



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**IMPACTO DE DEFECTOS EN EL AISLAMIENTO DE CABLES  
DE POTENCIA**

Autor: Br. Juan Carlos Contreras Morales

Mérida, Octubre, 2017

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

## **IMPACTO DE DEFECTOS EN EL AISLAMIENTO DE CABLES DE POTENCIA**

Trabajo de Grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero  
Electricista

Autor: Br. Juan Carlos Contreras Morales  
Tutor: Ph.D. Jean Carlos Hernández Mejía

Mérida, Octubre, 2017

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

## **IMPACTO DE DEFECTOS EN EL AISLAMIENTO DE CABLES DE POTENCIA**

Autor: Br. Juan Carlos Contreras Morales

Trabajo de Grado, presentado en cumplimiento parcial de los requisitos exigidos para optar al título de Ingeniero Electricista, aprobado en nombre de la Universidad de Los Andes por el siguiente jurado:

---

Prof.(a) María Angélica Salazar  
Jurado

---

Prof. Osías Hernández Pérez  
Jurado

---

Prof. Jean Carlos Hernández Mejía  
Tutor

## DEDICATORIA

Al culminar una de mis metas como el significado de formarme como profesional, y poder dedicar toda esta experiencia de mi vida a **Alba Elisa** y **José Isidro**, que estuvieron allí siempre brindándome su apoyo incondicional para cumplir satisfactoriamente esta gran meta, que dios les de mucha vida y salud. Gracias.

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

## AGRADECIMIENTO

Primordialmente a **DIOS**, que nunca ha estado ausente en ningún instante de mi vida, brindándome de su sabiduría y mucha salud, por haberme dado este don de ser lo que soy hoy en día, y en darme fuerzas en todo momento de no perder fe en ti.

A mis padres y hermanos que han sido un ejemplo a seguir, por ofrecerme su apoyo en todo momento, que nunca dudaron del cumplimiento de esta meta. A la Universidad de Los Andes por abrir sus puertas y ofrecerme un lugar donde expandir mis conocimientos, a todos los profesores de la Escuela de Ingeniería Eléctrica por su tiempo y dedicación en mi formación como ingeniero; a los trabajadores que de alguna u otra forma contribuyeron en mi proceso académico. Al profesor Jean Carlos Hernández por su motivación, orientación y paciencia en su labor como tutor académico para la realización de este trabajo de grado. Y a todos los compañeros de clase con los cuales compartí a lo largo de la carrera. Gracias.

Juan.

Juan Carlos Contreras Morales. “**Impacto de Defectos en el Aislamiento de Cables de Potencia**”. Universidad de Los Andes. Tutor: Ph.D. Jean Carlos Hernández Mejía. Octubre 2017.

## RESUMEN

El polietileno reticulado (XLPE) se ha convertido en el aislamiento preferido universalmente para cables de potencia, tanto para aplicaciones de distribución como para sistemas de transmisión. Este sistema de aislamiento proporciona rentabilidad en la operación y la adquisición, así como menores requisitos ambientales y de mantenimiento. Una de las principales fallas en este sistema de aislamiento se debe al envejecimiento y degradación a lo largo de su vida útil o producidas por algún defecto creadas desde su fabricación, entre las causas se encuentran el árbol de agua, las impurezas, la delaminación de las pantallas semiconductoras, cavidades y las protuberancias. En este trabajo se desarrolló el estudio del comportamiento del campo eléctrico a lo largo del aislamiento y el impacto que estos defectos ocasionan en el mismo, para la elaboración de este análisis se procedió a realizar el modelado de un cable de potencia mediante el programa Maxwell SV<sup>®</sup> con el cual se realizaron las simulaciones necesarias de todos los casos de estudios planteados, entonces efectuar una comparación con datos teóricos obtenidos. Con la ayuda del simulador COMSOL *Multiphysics*<sup>®</sup> el cual proporciona una visión tridimensional (3-D) y por tanto utilizando este enfoque se espera que se desarrolle una mejor comprensión del fenómeno en estudio. Luego se realizó un análisis de los resultados obtenidos y una comparación con los datos antes arrojados por el simulador Maxwell SV<sup>®</sup>.

**Descriptor:** Cable de potencia, XLPE, aislamiento, defectos, Maxwell SV<sup>®</sup>, COMSOL *Multiphysics*<sup>®</sup>, campo eléctrico.

## ÍNDICE GENERAL

APROBACIÓN .....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO .....	iv
RESUMEN.....	v
LISTA DE FIGURAS .....	x
LISTA DE TABLAS .....	xv
INTRODUCCIÓN.....	1

<b>CAPÍTULO</b>	pp.
-----------------	-----

<b>1. OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>3</b>
1.1 JUSTIFICACIÓN .....	3
1.2 OBJETIVOS .....	4
1.2.1 Objetivo General .....	4
1.2.2 Objetivos Específicos.....	4
1.3 METODOLOGÍA .....	4
1.4 ALCANCE.....	5
1.5 LIMITACIONES .....	5

<b>2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS PARA UN SISTEMA DE CABLES DE POTENCIA Y SUS DEFECTOS.....</b>	<b>6</b>
2.1 HISTORIA DE LOS CABLES DE POTENCIA .....	6
2.2 CONCEPTO DE CABLE .....	8
2.3 ESTRUCTURA DE LOS CABLES DE POTENCIA .....	8
2.3.1 El Conductor .....	9
2.3.2 Pantalla del Conductor .....	11

2.3.3 Aislamiento .....	11
2.3.4 Pantalla del Aislamiento.....	13
2.3.5 Pantalla Metálica o Neutro Concéntrico .....	13
2.3.6 Cubierta o Chaqueta .....	14
2.4 CABLES DE POTENCIA ENVEJECIMIENTO Y DEGRADACIÓN.....	15
2.4.1 Características de los Cables XLPE.....	17
2.4.2 Defectos en el Aislamiento de Cables XLPE y sus Problemas Asociados .....	18
Cavidades .....	21
Protuberancias .....	22
Sustancias Contaminantes .....	23
Degradación Eléctrica .....	24
Degradación de Árboles de Agua.....	25
Modelado del Árbol de Agua.....	27
Degradación de Árboles Eléctricos.....	28
Degradación por descarga parcial.....	30
2.5 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA MAXWELL SV® .....	31
2.6 SUMARIO .....	32

<b>3. INTRODUCCIÓN A MAXWELL SV® Y MODELADO DEL CABLE DE POTENCIA.....</b>	<b>33</b>
3.1 COMPORTAMIENTO DEL CAMPO ELÉCTRICO EN MEDIOS DIELECTRICOS.33	
3.1.1 Introducción al programa Maxwell y simulación del modelado del capacitor de placas paralelas.....	34
3.2 CAMPOS ELÉCTRICOS EN CABLES DE POTENCIA.....	45
3.3 MODELADO DEL CABLE DE POTENCIA Y CÁLCULO DE LA MAGNITUD DEL CAMPO ELÉCTRICO MEDIANTE EL SIMULADOR MAXWELL SV®.....	47
3.4 SUMARIO .....	51
<b>4. CASOS DE ESTUDIO Y SIMULACIÓN CON EL PROGRAMA COMPUTACIONAL MAXWELL SV®.....</b>	<b>52</b>
4.1 PROBLEMAS ASOCIADOS EN LA MANUFACTURA .....	52

4.1.1 Cavidades .....	52
Simulación de una micro-cavidad .....	54
Simulación de la macro-cavidad esférica .....	56
Simulación de la macro-cavidad elipsoidal .....	62
4.1.2 Protuberancias .....	65
Simulación de la protuberancia .....	66
4.1.3 Contaminantes .....	68
Simulación de los distintos contaminantes .....	70
4.1.4 Delaminación .....	76
Simulación para una delaminación .....	77
4.2 DEFECTOS DEBIDO A LA DEGRADACIÓN Y ENVEJECIMIENTO .....	79
4.2.1 Árboles de Agua .....	79
Simulación de los distintos árboles de agua .....	81
4.2.2 Árbol Eléctrico .....	88
Simulación del árbol eléctrico .....	90
4.3 MANO DE OBRA E INSTALACIÓN .....	92
4.3.1 Corte .....	92
Simulación del corte .....	93
4.4 SUMARIO .....	95
<b>5. SIMULACIONES MEDIANTE COMSOL MULTIPHYSICS® .....</b>	<b>96</b>
5.1 DESCRIPCION DEL PROGRAMA COMSOL .....	96
5.1.1 Modulo de interfaz utilizado .....	96
5.2 MÉTODO DE ELEMENTO FINITO (FEM) .....	98
5.3 CÁLCULO DEL EFECTO DEL CAMPO EN LA CAPACITANCIA .....	100
5.3.1 Definición del Modelo y Resultado .....	101
5.4 SIMULACIONES DE ALGUNOS DEFECTOS ENCONTRADOS EL AISLAMIENTO DEL CABLE DE POTENCIA .....	103
5.4.1 Simulación de una macro-cavidad esférica .....	103
5.4.2 Simulación de una macro-cavidad elipsoidal .....	105
5.4.3 Simulación para un árbol de agua .....	106

5.5 SUMARIO .....	108
CONCLUSIONES .....	109
RECOMENDACIONES.....	111
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	112

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

## LISTA DE FIGURAS

pp.

Figura 2.1. Elementos que componen el cable de potencia (Herculano y Maza, 2010).....	9
Figura 2.2. Conductores circulares redondos y comprimidos concéntricos (Herculano y Maza, 2010).....	10
Figura 2.3. Diferentes tipos de cable. ....	14
Figura 2.4. Tiempo y campos eléctricos en los que están operativos diversos mecanismos de interrupción eléctrica (Hernández, 2008). ....	16
Figura 2.5. Defectos típicos del cable de potencia XLPE (Hampton, 2016).....	20
Figura 2.6. Fotomicrografía de aislamiento de cables XLPE. Foto tomada bajo microscopio de interferencia diferencial con la división más pequeña de 2,7 $\mu\text{m}$ de ancho (Toshikatsu y Greenwood, 1983). ....	21
Figura 2.7. Fotografía de árboles generados a partir de asperezas alrededor de capas semiconductoras de un cable XLPE (Toshikatsu y Greenwood, 1983). ....	23
Figura 2.8. Los árboles eléctricos (ET) están uniendo dos contaminantes y otro ET está emanando de la pantalla del conductor (Mashikian y Szatkowski, 2006).....	24
Figura 2.9. Arboles de agua en un cable con aislamiento XLPE (Hampton y otros, 2007).....	25
Figura 2.10. En el lado izquierdo un ejemplo de un árbol de agua ventoso (Hyvönen, 2008) que crece de la pantalla del conductor y en el lado derecho un ejemplo de árbol de agua lazo de corbata (Toshikatsu y Greenwood, 1983).....	26
Figura 2.11. Áreas de mayor estrés, sitios de posibles árboles eléctricos (ET), creados por un árbol de agua (WT) (Hernández, 2008). ....	27
Figura 2.12. Árbol eléctrico que crece desde la punta de un árbol de agua (Hernández, 2008). ....	29
Figura 3.1. Corte transversal de un condensador de placas paralelas (Cheng, 1997). ....	34
Figura 3.2. Panel de control de Maxwell SV.....	34
Figura 3.3. Administrador de proyectos en Maxwell. ....	35
Figura 3.4. Crear nuevo proyecto en Maxwell. ....	35
Figura 3.5. Menú de comandos ejecutivos en Maxwell. ....	36

Figura 3.6. Modelado del capacitor de placas paralelas. ....	37
Figura 3.7. Configuración de los materiales. ....	37
Figura 3.8. Administrador de límites y fuentes. ....	38
Figura 3.9. Opciones de configuración de la solución. ....	39
Figura 3.10. Malla de inicio predeterminada. ....	39
Figura 3.11. Opciones de configuración de la malla. ....	40
Figura 3.12. Generación de la malla refinada. ....	40
Figura 3.13. Creación del grafico en 2D. ....	41
Figura 3.14. Magnitud del campo eléctrico. ....	42
Figura 3.15. Capacitor de placas paralelas que contiene dos dieléctricos en los que su interfase es paralela a las placas conductoras (Hayt y Buck, 2006). ....	43
Figura 3.16. Capacitor de placas paralelas con interfase de dos dieléctricos. ....	44
Figura 3.17. Configuración dieléctrico-dieléctrico. ....	45
Figura 3.18. Configuración de un sistema de cilindricos coaxiales (Ravindra y Wolfgang, 2011). ....	46
Figura 3.19. Distribución del campo eléctrico dentro del XLPE de un cable de potencia (BRUGG Cables, 2006). ....	46
Figura 3.20. Sección transversal del cable de potencia EPR-15 kV (Hernández, 2008). ....	47
Figura 3.21. Modelado del cable de potencia con Maxwell. ....	48
Figura 3.22. Distribución del campo eléctrico con Maxwell SV <sup>®</sup> . ....	49
Figura 3.23. Campo eléctrico a lo largo del aislamiento XLPE. ....	50
Figura 3.24. Fuerza del campo eléctrico versus longitud radial. ....	51
Figura 4.1. Características de resistencia AC de cables de 6,6 kV XLPE con aislamiento de 3,2 mm de espesor 5kV / 30 min (Toshikatsu y Greenwood, 1983). ....	53
Figura 4.2. Distribución del campo eléctrico en el cable de potencia. ....	54
Figura 4.3. Visualización de la micro-cavidad. ....	55
Figura 4.4. Comportamiento del campo eléctrico dentro del aislamiento XLPE. ....	55
Figura 4.5. Macro-cavidad cerca del conductor. ....	56
Figura 4.6. Campo eléctrico alrededor de la macro-cavidad. ....	57
Figura 4.7. Campo eléctrico a lo largo del aislamiento. ....	57
Figura 4.8. Macro-vacío cercano a la pantalla del aislamiento. ....	58
Figura 4.9. Distorsión del campo eléctrico. ....	59

Figura 4.10. Comparación del comportamiento del campo eléctrico.....	59
Figura 4.11. Cavidad en la mitad del aislamiento. ....	60
Figura 4.12. Macro-cavidad en aislamiento XLPE. ....	61
Figura 4.13. Variación del campo eléctrico.....	61
Figura 4.14. Campo eléctrico al introducir un elipsoide. ....	62
Figura 4.15. Defecto elipsoidal en posición horizontal.....	63
Figura 4.16. Variación del campo en el elipsoide, posición horizontal.....	63
Figura 4.17. Macro-cavidad elipsoidal en posición vertical.....	64
Figura 4.18. Campo eléctrico en el elipsoide de posición vertical. ....	64
Figura 4.19. Árbol de impulsos que crece a partir de una aspereza de la capa de compuesto semiconductor de un cable XLPE (Toshikatsu y Greenwood, 1983). ....	65
Figura 4.20. Protuberancia en la pantalla semiconductor. ....	67
Figura 4.21. Visualización del campo eléctrico en la protuberancia.....	67
Figura 4.22. Campo eléctrico a lo largo del aislamiento. ....	68
Figura 4.23. Defectos típicos encontrados en cables extruidos (contaminantes - izquierda y derecha, y distorsión de la pantalla - derecha) (Hampton y otros, 2007).....	69
Figura 4.24. Incrustación de vidrio en el aislamiento.....	71
Figura 4.25. Campo eléctrico al introducir un contaminante (vidrio) en el aislamiento del cable de potencia.....	71
Figura 4.26. Campo eléctrico en presencia de un contaminante (vidrio). ....	72
Figura 4.27. Contaminante no metálico (madera) en el aislamiento XLPE. ....	73
Figura 4.28. Distribución del campo eléctrico mediante un contaminante no metálico. ....	73
Figura 4.29. Contaminante metálico (acero) cercano al conductor.....	74
Figura 4.30. Distorsión del campo eléctrico para un contaminante metálico (acero). ....	74
Figura 4.31. Variación del campo eléctrico en el aislamiento, al introducir un contaminante metálico. ....	75
Figura 4.32. Árbol de agua tipo ventoso (WT) y árbol eléctrico (ET) que crecen entre sí desde pantallas opuestas (Mashikian y Szatkowski, 2006). ....	76
Figura 4.33. Árboles eléctricos (ET), con puntas cercanas a la unión, a ambos lados de un largo árbol de agua ventoso (WT) (Mashikian y Szatkowski, 2006). ....	77
Figura 4.34. Delaminación en la pantalla semiconductor.....	78
Figura 4.35. Vista ampliada de la delaminación. ....	78

Figura 4.36. Campo eléctrico presentado mediante una delaminación. ....	79
Figura 4.37. Árboles de agua encontrados en cables XLPE (Toshikatsu y Greenwood, 1983). ....	80
Figura 4.38. Bow-tie, árbol desarrollado en cables de polietileno (Toshikatsu y Greenwood, 1983). ....	81
Figura 4.39. Árbol de agua desarrollado un 33% del aislamiento del cable. ....	82
Figura 4.40. Efecto del campo eléctrico frente a un árbol de agua. ....	82
Figura 4.41. Campo eléctrico debido a un árbol de agua de tipo ventoso. ....	83
Figura 4.42. Árbol de agua a una 67% del aislamiento. ....	84
Figura 4.43. Distribución del campo eléctrico en presencia de un árbol de agua. ....	84
Figura 4.44. Árbol de agua al 100% de su crecimiento. ....	85
Figura 4.46. Árbol de agua (bow-tie) el centro del aislamiento. ....	87
Figura 4.47. Efecto del campo eléctrico en presencia de un árbol de agua lazo de corbata en el aislamiento del cable de potencia. ....	87
Figura 4.48. Efecto del campo en el aislamiento al introducir un lazo de corbata. ....	88
Figura 4.49. Árbol eléctrico en cable con aislamiento XLPE bajo tensión de AC, (a) árbol de tipo arbusto, (b) árbol convencional, (c) árbol de tipo fibrilar, (d) árbol de tipo intrínseco, (e) árbol que provoca la ruptura del aislamiento (Sarathi y otros, 2011). ....	89
Figura 4.50. Árbol eléctrico que crece en las puntas de un árbol de agua. ....	91
Figura 4.51. Comportamiento del campo debido a un árbol eléctrico. ....	91
Figura 4.52. Efecto de los árboles eléctricos de la Figura 4.51. ET1 campo eléctrico para el ET de la izquierda, y ET2 para el ET de la derecha. ....	92
Figura 4.53. Corte profundo, con más del 50% del aislamiento, realizado durante la instalación (Mashikian y Szatkowski, 2006). ....	93
Figura 4.54. Corte en el aislamiento durante la instalación. ....	94
Figura 4.55. Efecto Campo eléctrico ocasionado por una incisión. ....	94
Figura 4.56. Distribución del campo eléctrico ocasionado por un corte en el aislamiento. ....	95
Figura 5.1. Tetraedro y triangulo en forma elemento finito discreto (Ravindra y Wolfgang, 2011). ....	99
Figura 5.2. Cálculo de campo por FEM en dos dimensiones, utilizando elementos discretos triangulares (Ravindra y Wolfgang, 2011). ....	99
Figura 5.3. Condensador simple que consta de dos discos de metal en un dominio de aire (COMSOL, 2014). ....	101

Figura 5.4 Configuración del mallado utilizado para el análisis (COMSOL, 2014).....	102
Figura 5.5. La norma de campo eléctrico (multi-rebanadas) y el campo eléctrico (flechas) para el caso de la condición de límite de carga cero (COMSOL, 2014). .....	102
Figura 5.6. Campo eléctrico el en cable de potencia. ....	104
Figura 5.7. Macro-cavidad esférica cercana a la pantalla del conductor.....	104
Figura 5.8. Planos de corte en el macro-defecto.....	105
Figura 5.9. Efecto del campo eléctrico en presencia de un macro-defecto elipsoidal.....	106
Figura 5.10. Árbol de agua modelado en COMSOL.....	107
Figura 5.11. Planos interceptando el árbol de agua.....	107
Figura 5.12. Vista ampliada del Campo eléctrico. ....	108

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

## LISTA DE TABLAS

pp.

Tabla 3.1. Medidas del cable de potencia de 15 kV.....	48
Tabla 3.2 Materiales para el cable de potencia. ....	49
Tabla 4.1. Análisis de contaminantes en polietileno (Toshikatsu y Greenwood, 1983). ...	69
Tabla 4.2. Relación entre la clase de voltaje y los niveles de limpieza aceptados (Hampton y otros, 2007). ....	70

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

# INTRODUCCIÓN

Debido al complejo crecimiento de la demanda de energía eléctrica y las distintas formas a las cuales se tiene que transmitir, se requiere el manejo de niveles de tensión elevados para lograr una calidad de energía óptima, por esta razón los cables de potencia subterráneos constituyen una opción para la transmisión y distribución de energía eléctrica donde las condiciones ambientales ocasionan daños de manera frecuente a los conductores aéreos. Las líneas subterráneas son también una de las mejores opciones para la distribución en aquellos lugares que se encuentran densamente poblados donde la exposición de los conductores a la intemperie representa un peligro para las personas que habitan en sus cercanías.

Ya que es de gran importancia la continuidad del servicio eléctrico y asegura su confiabilidad, es considerable la detección de los defectos en la estructura de aislamiento del cable de potencia que pueden causar un fallo prematuro. El fallo del cable subterráneo en servicio puede causar una interrupción prolongada en el suministro de energía eléctrica. La detección precoz puede evitar tales fallos y mediante la adopción de medidas preventivas sería posible mejorar la fiabilidad del sistema de potencia y su funcionamiento; es indispensable el desarrollo de nuevas técnicas de estudio para el diagnóstico de cables de potencia y determinar cualquier cambio en las propiedades eléctricas del aislamiento, lo cual durante toda su vida útil están sujetos a soportar la magnitud del campo eléctrico, por tanto, cualquier tipo de imperfección produciría un rápido envejecimiento y degradación en el aislamiento del cable y esto podría conllevar a una posible falla, por esta razón es primordial el estudio de todos los fenómenos y alteraciones a las cuales están sometidos los cables de potencia y estar seguros de no tener ningún defecto.

En este trabajo de grado se realizará un estudio del impacto que ocasionan los distintos defectos en el aislamiento de los cables de potencia debido a la humedad y la tensión eléctrica, conocidos como arboles de agua y eléctricos, y otros como impurezas en la fabricación. Este estudio se realizará mediante la ayuda de los programas computacionales como Maxwell SV<sup>®</sup> y

COMSOL *Multiphysics*<sup>®</sup> con el objetivo de observar el comportamiento del campo eléctrico a lo largo del aislamiento (XLPE) en el cable de potencia.

Se describe la estructura que se siguió a lo largo de la investigación:

En el Capítulo 1, se presenta la justificación de la investigación, los objetivos, la metodología, el alcance y las limitaciones encontradas.

El Capítulo 2 proporciona los conceptos básicos de los sistemas de cables. Se explica la estructura básica de un sistema de cable de potencia. Además, se presentan los mecanismos de envejecimiento, degradación de los cables de potencia.

Para el Capítulo 3 se estudia el comportamiento del campo eléctrico en los sistemas de cables de potencia. Se introduce al funcionamiento del simulador Maxwell SV<sup>®</sup>, el modelado y análisis básico de un cable de potencia.

En este Capítulo 4 se plantean los casos de estudio a realizar y posteriormente obtener las simulaciones correspondientes con el programa Maxwell para su respectivo análisis.

Finalmente, en el Capítulo 5 se realiza una explicación a la introducción e interfase utilizada por el programa COMSOL *Multiphysics*<sup>®</sup> para el análisis de simulaciones. Se presentan algunos casos ya estudiados en el Capítulo 4 realizando una comparación, posteriormente se muestran los resultados obtenidos y una mejor visualización 3D del efecto ocasionado en la magnitud del campo eléctrico en el aislamiento XLPE.

Por último, se tienen las conclusiones y las recomendaciones, obtenidas a lo largo del trabajo de grado, mediante el análisis e interpretación de los resultados obtenidos en las diversas simulaciones

# CAPÍTULO 1

## OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN

En este Capítulo se expone la justificación para la obtención del estudio realizado, se presentan los objetivos, las limitaciones encontradas y la metodología que se siguió a lo largo del trabajo de grado.

### 1.1 JUSTIFICACIÓN

El medio más utilizado para la transmisión de energía eléctrica en la actualidad es mediante las líneas aéreas debido a su bajo costo de instalación, ya que su medio aislante es el aire; existe diferentes factores climáticos por cuales las vuelven susceptibles a fallas alterando su funcionamiento, uno de estos factores son las descargas atmosféricas, esta no es la única problemática que enfrentan estas líneas, sino también su mantenimiento (limpieza, poda de árboles) y la seguridad de las personas.

Los cables de polietileno reticulado (XLPE) son los cables subterráneos de media tensión más utilizados, este sistema de aislamiento facilita la rentabilidad en la compra e instalación, así como menores requisitos ambientales y de mantenimiento. Desde su fabricación pueden existir imperfecciones en el aislamiento los cuales son conocidos como defectos de manufactura tales como: impurezas, burbuja de aire, protuberancias, son una de las principales causas de fallas durante su funcionamiento, los cables subterráneos están expuestos a humedad, cambios de temperatura, ciclos de carga y otros, todos estos fenómenos producen degradación y envejecimiento en los cables los cuales contribuyen a la generación de árboles de agua y árboles eléctricos en su aislamiento. Esto puede obtener una distorsión en la magnitud de campo eléctrico y consecuentemente ocurrir una falla, por esta razón es de gran importancia realizar un estudio sobre todos estos defectos.

No es imposible realizar mediciones de diagnóstico en todos los sistemas de cables en uso y es aún más difícil realizar pruebas de laboratorio a escala completa de cada sistema. El aislamiento del cable debe ser desmontado y cortado durante la reparación de un fallo, para recoger muestras de aislamiento y realizar un análisis más profundo y proporcionar más información sobre el estado real del sistema de aislamiento del cable.

Para dicho estudio se usarán las herramientas computacionales como lo son Maxwell SV<sup>®</sup> y COMSOL *Multiphysics*<sup>®</sup>, en los cuales se tendrá que especificar casos de estudio para su posterior simulación realizando una comparación en los datos obtenidos y enfocándose principalmente en el comportamiento de la magnitud del campo eléctrico en cables de potencia en presencia de dichos defectos.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo General**

Estudiar el impacto de presencia de defectos en el aislamiento de cables de potencia de media tensión.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- ✓ Entender los conceptos fundamentales para el inicio de la investigación.
- ✓ Realizar la revisión bibliográfica.
- ✓ Establecer modelos y casos de estudio.
- ✓ Realizar simulaciones.
- ✓ Evaluar los casos de estudio.
- ✓ Analizar los resultados para establecer conclusiones y recomendaciones.

## **1.3 METODOLOGÍA**

La metodología que se siguió consiste en la investigación de tipo documental y de campo en la elaboración y desarrollo de un modelo para solucionar problemas; primeramente, la selección del material bibliográfico fundamental para conocer y entender los conceptos básicos sobre la estructura de los cables de potencia y los principales problemas que presenta en su aislamiento.

La recopilación de artículos relacionados con estudios realizados en laboratorio respecto a defectos presentes en el aislamiento del cable de potencia, y así poder establecer casos de estudio reales (tamaños, medidas, tipos de material y composición).

Luego de establecer los casos de estudios y escoger el cable utilizado (medidas del cable), se requirió el manejo y correcto uso del programa Maxwell SV<sup>®</sup> para realizar la simulación en cuanto a la magnitud del campo eléctrico y su comportamiento a lo largo del aislamiento en el cable de potencia; los datos arrojados fueron comparados con los teóricos obtenidos, luego de establecer su confiabilidad poder realizar las simulaciones de los casos establecidos.

