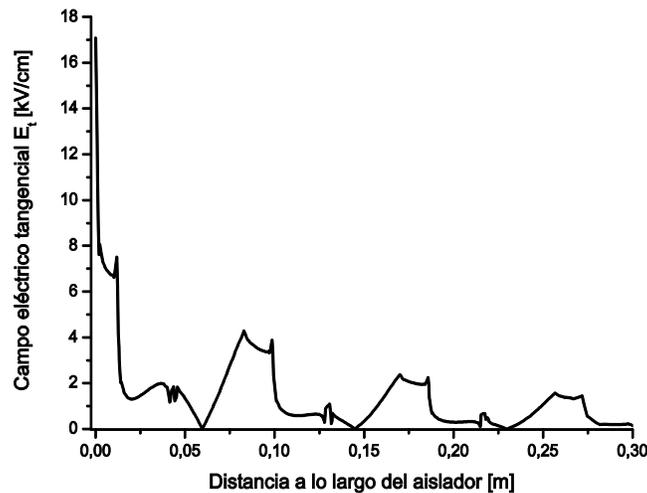
La Figura 4.19 muestra el comportamiento superficial de la componente tangencial de campo eléctrico. Se observa que el  $E_{t\max}$  difiere del máximo campo eléctrico tangencial que presenta el modelo de dos dimensiones. Esto se puede atribuir a la presencia del conductor energizado, ya que el conductor provoca la atenuación de esfuerzos eléctricos en el extremo inmediato al herraje en el aislador.



**Figura 4.17** Modelo en tres dimensiones del aislador polimérico.



**Figura 4.18** a) Herraje energizado en el modelo de 3 dimensiones, b) Distribución de campo eléctrico en las cercanías del herraje.



**Figura 4.19** Comportamiento del campo eléctrico tangencial en la superficie del aislador (primeros centímetros desde el herraje energizado) en el modelo de tres dimensiones.

En secciones anteriores se hizo mención a que se puede presentar actividad corona ante campos eléctricos mayores a 22 kVrms/cm. Este valor se considera en referencias donde las simulaciones se realizan en 2D. Se observa de la Figura 4.19 que el valor del máximo campo eléctrico tangencial está por debajo de los 22 kVrms/cm para una simulación en 3D.

Sin embargo, algunas pruebas realizadas en laboratorio muestran que gradientes entre 10 y 14 kV/cm son suficientes para generar una descarga parcial en contacto con la superficie [9], así como en otras publicaciones se ha mencionado que algunas empresas

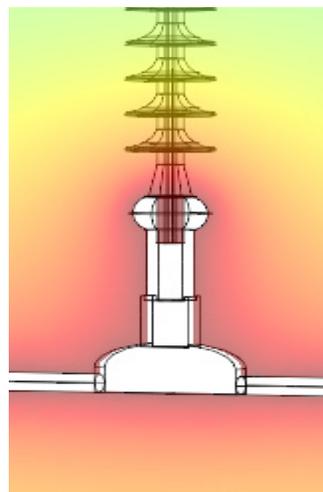
consideran valores menores a 17 kV/cm para dar inicio a actividad corona en presencia de gotas de agua [1].

En [37] se puede observar que para una simulación en 3D la intensidad de campo eléctrico en un diseño de aislador polimérico parecido al utilizado en este trabajo, es de 12 kV/cm.

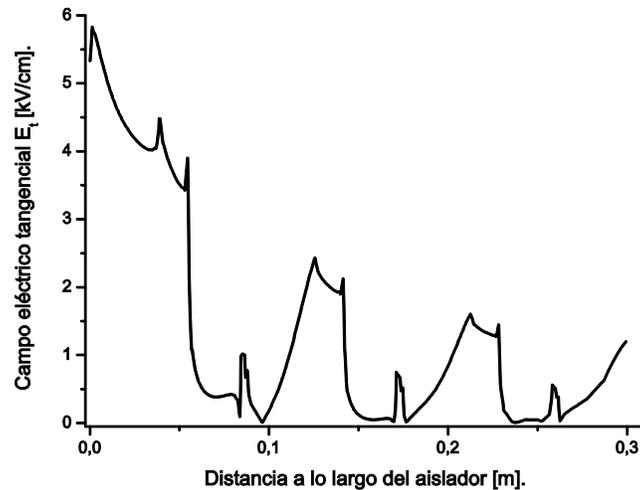
#### 4.8. Simulación del perfil inclinado en 3D

Con la finalidad de verificar la intensidad de campo con la inclinación del perfil obtenida en dos dimensiones con el método de algoritmos genéticos, se realiza la simulación en tres dimensiones incluyendo los elementos que se mencionan en la sección anterior.

En la Figura 4.20 se muestra la solución de esta simulación, específicamente se observa la distribución de potencial. En la Figura 4.21 se grafica el comportamiento del campo eléctrico tangencial sobre los primeros 30 cm de la distancia de fuga, donde el tamaño de elemento en la malla se mantuvo como 0.001 m al igual que en 2D. El resultado del máximo campo eléctrico en 2D y en 3D es similar; la diferencia se atribuye a la presencia de elementos no considerados en 2D.



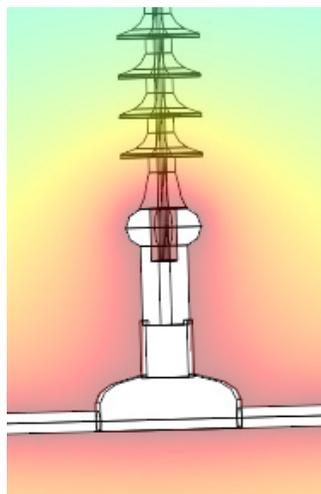
**Figura 4.20** Solución del perfil inclinado en 3D.



**Figura 4.21** Comportamiento del campo eléctrico tangencial en la superficie del aislador (primeros centímetros desde el herraje energizado) en el modelo inclinado de 3D.

#### 4.9. Simulación del perfil cóncavo en 3D

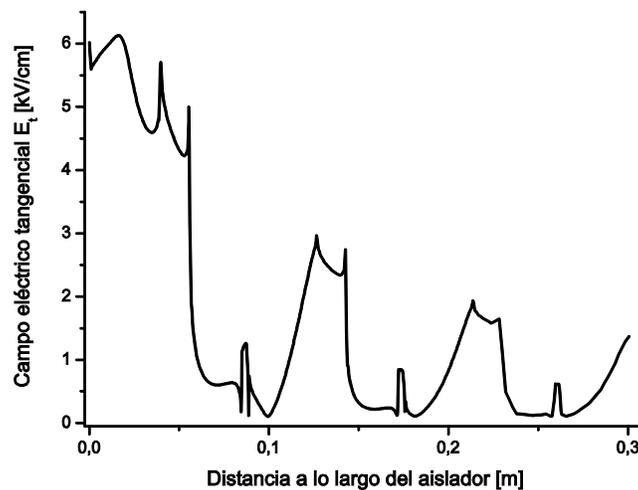
Al igual que en el caso anterior, el resultado obtenido del proceso de optimización con AG en la simulación en 2D para encontrar un perfil cóncavo se toma para realizar la simulación en 3D, donde el número de elementos de malla se incrementó por el tamaño del modelo utilizado. Sin embargo, para hacer válida la comparación, el tamaño de elemento en el área bajo análisis se mantuvo como 0.001 m, además de que se tomaron componentes en el arreglo que no se consideraron en la simulación en 2D, como son el efecto de proximidad de la torre, el conductor energizado, así como el herraje completo.



**Figura 4.22** Solución del perfil cóncavo en 3D.

La Figura 4.22 muestra la solución para la distribución de potencial cercana al conductor energizado.

La Figura 4.23 muestra que, al igual que en el perfil inclinado, el comportamiento del campo eléctrico tangencial es muy parecido al obtenido de la simulación en 2D, para este mismo perfil. De las dos soluciones en 3D presentadas hasta ahora se observa que el comportamiento del esfuerzo eléctrico en forma local (punto triple) es muy parecido al obtenido en 2D. Las pequeñas variaciones pueden ser atribuidas a la presencia del conductor energizado.