Para la visualización 3D se utilizó el programa COMSOL *Multiphysics*<sup>®</sup> y realizar la comparación sobre un caso específico en cuanto a los datos arrojados primeramente por el simulador Maxwell SV<sup>®</sup>.

#### **1.4 ALCANCE**

A partir de la teoría de campo eléctrico se puede escoger un modelo para la investigación de casos teóricos prácticos y la selección de casos básicos para una correcta interpretación con los casos reales encontrados. Se utilizó una estructura que consiste en la comparación de los datos obtenidos en los programas computacionales Maxwell y COMSOL en el modelado del cable de potencia.

#### **1.5 LIMITACIONES**

Las limitaciones encontradas en el modelo usado para la implementación del cable de potencia están basadas en el análisis de campo eléctrico en un capacitor cilíndrico, por lo tanto, no se puede evaluar de manera global cada una de las variables dependientes del campo eléctrico. sin embargo, se puede citar que esta metodología se puede seguir para otros diseños futuros.

# CAPÍTULO 2

## FUNDAMENTOS TEÓRICOS PARA UN SISTEMA DE CABLES DE POTENCIA Y SUS DEFECTOS

Este Capítulo presenta una introducción a la historia y a los conceptos básicos de los sistemas de cable de potencia. Se explica la estructura fundamental, envejecimiento, degradación de los cables de potencia.

### 2.1 HISTORIA DE LOS CABLES DE POTENCIA

Los cables de potencia tienen su origen en la década de 1880 cuando la necesidad de cables de distribución de energía se hizo evidente después de la invención de la bombilla incandescente. A medida que crecieron las zonas urbanas, se convirtió en una necesidad para reemplazar algunas líneas aéreas con cables de distribución subterráneos, ya que el número y el tamaño de los alimentadores eran imposibles de acomodar usando el enfoque de cabeza. Los cables de alimentación aislados con papel impregnado fueron los primeros en ser comercializados en 1884 por *Callender Cables of England*. Los cables de papel con aislamiento de plomo cubierto (PILC) de media tensión siguen funcionando debido a su durabilidad y confiabilidad. Para algunas empresas eléctricas todavía constituyen una parte considerable de su red de distribución subterránea (Hernández, 2008).

La historia de los cables de los años 1800 hasta el presente ha estado llena de mejoras tecnológicas con la invención de nuevos materiales, diseños y procesos de fabricación; Sin embargo, es más relevante tener una mirada más cercana a los últimos 50 años de historia del cable debido a la invención del aislamiento basado en material polimérico (Hernández, 2008).

Antes y durante la década de 1950, la necesidad de diseños de cables flexibles y Más fácil de manejar para la instalación, en comparación con los cables PILC, se hizo evidente. Se utilizaron varias formas de caucho para lograr este objetivo. Sin embargo, en 1933, el polietileno (PE) fue descubierto y comenzó a ganar la aceptación para las aplicaciones del cable de la distribución de energía. En la década de 1950, PE ya había ganado aceptación general y había reemplazado casi todos los diseños previos basados en caucho, así como un considerable porcentaje de cables PILC (Hernández, 2008). Inicialmente, los cables de plástico fabricados en los Estados Unidos estaban hechos de polietileno de alto peso molecular (HMWPE). En 1963 con la invención de XLPE, se abandonó rápidamente el HMWPE ya que los conductores aislados con XLPE podían funcionar a una temperatura más alta que HMWPE. Así, las empresas de servicios públicos fueron capaces de utilizar un tamaño de conductor más pequeño para el mismo requisito de corriente (Hernández, 2008).

Pronto se hizo evidente que los cables basados en PE eran susceptibles a un nuevo mecanismo de falla cuando los cables prematuramente comenzaban a fallar, en el momento que los cables estaban operando en un ambiente húmedo, en algunos casos con menos de 10 años de servicio. Así, los fabricantes de cable y las empresas de servicios públicos fueron desafiados a descubrir las posibles causas y a encontrar soluciones que les dieran la confianza necesaria para continuar su compromiso con el cable de aislamiento polimérico subterráneo. Se descubrió que estos fallos tempranos fueron causados por un proceso de degradación del árbol de agua a partir de protrusiones en el conductor y en los escudos del aislamiento, contaminantes en el aislamiento y escudos, o huecos en el aislamiento (Hernández, 2008).

En la década de 1980 avances notables se hicieron para controlar el árbol de agua con la introducción de un proceso de curado en seco para los termoendurecibles (Hernández, 2008). Este nuevo aislamiento incluye tecnología retardante de árboles desarrollada para resolver el problema del árbol de agua. Se basa en dos enfoques; Uno es el uso de aditivos y el otro implica la tecnología de copolímero. No hay duda de que la tecnología retardante de los árboles es una innovación hecha posible por diferentes proveedores. Como resultado, se puede esperar que diferentes tecnologías como el polietileno reticulado retardante de árboles (TRXLPE) tengan diferentes características y rendimiento en condiciones de servicio idénticas (Hernández, 2008).

En la década de 1960, se introdujeron en el mercado cables con aislamiento de caucho de etileno propileno (EPR) para tensiones de hasta 60 kV. Los cables EPR tienen mejor flexibilidad que los cables basados en PE, pero también son susceptibles al árbol de agua (Hernández, 2008). Además, las pérdidas dieléctricas de un cable EPR son mucho más altas que las de un cable XLPE o TRXLPE equivalente, por lo que el uso de cables EPR por encima de 69 kV para nuevas instalaciones es menos deseable. Esta es también la principal razón por la que los cables EPR no se utilizan para aplicaciones de transmisión. Es importante mencionar que los cables EPR sólo se utilizan ampliamente en los Estados Unidos, América del Sur e Italia (Hernández, 2008).

Hoy en día, los materiales aislantes más populares son TRXLPE y EPR, pero en algunos también se utilizan cables XLPE. En los Estados Unidos la mayoría de los servicios públicos aún no han estandarizado el uso de cables TRXLPE o EPR. Sin embargo, se ha demostrado que para las aplicaciones típicas de tipo URD, las ventajas de bajos costes iniciales, así como los menores costes operativos totales, como pérdidas dieléctricas durante la vida del cable, sugieren el uso de TRXLPE sobre el aislamiento EPR (Hernández, 2008).

## 2.2 CONCEPTO DE CABLE

Se llama **cable** a un conductor (generalmente cobre) o conjunto de ellos recubierto de un material aislante o protector; cuyo propósito es conducir la electricidad.

## 2.3 ESTRUCTURA DE LOS CABLES DE POTENCIA

El cable de potencia está destinado a transmitir energía eléctrica. Estos cables suelen ser enterrados bajo tierra. Por lo tanto, se les llama líneas de distribución subterráneas residenciales o líneas subterráneas de transmisión de energía según sus funciones. El cable es un conductor aislado. Los cables de potencia o simplemente los cables se clasifican según su tipo de aislamiento como papel, caucho, plástico o gas. Los cables para la transmisión y distribución de energía están compuestos de muchos tipos diferentes de aislamiento, conductores y materiales de blindaje (Toshikatsu y Greenwood, 1983).

La Figura 2.1 muestran la sección longitudinal de un cable de potencia, respectivamente. La estructura se compone del conductor, del semiconductor sobre el conductor, el aislamiento, el semiconductor sobre el aislamiento, la pantalla metálica o neutro concéntrico y la cubierta o chaqueta.

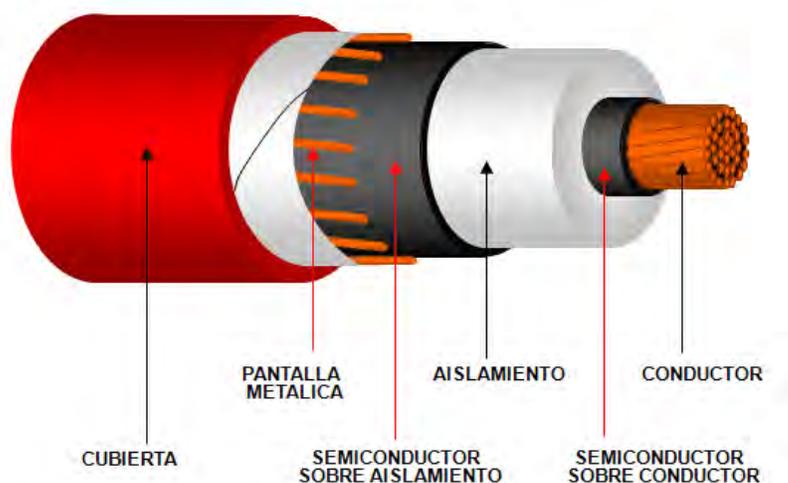


Figura 2.1. Elementos que componen el cable de potencia (Herculano y Maza, 2010).

### 2.3.1 El Conductor

Un conductor es todo aquel material que permite el flujo de la corriente o de cargas eléctricas en movimiento sin mucha oposición (Herculano y Maza, 2010). Es un elemento metálico que permite con facilidad el paso de corriente eléctrica, es decir, posee baja resistencia y alta conductividad.

Para efectos de un cable de potencia de media tensión solamente se utiliza cobre o aluminio, por lo cual, a mayor área del conductor, mayor capacidad de transmisión de corriente eléctrica (Herculano y Maza, 2010). El conductor es un elemento importante en un cable de potencia y cumple la función de transportar la corriente de un extremo a otro del cable tratando de perder la menor cantidad de la energía transportada (Herculano y Maza, 2010). En algunas situaciones, el conductor es redondo concéntrico, pero en otras situaciones el conductor es

comprimido con la idea de proporcionar una interfaz aún más lisa en la superficie exterior del conductor (Hernández, 2008), véase la Figura 2.2.

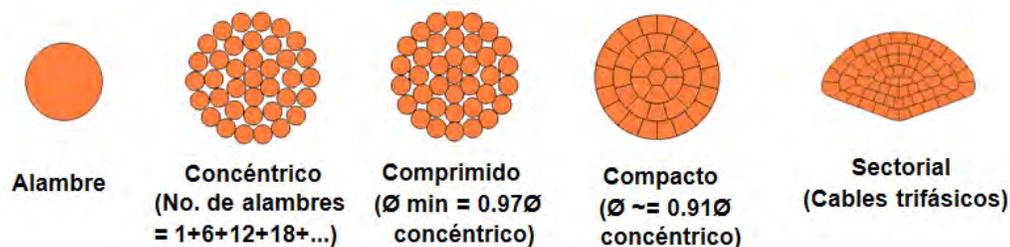


Figura 2.2. Conductores circulares redondos y comprimidos concéntricos (Herculano y Maza, 2010).

El conductor concéntrico está formado por alambres trenzados helicoidalmente en capas que son concéntricas. El conductor compacto no es otra cosa más que un conductor concéntrico que ha sido comprimido con la finalidad de eliminar los espacios libres que existen entre los alambres, por lo cual no se reduce el área del material conductor (Herculano y Maza, 2010).

Otro de los objetivos de compactar el conductor concéntrico es evitar que entre los intersticios se filtre agua en forma de vapor. Al momento de trabajar con el cable en lugares con alta humedad y al compactar un conductor circular concéntrico el área se reduce y por lo tanto todas las áreas de los recubrimientos que protegen al conductor central también se reducen, contribuyendo de esta manera a un ahorro en el uso de todo el material utilizado para la elaboración de un cable de potencia (Herculano y Maza, 2010).

El tamaño del conductor está dado por el área de la sección transversal del conductor y está definido por la *American Wire Gage* (AWG). El indicador está formado por una progresión geométrica entre dos diámetros consecutivos. El tamaño más grande de AWG es 0000, comúnmente conocido como 4/0, y el más pequeño es 36, que es aproximadamente 0,0050 in. de diámetro. Cuando el tamaño del conductor es mayor que 4/0 AWG, está dado por el área de la sección transversal en mil circular mils (MCM), o kcmils. En algunas situaciones, MCM se utiliza en lugar de kcmils. Un circular mil (cmil) se define como el área de un conductor sólido

que tiene un diámetro de un mil (mil de una pulgada). Además, los tipos de conductores sólidos sólo se encuentran hasta un tamaño de 1/0 AWG (Hernández, 2008).

### **2.3.2 Pantalla del Conductor**

La función principal del blindaje del conductor, o pantalla del conductor, es proporcionar una interfaz lisa entre el conductor y el aislamiento. La interfaz suave entre el blindaje del conductor y el aislamiento evita la presencia de puntos afilados (conocidos como protrusiones) que podrían imponer tensiones de alto voltaje al aislamiento. El blindaje del conductor y el aislamiento están unidos químicamente. Si el blindaje del conductor no está presente, las líneas de campo eléctrico están más concentradas en los bordes más afilados alrededor del perímetro exterior del conductor. Como resultado, se crean zonas de tensión de alto voltaje entre el conductor y la interfaz de aislamiento. Esto disminuye la vida útil del cable, ya que su fallo eventual probablemente será causado por esta tensión de voltaje aumentada (Hernández, 2008).

El blindaje del conductor está hecho de un material semiconductor. El material semiconductor está especialmente diseñado con alrededor de 30% a 40% de negro de humo para satisfacer la conductividad requerida de manera que el blindaje del conductor y el conductor estén al mismo potencial cuando el cable está energizado (Hernández, 2008).

### **2.3.3 Aislamiento**

El aislamiento en un cable de potencia es una capa de material sintético de alta resistividad y tiene como función confinar el campo eléctrico. El espesor del aislamiento es importante que sea el apropiado para la tensión del conductor, ya que tiene la finalidad de que el campo eléctrico al que se somete al aislamiento sea menor a la rigidez dieléctrica del medio aislante (Herculano y Maza, 2010).

El aislamiento es capaz de soportar la tensión de funcionamiento a la temperatura nominal de funcionamiento, típicamente de 75 ° C a 90 ° C. El aislamiento puede clasificarse como aislamiento laminado o extruido. El aislamiento debe estar limpio debe haber interfaces suaves con el blindaje del conductor y el blindaje del aislamiento para evitar tensiones eléctricas elevadas que podrían causar un fallo de aislamiento temprano (Hernández, 2008).

Se han utilizado distintos materiales para aislar los cables de energía. Los primeros aislamientos utilizados fueron de papel y plomo, los cuales han estado en operación por más de 100 años y aún se encuentran instalados. Esta tecnología ya no es utilizada, debido al interés de ayudar al medioambiente, que busca eliminar el uso del plomo, así como por ser cables con mayores pérdidas eléctricas que los cables que se producen hoy en día de una forma más eficiente.

El policloruro de vinilo (PVC) fue otro material utilizado para aislamiento de cables de media tensión; pero, debido a su baja resistencia dieléctrica y temperatura de operación, se dejó de utilizar para estas tensiones. Actualmente, lo podemos encontrar en cables de baja tensión. El PVC fue sustituido por el Polietileno (PE) en la década de 1930, cuando se introdujo el uso del Polietileno de baja densidad (LDPE) como aislamiento en cables de media tensión, debido a su costo y excelentes propiedades eléctricas; dichas características se deben a que el PE es uno de los materiales de menor permitividad relativa (2.25), lo cual lo hace un excelente aislante eléctrico.

El aislamiento extruido, puede clasificarse como aislamiento termoplástico o termoestable. Un termoplástico se funde a cierta temperatura y se congela hasta un estado frágil y vítreo cuando la temperatura disminuye suficientemente. El aislamiento termoplástico incluye polietileno (PE), que se divide en PE de bajo peso molecular (LMWPE), también conocido como PE de baja densidad (LDPE) y PE de alto peso molecular (HMWPE), también conocido como densidad alta (HDPE). Por otro lado, un termoendurecido es un polímero que cura a una forma más duradera. El curado convierte la resina en un plástico o caucho utilizando un proceso de reticulación en una estructura molecular tridimensional rígida (Hernández, 2008). En general, un termoendurecido es más fuerte que el termoplástico debido a la estructura tridimensional de la molécula. Los materiales termoestables pueden soportar temperaturas más altas y no son reciclables, al igual que los termoplásticos. El aislamiento termoendurecido incluye PE

reticulado (XLPE), Retardante de árbol de agua XLPE (WTRXLPE) también conocido como Retardante de árbol XLPE (TRXLPE) y Caucho de propileno de etileno (EPR). Estos son los aislantes en uso popular hoy en día.

#### **2.3.4 Pantalla del Aislamiento**

El blindaje de aislamiento, o pantalla de aislamiento, cumple la misma función que el blindaje del conductor y proporciona una interfaz suave entre el aislamiento y el neutro concéntrico. Si el protector de aislamiento no está presente, las líneas de campo eléctrico aparecerán alrededor del exterior del aislamiento del cable. El blindaje de aislamiento asegura que el voltaje fuera del cable está al potencial de tierra. Si el blindaje aislante y el aislamiento no están unidos químicamente; (Hernández, 2008). En este caso, el blindaje de aislamiento se denomina escudo desmontable. Los escudos desmontables facilitan el corte para la terminación y empalme del cable.

Para el apantallamiento del aislamiento, se utiliza un material semiconductor para evitar que se produzca ionización a su vez producida por descargas eléctricas, las cuales son reducidas por dicho material semiconductor.

#### **2.3.5 Pantalla Metálica o Neutro Concéntrico**

El blindaje de un cable se coloca sobre el blindaje aislante para mantener la parte externa del núcleo del cable a potencial de tierra, proporcionando así protección contra contacto accidental. También está diseñado para soportar corrientes de falla, corrientes extraviadas, corrientes de carga y corrientes desequilibradas. El neutro concéntrico puede ser reemplazado por una funda metálica para lograr la misma función. En esta situación, se dice que el cable está completamente blindado. Generalmente, la funda concéntrica neutra o metálica son fabricados de plomo, aluminio o cobre, en una variedad de diseños que incluyen cintas delgadas, hilos redondos y tubos extrudidos sólidos u ondulados (Hernández, 2008).

### 2.3.6 Cubierta o Chaqueta

La chaqueta, también conocida como la sobre-funda, es una cubierta protectora que también puede proporcionar un aislamiento adicional. La chaqueta más común es una camisa encapsulada (es extrudida entre y sobre el neutro). La protección podría ser contra tensiones mecánicas (para el neutro), térmicas o químicas. Otorga alguna (pero no completa) protección contra la entrada de agua, por lo tanto, reduce la corrosión concéntrica de la pantalla metálica o neutro, así como la entrada de humedad al cable (Hernández, 2008). También podría ser diseñado para sostener una armadura metálica, cables o cintas, mejorando aún más el nivel de protección.



Figura 2.3. Diferentes tipos de cable.

Los materiales típicos incluyen el cloruro de polivinilo (PVC) fue uno de los primeros materiales de revestimiento y sigue siendo común, PE clorado, PE, LDPE, polietileno de baja densidad lineal (LLDPE) el más comúnmente usado, PE de densidad media (MDPE), HDPE y nylon (Short, 2004). El PVC tiene buenas propiedades de revestimiento, pero el LLDPE es aún mejor en cuanto a las propiedades mecánicas, los límites de temperatura y la entrada de agua. La humedad pasa a través de revestimiento de PVC más de diez veces más rápido de lo que pasa a través de LLDPE. El polietileno de baja densidad resiste mejor la abrasión y también tiene un menor coeficiente de fricción, lo que facilita la extracción del conducto (Short, 2004).

Las chaquetas semiconductoras también están disponibles. Las chaquetas semiconductoras proporcionan la ventaja de conexión a tierra del cable sin juntas, al mismo

tiempo que bloquean la humedad y protegen físicamente el cable. Cuando se entierra directamente, un neutro expuesto proporciona un excelente conductor de puesta a tierra. El neutro en contacto con el suelo ayuda a mejorar la puesta a tierra del equipo y mejora la protección contra las sobretensiones (Short, 2004).

## **2.4 CABLES DE POTENCIA ENVEJECIMIENTO Y DEGRADACIÓN**

Como cualquier otro sistema, un sistema de cable de potencia envejece a medida que avanza el tiempo. El envejecimiento es responsable de los cambios en las propiedades de aislamiento debido a las tensiones eléctricas, térmicas, mecánicas y ambientales aplicadas a los componentes del sistema de cable con el tiempo. Un ejemplo de envejecimiento es la oxidación del material aislante. En casos prácticos, puede haber uno o más mecanismos de envejecimiento que podrían ser dependientes entre sí. La trayectoria exacta en la que el sistema de cable envejece, degrada y falla depende de varios factores tales como voltaje, tensiones térmicas, mantenimiento, tecnología del sistema de cable y entorno (Hernández, 2008).

Con el tiempo, los mecanismos de envejecimiento contribuyen al proceso de degradación y finalmente llevan al sistema de cable a fallo o avería. Debido a que la principal razón por la que los cables PILC fallan es que la vaina externa está agrietada o corroída, permitiendo la penetración de la humedad, la discusión sobre esta sección se basa principalmente en el envejecimiento, degradación y descomposición de cables con aislamiento polimérico extrudido (Hernández, 2008). Se presta especial atención al aislamiento XLPE ya que representa el 35,4% del cable total instalado, lo que lo convierte en el material de aislamiento más común. Además, como se mencionó anteriormente, el uso del cable PILC está disminuyendo; El antiguo cable HMWPE está siendo reemplazado por un cable nuevo, los mecanismos de envejecimiento del cable TRXLPE son algo similares al cable XLPE, y los mecanismos de envejecimiento de los cables EPR todavía no son tan bien entendidos como los de los cables XLPE.

La presencia de descarga parcial dentro del aislamiento a granel de un sistema de cable implica la presencia de árboles eléctricos. Debido a la descarga parcial, los árboles eléctricos

aumentarán su tamaño y seguirán propagándose a través del aislamiento. Esto reduce la resistencia a la rotura, llevando eventualmente a una avería eléctrica (Hernández, 2008).

La avería en el aislamiento polimérico del cable es siempre un acontecimiento catastrófico. En otras palabras, el evento es irreversible y destructivo. Por lo general resulta en un estrecho canal de ruptura entre los electrodos. Todos los procesos de descomposición en polímeros son impulsados por energía eléctrica y en última instancia térmicos en el sentido de que el canal de descarga implica al menos la fusión y probablemente la carbonización y vaporización del material (Hernández, 2008).

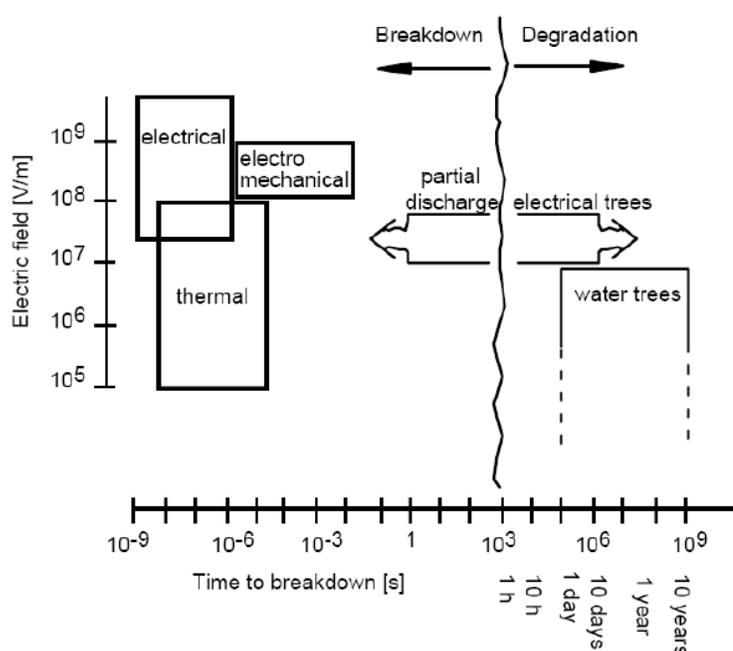


Figura 2.4. Tiempo y campos eléctricos en los que están operativos diversos mecanismos de interrupción eléctrica (Hernández, 2008).

(Dissado y otros, 1992) ha presentado la relación entre los mecanismos de degradación de bajo nivel como los árboles de agua y los árboles eléctricos y los procesos de degradación de forma gráfica. Esto se muestra en la Figura 2.4. Sin embargo, la distinción entre las etapas de degradación y desglose no está clara. Como se ha mencionado anteriormente, se supone que el mecanismo de descomposición ha comenzado sólo después de la presencia de descargas parciales. La Figura 2.4 también muestra que existe una superposición entre los mecanismos de

interrupción eléctrica y térmica; debido a que en algunas situaciones un árbol de agua puenteando el aislamiento podría causar una ruptura térmica sin la presencia de descargas parciales. Sin embargo, esta situación es bastante infrecuente y se acepta generalmente que más del 90% de los fallos de aislamiento polimérico del cable siguen en cierta medida los procesos de degradación y descomposición mostrados en la Figura 2.4 (Hernández, 2008).

#### 2.4.1 Características de los Cables XLPE

- El rendimiento eléctrico es excelente. La resistencia a la rotura dieléctrica y la resistividad de volumen son altas, y la tangente de pérdida dieléctrica y la constante dieléctrica son ambas bajas (Toshikatsu y Greenwood, 1983).
- La resistividad térmica es baja, los cables XLPE-aislados pueden funcionar continuamente a una temperatura máxima de 90 °C, porque tienen características excelentes del envejecimiento del calor (Toshikatsu y Greenwood, 1983). Esto conduce a una mayor capacidad de transmisión de potencia para cables XLPE que para cables PE no reticulados.
- Son del tipo seco. Los problemas relacionados con el aceite, tal como se podría prever en los cables de papel impregnados de aceite (accidentes de fugas de aceite y degradación del aislamiento (Toshikatsu y Greenwood, 1983), que podrían ocurrir en caso de pérdida de aceite o flujo hacia abajo), no presentan problemas con el agrietamiento de las vainas de plomo debidas a la vibración ya la expansión y contracción termal.
- Son químicamente estables.
- Son fáciles de empalmar y terminar.

Como se ha indicado anteriormente, los cables con aislamiento XLPE tienen excelentes características, pero por otro lado tienen algunas deficiencias como se describe a continuación:

- Su aislamiento por naturaleza es más grueso y consecuentemente más grande en radio que los actuales cables aislados de papel (Toshikatsu y Greenwood, 1983).

- Son inferiores en características de temperatura a los cables aislados con papel impregnado de aceite (Toshikatsu y Greenwood, 1983).
- Los efectos de la permeación del agua en el aislamiento siguen sin resolverse.
- El polietileno reticulado no es tan resistente a la corona como el papel impregnado de aceite (Toshikatsu y Greenwood, 1983). A este sentido, incluso EPR es superior.

#### **2.4.2 Defectos en el Aislamiento de Cables XLPE y sus Problemas Asociados**

Un cable aislante sólido XLPE, a pesar de que ha tenido mucha experiencia en servicio, es un cable que se debe mejorar (Toshikatsu y Greenwood, 1983). Como hay más de 160.000 km de cables de potencia XLPE enterrados a voltajes superiores a 15 kV en los Estados Unidos, se han hecho muchos estudios de sus propiedades dieléctricas tanto en ambientes húmedos como secos.

Existen abundantes teorías sobre los mecanismos de ruptura dieléctrica de tales cables, pero está claro que los voltajes de ruptura alcanzados son sustancialmente menores de lo que se anticiparía por extrapolación a partir de los resultados de laboratorio en muestras delgadas. La tensión de ruptura a corto plazo del aislamiento XLPE es extremadamente alta, superando los 800 kV/mm, pero los cables XLPE reales ofrecen valores mucho menores de avería. Se cree que esto se debe a imperfecciones en el cable (Toshikatsu y Greenwood, 1983).

Los cables extruidos considerados aquí difieren de los bien conocidos cables con aislamiento laminado, donde el dieléctrico se aplica en capas delgadas desde el interior hacia fuera. Un defecto en una de las capas tiene un efecto sobre la calidad total del dieléctrico. En un cable extruido el dieléctrico se aplica a lo largo, una pared de aislamiento completa se fabrica de una sola vez. Dichos cables sólidos están más sujetos a deterioro y descomposición, que pueden comenzar desde los defectos más pequeños que los cables con revestimiento. Una imperfección fatal puede ocurrir en un punto solamente, mientras que el resto del aislamiento está sano. La aplicación longitudinal del aislamiento conduce así a defectos aislados y provoca las características típicas de los dieléctricos extruidos. Cuando se prueban a alto voltaje, los valores de ruptura se encuentran dispersos apreciablemente tanto en voltaje como en los sitios

de ruptura (Toshikatsu y Greenwood, 1983). Allí los defectos se pueden llamar "macro-defectos", se pueden eliminar en gran medida mejorando los actuales procesos de fabricación y manipulación de cables. Hay otros tipos de defectos que son considerados "micro-defectos". Estos defectos han recibido atención recientemente por las siguientes dos razones principales:

1. Los macro-defectos se minimizan ahora mediante la introducción de nuevas técnicas, tales como sistemas cerrados completamente limpios de flujo de material para eliminar la inclusión de sustancias extrañas, un proceso de extrusión simultánea de tres capas para reducir las asperezas de las capas semiconductoras al aislamiento, Control de operación para suprimir la formación de macro-huecos en el aislamiento, y así sucesivamente (Toshikatsu y Greenwood, 1983).
2. Existe una tendencia de que los cables dieléctricos extruidos reemplacen los cables aislados con papel impregnados con aceite a voltajes más altos. Con el fin de lograr los cables de alta tensión XLPE, debe prestarse atención a lo que se llama "micro-defectos" (Toshikatsu y Greenwood, 1983).

Es difícil definir rigurosamente macro-defectos y micro-defectos. Tal vez la línea divisoria se encuentra a unos pocos cientos de micras (Toshikatsu y Greenwood, 1983). Algunas causas del estrés local se presentan:

- Imperfecciones de fabricación: tiende a aumentar el estrés local que conduce a un fracaso inicial o mayores tasas de envejecimiento (Hampton, 2016).

1. Cavidades
2. Protuberancias de las capas semiconductoras
3. Contaminantes en el aislamiento (metálicos y no metálicos)
4. Mala aplicación de material semiconductor

- Mala mano de obra: tiende a incrementar el estrés local que conduce a un fracaso temprano a tasas más altas de envejecimiento (Hampton, 2016).

1. Cortes o contaminación interfacial en accesorios
2. Falta de componentes o conexiones aplicados
3. Desalineación de los accesorios

- Entorno húmedo: tiende a reducir el estrés local después de la entrada de agua (ya sea por migración normal a través de materiales poliméricos o roturas en sellos o envolturas metálicas) (Hampton, 2016):

1. Lazo de corbata
2. Árboles de agua ventosos
3. Altas tasas de corrosión

- Entorno agresivo: tiende a reducir la rigidez dieléctrica. El impacto puede ser local si la influencia ambiental es local (Hampton, 2016).

1. Ataque químico (fugas de aceite del transformador, derrames petroquímicos, fertilizantes)
2. Inundación que crea un cambio de paso en las condiciones ambientales

Los defectos en los cables con aislamiento extruido que pueden conducir al fallo se muestran esquemáticamente en la Figura 2.5. Estos defectos incluyen protrusiones, cavidades, grietas, delaminación, interrupciones del escudo del conductor, árboles de agua y árboles eléctricos.

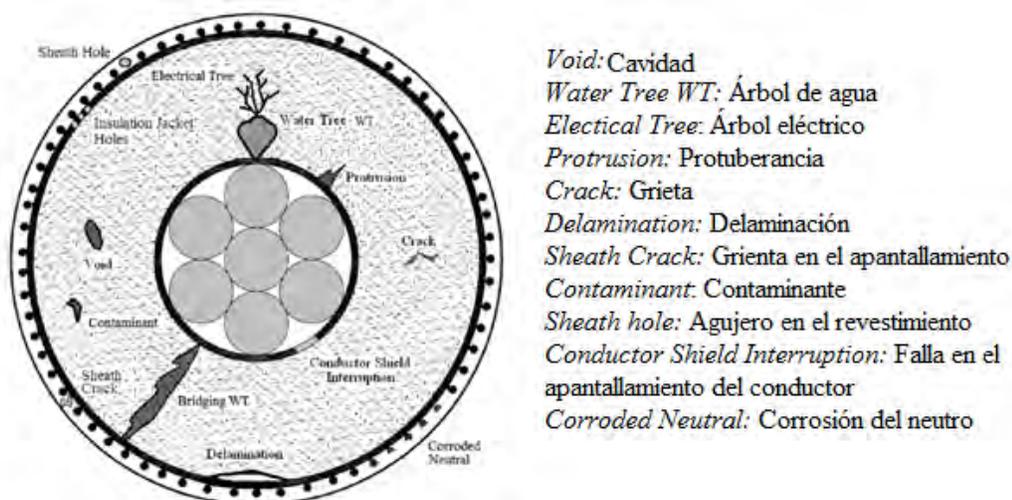


Figura 2.5. Defectos típicos del cable de potencia XLPE (Hampton, 2016).

Se considera que las imperfecciones más críticas en orden decreciente de importancia son (1) protrusiones en la protección del conductor, (2) contaminantes que comprenden partículas conductoras y partículas aislantes que tienen una conductividad significativamente

mayor que el aislamiento, y (3) huecos que se descargan durante la Aplicación de la tensión alterna (Toshikatsu y Greenwood, 1983).

#### 2.4.2.1 Cavidades

Lo que se denomina "*micro-void*", que se forman inherentemente durante el proceso de reticulación, especialmente por el método de curado por vapor (Toshikatsu y Greenwood, 1983). Una cavidad es un espacio potencial para una descarga interna que deteriora el aislamiento. Se considera perjudicial una cavidad igual o mayor que el que permite una descarga interna.

Las micro-cavidades se caracterizan por el hecho de que aparecen uniformemente sobre toda la longitud del aislamiento, lo cual es realmente diferente de las características de las "macro-cavidades", que se incluyen como manchas de un solo punto por accidente. Las micro-cavidades tienen una distribución radial que puede determinarse por la condición de la reticulación (Toshikatsu y Greenwood, 1983). En la Figura 2.6 se muestra una microfotografía de algunas micro-cavidades y su distribución radial.

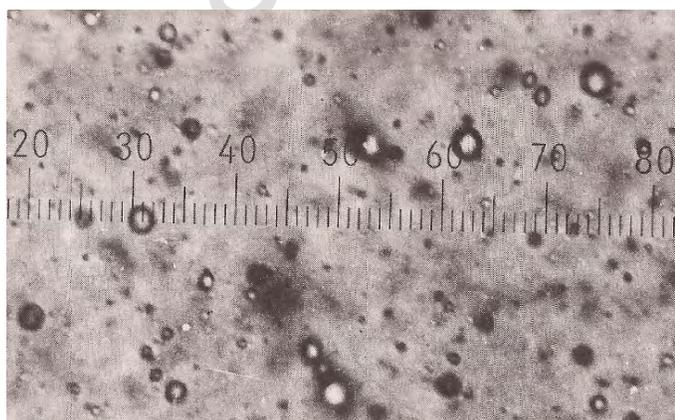


Figura 2.6. Fotomicrografía de aislamiento de cables XLPE. Foto tomada bajo microscopio de interferencia diferencial con la división más pequeña de 2,7 µm de ancho (Toshikatsu y Greenwood, 1983).

Las macro-cavidades a menudo se pueden encontrar con la ayuda de un detector de descarga. Se ha diseñado un equipo de exploración para detectar y localizar estos vacíos. Todavía no se ha establecido una correlación distintiva entre el tamaño de las cavidades, los

voltajes de ruptura o la vida útil de los cables extruidos. Existen datos clásicos frecuentemente citados que demuestran la coincidencia entre la vida útil del aislamiento de polietileno en presencia de cavidades y la vida útil del cable de polietileno (Toshikatsu y Greenwood, 1983).

#### 2.4.2.2 Protuberancias

Las asperezas de la capa semiconductor interna (blindaje del conductor) e incluso de la capa semiconductor externa (blindaje de aislamiento) de los cables PE y XLPE pueden producir, cuando están energizados, un campo eléctrico lo suficientemente alto para iniciar un camino de ruptura dendrítico llamado árbol, Conducen a la avería final del aislamiento del cable (Toshikatsu y Greenwood, 1983). Hay tres tipos de materiales semiconductores para estas capas:

1. Cinta semiconductor de tela.
2. Polietileno semiconductor o polietileno reticulado.
3. Copolímero de etileno vinil acetato (EVA) semiconductor.

Todos ellos contienen normalmente negro de carbón (polvo fino de carbono) para obtener sus características semiconductoras. La cinta de tela es inferior a los polímeros con capas de carbono, ya que la primera capa posee por su naturaleza un borde rizado, que puede ser un punto de partida fácil para el árbol. Además, se adhiere mal al aislamiento y no puede liberarse de huecos que pueden precipitar descargas internas (corona). Tales descargas internas pueden dar lugar a lo que generalmente se denomina "deterioro corona" del aislamiento a través de la iniciación del árbol (Toshikatsu y Greenwood, 1983). La Figura 2.7 muestra árboles que crecen en ambas capas semiconductoras de un cable XLPE. Se consiguió una mejora utilizando cintas semiconductoras de butilo o nailon semi-curado que minimizan los espacios de extremo.

Con el fin de eliminar estos defectos en los sistemas de aislamiento de cables XLPE de manera más completa, se diseñó la capa de blindaje polimérica semiconductor extruida mencionada anteriormente para reemplazar las cintas, especialmente para cables de alto voltaje de (66 a 77) kV y superiores. Esta práctica se ha vuelto cada vez más popular, incluso para las clases de tensión más baja de cables extruidos. Se espera que proporcione superficies lisas y sin protrusión. Puede ser el avance tecnológico que abre la era de los cables XLPE de alto voltaje e

incluso extra alta tensión. Se refiere apropiadamente como la segunda generación de cables dieléctricos sólidos (Toshikatsu y Greenwood, 1983).



Figura 2.7. Fotografía de árboles generados a partir de asperezas alrededor de capas semiconductoras de un cable XLPE (Toshikatsu y Greenwood, 1983).

#### 2.4.2.3 Sustancias Contaminantes

Se sospechaba que los contaminantes en el aislamiento del cable reducirían el voltaje de ruptura a corto plazo y deteriorarían el aislamiento alrededor de ellos, acortando así la vida útil del cable. Pero se reconoció que era extremadamente difícil averiguar cómo estos contaminantes inician la degradación (Toshikatsu y Greenwood, 1983). Contaminantes como el vidrio, la madera y el acero estaban incrustados en polietileno. El tamaño de los contaminantes no era tan pequeño como para exagerar su efecto: eran de (0,7 a 1) mm de largo y de (0,1 a 0,2) mm de diámetro. El radio de los puntos de tales contaminantes similares a agujas no era totalmente controlable, pero era inferior a 5  $\mu\text{m}$ . El polietileno puede estar contaminado durante:

(a) Proceso de fabricación del material, (b) Proceso de transferencia, (c) Proceso de mezcla y (d) Proceso de extrusión.

Como etapa siguiente, se ha desarrollado un nuevo sistema limpio total para la fabricación libre de contaminación. Un contenedor de metal se puede utilizar para la entrega de materias primas de un fabricante. Pero incluso en este sistema cerrado, es aconsejable para el control de calidad para comprobar el compuesto XLPE para la contaminación. Debe observarse que el uso de un detector de metales y una malla fina en un extrusor puede excluir los contaminantes hasta cierto grado (Toshikatsu y Greenwood, 1983).

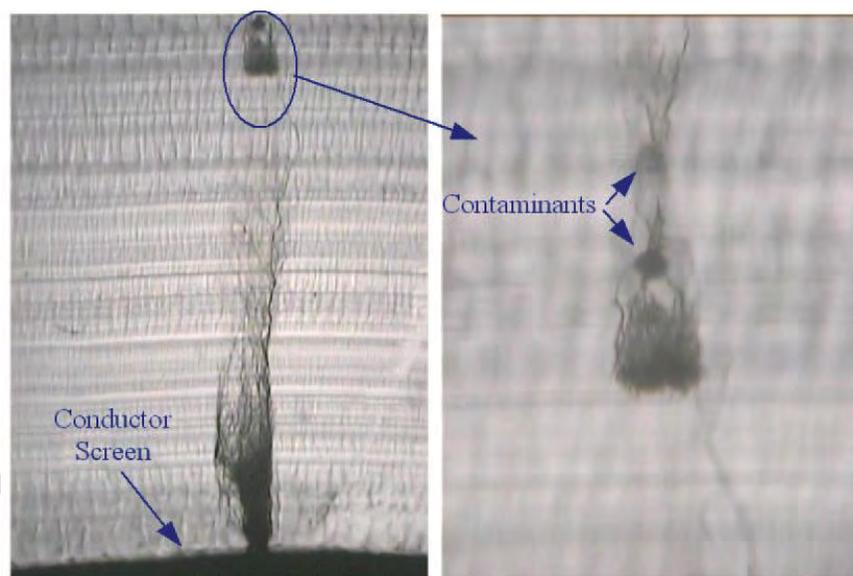


Figura 2.8. Los árboles eléctricos (ET) están uniendo dos contaminantes y otro ET está emanando de la pantalla del conductor (Mashikian y Szatkowski, 2006).

#### 2.4.2.4 Degradación Eléctrica

Los defectos más peligrosos en el aislamiento polimérico son causados por la degradación eléctrica. Las descargas parciales, los árboles eléctricos (ET) y los árboles de agua (WT) son los mecanismos más importantes. La degradación eléctrica afectará el aislamiento local y aleatoriamente. La degradación eléctrica no afecta a toda la longitud del cable, como ocurre con la degradación térmica. El defecto que conduce al desglose final será generalmente un fenómeno local (Hyvönen, 2008). La baja intensidad del campo eléctrico y el largo tiempo

de desarrollo son comunes para los mecanismos de degradación eléctrica en los cables de media tensión.

#### 2.4.2.5 Degradación de Árboles de Agua.

La mayoría de los cables XLPE aislados instalados en el suelo están expuestos a la humedad y al estrés eléctrico como resultado son susceptibles a la degradación debido a los árboles de agua. Los árboles de agua se encuentran generalmente para iniciar y crecer en aislamiento XLPE expuesto a un campo eléctrico alternativo y la humedad. Las impurezas dentro del material aislante aumentarán el riesgo de la iniciación del árbol de agua (Hyvönen, 2008). Pequeños defectos en forma de árbol aparecen dentro del aislamiento y crecen en la dirección del campo eléctrico. La presencia de árboles de agua en el interior del aislamiento provoca la reducción de la resistencia a la rotura eléctrica del sistema de aislamiento de cables. Los árboles de agua son difusos y borrosos y dan la impresión de desaparecer al secar (Hernández, 2008).



Figura 2.9. Árboles de agua en un cable con aislamiento XLPE (Hampton y otros, 2007)

La Figura 2.9 muestra árboles de agua (WT) que han crecido desde el blindaje de aislamiento hacia el blindaje del conductor, así como árboles dentro del aislamiento para un cable XLPE. Se observa que los árboles del agua tienen diversas formas y tamaños; El árbol de agua más largo está puentando el aislamiento. Existen dos tipos de árboles de agua:

**Arboles de agua lazo de corbata (*Bow-tie*):** Este tipo de árbol de agua crece desde un lugar específico dentro del aislamiento a granel; la ubicación es típicamente un vacío (Figura 2.10), contaminante soluble en agua u otro tipo de impureza. Los arboles de lazo de corbata alcanzan una longitud límite, en general crecen hasta varios cientos de micras ( $\mu\text{m}$ ) y tienden a crecer en dos direcciones de una forma simétrica que se asemeja a una corbata de la que derivan su nombre (Hernández, 2008). En la mayoría de los casos, los árboles de agua *bow-tie* no tienen un efecto significativo sobre la degradación en las bajas tensiones del campo eléctrico utilizadas en los cables de distribución. Sin embargo, tienen un papel significativo en la reducción de la fuerza de ruptura en comparación con los árboles de agua ventoso (Schurch y otros, 2014).

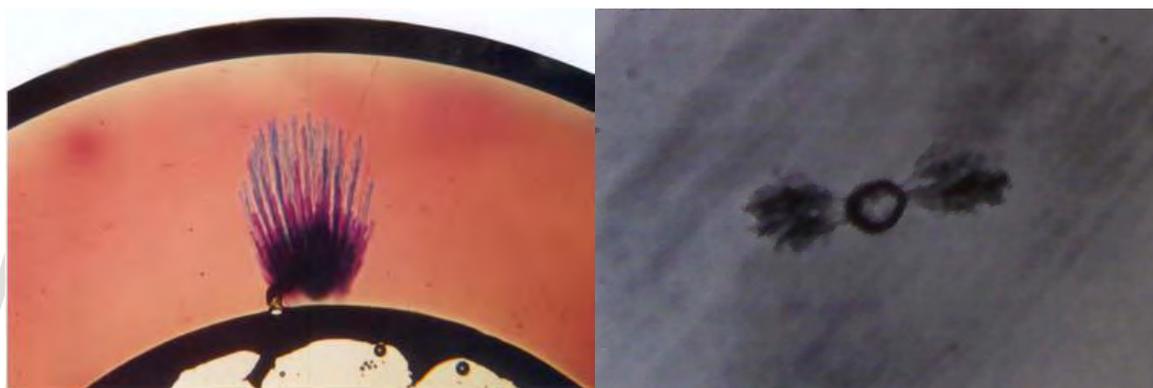


Figura 2.10. En el lado izquierdo un ejemplo de un árbol de agua ventoso (Hyvönen, 2008) que crece de la pantalla del conductor y en el lado derecho un ejemplo de árbol de agua lazo de corbata (Toshikatsu y Greenwood, 1983).

**Arboles de agua ventoso:** Este tipo de árboles se inician en las interfaces entre las pantallas semiconductoras y el aislamiento y crecen en la misma dirección que el campo eléctrico aplicado (Figura 2.10). Los árboles de agua ventoso normalmente necesitan un tiempo de iniciación más largo que los árboles de corbata. Los árboles de agua *Bow-tie* se saturan después de una cierta longitud, pero los árboles de agua ventoso crecen continuamente y pueden penetrar finalmente todo el grosor del aislamiento. Por lo tanto, los árboles de agua ventoso se consideran que causan una degradación más severa que los árboles de agua de corbata. Los

árboles de agua causan el realce local del estrés que puede ser la fase de la iniciación para un árbol eléctrico (Hyvönen, 2008).

#### 2.4.2.6 Modelado del Árbol de Agua.

En general, se acepta que la degradación del aislamiento del cable resultante de los árboles de agua tiene tres etapas principales: el inicio del árbol de agua, el crecimiento del árbol de agua, y el proceso de descomposición final. Aunque la iniciación y el crecimiento de los árboles de agua han sido intensamente estudiados, algunos de sus verdaderos mecanismos físicos siguen siendo desconocidos (Hernández, 2008).

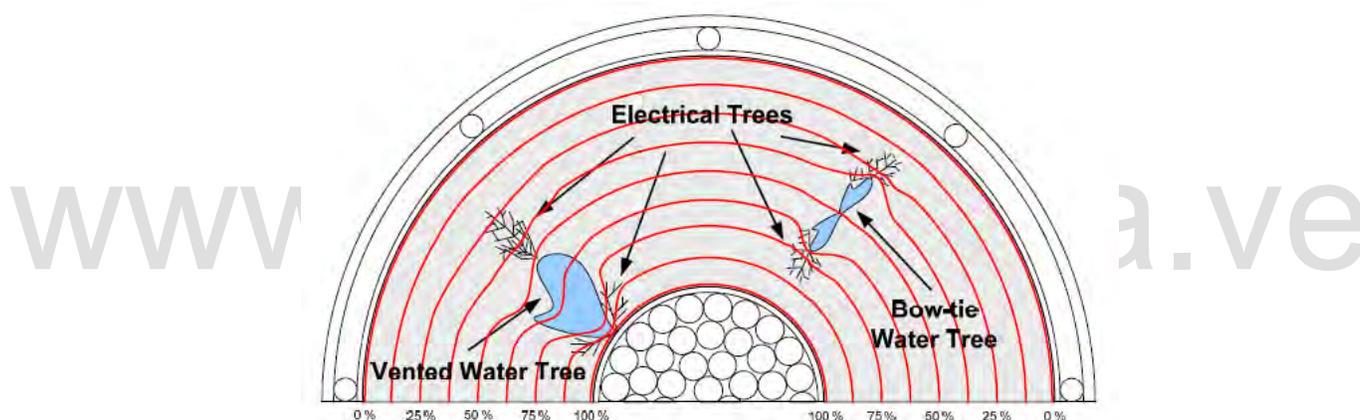


Figura 2.11. Áreas de mayor estrés, sitios de posibles árboles eléctricos (ET), creados por un árbol de agua (WT) (Hernández, 2008).

Los árboles de agua (WT) tienen significativamente mayor permitividad y conductividad que las secciones de aislamiento. La distribución de voltaje dentro del aislamiento del cable se realiza principalmente a través del acoplamiento capacitivo y, por lo tanto, está dictada por permitividad. Las áreas con árbol de agua tienen una capacitancia relativamente mayor y, por lo tanto, asumen una proporción menor de la tensión total, mientras que las áreas secas adyacentes de aislamiento se vuelven excesivamente tensas. Esto se representa en la Figura 2.11 por medio de líneas equipotenciales que muestran dos áreas de mayor tensión alrededor del WT.

A medida que el WT crece, aumenta el estrés en estas áreas. Debe existir, además, cualquier rugosidad inusual sobre la superficie de la pantalla o alguna otra inclusión en estas áreas, se genera un árbol eléctrico, especialmente durante las condiciones de sobretensión transitorias. Los árboles eléctricos así iniciados tienden a crecer cada vez que el estrés sobrepasa el nivel inicial de descarga parcial (PD) en la punta del ET (Mashikian y Szatkowski, 2006). Esto continúa hasta que, con relativa rapidez, la punta del ET se encuentra con el límite del WT, que representa una región de estrés bajo.

#### 2.4.2.7 Degradación de Árboles Eléctricos.

Un árbol eléctrico es una red de canales conductores finos que se propaga relativamente rápido a través del aislamiento causando fallas. Los árboles eléctricos pueden iniciarse a partir de un defecto, tal como un contaminante conductor, superficies erosionadas en una cavidad, los árboles de agua, o la iniciación puede tener lugar en las micro-cavidades del polímero si el incremento del campo eléctrico es suficientemente grande (Hyvönen, 2008). Hay dos fases de árbol eléctrico. Durante la fase de iniciación el movimiento de carga (0,1 a 0,2) pC de cada medio ciclo del voltaje aplicado gradualmente degrada el polímero conduciendo a la formación de una cavidad pequeña. La inyección de carga y electroluminiscencia causada por el aumento del campo eléctrico en el aislamiento desempeña un cierto papel durante la fase de iniciación de un árbol eléctrico. Cuando se somete a tensión de corriente alterna (AC) el polietileno emite luz visible y en los rangos ultra violeta (UV) por encima de un cierto voltaje umbral, debido a las cargas de polaridades positiva y negativa inyectadas en el polímero (Hyvönen, 2008). La luz UV provoca la degradación debido a las reacciones fotoquímicas, crea radicales libres y rompe los enlaces que conducen a la formación de una micro-cavidad y posteriormente un árbol eléctrico.

Durante la fase de crecimiento, se forma una red en forma de árbol de ramas a partir del vacío expandido debido a las descargas parciales dentro de las ramas. Las descargas de 5 pC son suficientes para causar la fuga térmica y la degradación térmica local extensa del polímero. La tasa de crecimiento de los árboles depende de la tensión eléctrica aplicada, la temperatura y las tensiones ambientales y mecánicas (Hyvönen, 2008).

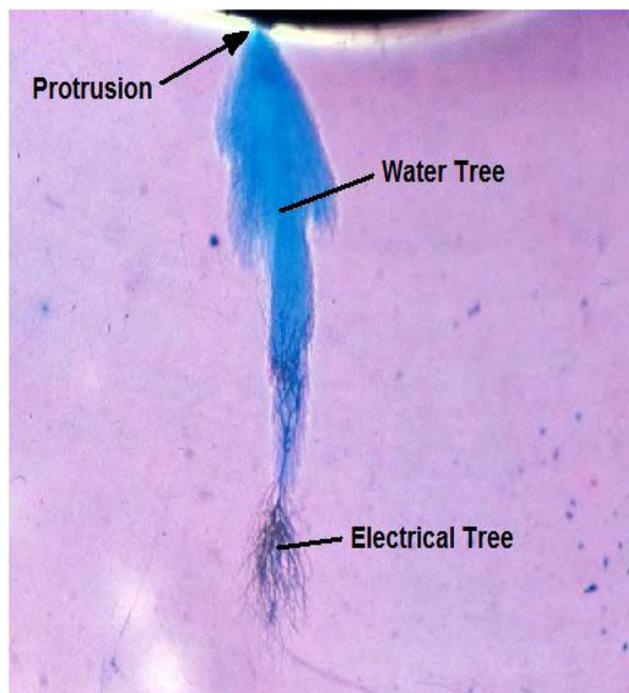


Figura 2.12. Árbol eléctrico que crece desde la punta de un árbol de agua (Hernández, 2008).

Durante la fabricación o instalación de un cable y sus accesorios, pueden formarse pequeñas cavidades o burbujas de gas dentro del aislamiento o en la superficie entre capas aislantes. Cuando la intensidad del campo eléctrico dentro de una cavidad o burbuja es lo suficientemente alta, se producirá una avería parcial. Los iones y electrones cargados positivos formados por la ruptura parcial chocarán sobre la superficie del aislamiento y comenzará la degradación del material aislante (Hyvönen, 2008). La rugosidad de la superficie de la cavidad o las impurezas dentro del aislamiento pueden conducir a una concentración de descargas parciales en un solo lugar. La concentración de descargas parciales conducirá a una región concentrada de degradación en el material aislante. Un conducto canal en forma de un arbusto o un árbol comienza a desarrollarse a través del aislamiento. Esta formación se conoce como árbol eléctrico. La ruptura total del aislamiento puede ocurrir cuando la rama de un árbol

eléctrico puentea los electrodos. La avería también puede ocurrir antes de que el árbol eléctrico puentee los electrodos (Hyvönen, 2008).

#### 2.4.2.8 Degradación por descarga parcial.

Las descargas parciales (PD) se define como "una descarga eléctrica que sólo puentea parcialmente el aislamiento entre conductores, y puede o no producirse junto a un conductor". Las descargas parciales ocurren cuando la intensidad del campo eléctrico local excede la rigidez dieléctrica del dieléctrico implicado, dando como resultado ionización y descomposición local. Pueden generarse descargas parciales de árboles eléctricos, huecos, cortes, grietas, protrusiones, delaminaciones y contaminantes con mala adherencia al material de aislamiento polimérico (Hernández, 2008).