**Figura 4.23** Comportamiento del campo eléctrico tangencial en la superficie del aislador (primeros centímetros desde el herraje energizado) en el modelo cóncavo de 3D.

#### 4.10. Simulación de anillo corona en 3D

En el caso de la simulación en dos dimensiones, el uso de AG muestra que el usar un anillo corona con las dimensiones adecuadas, además de su instalación correcta, es la técnica que mejor atenúa la componente tangencial de campo eléctrico en la superficie del aislador. Al igual que en los dos casos anteriores, los valores encontrados en el modelo de dos dimensiones se llevan a una simulación en 3D. La Figura 4.24 muestra el modelo utilizado para esta simulación. De esta misma figura se puede observar que en los primeros tres faldones se mantiene un tamaño de elemento de tal forma que sea igual al utilizado en 2D, 0.001 m, con la finalidad de poder realizar una comparación entre ambas simulaciones.

La Figura 4.25 muestra el comportamiento de  $E_t$  en los primeros 30 cm sobre la superficie. Al compararla con la Figura 4.16, es evidente que el máximo campo eléctrico tangencial presente en la superficie del aislador en ambos casos es de la misma magnitud.

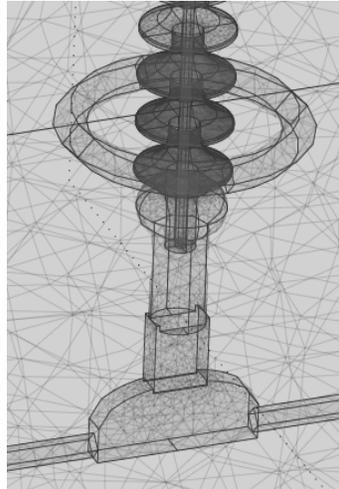


Figura 4.24 Anillo corona en el modelo de 3D.

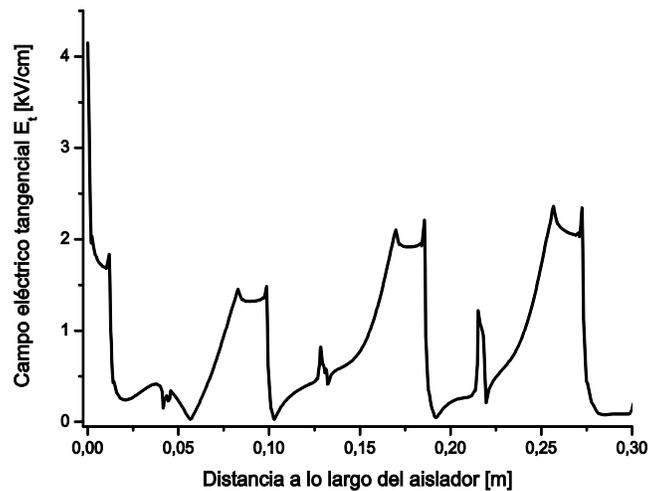
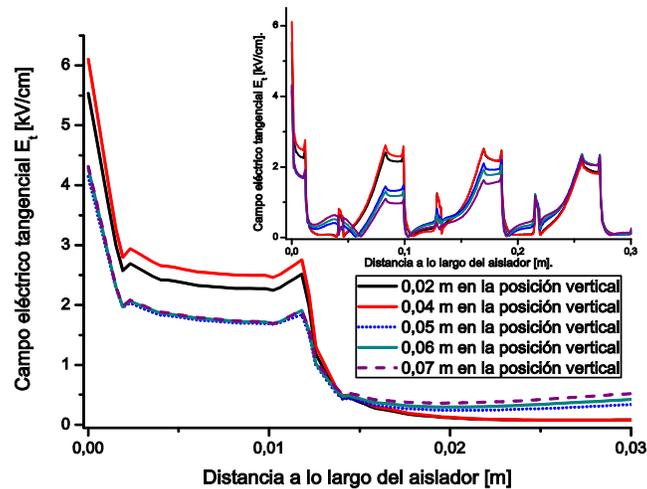


Figura 4.25 Comportamiento del campo eléctrico tangencial en la superficie del aislador (primeros centímetros desde el herraje energizado) en el modelo con anillo corona en 3D.

Como ya se mencionó, en ninguno de los casos la optimización se realizó en 3D. Sin embargo, la técnica de anillo corona se utiliza en esta sección para comprobar que no existe un mejor valor para la tercera variable encontrada en la optimización en 2D (la posición en el eje vertical del anillo). Para realizar la comprobación se coloca el anillo en diferentes posiciones sobre el eje vertical. El comportamiento del campo eléctrico tangencial se muestra en la Figura 4.26, de donde se observa que el valor encontrado por AG en 2D sigue

presentando el menor esfuerzo eléctrico sobre la superficie del aislador en la simulación en 3D.



**Figura 4.26** Campo eléctrico tangencial en la superficie del aislador (primeros centímetros desde el herraje energizado) para diferentes posiciones del anillo corona.

#### 4.11. Registro de campo eléctrico fuera de la superficie

Las mediciones, en las simulaciones hasta ahora realizadas, muestran el comportamiento del campo eléctrico sobre la superficie del aislador polimérico. Sin embargo; otros trabajos enfocados al estudio del comportamiento de  $E_t$  establecen que las mediciones en la simulación se realicen a 0.5 mm sobre la superficie y no deben exceder 4.5 kV/cm [1] y recientemente se ha sugerido realizarlas a 1 mm de la superficie, y no debe exceder 4.2 kV/cm. En algunos casos estas distancias se propusieron con la finalidad de evitar errores numéricos en la simulación, debido a que la calidad de malla no puede ser suficiente para reducir errores numéricos cercanos al punto triple. En este trabajo la computadora utilizada fue una Intel(R) Xeon (R) X5660 2.8 GHz con dos procesadores y 48 Gb de memoria RAM, por lo cual el efecto de error de simulación sobre la superficie fue considerado no significativo.

Es evidente que la zona de interés donde se requiere la medición es la superficie, puesto que la superficie del aislador es donde se presentan las descargas superficiales. Obedeciendo las recomendaciones y para verificar el comportamiento del campo eléctrico fuera de la superficie se realizan las mediciones a la distancia indicada en el modelo de 2D.

En la Figura 4.27 el campo eléctrico tangencial registrado a una distancia de 0.5 mm y 1 mm de la superficie se compara con el campo eléctrico tangencial registrado en la superficie para el diseño original del aislador. Es evidente que conforme la medición en la simulación se realiza a una distancia más alejada de la superficie, el campo eléctrico máximo se reduce. De la Figura 4.27 se observa que el campo registrado a 0.5mm de la superficie es suficiente para dar inicio de actividad corona. En los tres registros de campo eléctrico realizados en esta simulación, el máximo campo eléctrico se presenta en el punto triple.

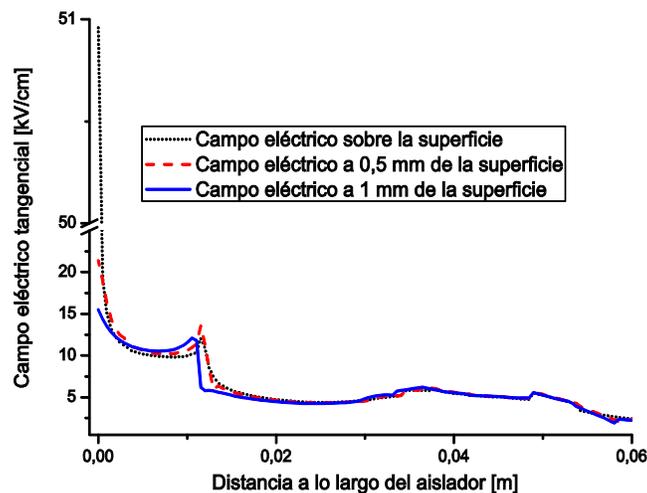


Figura 4.27 Mediciones fuera de la superficie en el diseño original del aislador.