La actividad de descarga parcial prolongada provoca la erosión del material aislante debilitando y rompiendo los enlaces químicos, lo que conduce a la formación de las escisiones. A medida que avanza el tiempo, las evaluaciones se hacen más profundas. Cuando se rompen los enlaces químicos, cambian las propiedades físicas y eléctricas del material aislante. Además, la descarga momentánea produce un plasma contenido, caliente e ionizado. Este plasma puede estar suficientemente caliente para carbonizar el material aislante circundante. El material carbonizado resultante es altamente conductor y concentra la tensión eléctrica en los extremos de la escisión que se alinean con el campo eléctrico. En consecuencia, el patrón de tensión eléctrica cambiante permite que el proceso continúe. Debido a que parte del aislamiento ahora está cortocircuitado eléctricamente hacia fuera, el aislamiento intacto restante ahora debe soportar un nivel creciente de tensión eléctrica. Con el tiempo, esto conduce a la formación de un árbol eléctrico y, por consiguiente, la degradación del árbol eléctrico. Estos árboles crecerán y completarán la ruta hacia la descomposición (Hernández, 2008).

## 2.5 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA MAXWELL SV®

Maxwell 2D *Student Version* (SV), es un paquete de software para el análisis de campos electromagnéticos en secciones transversales de estructuras. Maxwell SV utiliza el análisis de elementos finitos (FEA) para resolver problemas electromagnéticos bidimensionales (2D). Para analizar un problema, debe especificar la geometría, propiedades de material y excitaciones apropiadas para un dispositivo o sistema de dispositivos (Ansoft, 2002). El software Maxwell hace lo siguiente:

- Crea automáticamente la malla de elementos finitos requerida.
- Calcula iterativamente la solución de campo electrostática o magnetostática deseada y cantidades especiales de interés, incluyendo fuerza, par, inductancia, capacitancia y pérdida de potencia (Ansoft, 2002).
- Proporciona la capacidad de analizar, manipular y mostrar soluciones de campo.

Maxwell SV® analiza una sección transversal 2D del modelo, luego genera una solución para esa sección transversal, utilizando FEA para resolver el problema. Dividir una estructura en muchas regiones más pequeñas (elementos finitos), el cual permite al sistema calcular la solución de campo por separado en cada elemento. Cuanto más pequeños sean los elementos, más precisa será la solución final (Ansoft, 2002).

- Maxwell 2D es un programa que puede usarse para visualizar campos magnéticos y eléctricos, predecir fuerzas magnéticas, entre otros.

- Los circuitos magnéticos son difíciles de diseñar porque los materiales utilizados son no lineales y los campos no pueden ser confinados como electrones dentro de los cables, lo cual hace que este programa pueda ejecutar un proceso de diseño mucho más fácil (Ansoft, 2002).

En este trabajo de grado se utilizó la interfaz de solución *AC conduction* para todos los casos de estudio, el cual nos proporciona una gran variedad de elementos a calcular como es, el

campo eléctrico, indispensable para el análisis de su comportamiento en el aislamiento de cables de potencia, para observar su distribución y el impacto que los defectos causan en él.

## **2.6 SUMARIO**

En este Capítulo se ha agregado información fundamental para la comprensión del desarrollo a lo largo de la investigación, basándose con material obtenido en diversos trabajos relacionados a los cables de potencia, su historia, importancia de un sistema de potencia, fallas que se presentan en el aislamiento, efectos ambientales, otros. También una introducción al método en cual se basa el programa computacional Maxwell para la solución de problemas, el cual será usado en siguiente Capítulo.

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

## CAPÍTULO 3

# INTRODUCCIÓN A MAXWELL SV<sup>®</sup> Y MODELADO DEL CABLE DE POTENCIA

Este Capítulo revisa los fundamentos de distribución del campo eléctrico en los sistemas de cables de potencia. Se introduce al funcionamiento del simulador Maxwell SV<sup>®</sup> y el modelado básico de un cable de potencia.

### 3.1 COMPORTAMIENTO DEL CAMPO ELÉCTRICO EN MEDIOS DIELÉCTRICOS

Cuanta más uniformidad en un campo eléctrico, mejor el uso del dieléctrico. Un uso ideal sólo puede realizarse en el caso de un campo totalmente uniforme. Sin embargo, no es posible en la práctica. La existencia de no uniformidad, permite el aumento de la tensión eléctrica en el dieléctrico (Ravindra y Wolfgang, 2011). El aumento de la tensión eléctrica sobre el aislamiento (dieléctrico) más allá de una cierta magnitud crítica puede conducir a una avería parcial o total del material aislante. Sin embargo, uno de los aspectos prácticos más importantes de la ingeniería de alto voltaje es prevenir cualquier tipo de avería eléctrica del aislamiento y lograr una larga vida útil.

Para un buen diseño, se debe adquirir el conocimiento de la distribución de la tensión eléctrica en los materiales aislantes entre dos electrodos (Ravindra y Wolfgang, 2011). También ayuda a lograr un mejor uso de los materiales aislantes y por lo tanto reduce el tamaño total y el costo del equipo. El esfuerzo eléctrico admisible en el equipo está interrelacionado con la distribución total del campo eléctrico en el espacio entre los electrodos y la resistencia eléctrica del dieléctrico en uso.

Para nuestro primer caso de estudio se utilizará uno en particular, con el cual se hace más sencillo observar el comportamiento del campo eléctrico en los dieléctricos; el cual consta del modelado de un capacitor de placas paralelas como se muestra en la Figura 3.1.

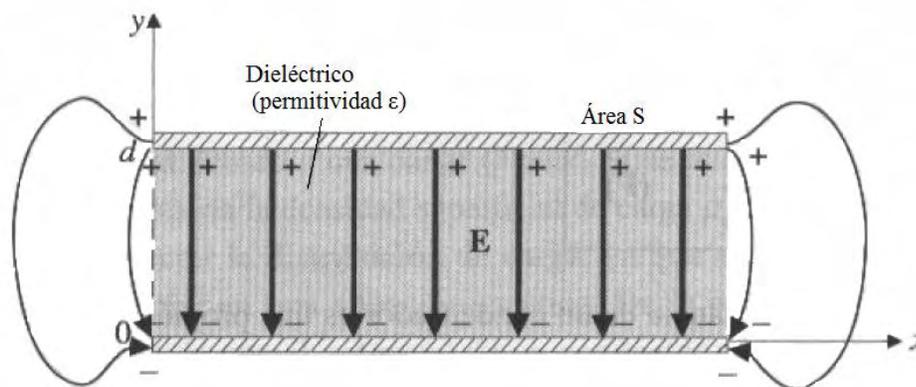


Figura 3.1. Corte transversal de un condensador de placas paralelas (Cheng, 1997).

### 3.1.1 Introducción al programa Maxwell y simulación del modelado del capacitor de placas paralelas.

Para acceder al panel de control de Maxwell, haga doble clic en el icono de **Maxwell SV**<sup>®</sup>. Aparecerá el panel de control de Maxwell (Figura 3.2). Si no, consulte las guías de instalación de Ansoft para obtener ayuda (Ansoft, 2002).

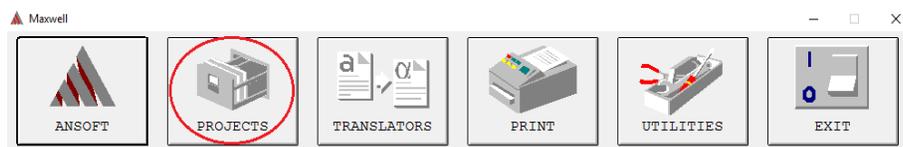


Figura 3.2. Panel de control de Maxwell SV.

Para ingresar al Administrador de proyectos, haga clic en **PROJECTS** del Panel de control de Maxwell (Figura 3.2). El Administrador de proyectos le permite crear y administrar productos Ansoft. Puede agregar nuevos directorios de proyectos, crear proyectos en directorios existentes y renombrar y copiar proyectos (Ansoft, 2002). Por defecto Maxwell asigna una carpeta específica en tu ordenador donde se guardarán tus proyectos (Figura 3.3).

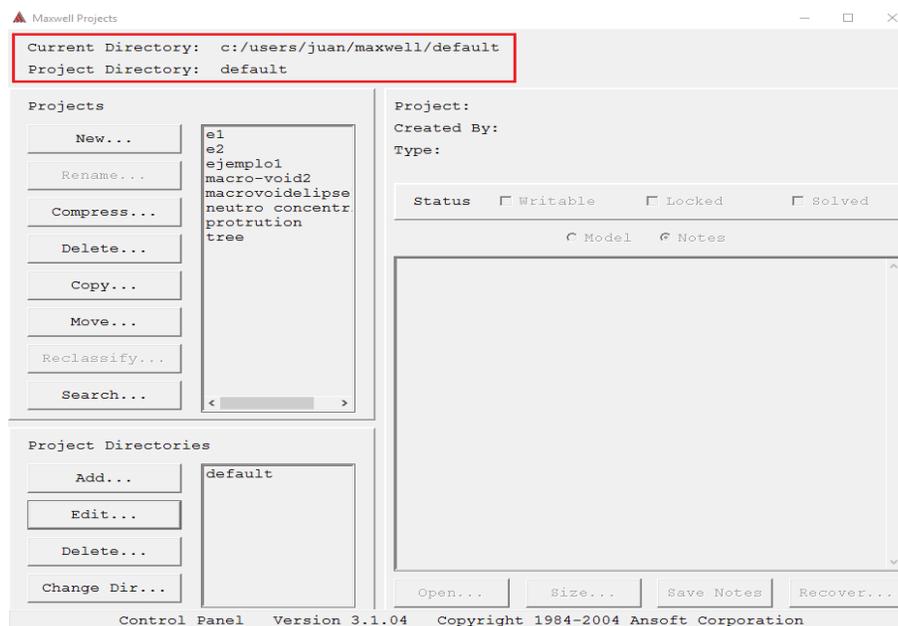


Figura 3.3. Administrador de proyectos en Maxwell.

Para crear un nuevo proyecto en el Administrador de proyectos, haga clic en *New...*  
 (Figura 3.4) Aparece la ventana Introducir nombre de proyecto y seleccionar tipo de proyecto.

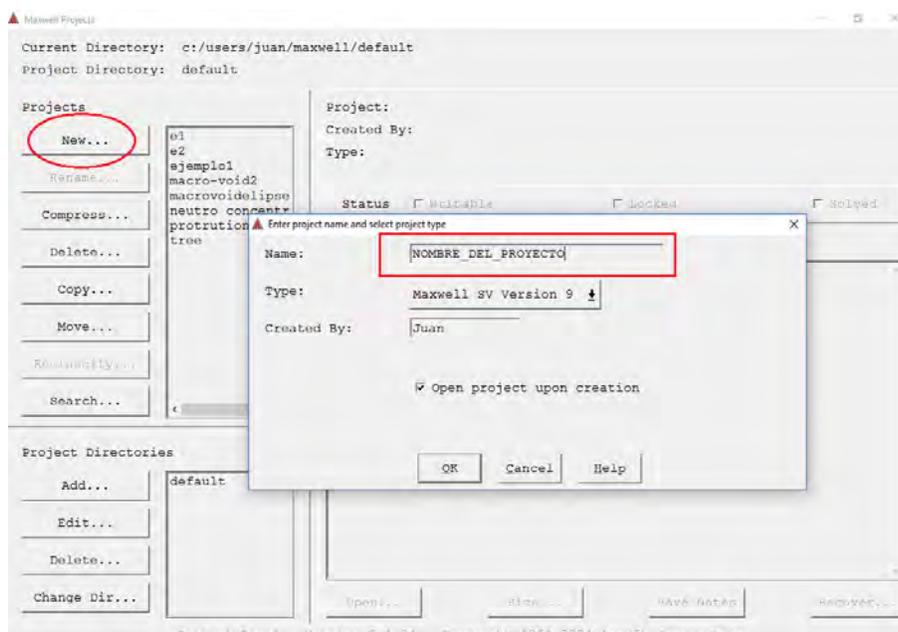


Figura 3.4. Crear nuevo proyecto en Maxwell.

Se abrirá el nuevo proyecto creado, ejecutando el simulador. Antes de empezar a dibujar su modelo, se debe especificar la interfaz en que se va calcular el campo. Para nuestro problema a resolver elegimos la opción **AC Conduction** y también definir el plano de dibujo (Figura 3.5).

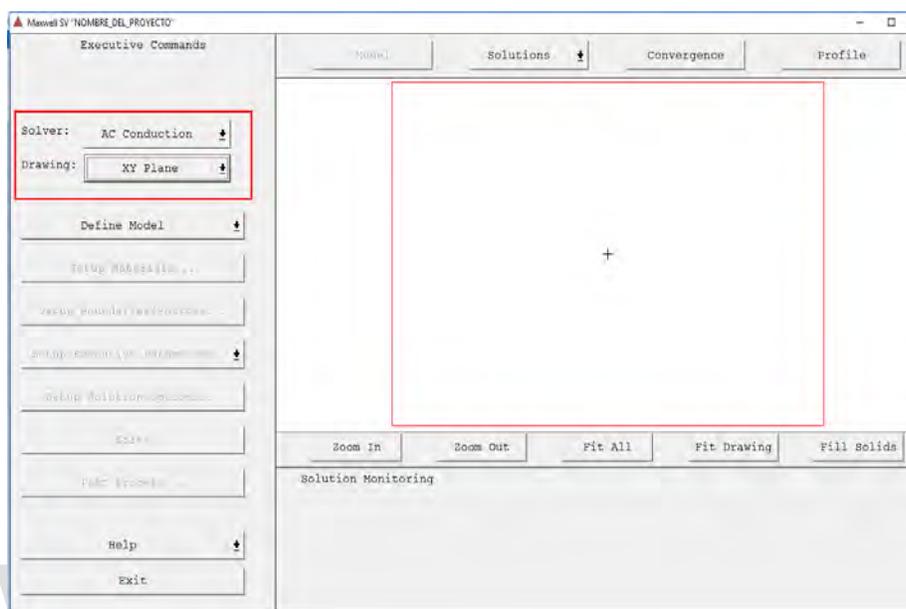


Figura 3.5. Menú de comandos ejecutivos en Maxwell.

Para dibujar el modelo geométrico se utiliza el modelador de Maxwell, que le permite crear estructuras 2D. Para acceder haga clic **Define Model > Draw Model**. Aparecerá el modelador 2D (Figura 3.6).

Con la barra de herramientas mostrada en la Figura 3.6 y sus distintas opciones se podrá realizar el modelado del capacitor de placas paralelas o bien sea la estructura que se quiera modelar. Una vez terminado el modelado nos vamos a la parte superior izquierda de la pantalla en la opción **File > Exit**, nos arroja una ventana en la cual nos pregunta guardar, darle clic en la opción **YES**.

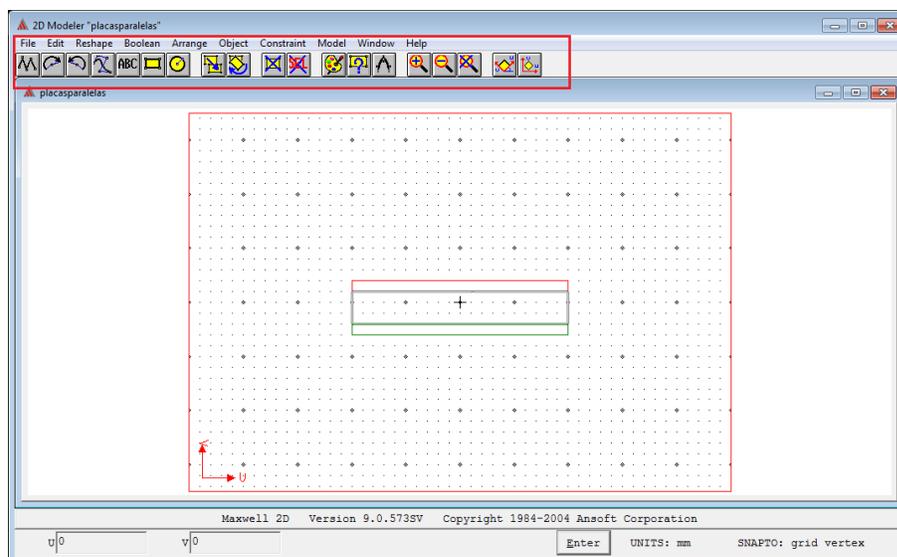


Figura 3.6. Modelado del capacitor de placas paralelas.

Una vez definida la estructura nos vamos a la siguiente opción. **Setup Materials** la cual nos sirve para agregar los distintos materiales de la estructura, escogemos nuestro material en la lista le damos en la opción **Assign** (Figura 3.7) con la cual se puede asignar el material a los objetos. Si el material que buscamos no se encuentra en la lista, podemos agregar un nuevo material, antes conociendo sus propiedades eléctricas para poder asignarlas; esto se podrá realizar en la opción **Material > Add**, (Figura 3.7). Por último, en la opción **Exit** y guardar.

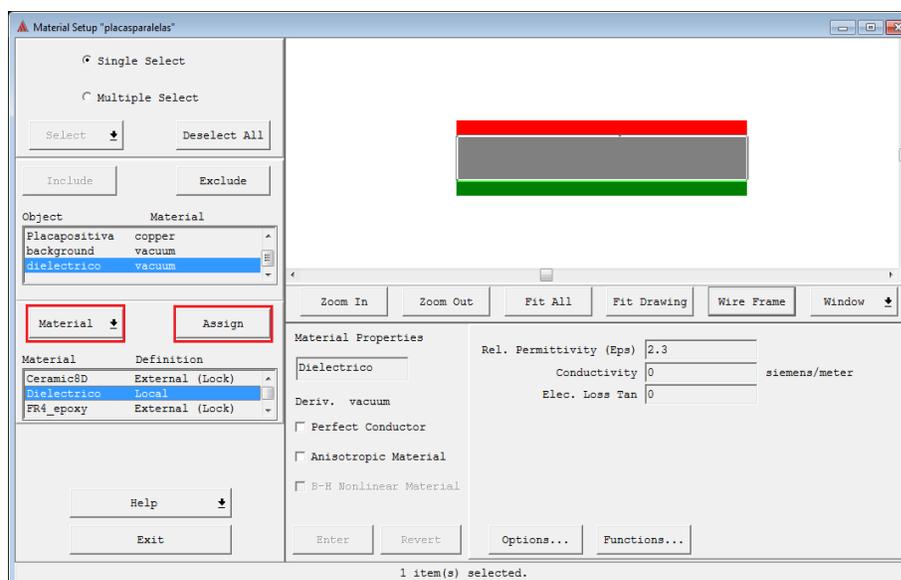


Figura 3.7. Configuración de los materiales.

Después de establecer las propiedades del material, el siguiente paso en la creación del modelo es definir las condiciones de los límites y las fuentes. Hacer clic en **Setup Boundaries/Sources**.

Ingresar en **Edit > Select > Object > By clicking** (Figura 3.8) esta opción nos servirá para elegir cada uno de los materiales, luego para poder agregar una fuente de voltaje nos vamos a la opción **Assign** (Figura 3.8). Para en el ajuste del voltaje en el plano de tierra solo habrá que agregar otra fuente de valor en 0 V. Por último, Clic **File > Exit**. Clic **YES**.

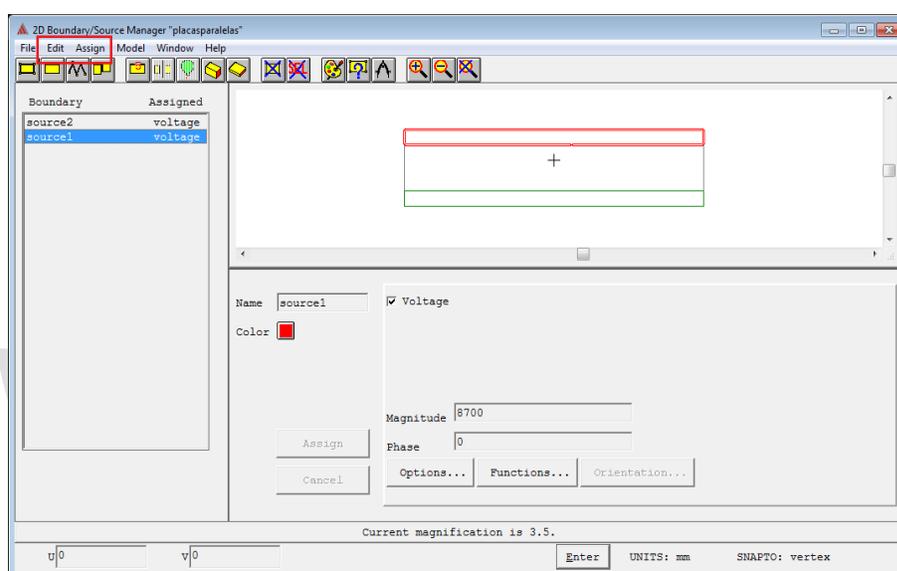


Figura 3.8. Administrador de límites y fuentes.

Maxwell 2D asigna automáticamente un conjunto de criterios de solución predeterminada después de asignar los límites y fuentes. Como resultado, una marca de verificación aparece automáticamente junto al botón **Setup Solution Options** (Figura 3.9) en el menú de Comandos ejecutivos. Puede generar una solución utilizando los criterios predeterminados seleccionando la opción **Solve** (Ansoft, 2002).

Para acceder y configurar las opciones de la solución, hacer clic en **Setup Solution Options**. Aparecerá la ventana solucionar configuración (Figura 3.9). Hacer clic en **Manual Mesh**.

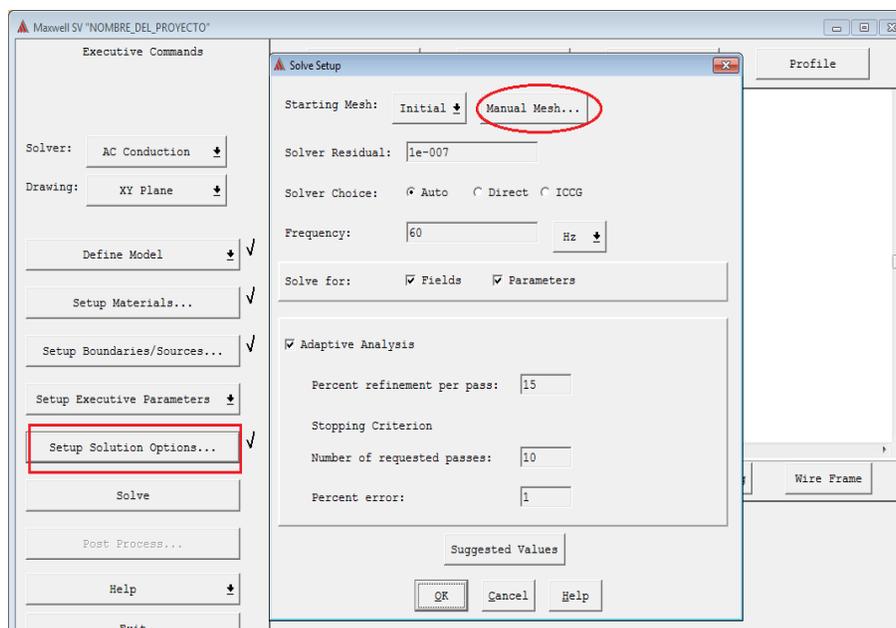


Figura 3.9. Opciones de configuración de la solución.

Primeramente, de debe generar la malla de inicio para este problema, se hace clic en **Mesh> Make**, por defecto Maxwell utilizará la malla gruesa que se genera por primera vez al iniciar el proceso de solución (Figura 3.10). Una vez generada, hacer Clic **File>Exit**. Clic **YES**.

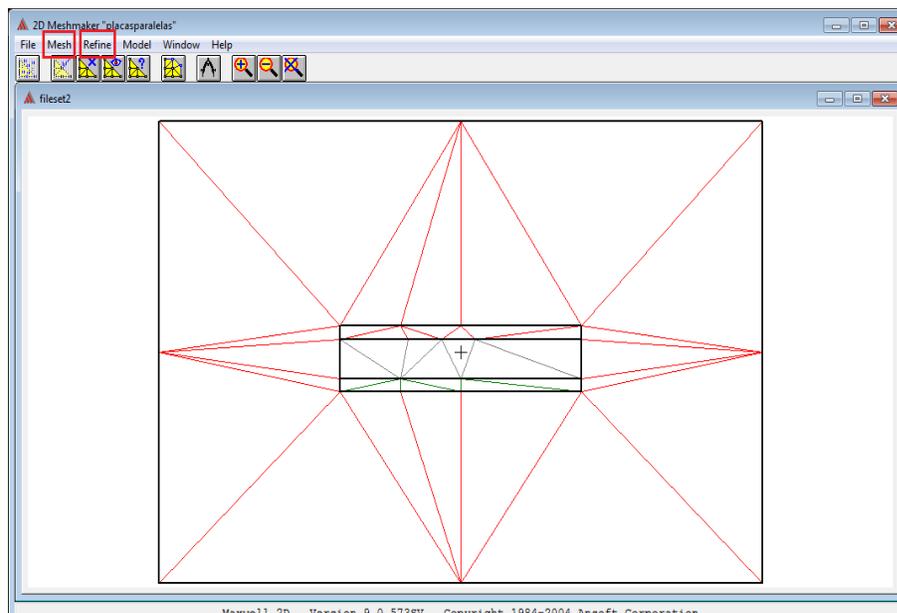


Figura 3.10. Malla de inicio predeterminada.

En la Figura 3.11 antes de salir se requiere elegir la opción **Current** necesario para luego poder refinar nuestra maya de inicio. Clic **OK**.

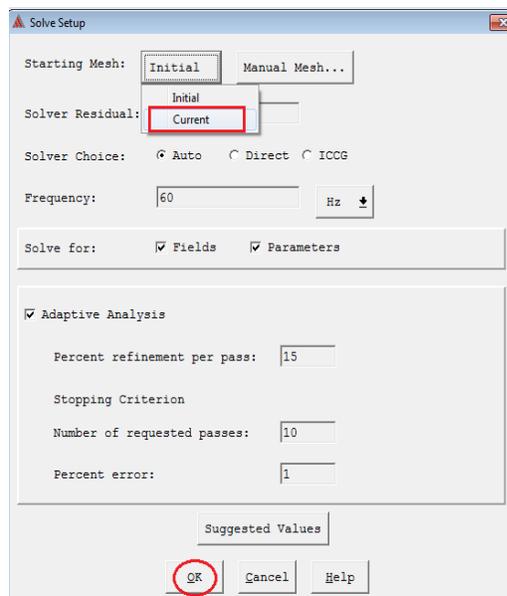


Figura 3.11. Opciones de configuración de la malla.

Para refinar aún más nuestra maya y obtener una mejor solución, nuevamente se debe ingresar en la **opción Setup Solution Options > Manual Mesh**. Hacer clic en **Refine** (Figura 3.12), podrá refinar la malla a gusto del usuario bien sea en una área u objeto específico con el número de triángulos que desee. Clic **File > Exit**. Clic **YES**

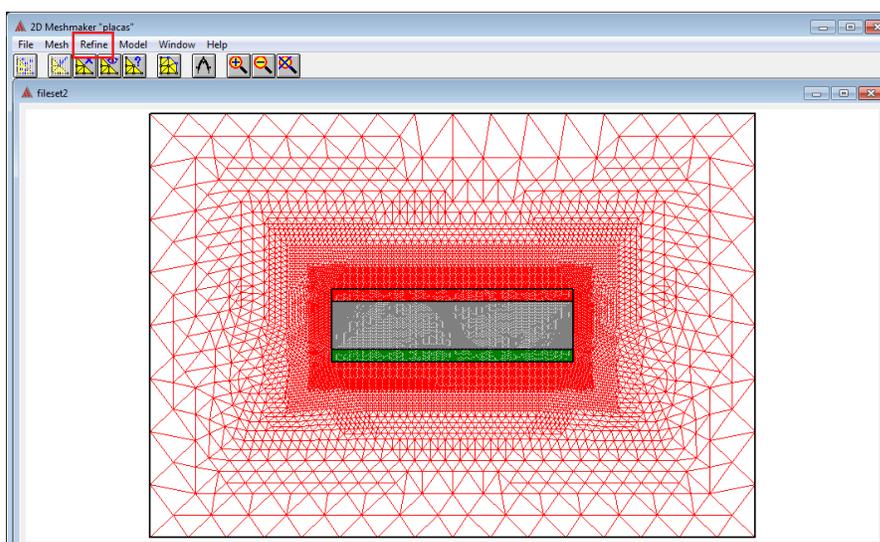


Figura 3.12. Generación de la malla refinada.

Ahora que ha configurado los parámetros de la solución, el problema está listo para ser resuelto. Para ejecutar la solución, haga clic en **Solve**. El proceso de solución comienza, y se debe esperar hasta que el programa genere una ventana de completado el proceso de solución.

**Nota:** Una vez generada una solución, el sistema no permite cambiar la geometría, las propiedades del material o las condiciones de contorno del modelo, a menos que primero elimine la solución, para generar una nueva al cambiar el modelo (Ansoft, 2002).

Luego que ha generado una solución para el problema, puede analizarlo utilizando las funciones de **Post Processing** de Maxwell 2D. Para el problema en solución queremos visualizar el comportamiento de la magnitud del campo eléctrico en la estructura, por lo tanto, hacer clic en **Plot > Field > Mag E (CmplxMag)** en toda el área de la superficie (Figura 3.13).

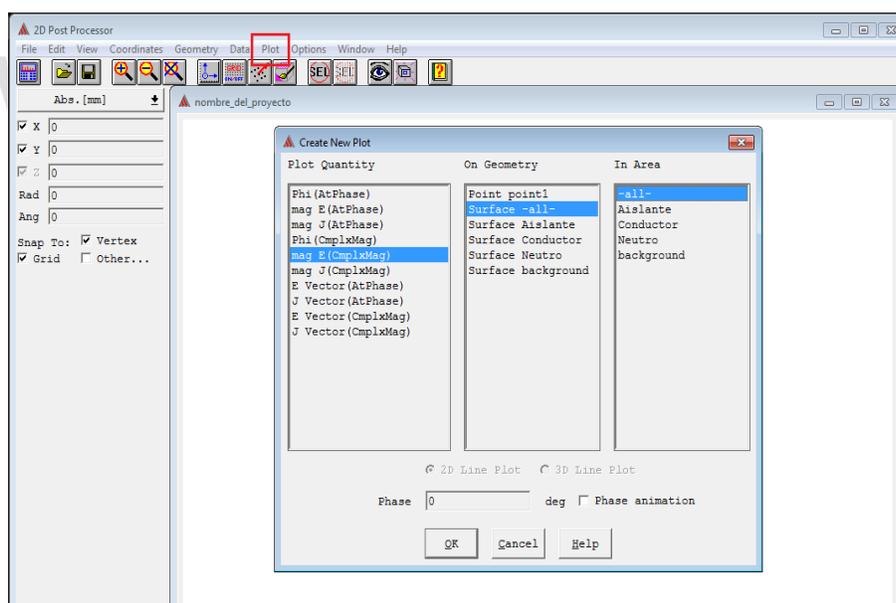


Figura 3.13. Creación del gráfico en 2D.

De forma predeterminada, Maxwell 2D configura un rango de diez divisiones automáticamente en base a la solución de campo eléctrico. Utilice el menú de procesamiento para editar los atributos. Puede cambiar el número de divisiones y el rango de este gráfico. Finalmente obtenemos la solución de la magnitud del campo eléctrico (Figura 3.14).

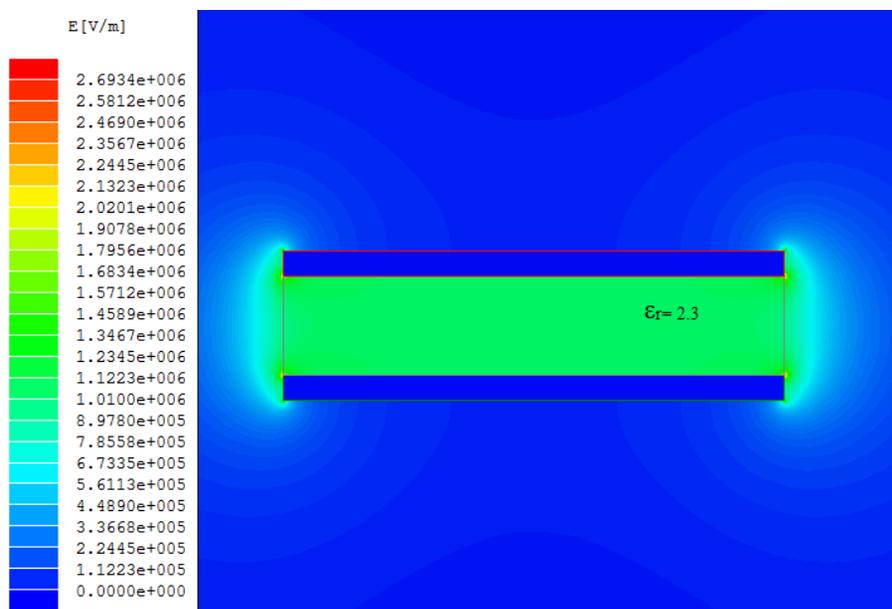


Figura 3.14. Magnitud del campo eléctrico.

En la Figura 3.14 se observa la magnitud del campo eléctrico dentro del dieléctrico es totalmente uniforme y constante (a través del dieléctrico). Se observa una ligera dispersión del campo eléctrico hacia el exterior, mejor conocido como “efecto de borde” el cual es suficientemente intenso en las proximidades de las puntas de cada placa, y por tanto es capaz de ionizar el aire que lo rodea convirtiendo el aire en un plasma conductor, haciendo que fluyan líneas de campo eléctrico entre placas. Sin embargo, si las placas de un área mucho mayor que la distancia que las separa, puede despreciarse el efecto de esas líneas exteriores y aproximar el campo entre las placas como uno entre dos planos paralelos de gran extensión.

Para hacer una comparación del valor obtenido por el programa Maxwell, se calcula la magnitud del campo eléctrico de manera teórica mediante la ecuación 3.1.

$$E = \frac{V}{d} \text{ [V/m]} \quad (3.1)$$

, donde V es el voltaje aplicado en y se escogió de un valor de  $V = 8700 \text{ V}$ ; d es la distancia entre placas, y se asumió de  $0.008 \text{ m}$ , lo cual nos da un valor para la magnitud del campo eléctrico de  $E = 1.0875 \cdot 10^6$ .

Por otro lado, el comportamiento de un sistema de aislamiento compuesto de dos o más dieléctricos, depende de la dirección de la interfaz dieléctrico-dieléctrico, con respecto a la dirección del campo eléctrico. La dirección de una interfaz podría ser longitudinal, perpendicular o diagonal (Ravindra y Wolfgang, 2011).

La Figura 3.15 muestra un condensador de placas paralelas con dos dieléctricos  $\epsilon_1$  y  $\epsilon_2$ , que forman una interfaz perpendicular (normal) en un campo uniforme a la dirección de las líneas de campo, es decir, a lo largo de la superficie equipotencial.

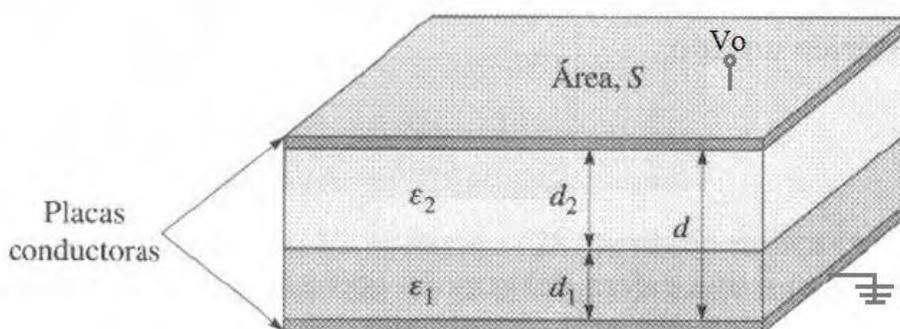


Figura 3.15. Capacitor de placas paralelas que contiene dos dieléctricos en los que su interfase es paralela a las placas conductoras (Hayt y Buck, 2006).

Para este caso supóngase la diferencia de potencial entre placas es  $V_0$ . Las intensidades de campo eléctrico en las dos regiones serán,  $E_1$  y  $E_2$  respectivamente, y son uniformes. Por lo tanto, de la ecuación 3.1 se desglosa que,  $V_0 = E_1 \cdot d_1 + E_2 \cdot d_2$ . La interfase del dieléctrico del campo eléctrico es perpendicular, en consecuencia, la densidad de flujo eléctrico ( $D$ ) en normal, puesto que no existen cargas libres en los dieléctricos perfectos que se están considerando,  $D_{N1} = D_{N2}$ , o igualmente  $\epsilon_1 \cdot E_1 = \epsilon_2 \cdot E_2$ . Finalmente eliminando  $E_2$  en la relación de  $V_0$ , nos queda la siguiente ecuación:

$$E_1 = \frac{V_0}{d_1 + d_2 (\epsilon_1 / \epsilon_2)} \quad [\text{V/m}] \quad (3.2)$$

, donde  $V_0$  es dado en Voltio,  $d_1$  y  $d_2$  en metro. Teniendo esto en cuenta, se procede a ingresar los datos y realizar las respectivas simulaciones con Maxwell SV, luego se hará la comparación con el valor teórico calculado y llegando a su análisis correspondiente.

Para este caso de estudio se tomará dos valores de dieléctrico, con un valor de 2.3 y 1.15 como se muestra en la Figura 3.16, y así observar el efecto que esto ocasiona en la magnitud del campo eléctrico. Para realizar la simulación se tomó un valor de  $V_0 = 8700$  V y las distancias  $d_1$  y  $d_2$  de 0.004 m cada una. Previamente calculado los valores teóricos mediante la ecuación 3.2, nos da para  $E_1 = 1.45 \cdot 10^6$  y el campo eléctrico  $E_2 = 7.25 \cdot 10^5$ .

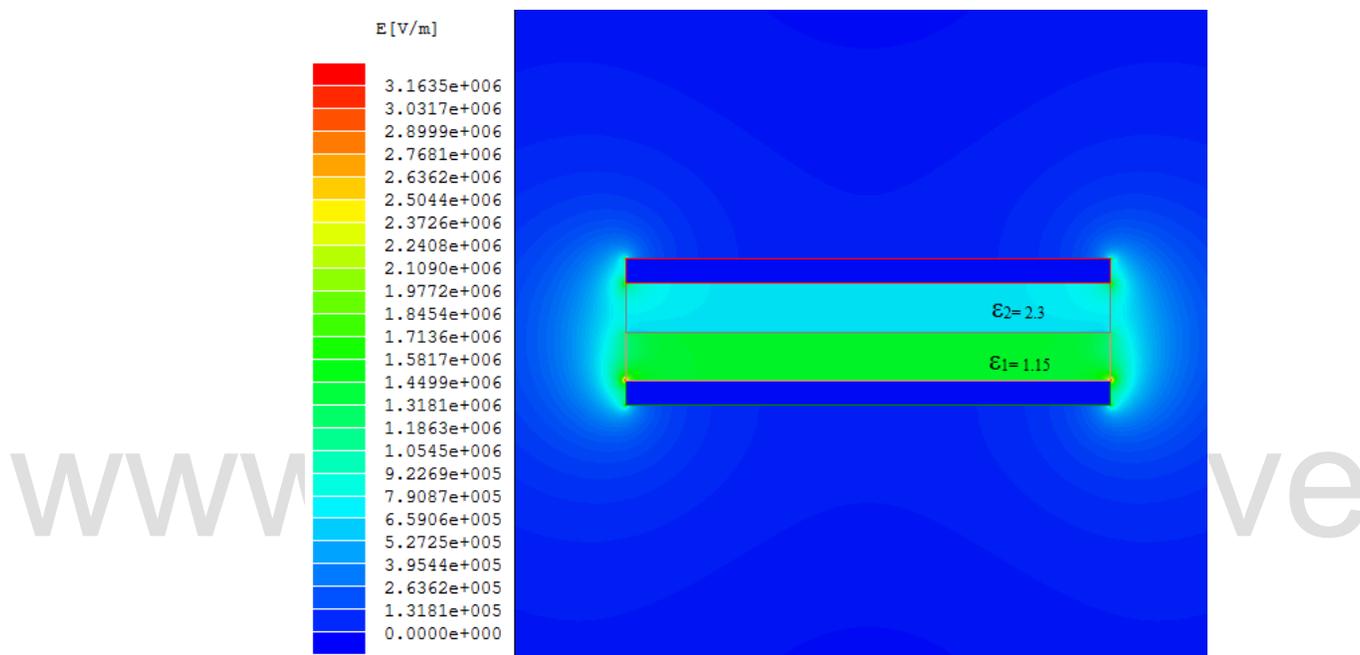


Figura 3.16. Capacitor de placas paralelas con interfase de dos dieléctricos.

Como se puede contemplar en la Figura 3.16 la magnitud del campo eléctrico es menor en el área donde se encuentra el dieléctrico de mayor permitividad ( $\epsilon_2$ ). Ya que la constante dieléctrica  $\epsilon_1$  es la mitad del valor de  $\epsilon_2$ , el campo eléctrico en esa área equivale a doble, como se observar en la Figura 3.16. Estos valores obtenidos por el simulador fueron comparados con los teóricos, los cuales se obtuvieron con la ecuación 3.2, nos damos cuenta que son de igual magnitud, por lo tanto, el programa es confiable.

En la siguiente simulación (Figura 3.17) no se varió el valor de  $\epsilon_2 = 2.3$ , y para  $\epsilon_1$  se aumentó ( $\epsilon_1 = 4.6$ ), con el mismo voltaje e igual separación entre placas del ejemplo anterior, y así poder observar el comportamiento de campo eléctrico en esta configuración.

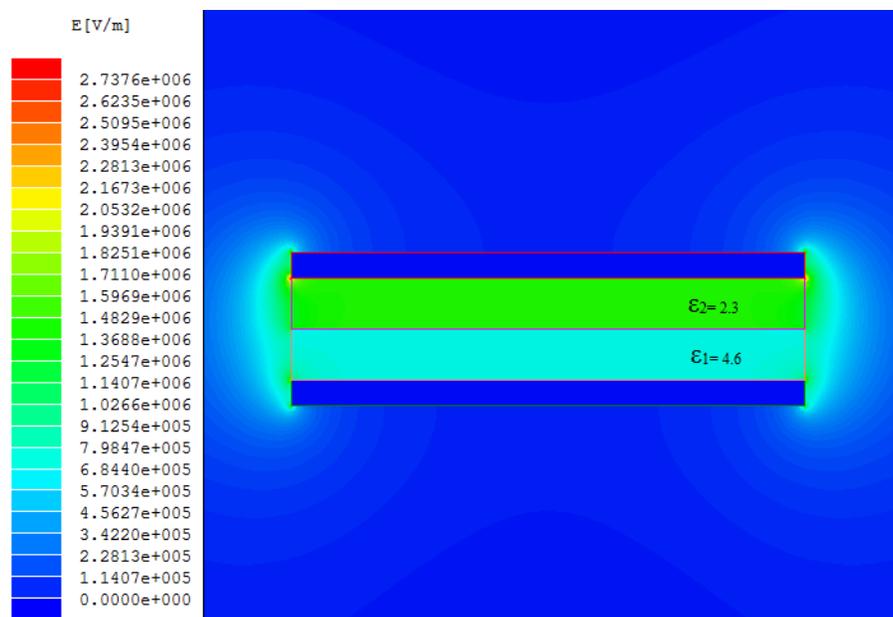


Figura 3.17. Configuración dieléctrico-dieléctrico.

En el arreglo de la Figura 3.17 se observa que allí el valor de campo eléctrico mayor se encuentra en el dieléctrico  $\epsilon_2$ , ya que en esta área la constante dieléctrica es menor, el valor para el campo eléctrico  $E_1 = 7.25 \cdot 10^5$  y para  $E_2 = 1.45 \cdot 10^6$ . Finalmente se llega a la conclusión que si al variar la permitividad ( $\epsilon$ ) en un área determinada, se modifica la magnitud del campo eléctrico que se encuentra allí, su valor dependerá si la constante dieléctrica aumenta o disminuye.

### 3.2 CAMPOS ELÉCTRICOS EN CABLES DE POTENCIA.

El estudio de los campos eléctricos es fundamental para entender el comportamiento del aislamiento eléctrico utilizado en los cables eléctricos. La construcción típica de un cable de potencia XLPE suele ser modelado como un sistema de cilindros coaxiales el cual se ilustra en la Figura 3.18, esta configuración proporciona una representación útil de la distribución del campo eléctrico en un cable de potencia.

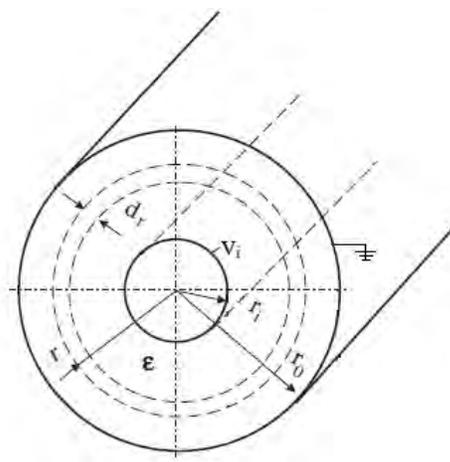


Figura 3.18. Configuración de un sistema de cilindros coaxiales (Ravindra y Wolfgang, 2011).

El campo eléctrico para una configuración coaxial es no lineal (Figura 3.19) y está representado para cualquier punto del material aislante por la ecuación (3.3).

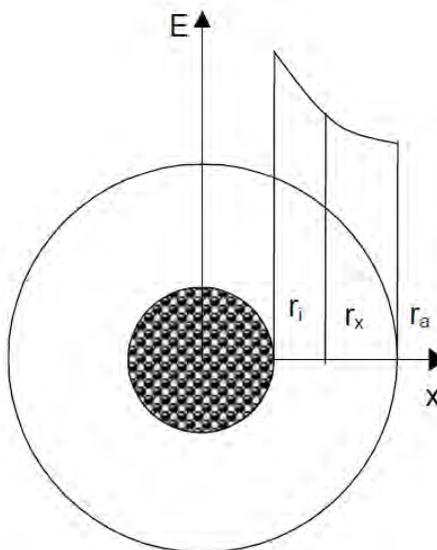


Figura 3.19. Distribución del campo eléctrico dentro del XLPE de un cable de potencia (BRUGG Cables, 2006).

$$E_x = \frac{V}{r_x \cdot \ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right)} \text{ (V/m)} \quad (3.3)$$

donde:

$E_x$ : representa la magnitud del campo eléctrico en (V/m); V: voltaje RMS entre los electrodos dado en (V);  $r_x$ : distancia radial entre los electrodos en (m);  $r_a$ : radio exterior del aislamiento en (m);  $r_i$ : radio interior del aislamiento en (m).

### 3.3 MODELADO DEL CABLE DE POTENCIA Y CÁLCULO DE LA MAGNITUD DEL CAMPO ELÉCTRICO MEDIANTE EL SIMULADOR MAXWELL SV®.

Para el modelado del cable de potencia es necesario obtener el tamaño del cable que se usará en la simulación, para nuestro caso de estudio se tomó como referencia un cable de potencia EPR-15 kV representado en la Figura 3.20, el cual se usó en todas las simulaciones posteriores.



Figura 3.20. Sección transversal del cable de potencia EPR-15 kV (Hernández, 2008).

En la siguiente tabla se muestran las medidas de referencia tomadas del cable de potencia (Figura 3.20) para el modelado del cable con Maxwell SV®:

Tabla 3.1. Medidas del cable de potencia de 15 kV.

<b>Sección transversal del cable de potencia de 15 kV</b>	
Diámetro del conductor	10 mm
Espesor de la pantalla del conductor	1 mm
Grosor del aislante	7 mm
Espesor de la pantalla del aislante	1 mm
Neutro concéntrico	1 mm
Chaqueta o cubierta	1 mm

Finalmente nos queda el modelado del cable de potencia con el simulador Maxwell, en el cual solo se representa, el conductor, el aislamiento y el neutro (Figura 3.21), ya que para este caso solo es necesario el comportamiento de campo eléctrico dentro de aislamiento. En el dibujo no se muestra el espesor de los apantallamientos ya que no es necesario para este caso de estudio, pero si se tomó en cuenta a la hora especificar el radio tanto para el conductor como para el neutro.

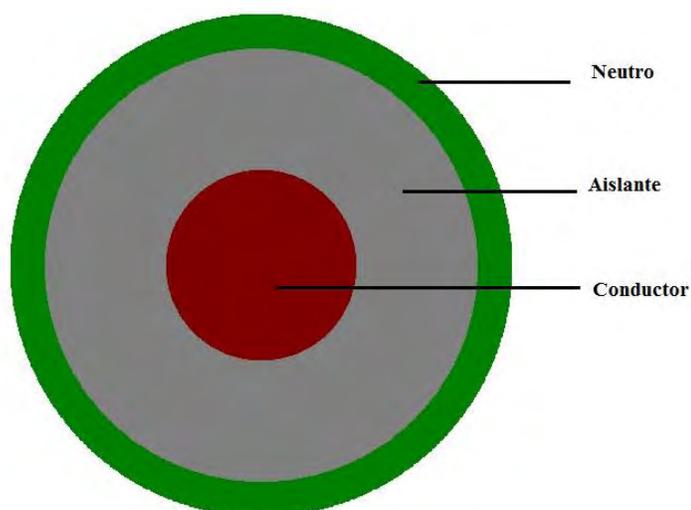


Figura 3.21. Modelado del cable de potencia con Maxwell.

A continuación, se muestran los materiales utilizados (Tabla 3.2) para el modelado del cable de potencia XLPE.

Tabla 3.2 Materiales para el cable de potencia.

Elementos	Material
neutro	cobre
aislante	polietileno
conductor	cobre

En la Figura 3.22 se observa la configuración del cable de potencia modelado en Maxwell en la cual se muestra la magnitud del campo eléctrico a lo largo del aislamiento y su distribución en él.

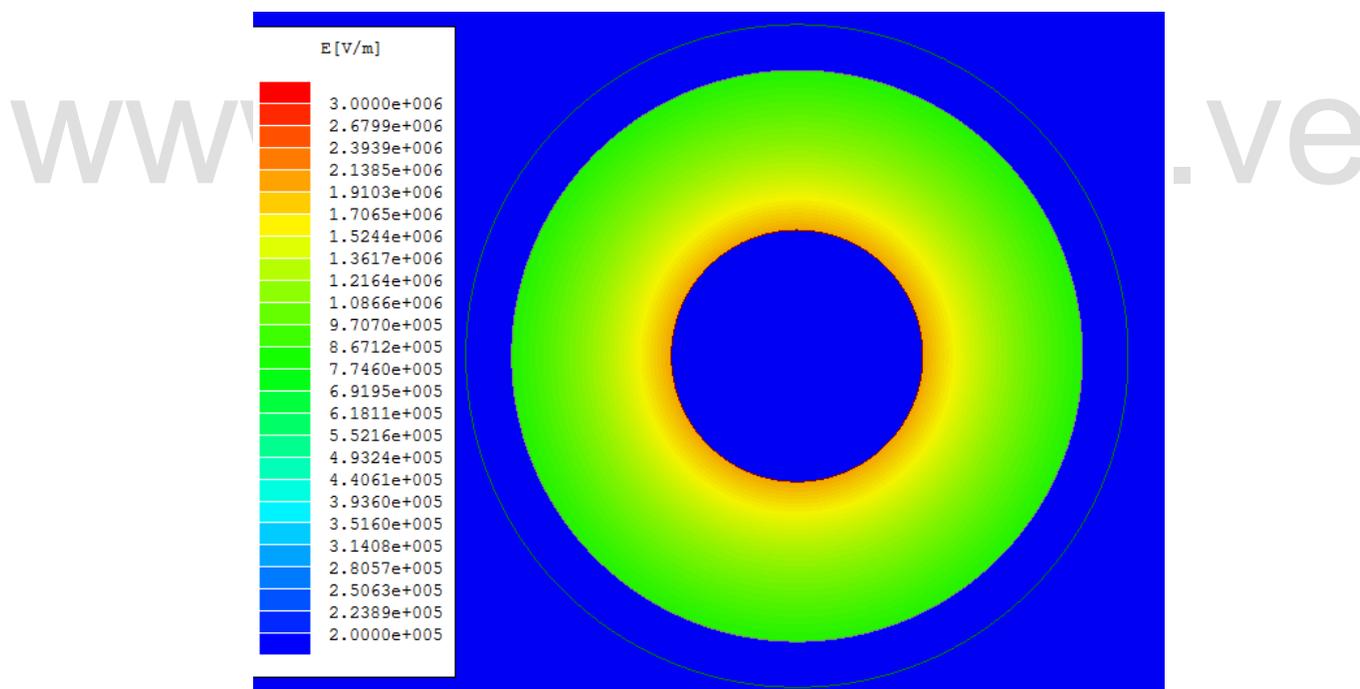


Figura 3.22. Distribución del campo eléctrico con Maxwell SV®.

En base a lo estudiado, queda claramente constituido que la distribución e intensidad del campo eléctrico se encuentra estrechamente ligada a las propiedades físicas y geométricas del material en el cual se encuentra.

Para el caso de la Figura 3.22, la intensidad del campo eléctrico en cualquier punto del aislamiento está dado por la ecuación (3.3). Esto indica que este tipo de arreglo el campo disminuye del interior al exterior del cilindro en forma exponencial, tal como se muestra en la Figura 3.23, el cual representa la distribución del campo eléctrico a lo largo del aislamiento XLPE del cable de potencia mediante Maxwell; los colores más intensos indican una mayor concentración de campo eléctrico, como se observa su máximo valor se encuentra en el interfaz conductor/dieléctrico. En este caso en particular el campo eléctrico existe en un dieléctrico homogéneo (Gómez y López, 2012), es decir, la permitividad relativa es la misma en todo el material aislante, así la intensidad del campo solo está en función del radio.

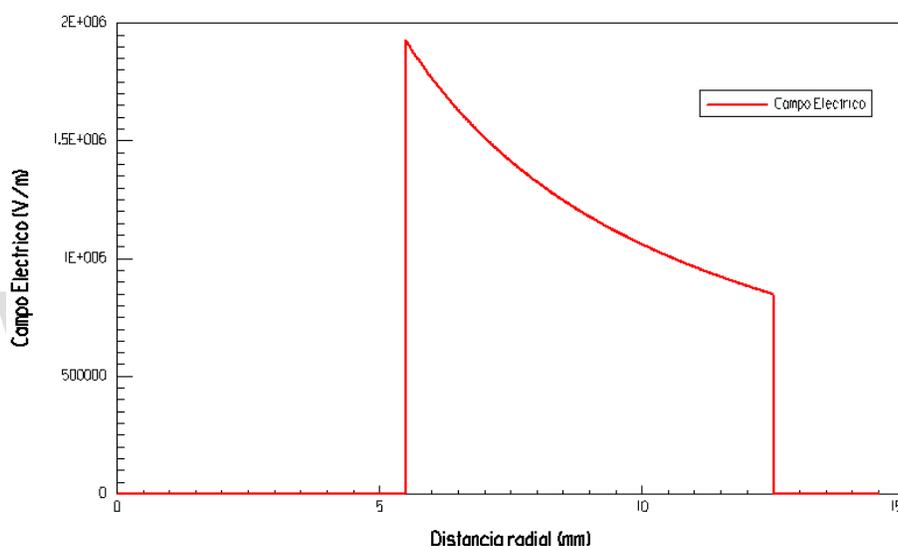


Figura 3.23. Campo eléctrico a lo largo del aislamiento XLPE.