La misma comparación, pero ahora para el aislador con el perfil inclinado se presenta en la Figura 4.28. De esta figura se observa que el campo eléctrico máximo no sólo ha sido movido fuera del punto triple sobre la superficie, sino que ha sido desplazado ligeramente fuera de la superficie del aislador, lo cual alivia el esfuerzo eléctrico sobre el polímero, que se presenta en un diseño común de aislador.

La Figura 4.29 muestra el registro de campo eléctrico para las dos distancias diferentes y la superficie del aislador con la instalación de un anillo corona con dimensiones óptimas. A diferencia del caso anterior, se observa que el campo eléctrico máximo se encuentra sobre la superficie, pero éste es de un valor menor que en el caso anterior.

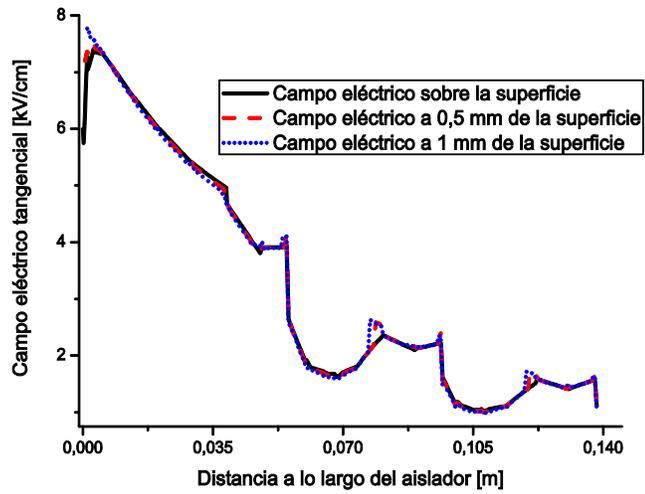


Figura 4.28 Mediciones fuera de la superficie en el diseño inclinado del aislador.

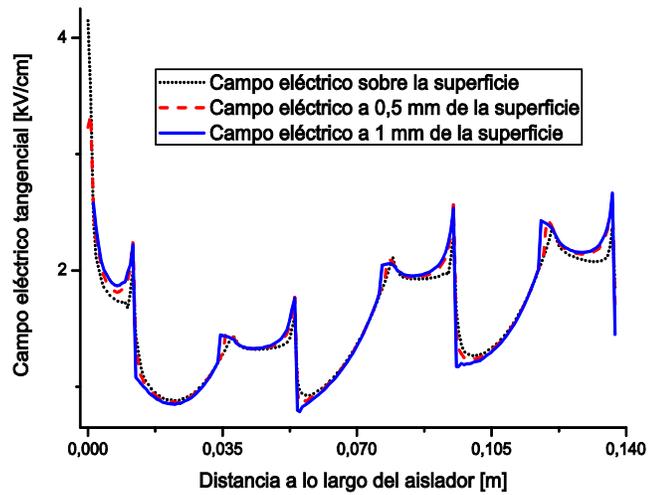


Figura 4.29 Mediciones fuera de la superficie en el diseño con anillo corona del aislador.



---

---

# CAPÍTULO V. Conclusiones

## 5.1. Introducción

En el presente trabajo se analizaron y compararon dos técnicas para atenuar la intensidad de campo eléctrico en aisladores de suspensión poliméricos de 115 kV. El interés en aisladores poliméricos a este nivel de tensión se debe a las siguientes razones:

(1) El uso de dispositivos atenuadores de campo eléctrico para aisladores de 115 kV no está especificado en normas, por lo que generalmente no se recomienda por los fabricantes.

(2) Se ha reportado un número considerable de fallas asociadas al campo eléctrico intenso en las cercanías del herraje energizado de aisladores de 115 y 138 kV.

(3) Las líneas de 115 kV representan una parte significativa del sistema eléctrico nacional. Además, en su proceso de expansión muchas de las nuevas líneas están siendo instaladas con aisladores poliméricos.

(4) A este nivel de tensión se considera que existe la posibilidad de controlar el campo eléctrico mediante el diseño del aislador sin necesidad de instalar un anillo corona.

A continuación se resumen las principales conclusiones obtenidas en el desarrollo de esta tesis. Además de indicar algunas recomendaciones para dar continuidad a este y a trabajos futuros.

## 5.2. Conclusiones

En la primera técnica de atenuación estudiada, la geometría de la cubierta polimérica en la vecindad del herraje energizado fue modificada mientras que en el segundo caso se analizó la instalación de un anillo corona. Ambas opciones fueron optimizadas con el

objetivo de comparar la reducción máxima de campo eléctrico que se puede alcanzar en la superficie del aislador.

Los resultados muestran que la componente tangencial de campo eléctrico en la superficie de un aislador polimérico de 115 kV puede reducirse de manera significativa con una geometría adecuada y con un valor específico de permitividad del material. Aunque el uso de un anillo corona correctamente instalado y dimensionado produce la máxima reducción de campo eléctrico, el modificar sólo la geometría puede reducir costos y evitar problemas asociados a la instalación del anillo. Esta alternativa se debe considerar como una opción cuando se está en la etapa de diseño del aislador, y por lo tanto se fabricaran nuevos moldes; sin embargo, en el caso de diseños ya en producción el uso del anillo correctamente instalado es la mejor opción pues no se requiere invertir en moldes costosos.

En el proceso de optimización del diseño se emplearon modelos en dos dimensiones y una vez obtenidos los parámetros óptimos se utilizaron en modelos de tres dimensiones para verificar que siguen siendo diseños válidos. Aún cuando se consideran más elementos en el modelo con sistema de atenuación en 3D, los resultados obtenidos son prácticamente los mismos que en 2D. El uso de modelos en 2D permite utilizar algoritmos de optimización que podrían requerir miles de simulaciones para obtener el mejor diseño. Del análisis de los resultados obtenidos se concluye que basta con realizar la optimización en 2D, ya que intentar realizarla en un modelo de 3D requiere de mayor capacidad de cómputo, además de que el tiempo de cómputo para converger a la solución podría ser del orden de días y no de horas como lo requiere la optimización en 2D.

### **5.3. Aportaciones**

- Se propone un diseño óptimo de aislador polimérico con un perfil inclinado de la cubierta polimérica próxima al herraje de potencial como una técnica de atenuación de campo eléctrico.
- Se propone un diseño óptimo para un aislador polimérico con un perfil cóncavo como una técnica de atenuación de campo eléctrico.

- Se propone un procedimiento para la optimización de la atenuación de campo eléctrico en aisladores poliméricos partiendo de modelos en 2D que posteriormente se validan con modelos de 3D.

#### **5.4. Recomendaciones para trabajos futuros**

Se recomienda incluir el efecto de las otras fases en el modelo del aislador.

Se simularon aisladores poliméricos del tipo suspensión. Para trabajos futuros se recomienda el estudio del comportamiento de campo eléctrico en otras configuraciones de aisladores, tal como la posición en tensión.

El problema con el campo eléctrico no es exclusivo de aisladores. Este tipo de investigaciones se puede extender al estudio en boquillas poliméricas, donde existe bastante interés por resolver este tipo de problemas con nuevas propuestas.

En este trabajo se consideró que el aislador está libre de contaminantes en su superficie, un trabajo futuro sería el incluir el efecto de la contaminación y gotas de agua en la distribución de campo eléctrico.

La optimización puede ser aplicada en otros sistemas de aislamiento susceptibles de ser mejorados por ejemplo en maquinas eléctricas o en cualquier otro dispositivo de media o alta tensión.



---

---

## **Artículos derivados de la tesis**

D. Cruz Domínguez, F.P. Espino-Cortés, P. Gómez, “Optimización del Diseño de Aisladores Poliméricos de 115 kV”, XII Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas, Mexico D.F., 2010.

D. Cruz Domínguez, F.P. Espino-Cortés, P. Gómez, “Optimization of Electric Field Grading Systems in Non-Ceramic Insulators”, 2011 Electrical Insulation Conference, Annapolis, Maryland, 5 al 8 Junio 2011.

D. Cruz Domínguez, F.P. Espino-Cortés, P. Gómez, “Comparación de técnicas de graduación de campo eléctrico en un aislador no cerámico”, Vigésimacuarta Reunión Internacional de Verano de Potencia Aplicaciones Industriales y Exposición Industrial RVP-AI 2011.



---

---

## Referencias

- [1] Masoud Farzaneh, William A. Chilshom “Insulators for icing and polluted environments”, Primera Edición, IEEE Press, 2009.
- [2] EPRI Article, “Addressing the Failure of Polymer Insulators”, Corporate Documents, 2007.
- [3] Comisión Federal de Electricidad, [www.cfe.org.mx](http://www.cfe.org.mx), noviembre 2011.
- [4] Andrew J. Philips, John Kuffel, Anthony Baker, Jeffery Burnham, Anthony Carreira, Edward Cherney, William Chisholm, Masoud Farzaneh, Robert Gemignani, Anthony Gillespie, Thomas Grisham, Robert Hill Tapan Saha, Bogdan Vancia, Jennifer Yu “Electric Fields on AC Composite Transmission Line Insulators”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, Num. 2, Abril 2008.
- [5] IEEE Guide for Application of Composite Insulator, IEEE Std 987-2001.
- [6] S. M de Oliveira y C. de Turreil “Aging of Distribution Composite Insulators Under Environmental and electrical Stresses”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, Num.2, pag 1074-1077, Abril, 1990.
- [7] Yasuda H., A. K. Sharma, T. Yasuda “Effects of Orientation and Mobility of Polymeric molecules at surfaces on Contact Angle and its Hysteresis”, J. Polym. Sci Polym. Phys. Ed, 19:1285, 1981.
- [8] Aleksandrov, G. N., W.E. Kiesewetter, E.K. Alvares, “Optimization of the Shape of Rod Insulators Based on Glass-Plastic”, electric Technology U.S.S.R., Num.4, pag. 95-105, 1984
- [9] Kapal Sharma, R.E.T., “Polymeric Insulators”, Technical Article.
- [10] W. Sima, F.P. Espino-Cortes, Edward Cherney, Shesha H. Jayaram “Optimization of

- 
- 
- Corona Ring Design for Long-Rod Insulators Using FEM Based Computational Analysis”, Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Indianapolis EUA, Septiembre 19-22, 2004.
- [11] W. Sima, Kun Wu, Qing Yang, Caixin Sun. “Corona Ring Design of  $\pm 800$  kV DC Composite Insulator Based on Computer Analysis”, 2006 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pag. 457-460, 2006.
- [12] Suat Ilhan, Aydogan Ozdemir, “380 kV Corona Ring Optimization for ac Voltages”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.18, Num.2, Abril, 2011.
- [13] Hongwei Mei, Liming Wang, Jianchao Zheng, Zhicheng Guan, “Installing the Rubber Sheat on Transmission Line to Improve the Performance of External Insulation of Line Insulator”, Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Haribin China, Julio 19-23, 2009.
- [14] Edson G. da Costa, Tarso V. Ferreira, Max G.G. Neri, Isaac B. Queiroz y André D. Germano, “Characterization of polymeric Insulators using Thermal and UV Imaging under Laboratory Conditions”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 16, Num.4, Agosto, 2009.
- [15] Paredes O. Myriam, F.P. Espino-Cortes, Gómez Y. Carlos. “Materiales Compuestos de Alta Permitividad para Atenuar el Campo Eléctrico en Aisladores Poliméricos”, XI Congreso Nacional De Ingeniería Electromecánica Y De Sistemas, pag. 194-199, México D.F., Noviembre, 2009.
- [16] R Abd Rahman, N. Harid, A. Hadda, “Stress Control on Polymeric Outdoor Insulators”, UPEC 2010, Agosto 31 - Septiembre 3, 2010.
- [17] T. Doshi, R. S. Gorur, “Electric Field Computation of Composite Line Insulators up to 1200 kV AC”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 18, Num. 3, Junio, 2011.

- 
- 
- [18] Enrique Pérez Ruiz, “Impacto de la lluvia acida sobre el envejecimiento de Aisladores EPDM”, Tesis que para obtener el grado de Maestro en Ciencias con Especialidad en Ingeniería Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional, SEPI ESIME, México D.F., 2002.
- [19] Alberto Rafael Portillo Méndez, “Efecto de la altitud y la humedad relativa sobre las tensiones de flameo en aislamientos poliméricos sujetos a contaminación”, Tesis que para obtener el grado de Maestro en Ciencias con Especialidad en Ingeniería Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional, SEPI ESIME, México D.F., 2002.
- [20] Daniel Fleisch, “A Student’s Guide to Maxwell Equations”, Primera Edición, Cambridge University Press, 2008.
- [21] De León Francisco, “Apuntes de Teoría Electromagnética”, ESIME IPN Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, México D.F.
- [22] Matthew N. O. Sadiku, “Elementos de Electromagnetismo”, Segunda Edición, Oxford University Press Inc., 1994.
- [23] Andrew Philips, D. J. Childs, H. M. Schnaider, “Aging of non-ceramic insulators due to corona from water drops” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, Num. 3, pag. 1081-1086, Julio, 1999.
- [24] EPRI, “Application guide for transmission line NCI”, Palo Alto, TR 111-566, 1998.
- [25] Edward Cherney “Partial discharge, part V: PD in polymer type line insulators” IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 7, Num. 2, pag. 28-32, Marzo/Abril, 1991.
- [26] Andrew Phillips “500-kV Non-ceramic Insulator Aging Chamber; Final Report”, EPRI, Noviembre, 2000.
- [27] Raymond Ferraro, Emilie Dohleman, “Corona Rings: Are They Needed?” Transmission & Distribution World, Marzo, 2010.

- 
- 
- [28] Steven C. Chapra, Raymond P. Canale, “Métodos numéricos para ingenieros”, 4ta. Edición, Mc Graw Hill, 2003.
- [29] User’s guide, “Optimization Toolbox for use with MATLAB<sup>®</sup>”, 2002.
- [30] F.P. Espino-Cortes, “A Study of Field-Dependent Stress Grading Systems Working under Fast Rise Time Pulses”, Tesis de doctorado Universidad de Waterloo, Ontario Canada, 2006.
- [31] Luis A. Siegert, “Alta tensión y sistemas de transmisión”, Primera Edición, Limusa, 1989.
- [32] M. Weedy, Underground Transmission of Electric Power, by John Wiley & Sons, Ltd., 1980.
- [33] Y.M. Li, Y. Q. E. Kuffel, “Numerical computation of electric field and optimal desingof three-phase enclosed CGIS”, Sixth International Symposium on High Voltage Engineering, L.A. EUA, artículo 24.02, 1989.
- [34] D. Biester, “In Geneva, Simens sets up the World’s First High Voltage Link to Feature a Gas-Insulated Transmission Line of the Second Generation”, Power transmission and Distribution Press Release EV H 200011.235e, Munich, Germany, Noviembre 2000.
- [35] Chakrabarti A.K. Van Heeswwijk R.G. and Srivastava, “Free Particle-initiated 60 Hz Breakdown at a Spacer Surface in a Gas Insulated Bus”, IEE Transactions On Electrical Insulation, Vol. 24, Num. 4, pag 549-560, 1989.
- [36] N. Giao Trinh, Farouk A.M: Risk, Claire Vincent, “Electrostatic Field Optimization of Epoxy Spacer for Compressed SF6 Insulated Cables”, IEEE Trans. PAS, Vol. 99, Num. 6, pag. 2164-2174, 1980.
- [37] Qing Yang, W. Sima, Deng Jiazhuo, Yuan Tao, Chen Lin, “New Optimization Method

---

---

on Electric Field Distribution of Composite Insulator”, 2010 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2010.

- [38] Myriam Paredes Olgúin, “Síntesis y estudio del comportamiento dieléctrico de un compósito polimérico inmerso en un campo eléctrico de alta intensidad”, Proyecto de investigación Doctoral en proceso, Departamento de Ingeniería en Metalurgia y Materiales, ESIQIE, IPN.