El campo eléctrico representado en la Figura 3.23 el cual fue desarrollado por el simulador Maxwell SV<sup>®</sup>, posteriormente se realiza una comparación con la fuerza numérica (teórica) del campo eléctrico el cual se representa y se calcula de acuerdo a la ecuación 3.3. Como puede verse en la Figura 3.24, ambas líneas tienen una gradiente decreciente y valores muy cercanos, con no más del 1% de error en su magnitud del campo eléctrico obtenido, estos datos nos proporcionan una buena exactitud y fiabilidad para la realización de las simulaciones posteriores en los casos de estudios a realizar.

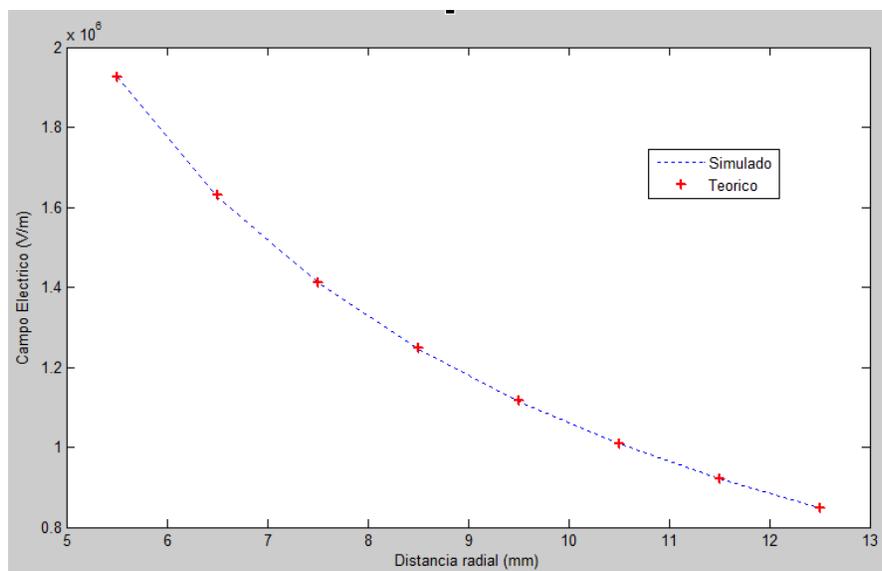


Figura 3.24. Fuerza del campo eléctrico versus longitud radial.

### 3.4 SUMARIO

En el Capítulo 3, se introduce al programa Maxwell mediante una simulación, con el ejemplo más simple en el cual se puede observar el comportamiento del campo eléctrico en medios dieléctricos mediante el arreglo de un capacitor de placas paralelas. También se realizó el modelado de un cable de potencia con Maxwell y poder ver la distribución del campo eléctrico y cómo se comporta a lo largo del aislamiento XLPE, este modelo se utiliza para la elaboración de las simulaciones en el siguiente Capítulo.

## **CAPÍTULO 4**

# **CASOS DE ESTUDIO Y SIMULACIÓN CON EL PROGRAMA COMPUTACIONAL MAXWELL SV<sup>®</sup>**

En este Capítulo se presentan los casos de estudios obtenidos durante la investigación, luego así obtener las simulaciones correspondientes para cada caso, realizar su respectivo análisis y discusión de los resultados.

### **4.1 PROBLEMAS ASOCIADOS EN LA MANUFACTURA**

#### **4.1.1 Cavidades**

En este primer caso se presentan los problemas relacionados con las cavidades en el aislamiento XLPE de cables de potencia. La mayoría de estas cavidades existentes en el aislamiento del cable extruido son de forma casi esférica o elipsoidal.

Los efectos por micro-cavidades han sido comprobados por dos tipos de experimentos. Estos muestran que la impregnación por gas o líquido da como resultado un aumento en la tensión de ruptura de los cables extruidos, y que existe una correlación entre los diámetros de cavidades y los voltajes de ruptura (Toshikatsu y Greenwood, 1983).

Un proceso de fabricación moderno puede excluir macro-cavidades con el cuidado adecuado. Las micro-cavidades inherentes a los métodos de curado al vapor pueden reducirse hasta aproximadamente 100  $\mu\text{m}$  de tamaño. La siguiente pregunta es si las cavidades de alrededor de 10  $\mu\text{m}$  son perjudiciales. La respuesta parece depender de la elección del grosor del aislamiento del cable o de la intensidad máxima o media del campo eléctrico de diseño. El

tamaño de las cavidades producidos puede reducirse a mucho menos de  $10\ \mu\text{m}$ , mediante un procedimiento denominado proceso de reticulación en seco (Toshikatsu y Greenwood, 1983). Para mayor comodidad práctica, se puede obtener el tamaño de cavidad máximo permisible, con algún factor de seguridad, del voltaje de inicio de corona a través de cavidades existentes. Se han medido valores de  $80\ \mu\text{m}$  y  $50\ \mu\text{m}$  para cavidades críticas en cables de (66 a 77) kV y cables de (138 a 154) kV, respectivamente. Las cavidades mayores a estos valores pueden llamarse "macro-voids".

Los efectos de las cavidades en la resistencia a la ruptura de los cables XLPE fueron corroborados por experimentos llevados a cabo en el aislamiento de cables XLPE con varios tamaños de cavidades. La Figura 4.1 aporta evidencia para demostrar que la reducción en el tamaño de la cavidad aumenta la fuerza de ruptura de la corriente alterna (AC). Experimentos similares también se llevaron a cabo para demostrar el efecto de la tensión en los cables XLPE. Esta referencia sostiene que la ruptura de AC es seguida por el inicio de descargas gaseosas en micro-cavidades, que pueden obedecer la ley de Paschen's (Toshikatsu y Greenwood, 1983).

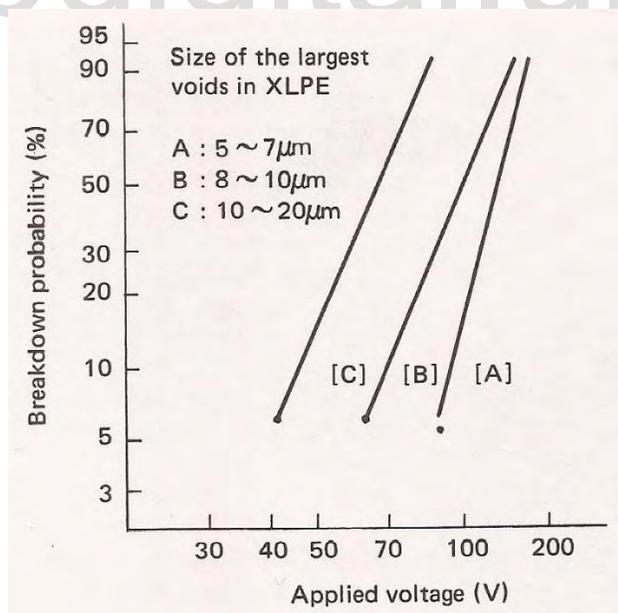


Figura 4.1. Características de resistencia AC de cables de 6,6 kV XLPE con aislamiento de 3,2 mm de espesor 5kV / 30 min (Toshikatsu y Greenwood, 1983).

#### 4.1.1.1 Simulación de una micro-cavidad

Para la simulación en programa Maxwell, se considera el cable de estudio anteriormente utilizado de 15 kV (Figura 3.20), con las medidas antes descritas en la Tabla 3.1. En esta primera simulación se realiza el análisis del efecto que ocasiona una micro-cavidad en el aislamiento XLPE. Tomando en cuenta las consideraciones anteriores, el “*micro-void*” se tomó de un radio de 35  $\mu\text{m}$  y de forma esférica, introducido en el aislamiento XLPE y cercano al conductor.

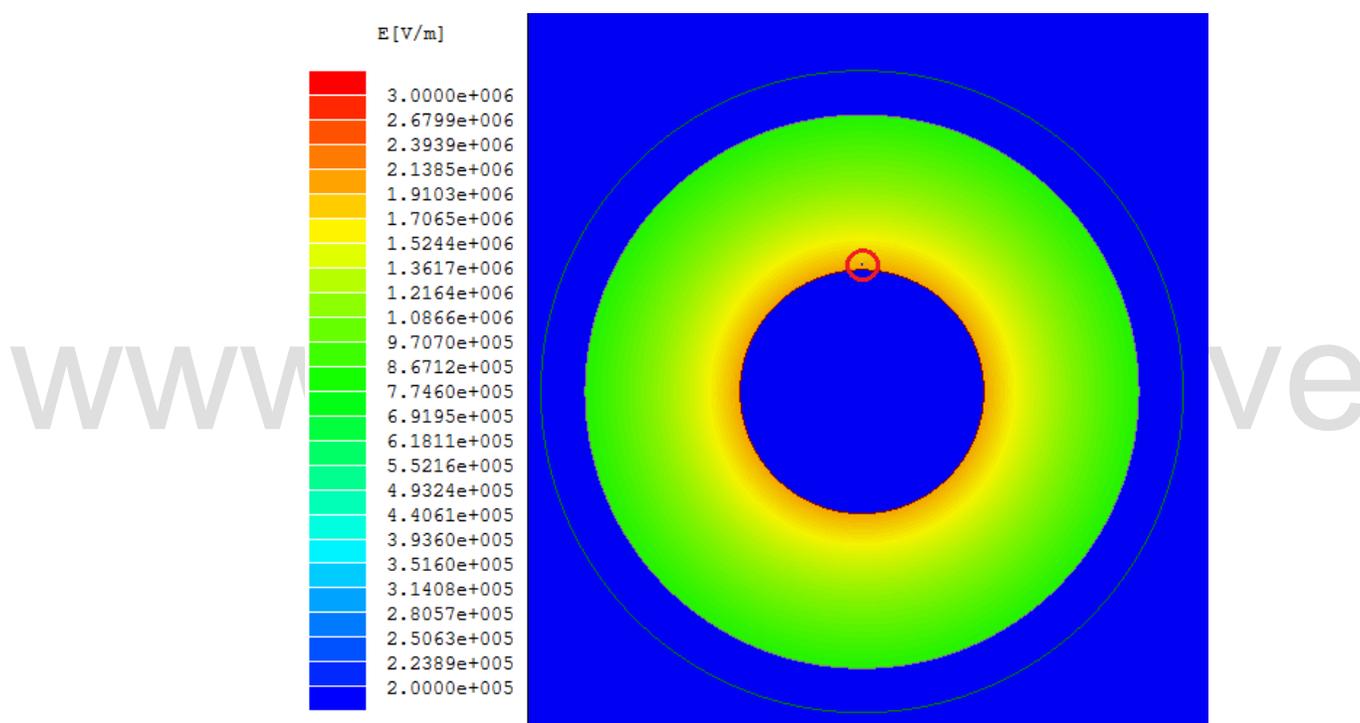


Figura 4.2. Distribución del campo eléctrico en el cable de potencia.

Para mejor visualización del campo eléctrico dentro del aislamiento, se simuló desde un rango superior de “cero” como se puede observar en la Figura 4.2, esto se realizó en todos los casos de estudio para poder observar una gama de colores más útil, y distinguir una mejor escala para su comparación, y comprender la no uniformidad del campo eléctrico en el área específica a estudiar (defectos) y su entorno cercano.

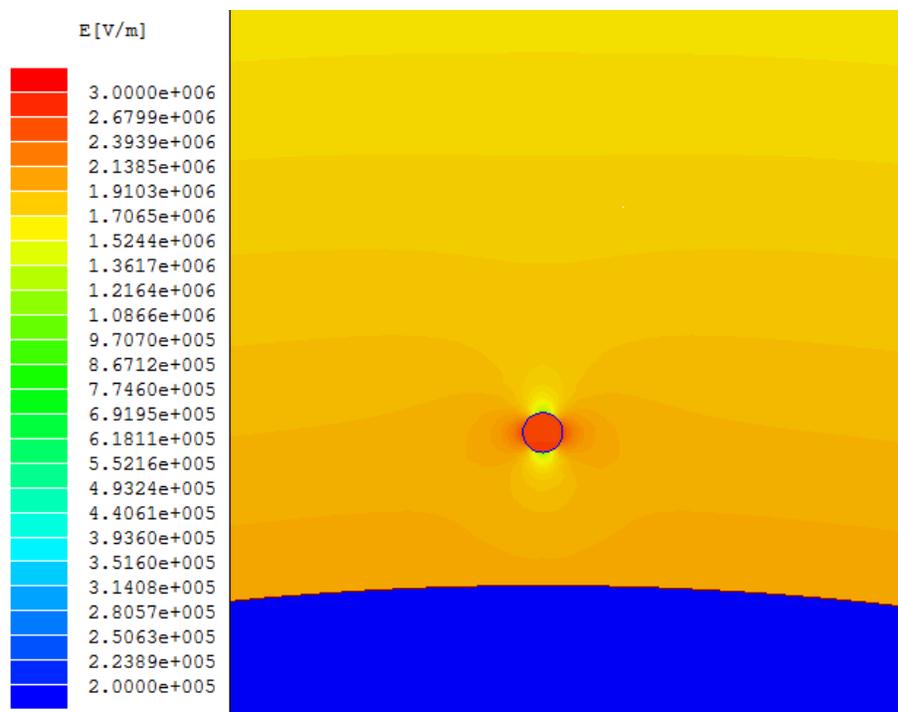


Figura 4.3. Visualización de la micro-cavidad.

www.bdigital.ula.ve

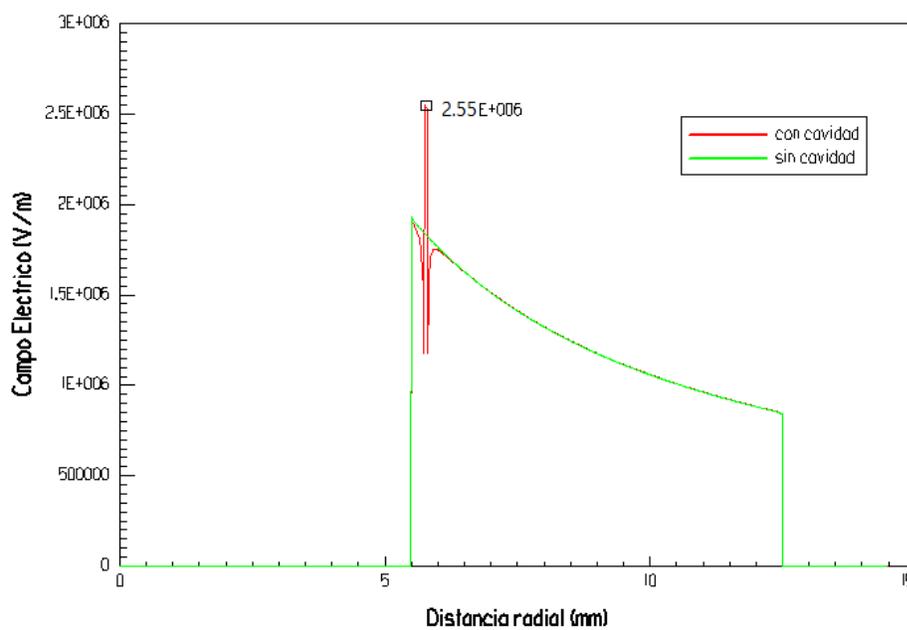


Figura 4.4. Comportamiento del campo eléctrico dentro del aislamiento XLPE.

La Figura 4.3, se observa que la mayor distribución del campo eléctrico se encuentra dentro de la burbuja de aire, esto se debe a su menor permitividad, también se observa cómo se afecta el campo eléctrico en su alrededor, por lo cual todos estos cambios en el aislante pueden generar una futura falla. En la Figura 4.4 se muestra una comparación de la distribución del campo eléctrico en el cable de potencia cuando existe o no la presencia de una micro-cavidad en el aislamiento del cable de potencia.

#### 4.1.1.2 Simulación de la macro-cavidad esférica

Para esta simulación se introdujo una macro-cavidad esférica de 250  $\mu\text{m}$  de diámetro en aislamiento XLPE en un área cerca al conductor como se muestra en la Figuras 4.5, en la cual se puede observar el comportamiento del campo eléctrico y como se ve afectado; realizando una comparación para cada caso de estudio y llegar a su respectivo análisis.

www.digital.ula.ve

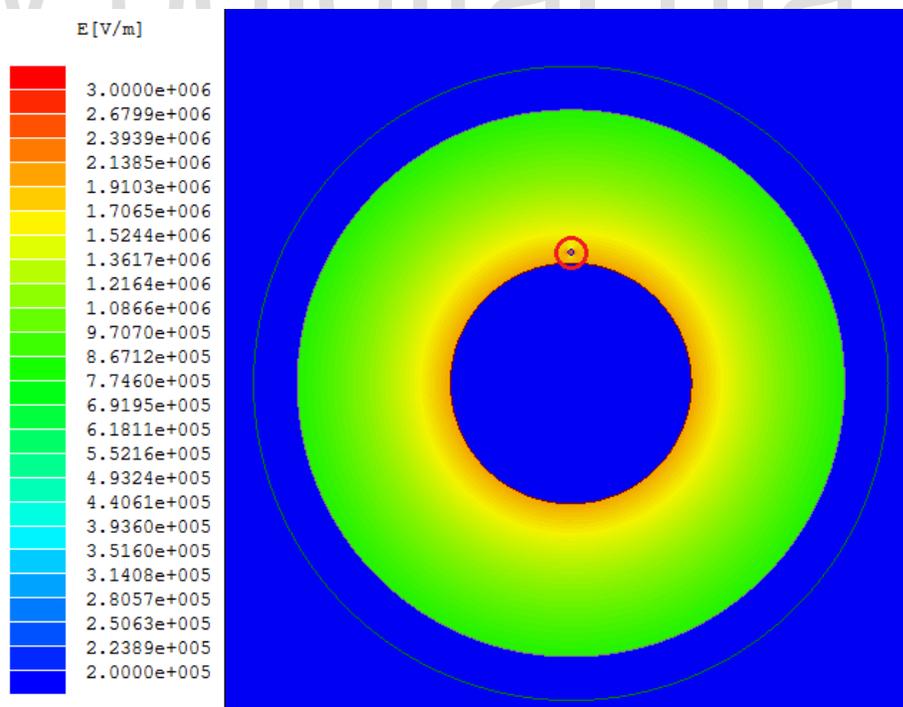


Figura 4.5. Macro-cavidad cerca del conductor.

Como se puede ver en la Figura 4.6 y 4.7 alrededor del defecto el campo eléctrico pierde su uniformidad y es de un valor mucho más bajo que dentro del mismo.

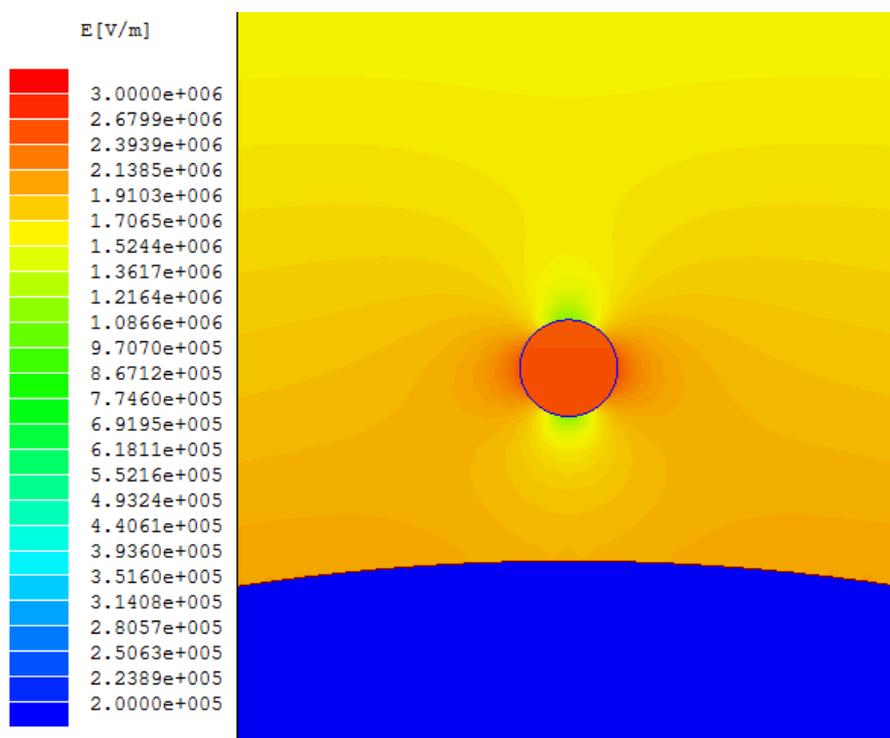


Figura 4.6. Campo eléctrico alrededor de la macro-cavidad.

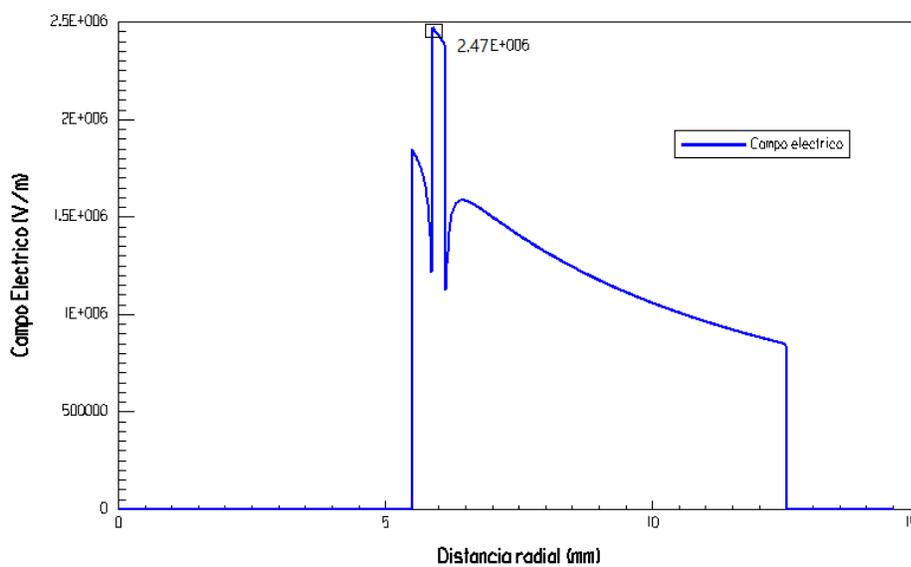


Figura 4.7. Campo eléctrico a lo largo del aislamiento.

Como segundo caso de estudio de un macro-defecto se puede ver en las Figuras 4.8 para este caso, el defecto se ubica en una parte cercana del apantallamiento del aislamiento para así observar su comportamiento en esta área.

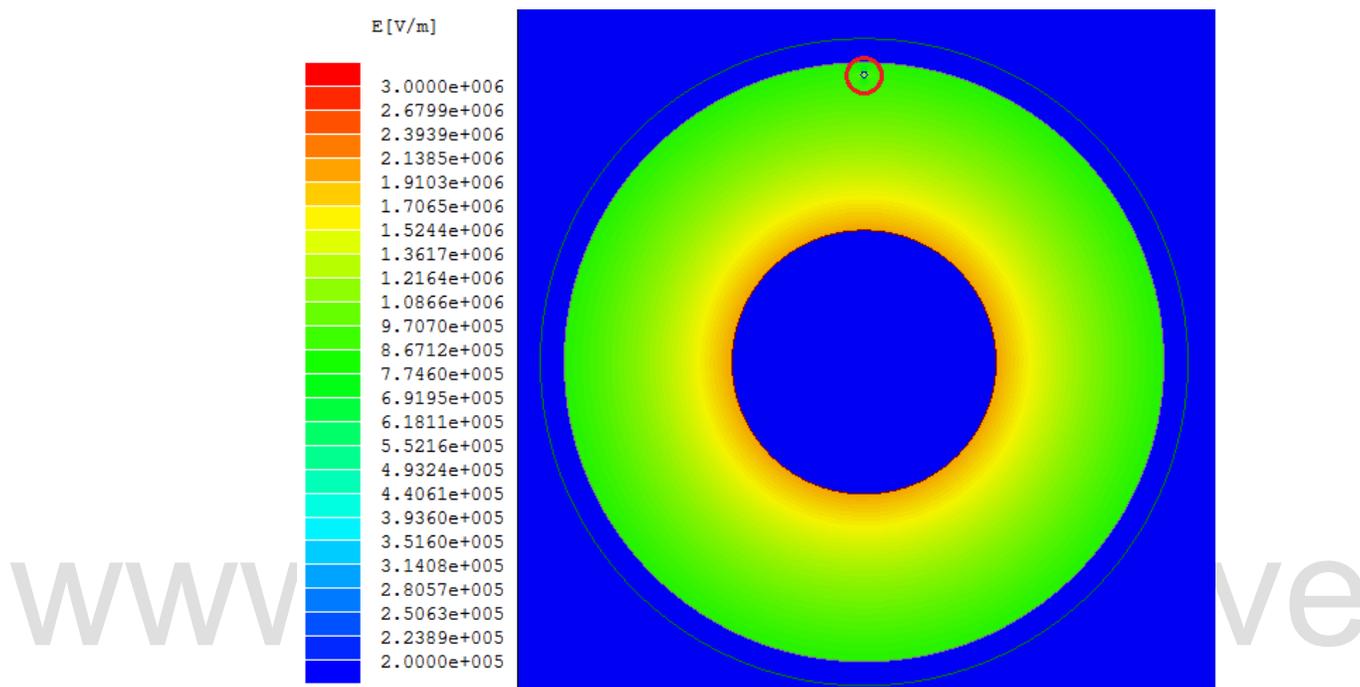


Figura 4.8. Macro-vacío cercano a la pantalla del aislamiento.

En la Figura 4.9 se puede ver que siempre dentro de la esfera de aire el campo eléctrico es mayor que a su alrededor (fuera de la esfera) por el cual el campo eléctrico presenta variaciones en el aislamiento y se puede generar otro tipo de imperfecciones como son los árboles eléctricos.

El grafico de la Figura 4.10 muestra las variaciones que presenta la macro-cavidad dentro del aislamiento cercano a la pantalla del aislamiento, y la comparación cuando no existe la imperfección dentro de él.

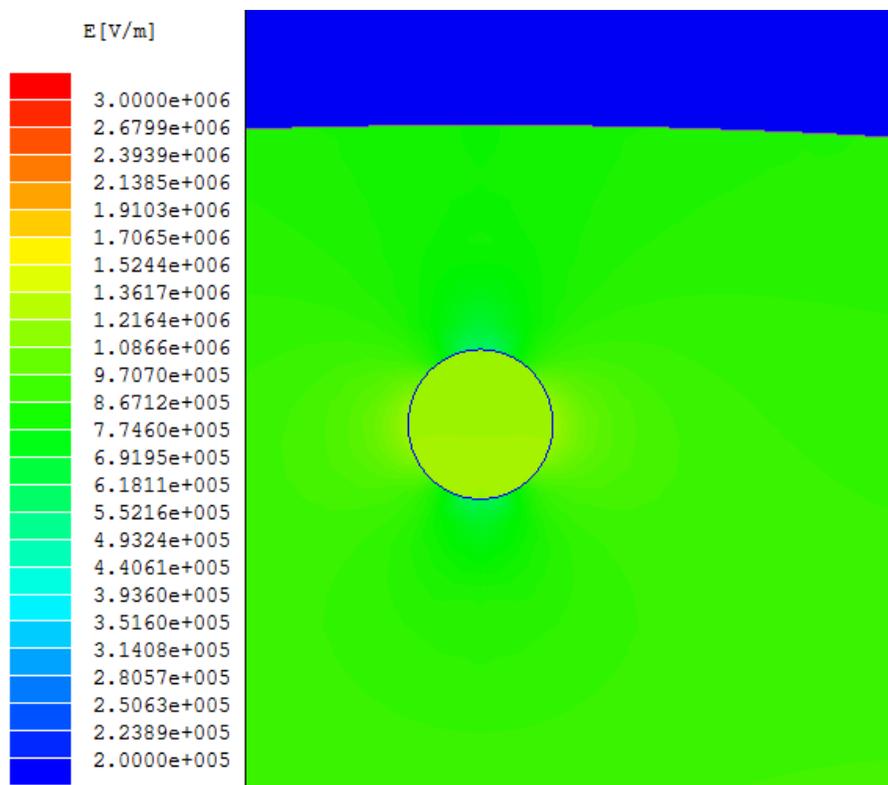


Figura 4.9. Distorsión del campo eléctrico.