---

---

## Apéndice A. Generalidades del aislador polimérico de 115 kV

### A.1 Descripción de sus partes

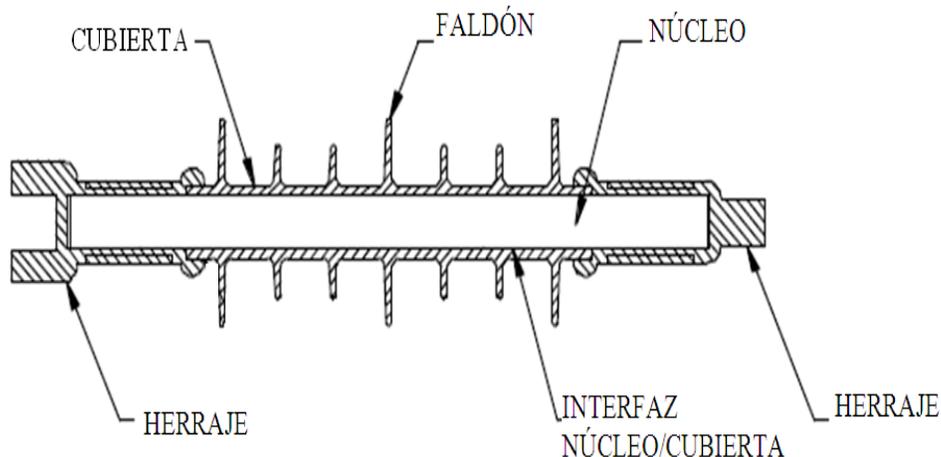


Figura A 1. Estructura de un aislador polimérico [9].

**Núcleo o barra.-** Es la parte de aislamiento interno de un aislador polimérico. Este es el encargado de sostener la carga mecánica, es fabricado principalmente de fibra de vidrio colocada en una matriz de resina para lograr un mayor aguante a la tensión mecánica.

**Cubierta.-** La cubierta es externa al núcleo y lo protege de la intemperie; ésta debe de ser complementada con los faldones.

**Faldones.-** Son partes aislantes, proyectándose desde la cubierta con la intención de incrementar la distancia de fuga y proporcionar una interrupción en la trayectoria del escurrimiento de agua.

**Herrajes.-** Los herrajes transmiten la carga mecánica al núcleo, son usualmente fabricados de metal.

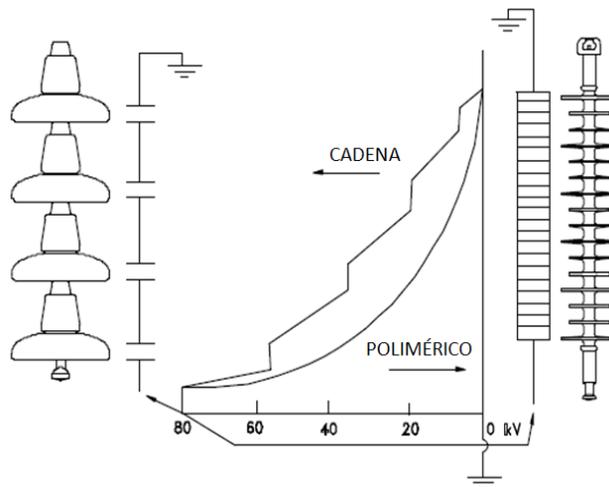
**Zona de acoplamiento.-** Es la parte de los herrajes que transmite la carga a la línea, a la torre o a otro aislador. Esta zona no incluye la interfaz entre el núcleo y herraje.

**Interfaz.-** Es la superficie entre diferentes materiales. Ejemplos de interfaces en aisladores poliméricos:

- Fibra de vidrio/impregnación de resina.
- Núcleo/cubierta.
- Cubierta/herraje.
- Relleno/polímero.
- Cubierta/faldones
- Núcleo/herrajes.

## A.2 Consideración de los efectos de capacitancia en el diseño de aisladores

La distribución de la capacitancia a lo largo de un aislador y su tamaño rigen el esfuerzo eléctrico que se presenta en ellos. Un aislador es polimérico como un cilindro de dieléctrico y presenta una permitividad relativa aproximadamente de tres. En él la intensidad de campo cae tan rápido conforme se incrementa la distancia desde la terminal energizada, como se muestra en la Figura A.2. La generación de descargas ocurre en o cerca de esta terminal.

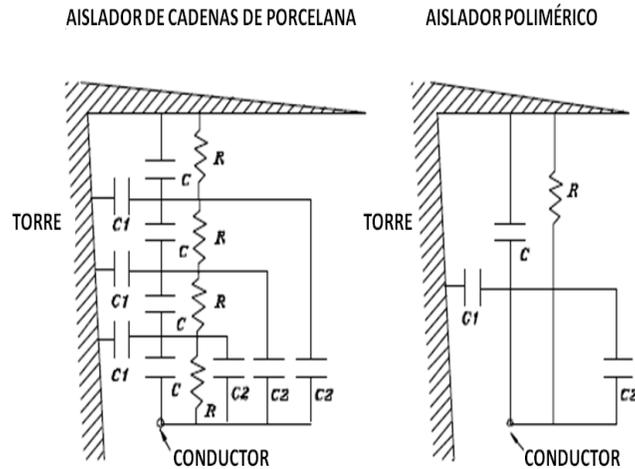


**Figura A 2.** Distribución de tensión a lo largo de una cadena de aisladores y de un aislador polimérico [9].

En una cadena de aisladores cerámicos con capacitancia grande (del orden de 30 pF), los discos son conectados a través de herrajes. La distribución de tensión está gobernada por las capacitancias de cada disco y por capacitancias a la línea y a tierra, en condiciones secas. Las unidades pegadas a la línea son más propensas a actividad corona que el resto de las unidades, las cuales presentan una impedancia de carga igual a 1.5 veces la fuente de

impedancia de la línea. El uso de anillos corona es una práctica común para aliviar campos eléctricos al final de la línea [9].

### A.3 Modelo de capacitancias



**Figura A 3.** Modelo de capacitancias para una cadena de aisladores y un aislador polimérico [9].

Capacitancia equivalente:

Aisladores de cadenas de porcelana:  $C_{eq} + C_{1eq} + C_{2eq}$

Aislador polimérico:  $C + C_1 + C_2$

Donde:

$C$ = capacitancia propia del disco o del aislador polimérico.

$C_1$ =Capacitancia entre el aislador y tierra.

$C_2$ =Capacitancia entre el aislador y la línea.

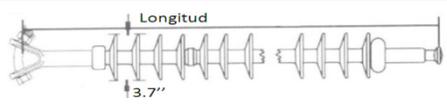
$R$ = resistencia del aislador.

Debido a la capacitancia existente entre el aislador, conductor y torre, la distribución de tensión a lo largo del aislador no es uniforme, la parte cercana al conductor es la más estresada. La resistencia depende de la presencia de contaminación sobre la superficie del

aislador y es considerablemente modificado por lluvia y niebla [9].

La Tabla A.1 muestra las características del aislador utilizado en este trabajo, extraídas del catálogo de un fabricante de aisladores poliméricos, mientras que en la Tabla A.2 se observa que para tensiones menores de 161 kV este fabricante no especifica el uso de anillo corona. De la Tabla A.3, se puede observar que existen anillos corona del diámetro encontrado como óptimo en este trabajo, 8 pulgadas aproximadamente 20 cm.

Especificaciones mecánicas									
Carga mecánica especificada = 30,000 lbs. 133kN									
Carga mecánica de rutina = 15,000 lbs. 67kN									
Tensión (kV)	Longitud Plg. (mm)	Num. de faldones	Distancia de arco en seco Plg. (mm)	Distancia de fuga Plg. (mm)	(*) 60		(*) Critical		Peso Libras (kg)
					Flashover ANSI (kV) Seco / húmedo		Flashover ANSI (kV) Seco / húmedo		
115	53 (1346)	28	42.9 (1090)	107 (2718)	430	405	700	695	7.1 (3.2)

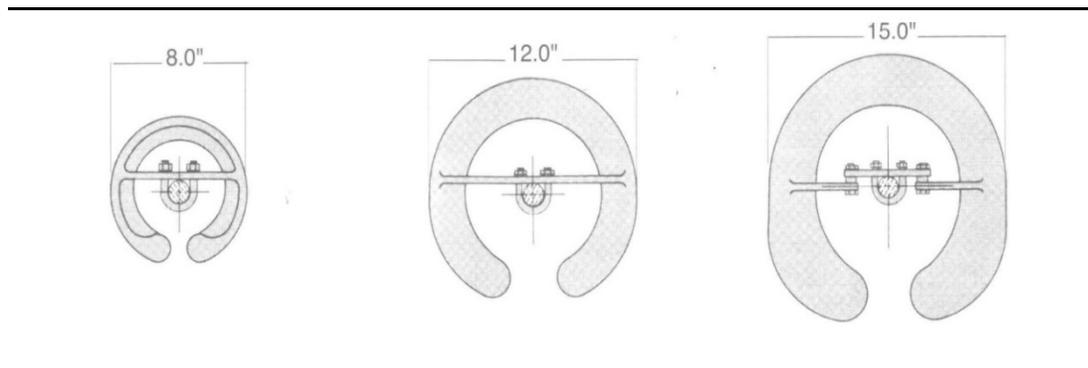


(\*) Pruebas de acuerdo con ANSI C29.1-1982. Los valores eléctricos son sin anillo corona

Tabla A.1. Características del aislador polimérico de 115 kV modelado.

Anillo corona			
Aplicación	161 kV y menores	230 kV	345 kV
Extremo superior energizado	Superior – No	Superior – 721273001	Superior – 721273001
	Inferior - No	Inferior - No	Inferior - No
Extremo inferior energizado	Superior – No	Superior – No	Superior – No
	Inferior - No	Inferior - 2721273001	Inferior - 2721273001

Tabla A.2. Tensiones para las cuales se recomienda uso de anillo corona.



<b>Cambios físicos y eléctricos en el aislador con la instalación de anillo corona</b>			
<b>Características físicas y eléctricas</b>	<b>230 kV</b>	<b>345 kV</b>	<b>500 kV</b>
<b>Distancia de arco en seco plg (mm)</b>	-1.2 (-30.48)	-2 (-50.8)	-5 (-127.0)
<b>Distancia de fuga plg (mm)</b>	0	0	0
<b>Flashover en condiciones secas 60Hz -kV</b>	-10	-15	-30
<b>Flashover en presencia de humedad 60Hz -kV</b>	0	0	0
<b>Flashover crítico positivo - kV</b>	-15	-25	-65
<b>Flashover crítico negativo - kV</b>	-20	-30	-65
<b>Peso lb (kg)</b>	3 (1.8)	3 (1.8)	5.1 (2.29)

**Tabla A.3.** Dimensiones de anillos corona.



---

---

## Apéndice B. Materiales de alta permitividad

Se pueden obtener materiales compuestos de alta permitividad adicionando rellenos inorgánicos a la matriz de silicón en la fabricación de materiales aislantes. Estos materiales permiten una distribución más uniforme del esfuerzo eléctrico. Para lograr esta característica se adiciona al polímero materiales ferroeléctricos. Es importante notar que con la adición de este tipo de materiales a la matriz de silicón no se deben perder las propiedades mecánicas de la misma, así como no se debe incrementar la conductividad de la mezcla. Una investigación en proceso ha logrado obtener buenos resultados usando como material ferroeléctrico BaTiO<sub>3</sub> (Titanato de Bario) ya que cuenta con una alta permitividad y puede incrementar más aún su constante de permitividad ( $\epsilon_r$ ) al ser dopado. Sin embargo, también puede incrementar su conductividad hasta valores no aptos para la fabricación de aislantes. Algunos materiales obtenidos de [38] fueron probados en el laboratorio de Alta Tensión de ESIME ZAC. con la finalidad de obtener sus valores de permitividad a diferentes frecuencias. Para ello se utilizó un arreglo de placas paralelas y un puente RLC.

**Tabla B 1.** Permitividad de mezclas de silicón + BaTiO<sub>3</sub> [38].

Silicón + BaTiO	100Hz	120Hz	1KHz	10KHz	100KHz
0%	3.0377	2.8320	2.7596	2.7539	2.6587
10%	3.3873	3.1899	3.1516	3.1189	3.0791
20%	3.7012	3.6586	3.4072	3.3206	3.3717
30%	4.1086	3.9711	3.8802	3.7978	3.8092
40%	5.5433	5.4837	5.4226	5.3615	5.2919
50%	5.9041	5.8870	5.5746	5.4240	5.9638

La tensión que se aplicó al arreglo de placas paralelas fue de 1V, el tipo de silicón utilizado es RTV 615 de General Electric. De los resultados obtenidos de esta prueba se puede decir que el valor de permitividad de las mezclas analizadas no varía en gran medida con la frecuencia. Gracias a esto se puede decir que es posible producir materiales con constantes de permitividad como los obtenidos en el Capítulo 4 para la atenuación de campo eléctrico en aisladores poliméricos.



---

---

## Apéndice C. Solución analítica de la optimización de un arreglo coaxial

La relación óptima entre el radio del conductor y el radio de la funda del conductor del arreglo mostrado en la Figura C.1 y que obedece a la ecuación 3.4 se obtiene de la ecuación de Laplace, ecuación A.1:

$$\nabla^2 V = 0 \quad A.1$$

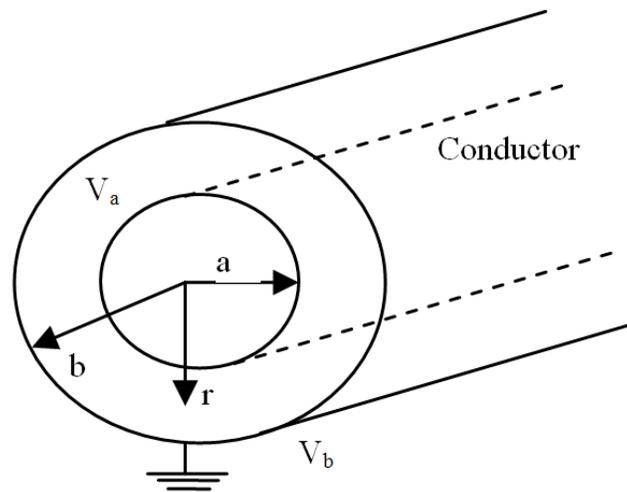


Figura C 1. Características del arreglo coaxial a optimizar.

El arreglo mostrado en la Figura C.1 posee simetría radial, así que sólo depende de  $r$ , ya que cualquier cambio en  $\theta$  y  $z$ , para una misma  $r$ , resulta indistinto. De esta forma, la ecuación de Laplace en coordenadas cilíndricas es:

$$\nabla^2 V = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial V}{\partial r} \right) = 0$$

Como sólo depende de  $r$ , se puede escribir como una derivada total con respecto a  $r$ :

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dV}{dr} \right) = 0$$

Resolviendo la ecuación anterior:

$$\int d \left( r \frac{dV}{dr} \right) = \int 0 \, dr$$

$$r \frac{dV}{dr} = 0 + c_1$$

Volviendo a integrar:

$$\int dV = c_1 \int \frac{dr}{r}$$

$$V = c_1 \ln(r) + c_2 \quad A.2$$

con  $c_1$  y  $c_2$  como constantes de integración. Esta es la forma de distribución de potencial en una simetría cilíndrica, por lo tanto:

$$V_a = c_1 \ln(a) + c_2$$

$$V_b = c_1 \ln(b) + c_2$$

Para el potencial entre estas dos fronteras se tiene que  $V_b - V_a$ , por lo tanto:

$$V_b - V_a = c_1 \ln(b) + c_2 - c_1 \ln(a) - c_2$$

$$c_1 = \frac{V_b - V_a}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)}$$

Se sabe que en este tipo de problemas, el campo eléctrico se comporta como:

$$\bar{E} = -\nabla V \quad A.3$$

y que además el gradiente de potencial en coordenadas cilíndricas se puede escribir como:

$$\nabla V = \frac{\partial V}{\partial r} \hat{r}$$

Por lo tanto:

$$\bar{E} = -\nabla V = -\frac{\partial V}{\partial r} \hat{r} = -\frac{dV}{dr} \hat{r} \quad \text{porque } V = V(r)$$