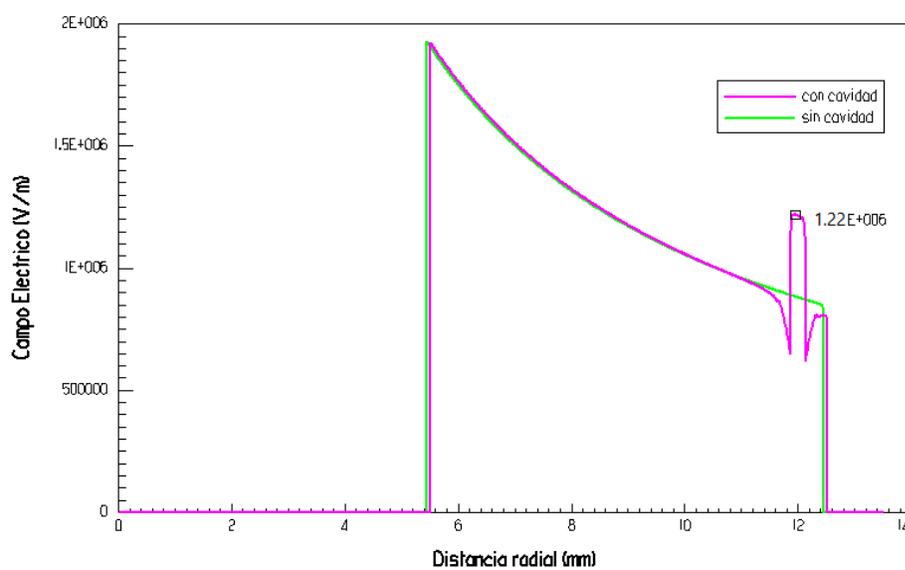


Figura 4.10. Comparación del comportamiento del campo eléctrico.

Finalmente, para el caso de estudio en curso de los macro-defectos se introduce una macro-cavidad en la mitad del aislamiento del cable de potencia, como se observa en la Figura 4.11. Esto se realiza con el objetivo de hacer la comparación de los 3 casos.

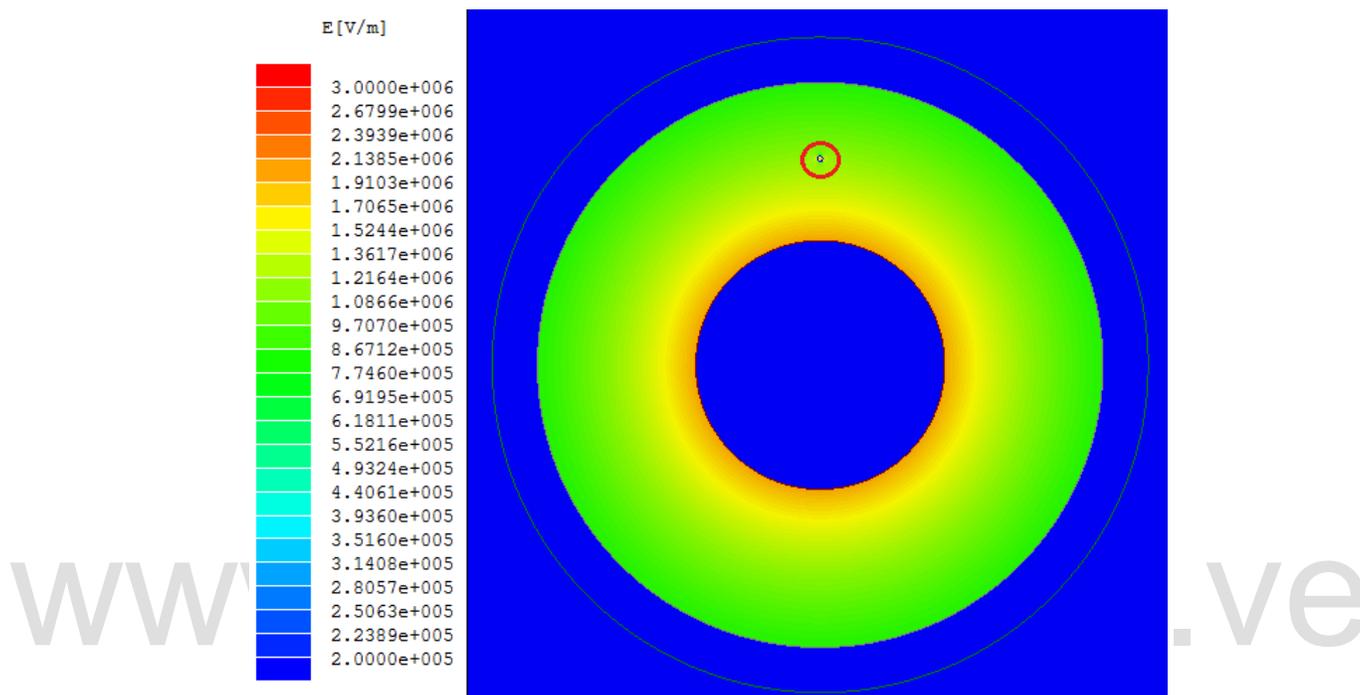


Figura 4.11. Cavidad en la mitad del aislamiento.

Al realizar la simulación con maxwell y ver el efecto del campo eléctrico que origina en esta posición, el cual es mostrado en una vista más ampliada en la Figura 4.12. Luego de analizar el efecto que ocasiona este macro-defecto se puede decir, que su mayor incremento del campo eléctrico es dentro del mismo, y se puede observar en el gráfico de la Figura 4.13.

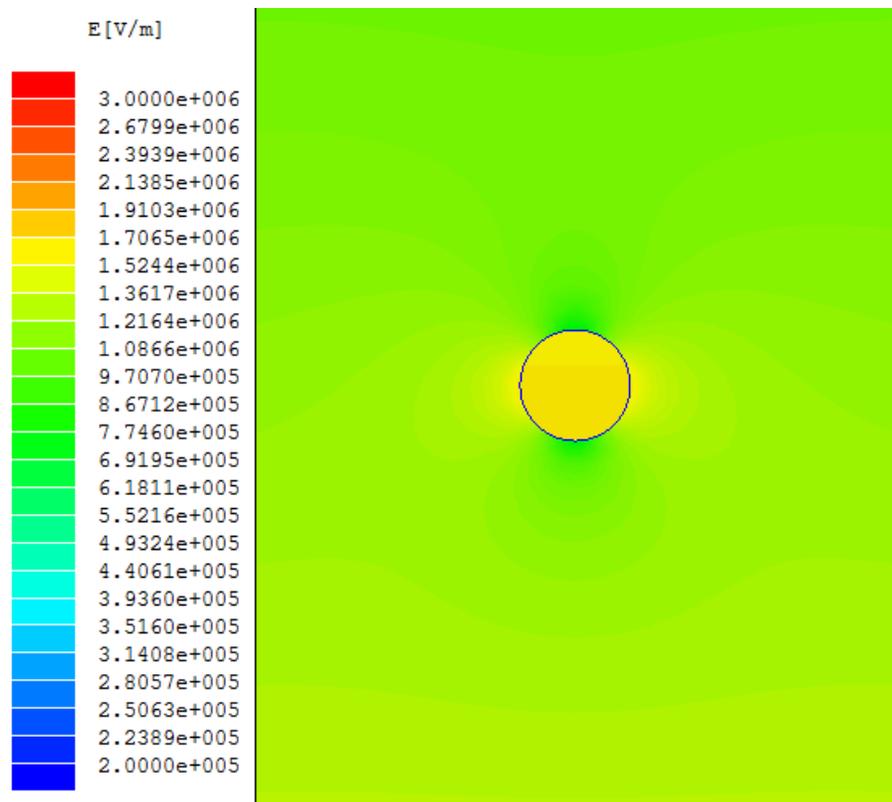


Figura 4.12. Macro-cavidad en aislamiento XLPE.

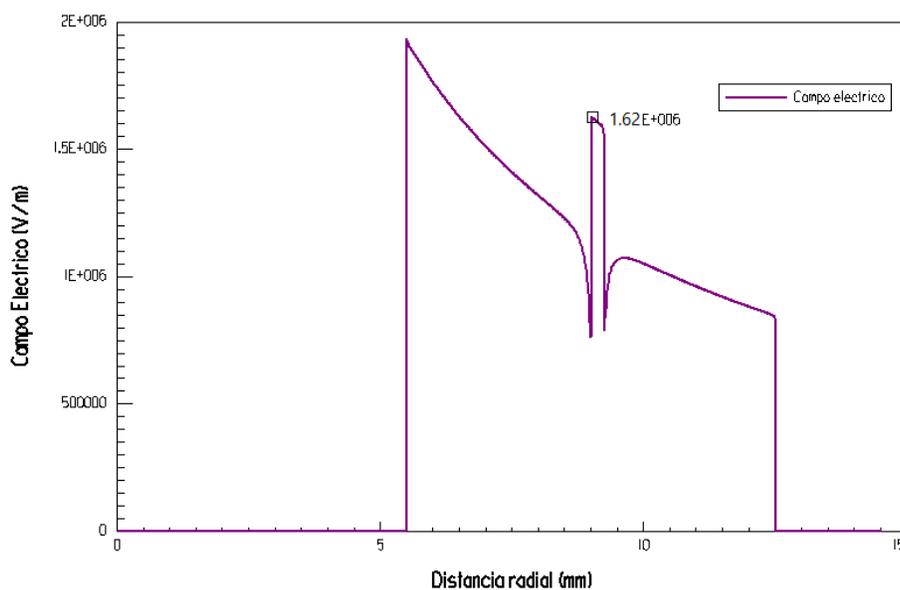


Figura 4.13. Variación del campo eléctrico.

Como se observa en las simulaciones anteriores de los macro-defectos, el defecto que mayor distorsión en el comportamiento del campo eléctrico ocasionó, es en el cual la macro-cavidad se encuentra cercano al conductor (Figura 4.6) ya que en esa área es donde mayor concentración del campo existe, la variación del campo eléctrico dentro de la cavidad es donde se encuentra su mayor incremento (Figura 4.7) por el cual puede ocasionar una futura falla, por lo tanto, es crucial la posición en que se encuentra el macro-defecto.

#### 4.1.1.2 Simulación de la macro-cavidad elipsoidal

Para este caso de estudio se realizó la simulación de una macro-cavidad de un tamaño aproximado de  $250\ \mu\text{m}$ , de forma elipsoidal, para dos posiciones distintas (vertical y horizontal) y observar su comportamiento y como afecta el campo eléctrico en el aislamiento del cable XLPE.

Inicialmente se colocó el defecto en posición horizontal, y en una zona cercana al conductor como se puede observar en la Figura 4.14.

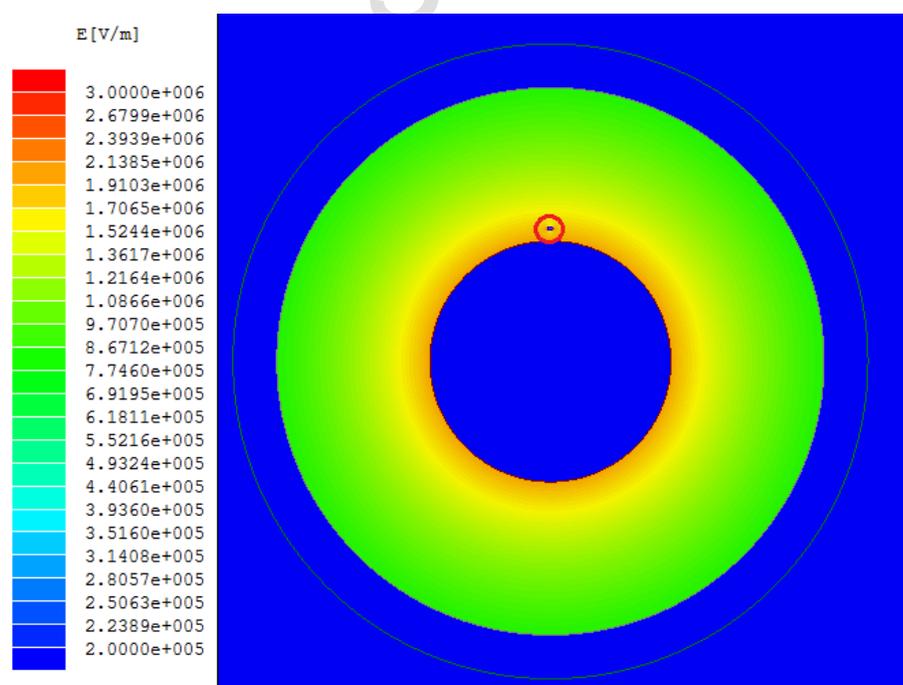


Figura 4.14. Campo eléctrico al introducir un elipsoide.

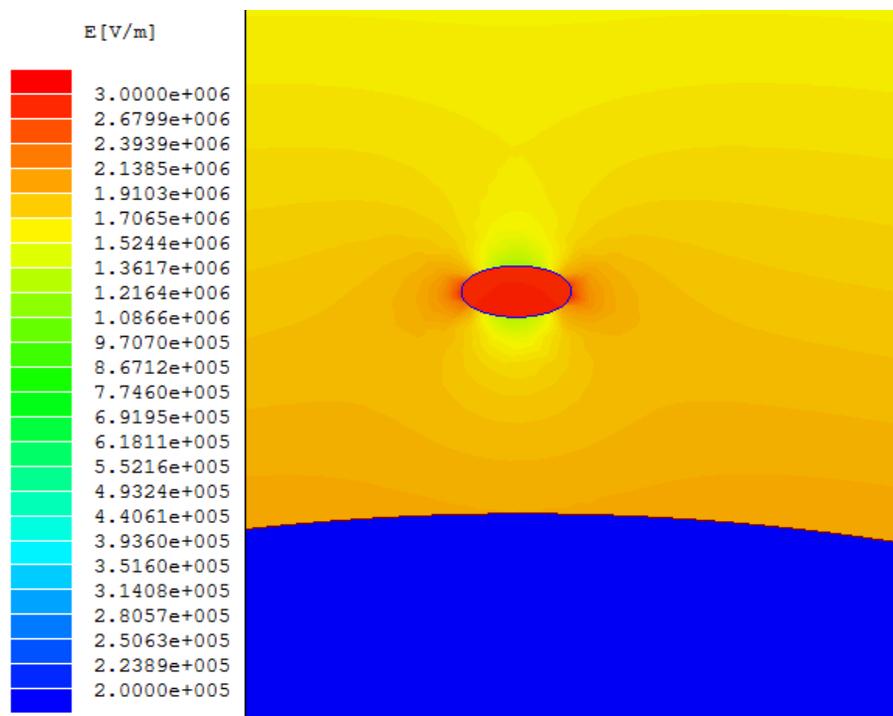


Figura 4.15. Defecto elipsoidal en posición horizontal.

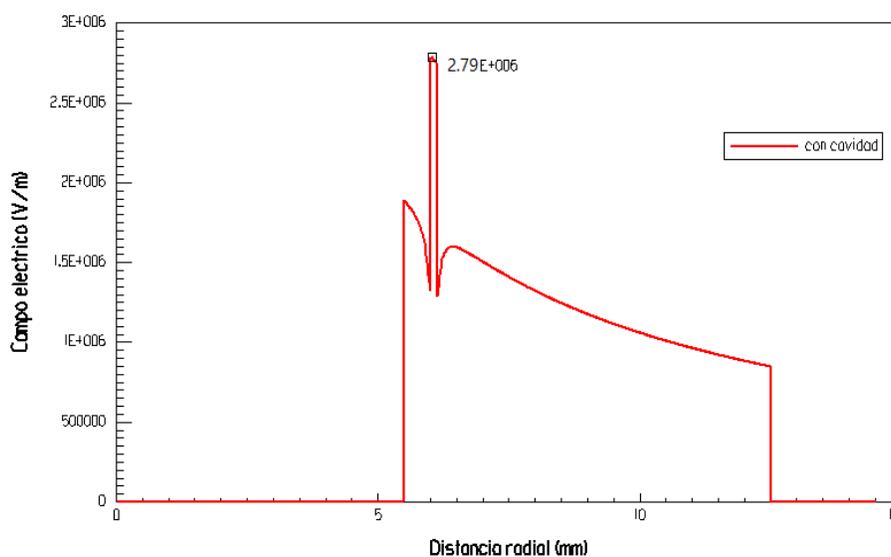


Figura 4.16. Variación del campo en el elipsoide, posición horizontal.

Como se puede observar en las Figuras 4.15 y 4.16 el campo eléctrico en su máximo valor se encuentre dentro de la macro-cavidad, de un valor considerable en comparación al obtenido fuera de él. Para la Figura 4.17 se muestra el macro-defecto en posición vertical.

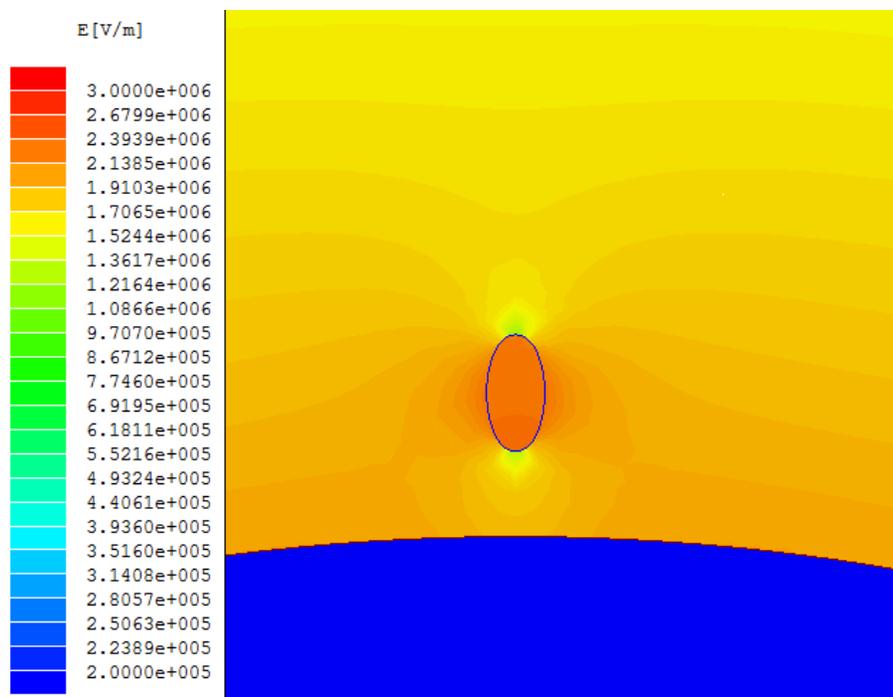


Figura 4.17. Macro-cavidad elipsoidal en posición vertical.

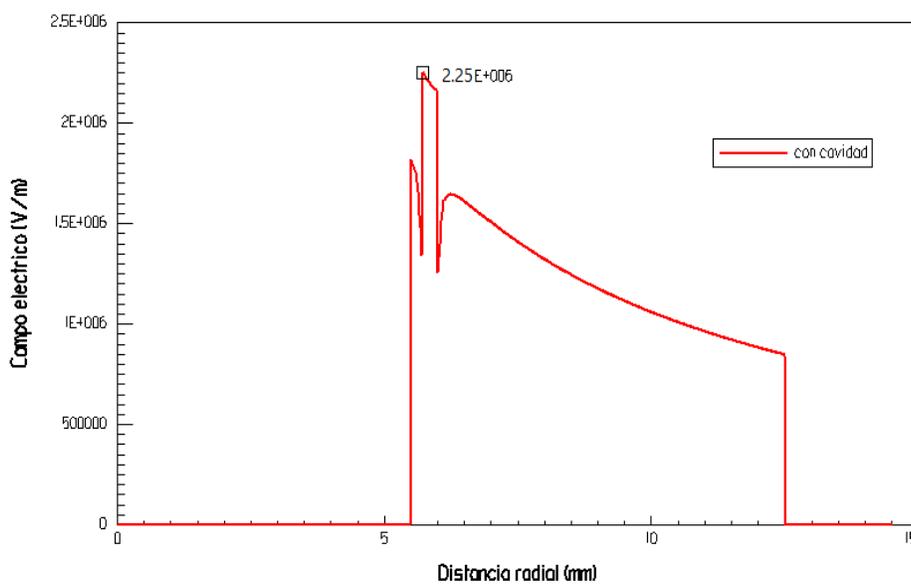


Figura 4.18. Campo eléctrico en el elipsoide de posición vertical.

Para el caso de la Figura 4.17, también coincide que su valor más alto del campo eléctrico existe dentro de la macro-cavidad. La variación que se obtuvo con el elipsoide en posición vertical ese puede apreciar en la Figura 4.18, pero no de un valor tan elevado en comparación

con el elipsoide de posición horizontal (Figura 4.16), esto se debe que en la posición horizontal el área que ocupa el macro-defecto está expuesto a un valor de campo eléctrico más elevado y de un valor “constante” el cual rodea en su totalidad al macro-defecto.

#### 4.1.2 Protuberancias

La suavidad superficial de la capa semiconductor depende ciertamente de su proceso de fabricación. Demuestra que la rugosidad superficial de la capa semiconductor, especialmente para blindaje de conductores, crea condiciones que conducen a la iniciación del árbol, lo que a su vez puede conducir a la descomposición final del aislamiento por corriente alterna o tensión de impulso (Toshikatsu y Greenwood, 1983). La Figura 4.19 muestra un ejemplo de generación de árboles a partir de una capa de polietileno semiconductor, de carbono, bajo la acción de un voltaje de alto impulso.

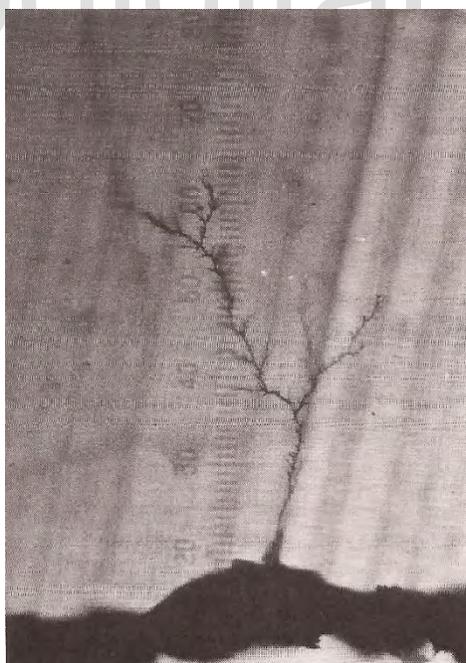


Figura 4.19. Árbol de impulsos que crece a partir de una aspereza de la capa de compuesto semiconductor de un cable XLPE (Toshikatsu y Greenwood, 1983).

También se sabe que los defectos como inclusiones conductoras y protrusiones de interfase son sitios eficaces de iniciación para árboles eléctricos. Principalmente debido al alto estrés del campo eléctrico y al alto grado de inyección de carga en los bordes afilados. Las primeras teorías para la iniciación de árboles eléctricos consideraron el inicio del árbol como un proceso de descomposición local en las regiones de alto campo cerca de la punta de las protuberancias (Høltø y Ildstad, (2009). También se propuso que los huecos pudieran ser generados por calentamiento dieléctrico o por tensiones mecánicas de Maxwell que causan fisuración y formación de grietas. Además, se demuestra que la inyección de carga espacial, que se produce cuando el campo eléctrico supera un cierto límite, juegan un papel importante durante el proceso de inicio.

#### 4.1.2.1 Simulación de la protuberancia

Para la simulación de este caso de estudio con el programa Maxwell, se introdujo una protuberancia en la pantalla semiconductor del conductor (Figura 4.20), para observar el comportamiento del campo eléctrico en esta área específica, y por el cual en este caso en su mayoría se generan los árboles eléctricos. El tamaño de la protuberancia es aproximadamente de 800  $\mu\text{m}$  de diámetro.

Para la Figura 4.21 nos muestra como se ve afectado el campo eléctrico en el área donde se encuentra la protuberancia, su mayor efecto se logra observa es en la curvatura el cual es más intenso el campo eléctrico; en sus terminaciones donde también se ve afectada la uniformidad del campo, en esta área ocurren descargas parciales incidiendo en la generación de árboles eléctricos.

En el gráfico de la Figura 4.22 se observa que tan elevado se encuentra el campo eléctrico iniciando desde la protuberancia y luego disminuye exponencialmente a lo largo del aislamiento.

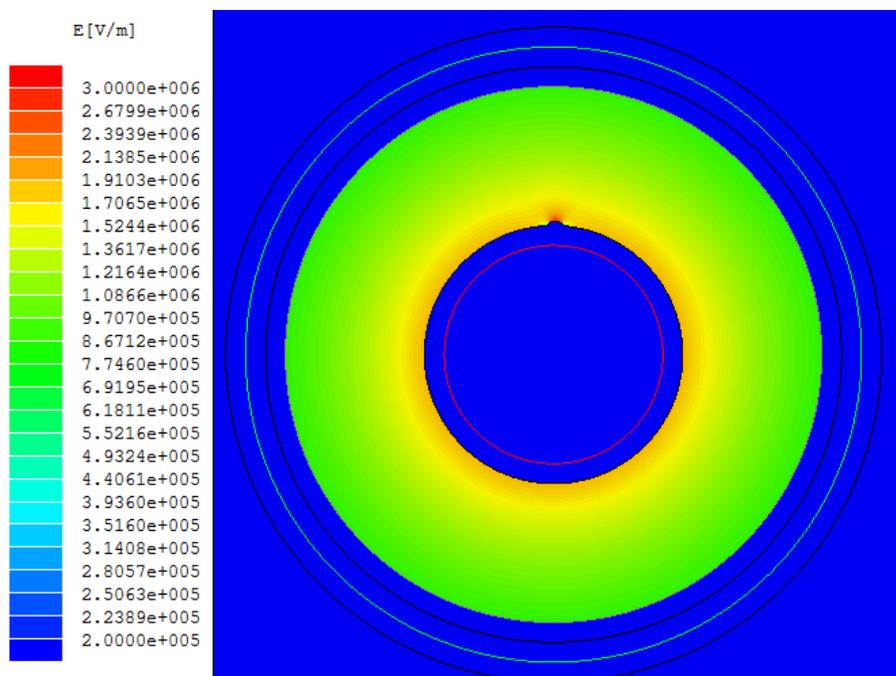


Figura 4.20. Protuberancia en la pantalla semiconductor.