Derivando:

$$\frac{dV}{dr} = \frac{d}{dr} (c_1 \ln(r) + c_2) = c_1 \frac{1}{r} = \frac{V_b - V_a}{r \ln\left(\frac{b}{a}\right)}$$

$$\bar{E} = -\frac{dV}{dr} \hat{r} = \frac{V_b - V_a}{r \ln\left(\frac{b}{a}\right)} \hat{r}$$

Si  $V_b=0$  y  $V_a=V$

$$\bar{E} = \frac{V}{r \ln\left(\frac{b}{a}\right)} \hat{r} \quad \text{A. 4}$$

La ecuación A.4 rige el comportamiento del campo eléctrico en un arreglo coaxial. Sin embargo, como se menciona en el Capítulo 2, se tiene como objetivo minimizar el esfuerzo eléctrico en el aislamiento del arreglo para todo  $r = a$ , porque se desea saber cómo es el campo eléctrico para toda  $r$  entre 0 y  $a$ .

$$\bar{E} = \frac{V}{r \ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad \text{donde } V = V_a$$

Por lo tanto, si hacemos  $r=a$ , tenemos una función  $\bar{E}(a)$  radial, la cual derivando e igualando a cero determina el valor de  $r$  que presenta un esfuerzo eléctrico mínimo.

$$\bar{E}(a) = \frac{V}{a \ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad \text{A. 5}$$

$$\begin{aligned} \frac{dE}{da} &= \frac{d}{da} \left[ \frac{V}{a \ln\left(\frac{b}{a}\right)} \right] = V \frac{d}{da} \left[ \frac{1}{a \ln\left(\frac{b}{a}\right)} \right] = V \left[ \frac{-\frac{d}{da} \left[ a \ln\left(\frac{b}{a}\right) \right]}{\left[ a \ln\left(\frac{b}{a}\right) \right]^2} \right] \\ &= \frac{-V}{\left[ a \ln\left(\frac{b}{a}\right) \right]^2} \left[ (a) \left( \frac{1}{\left(\frac{b}{a}\right)} \right) \left( -\frac{b}{a^2} \right) + \ln\left(\frac{b}{a}\right) (1) \right] = \frac{-V}{\left[ a \ln\left(\frac{b}{a}\right) \right]^2} \left[ -1 + \ln\left(\frac{a}{b}\right) \right] \end{aligned}$$

$$\frac{dE}{da} = V \left[ \frac{1}{a^2 \left[ \ln \left( \frac{b}{a} \right) \right]^2} - \frac{\ln \left( \frac{b}{a} \right)}{a^2 \left[ \ln \left( \frac{b}{a} \right) \right]^2} \right] = V \left[ \frac{1}{a^2 \left[ \ln \left( \frac{b}{a} \right) \right]^2} - \frac{1}{a^2 \ln \left( \frac{b}{a} \right)} \right] = 0$$

$$\frac{1}{a^2 \left[ \ln \left( \frac{b}{a} \right) \right]^2} = \frac{1}{a^2 \ln \left( \frac{b}{a} \right)}$$

$$\ln \left( \frac{b}{a} \right) = 1 \quad \text{y} \quad e = \frac{b}{a}$$

$$a = \frac{b}{e} \quad \text{A.6}$$

La ecuación A.6 es la condición en la cual se cumple que el campo eléctrico es mínimo dentro del arreglo, particularmente si se tiene que  $b=1$ :

$$a = \frac{1}{e} = 0.36788$$

---

---

## Apéndice D. Generalidades del código para la optimización del arreglo traixial

```
% COMSOL Multiphysics Model M-file
% Generated by COMSOL 3.5a (COMSOL 3.5.0.603, $Date: 2008/12/03 17:02:19 $)

function [Emax]=trifasico(X) Se define el archivo como una función, con un escalar como salida y un vector como entrada.

fclear fem
x1=X(1); Se asigna una variable a cada posición del vector entrada.
x2=X(2);
hip=sqrt(((x1)^2)-((x1/2)^2)); Se determina la distancia entre centros de conductores en términos de las variables de entrada.

% COMSOL version
clear vrsn
vrsn.name = 'COMSOL 3.5';
vrsn.ext = 'a';
vrsn.major = 0;
vrsn.build = 603;
vrsn.rcs = '$Name: $';
vrsn.date = '$Date: 2008/12/03 17:02:19 $';
fem.version = vrsn;

% Geometry Se genera la geometría en términos de las variables definidas anteriormente.
g1=ellip2(0.6,0.6,'base','center','pos',[0,0]);
g2=ellip2(1,1,'base','center','pos',{0,0},'rot','0');
g3=ellip2(0.2,0.2,'base','center','pos',[0,0]);
g4=ellip2(x2,x2,'base','center','pos',{-hip,-x1/2},'rot','0');
g5=ellip2(0.2,0.2,'base','center','pos',[0,0]);
g6=ellip2(x2,x2,'base','center','pos',{hip,-x1/2},'rot','0');
g7=ellip2(0.2,0.2,'base','center','pos',[0,0]);
g8=ellip2(x2,x2,'base','center','pos',{0,x1},'rot','0');

% Analyzed geometry
clear s
s.objs={g2,g4,g6,g8};
s.name={'E1','E2','E3','E4'};
s.tags={'g2','g4','g6','g8'};

fem.draw=struct('s',s);
fem.geom=geomcsg(fem);

% Initialize mesh
fem.mesh=meshinit(fem, ...
    'hauto',5);

% Refine mesh
fem.mesh=meshrefine(fem, ...
    'mcase',0, ...
    'rmethod','regular');

% (Default values are not included)

% Application mode 1
clear appl
appl.mode.class = 'EmElectrostatics';
appl.module = 'ACDC';
appl.border = 'on';
appl.assignsuffix = '_emes';
clear bnd
```

```

bnd.V0 = {0,-.5,1};
bnd.type = {'V0','V','V'};
bnd.ind = [1,1,2,2,2,2,3,3,1,3,3,1,2,2,2,2];
clear equ
equ.epsilonr = {3,1};
equ.ind = [1,2,2,2];
appl.bnd = bnd;
fem.appl{1} = appl;
fem.frame = {'ref'};
fem.border = 1;
clear units;
units.basesystem = 'SI';
fem.units = units;

% ODE Settings
clear ode
clear units;
units.basesystem = 'SI';
ode.units = units;
fem.ode=ode;

% Multiphysics
fem=multiphysics(fem);

% Extend mesh
fem.xmesh=meshextend(fem);

% Solve problem
fem.sol=femstatic(fem, ...
    'init',fem0.sol, ...
    'solcomp',{'V'}, ...
    'outcomp',{'V'}, ...
    'blocksize','auto');

% Save current fem structure for restart purposes
fem0=fem;

% Plot solution
postplot(fem, ...
    'tridata',{'V','cont','internal','unit','V'}, ...
    'trimap','Rainbow', ...
    'title','Surface: Electric potential [V]', ...
    'axis',[-1.350817084838135,1.350817084838135,-0.9899999737739563,0.9899999737739563]);

% Plot in cross-section or along domain
data1=postcrossplot(fem,1,[0 0;0 1], ...
    'lindata','normE_emes', ...
    'outtype','postdata', ...
    'title','Electric field, norm [V/m]', ...
    'axislabel',{'Arc-length','Electric field',' norm [V/m]});
Efield1=[data1.p(2,:)];

Emax1=max(Efield1);

% Plot in cross-section or along domain
data2=postcrossplot(fem,1,[-hip 0;-x1/2 x1], ...
    'lindata','normE_emes', ...
    'outtype','postdata', ...
    'title','Electric field, norm [V/m]', ...
    'axislabel',{'Arc-length','Electric field',' norm [V/m]});

```

**Se guarda la grafica de campo eléctrico como un vector.**

**Se extrae, del vector de la grafica de campo eléctrico, la columna correspondiente a los valores de campo eléctrico y se identifica el valor máximo.**

**Se guarda la grafica de campo eléctrico, sobre hip, como un vector.**

```
Efield2=[data2.p(2,:)];
```

**Se extrae, del vector de la grafica de campo eléctrico, la columna correspondiente a los valores de campo eléctrico y se identifica el máximo valor.**

```
Emax2=max(Efield2);
```

```
if Emax1>Emax2  
    Emax=Emax1;  
else  
    Emax=Emax2;  
end
```

**Se determina el valor de la variable de salida.**



**REFERENCIAS**

- 
- [1] Masoud Farzaneh, William A. Chilshom “Insulators for icing and polluted environments”, Primera Edición, IEEE Press, 2009.
- [2] EPRI Article, “Addressing the Failure of Polymer Insulators”, Corporate Documents, 2007.
- [3] Comisión Federal de Electricidad, [www.cfe.org.mx](http://www.cfe.org.mx), noviembre 2011.
- [4] Andrew J. Philips, John Kuffel, Anthony Baker, Jeffery Burnham, Anthony Carreira, Edward Cherney, William Chisholm, Masoud Farzaneh, Robert Gemignani, Anthony Gillespie, Thomas Grisham, Robert Hill Tapan Saha, Bogdan Vancia, Jennifer Yu “Electric Fields on AC Composite Transmission Line Insulators”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, Num. 2, Abril 2008.
- [5] IEEE Guide for Application of Composite Insulator, IEEE Std 987-2001.
- [6] S. M de Oliveira y C. de Turreil “Aging of Distribution Composite Insulators Under Environmental and electrical Stresses”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, Num.2, pag 1074-1077, Abril, 1990.
- [7] Yasuda H., A. K. Sharma, T. Yasuda “Effects of Orientation and Mobility of Polymeric molecules at surfaces on Contact Angle and its Hysteresis”, J. Polym. Sci Polym. Phys. Ed, 19:1285, 1981.
- [8] Aleksandrov, G. N., W.E. Kiesewetter, E.K. Alvares, “Optimization of the Shape of Rod Insulators Based on Glass-Plastic”, electric Technology U.S.S.R., Num.4, pag. 95-105, 1984
- [9] Kapal Sharma, R.E.T., “Polymeric Insulators”, Technical Article.

- [10] W. Sima, F.P. Espino-Cortes, Edward Cherney, Shesha H. Jayaram “Optimization of Corona Ring Design for Long-Rod Insulators Using FEM Based Computational Analysis”, Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Indianapolis EUA, Septiembre 19-22, 2004.
- [11] W. Sima, Kun Wu, Qing Yang, Caixin Sun. “Corona Ring Design of  $\pm 800$  kV DC Composite Insulator Based on Computer Analysis”, 2006 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pag. 457-460, 2006.
- [12] Suat Ilhan, Aydogan Ozdemir, “380 kV Corona Ring Optimization for ac Voltages”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.18, Num.2, Abril, 2011.
- [13] Hongwei Mei, Liming Wang, Jianchao Zheng, Zhicheng Guan, “Installing the Rubber Sheat on Transmission Line to Improve the Performance of External Insulation of Line Insulator”, Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Haribin China, Julio 19-23, 2009.
- [14] Edson G. da Costa, Tarso V. Ferreira, Max G.G. Neri, Isaac B. Queiroz y André D. Germano, “Characterization of polymeric Insulators using Thermal and UV Imaging under Laboratory Conditions”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 16, Num.4, Agosto, 2009.
- [15] Paredes O. Myriam, F.P. Espino-Cortes, Gómez Y. Carlos. “Materiales Compuestos de Alta Permitividad para Atenuar el Campo Eléctrico en Aisladores Poliméricos”, XI Congreso Nacional De Ingeniería Electromecánica Y De Sistemas, pag. 194-199, México D.F., Noviembre, 2009.
- [16] R Abd Rahman, N. Harid, A. Hadda, “Stress Control on Polymeric Outdoor Insulators”, UPEC 2010, Agosto 31 - Septiembre 3, 2010.
- [17] T. Doshi, R. S. Gorur, “Electric Field Computation of Composite Line Insulators up

- 
- to 1200 kV AC”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 18, Num. 3, Junio, 2011.
- [18] Enrique Pérez Ruiz, “Impacto de la lluvia acida sobre el envejecimiento de Aisladores EPDM”, Tesis que para obtener el grado de Maestro en Ciencias con Especialidad en Ingeniería Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional, SEPI ESIME, México D.F., 2002.
- [19] Alberto Rafael Portillo Méndez, “Efecto de la altitud y la humedad relativa sobre las tensiones de flameo en aislamientos poliméricos sujetos a contaminación”, Tesis que para obtener el grado de Maestro en Ciencias con Especialidad en Ingeniería Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional, SEPI ESIME, México D.F., 2002.
- [20] Daniel Fleisch, “A Student’s Guide to Maxwell Equations”, Primera Edición, Cambridge University Press, 2008.
- [21] De León Francisco, “Apuntes de Teoría Electromagnética”, ESIME IPN Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, México D.F.
- [22] Matthew N. O. Sadiku, “Elementos de Electromagnetismo”, Segunda Edición, Oxford University Press Inc., 1994.
- [23] Andrew Philips, D. J. Childs, H. M. Schnaider, “Aging of non-ceramic insulators due to corona from water drops” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, Num. 3, pag. 1081-1086, Julio, 1999.
- [24] EPRI, “Application guide for transmission line NCI”, Palo Alto, TR 111-566, 1998.
- [25] Edward Cherney “Partial discharge, part V: PD in polymer type line insulators” IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 7, Num. 2, pag. 28-32, Marzo/Abril, 1991.
- [26] Andrew Phillips “500-kV Non-ceramic Insulator Aging Chamber; Final Report”, EPRI, Noviembre, 2000.

- [27] Raymond Ferraro, Emilie Dohleman, “Corona Rings: Are They Needed?” Transmission & Distribution World, Marzo, 2010.
- [28] Steven C. Chapra, Raymond P. Canale, “Métodos numéricos para ingenieros”, 4ta. Edición, Mc Graw Hill, 2003.
- [29] User’s guide, “Optimization Toolbox for use with MATLAB<sup>®</sup>”, 2002.
- [30] F.P. Espino-Cortes, “A Study of Field-Dependent Stress Grading Systems Working under Fast Rise Time Pulses”, Tesis de doctorado Universidad de Waterloo, Ontario Canada, 2006.
- [31] Luis A. Siegert, “Alta tensión y sistemas de transmisión”, Primera Edición, Limusa, 1989.
- [32] M. Weedy, Underground Transmission of Electric Power, by John Wiley & Sons, Ltd., 1980.
- [33] Y.M. Li, Y. Q. E. Kuffel, “Numerical computation of electric field and optimal desingof three-phase enclosed CGIS”, Sixth International Symposium on High Voltage Engineering, L.A. EUA, artículo 24.02, 1989.
- [34] D. Biester, “In Geneva, Simens sets up the World’s First High Voltage Link to Feature a Gas-Insulated Transmission Line of the Second Generation”, Power transmission and Distribution Press Release EV H 200011.235e, Munich, Germany, Noviembre 2000.
- [35] Chakrabarti A.K. Van Heeswwijk R.G. and Srivastava, “Free Particle-initiated 60 Hz Breakdown at a Spacer Surface in a Gas Insulated Bus”, IEE Transactions On Electrical Insulation, Vol. 24, Num. 4, pag 549-560, 1989.
- [36] N. Giao Trinh, Farouk A.M: Risk, Claire Vincent, “Electrostatic Field Optimization of Epoxy Spacer for Compressed SF6 Insulated Cables”, IEEE Trans. PAS, Vol. 99,

Num. 6, pag. 2164-2174, 1980.

- [37] Qing Yang, W. Sima, Deng Jiazhuo, Yuan Tao, Chen Lin, “New Optimization Method on Electric Field Distribution of Composite Insulator”, 2010 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2010.
- [38] Myriam Paredes Olguín, “Síntesis y estudio del comportamiento dieléctrico de un compuesto polimérico inmerso en un campo eléctrico de alta intensidad”, Proyecto de investigación Doctoral en proceso, Departamento de Ingeniería en Metalurgia y Materiales, ESIQIE, IPN.