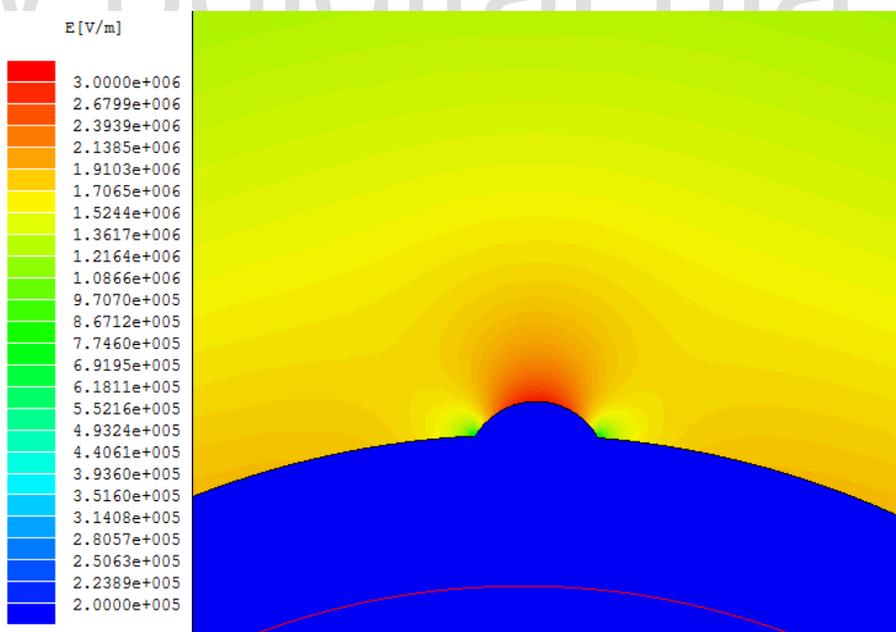


Figura 4.21. Visualización del campo eléctrico en la protuberancia.

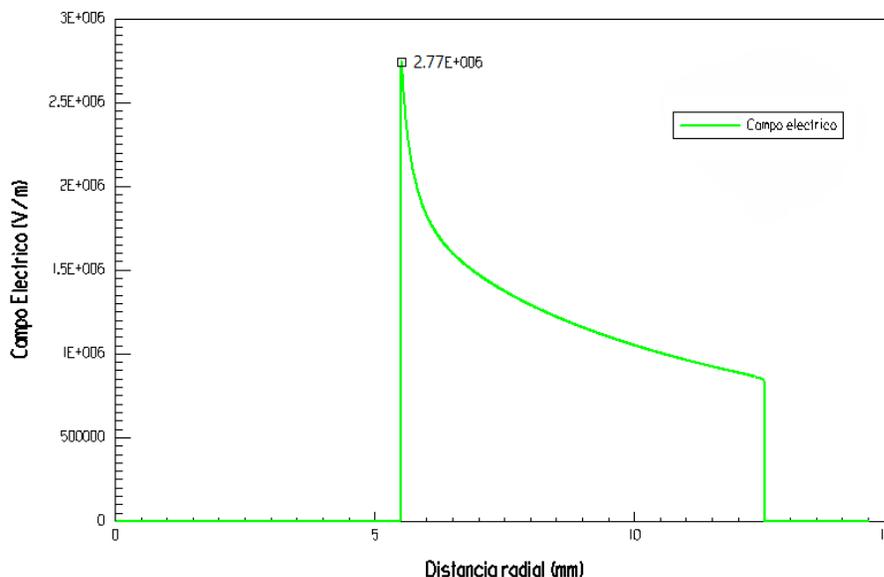


Figura 4.22. Campo eléctrico a lo largo del aislamiento.

### 4.1.3 Contaminantes

Los fabricantes de cables, han implementado sistemas de manejo de materiales para prevenir la contaminación durante el proceso de fabricación. Un ejemplo es que se han instalado salas de limpieza en la mayoría de las plantas de fabricación de cables y se han implementado instalaciones separadas para el aislamiento y los materiales semiconductores (Hampton y otros, 2007).

Se dispone de datos sobre la contaminación en resina de polietileno inmediatamente después de la fabricación. Los contaminantes incluidos en el polietileno se clasifican generalmente con el fin de controlar la producción según su apariencia. Es urgente que se encuentre algún método para reducir los contaminantes en este material. La clasificación visual tiene un éxito limitado como se indica en la Tabla 4.1. Los contaminantes se dividen en tres grupos: ámbar (A), negro (B) y metal (M); Son revisados por el análisis elemental. Casi todos los contaminantes considerados en el grupo "A" eran de color ámbar. Los contaminantes del grupo B fueron resina quemada con poca excepción. Algunos de los materiales atribuidos a los metales fueron resina quemada. Casi todos los contaminantes investigados aquí eran más

pequeños que  $250\ \mu\text{m}$ , unos pocos eran de  $(280\ \text{a}\ 360)\ \mu\text{m}$  de tamaño y se pensó que venían del agua o del aire (Toshikatsu y Greenwood, 1983). Se concluye que es posible obtener polietileno casi-puro a partir de suministros de materias primas.

Tabla 4.1. Análisis de contaminantes en polietileno (Toshikatsu y Greenwood, 1983).

<b>Agrupación de la aparición de Contaminantes</b>			
Grupo	A	B	C
Proporción %	92	7	1
<b>Análisis elemental</b>			
Grupo	A	B	C
Resina quemada	20/23	23/29	3/10
Contaminantes en el agua o el aire	3/23	3/29	0
Sustancias ferrosas	0	3/29	6/10
Sustancias porosas	0	0	1/10



Figura 4.23. Defectos típicos encontrados en cables extruidos (contaminantes - izquierda y derecha, y distorsión de la pantalla - derecha) (Hampton y otros, 2007).

La limpieza de los materiales aislantes (tanto el peróxido como el curado por humedad) se evalúa a menudo mediante la conversión de una muestra representativa del polímero en una cinta transparente, estableciendo a continuación la concentración de cualquier sustancia no homogénea. Las cuales se detectan identificando variaciones en la transmisión de luz a través

de la cinta (Hampton y otros, 2007). El procesamiento de datos es llevado a cabo por un microordenador, que es capaz de producir datos de concentración segregados por tamaño para un número de niveles seleccionados de oscurecimiento (Tabla 4.2). Estos materiales de aislamiento XLPE más limpios conducen a una vida en servicio mucho más larga para los cables.

Tabla 4.2. Relación entre la clase de voltaje y los niveles de limpieza aceptados (Hampton y otros, 2007).

Nivel de tensión	MV (6 a 36) kV	HV (36 a 161) kV	EHV (> 161) kV
Tensión eléctrica media (kV/mm)	2	6	10
Contaminantes controlados ( $\mu\text{m}$ )	200 – 500	100 – 200	70 – 100
Contaminantes excluidos ( $\mu\text{m}$ )	100 – 200	70 – 100	50 - 70

#### 4.1.3.1 Simulación de los distintos contaminantes

De lo anterior descrito, para la simulación con el programa Maxwell de los diferentes contaminantes incrustados en el aislamiento XLPE, se va realizar sobre dos tipos de contaminantes, metálicos y no metálicos (Toshikatsu y Greenwood, 1983). Para los materiales metálicos se utilizará el acero y para lo no metálicos el vidrio y la madera.

Los tamaños para todos los contaminantes se consideran en un aproximado de 300  $\mu\text{m}$  de longitud. Su forma fue modelada en una apariencia irregular, ya que todos estos materiales así lo presentan en su realidad. Para todos los casos, el contaminante se ubicará en una posición cercana al conductor, ya que en esta área es donde más se ve afectada la uniformidad del campo eléctrico. Para la primera simulación (Figura 4.24) se muestra cómo se afecta el campo eléctrico cuando presenta un contaminante de tipo no metálico, en este caso una pequeña incrustación de vidrio.

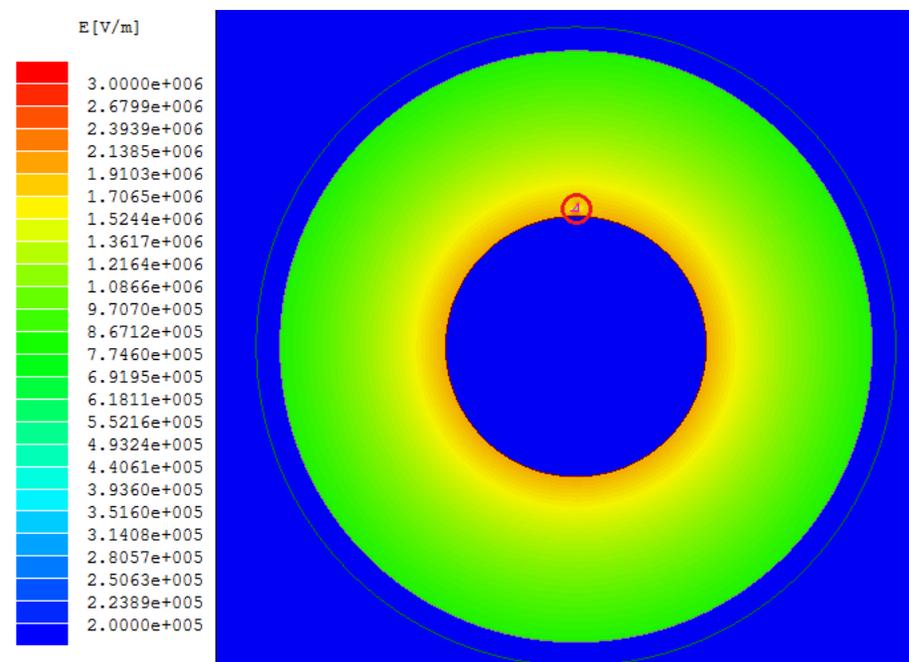


Figura 4.24. Incrustación de vidrio en el aislamiento.

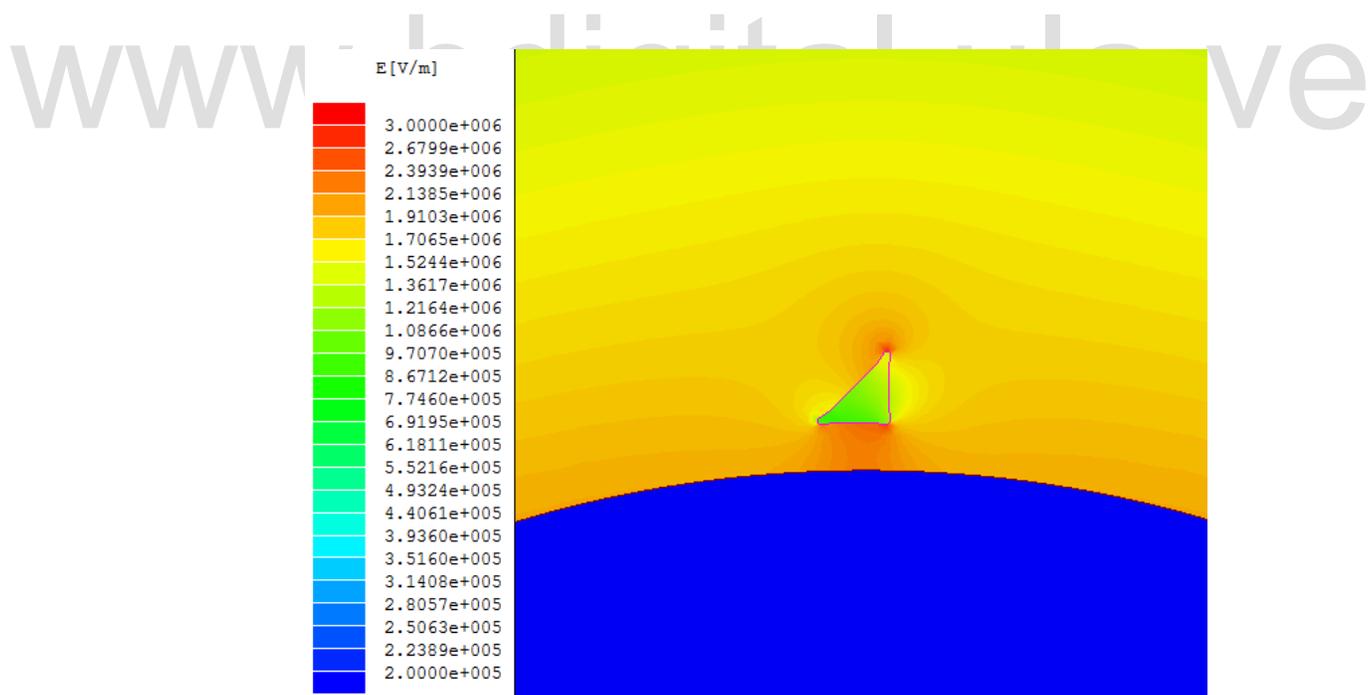


Figura 4.25. Campo eléctrico al introducir un contaminante (vidrio) en el aislamiento del cable de potencia.

Debido a que la permitividad relativa del vidrio (5.5) es mayor a la del aislamiento de polietileno (2.25), en su interior el campo eléctrico será menor (Figura 4.26). Se observa que en las puntas del contaminante (Figura 4.25) este tiene su mayor efecto en la distorsión del campo eléctrico, en el cual puede contribuir a la formación de nuevos defectos.

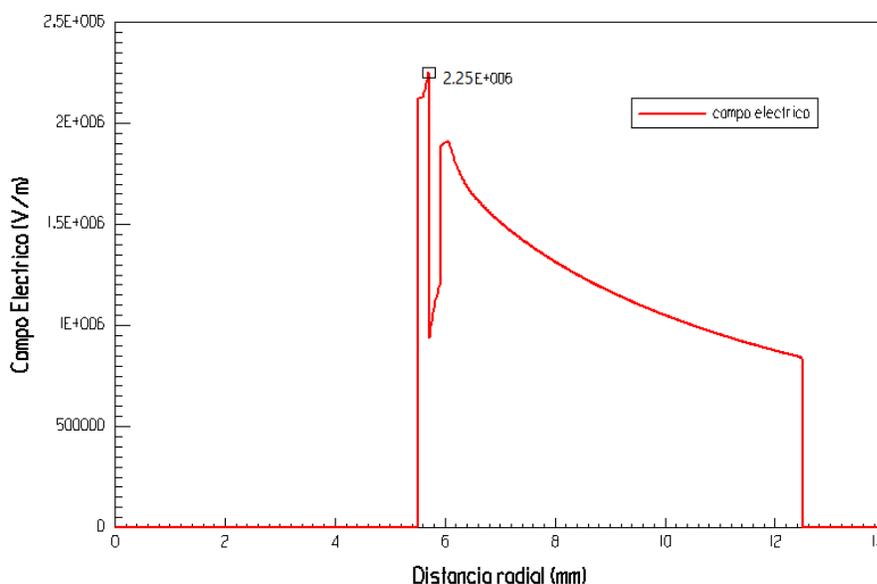


Figura 4.26. Campo eléctrico en presencia de un contaminante (vidrio).

Para una segunda simulación de los defectos contaminantes, la cual se muestra en la Figura 4.27, se refiere a un contaminante no metálico en esta ocasión madera, para este caso se tomó una permitividad relativa de 1.4 la cual está en el rango perteneciente a este material.

En la Figura 4.27 se muestra el efecto que ocasiona este defecto (madera) con curvaturas más suaves que se asemeja a los contaminantes de este tipo, aun así, en las partes donde existe irregularidad o cambios, es donde más se ve afectado la uniformidad del campo eléctrico el en asilamiento del cable de potencia. Ya que su permitividad relativa es menor dentro del contaminante, existe mayor concentración de campo eléctrico (Figura 4.28).

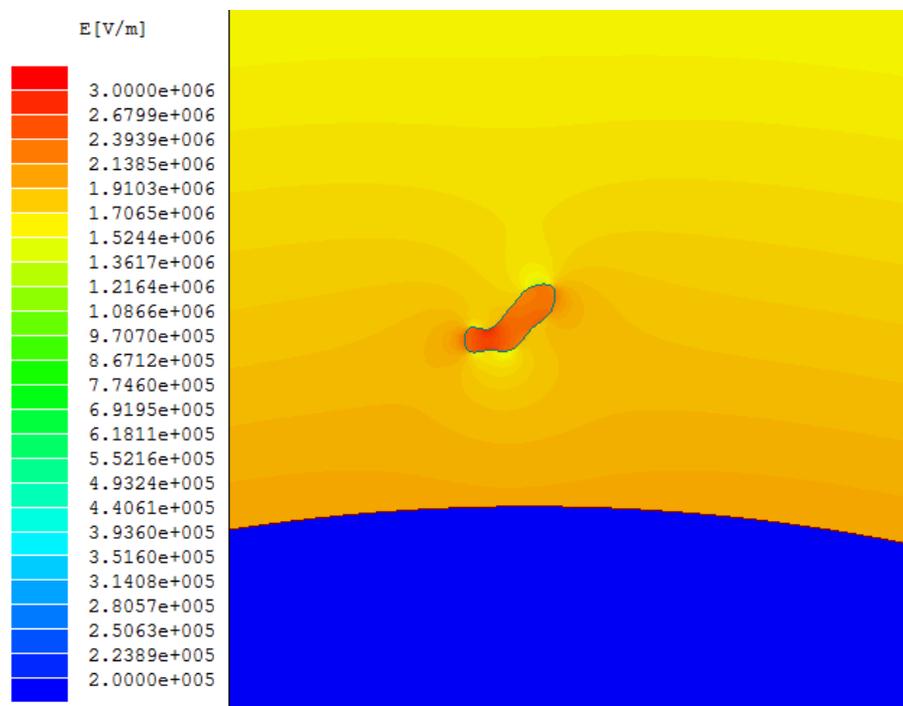


Figura 4.27. Contaminante no metálico (madera) en el asilamiento XLPE.

www.bdigital.ula.ve

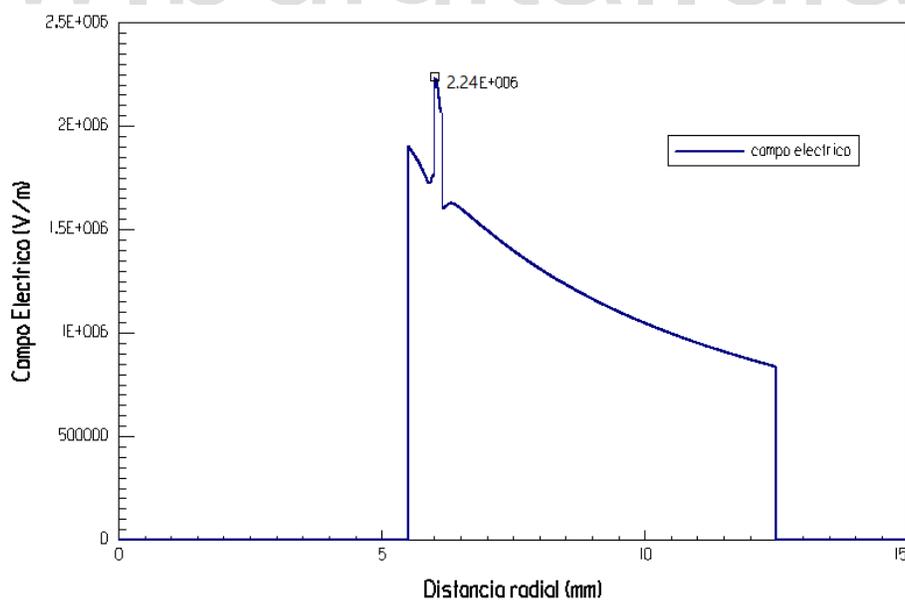


Figura 4.28. Distribución del campo eléctrico mediante un contaminante no metálico.

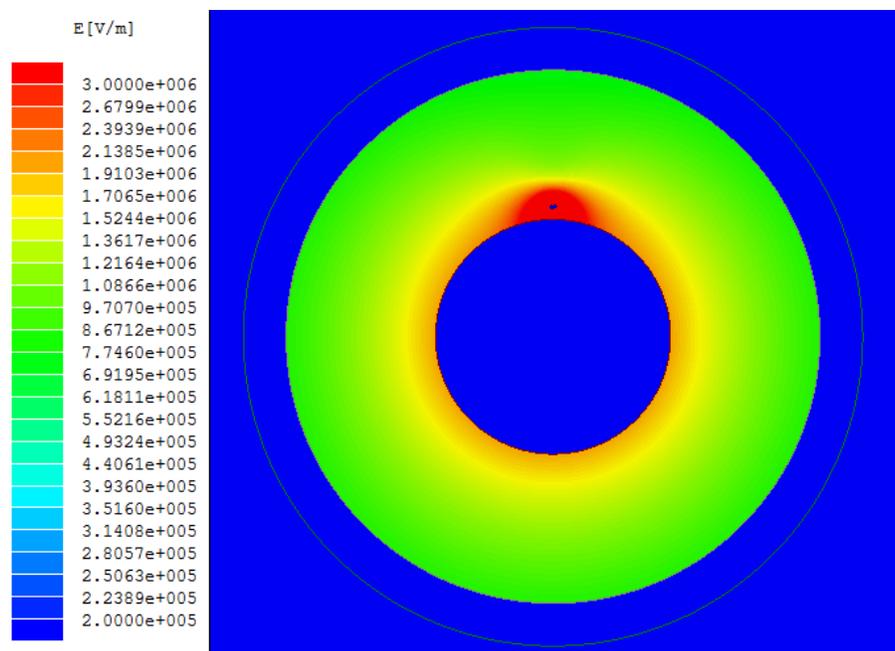


Figura 4.29. Contaminante metálico (acero) cercano al conductor.

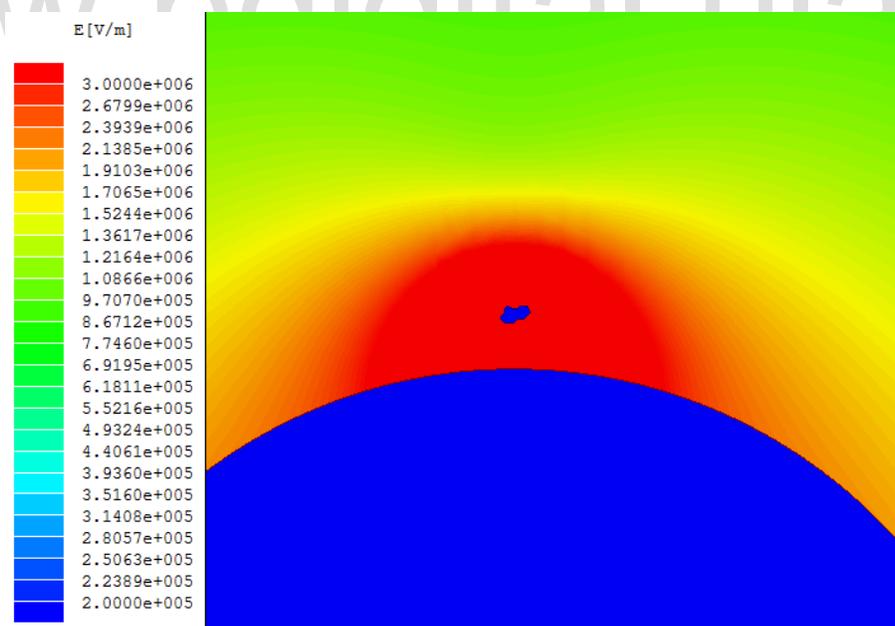


Figura 4.30. Distorsión del campo eléctrico para un contaminante metálico (acero).

Por último, el caso de estudio para un contaminante metálico mostrado en la Figura 4.29 en esta ocasión el campo eléctrico se ve afectado de una manera considerable en cuanto a los

casos anteriores, se puede apreciar que afecta un área aproximada de 1/3 al que ocupa el aislamiento. En la Figura 4.30 se puede apreciar mucho mejor el efecto del contaminante metálico y como afecta el campo eléctrico a su alrededor.

La variación que este contaminante metálico presenta a lo largo del aislamiento de cable de potencia se puede observar en la Figura 4.31, en este grafico se puede apreciar el punto más alto en el cual el campo eléctrico se ve afectado con un valor aproximado de  $3.5 \times 10^7$  V/m, en comparación al campo cuando no existe ningún defecto ( $1.9 \times 10^6$  V/m) es considerablemente alto y de mayor riesgo para la ruptura del dieléctrico.

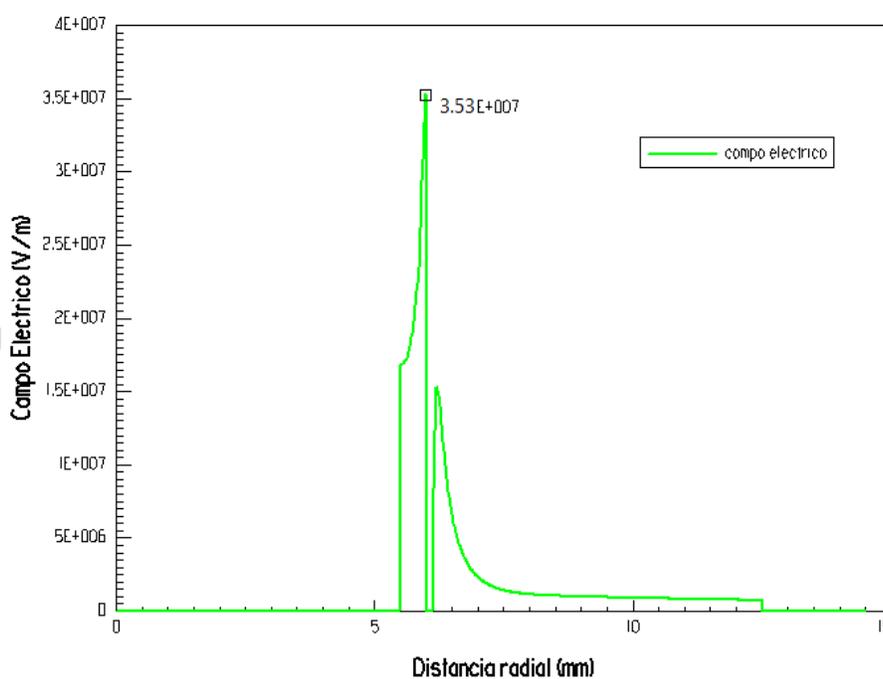


Figura 4.31. Variación del campo eléctrico en el aislamiento, al introducir un contaminante metálico.

Los ejemplos anteriores ilustran defectos que se han encontrado en cables de media tensión. Aunque éstos pueden no cubrir todos los defectos posibles, los cuales fueron seleccionados porque se han encontrado con frecuencia en las muestras del cable que fueron puestas a prueba. Algunos se debieron a contaminantes sólidos presentes en las materias primas o introducidos durante el proceso de fabricación (Toshikatsu y Greenwood, 1983). Se ha observado que las áreas de concentración de alta tensión en las interfaces de la pantalla

semiconductoras de aislamiento, son los sitios de generación de árboles eléctricos. Tales defectos ocurren con más frecuencia en los cables más antiguos. Hoy en día, se espera que el control de calidad reduzca la probabilidad de tales defectos.

#### 4.1.4 Delaminación

Los problemas asociados a la delaminación de la pantalla semiconductoras en la gran mayoría de los casos dan inicio al crecimiento de los arboles eléctricos. Estas imperfecciones causadas mediante el proceso de fabricación, muestran varios eventos en los que la formación de ET asociados con WT no han provocado fallas en los cables, incluso después de varios años de servicio en entornos operativos muy severos (Mashikian y Szatkowski, 2006).

La Figura 4.32 ilustra el árbol eléctrico que emana de la pantalla semiconductoras hacia el WT ventoso grande, el cual crece de una pantalla del conductor. El ET está creciendo radialmente hacia la parte superior del WT (Mashikian y Szatkowski, 2006). Este sitio fue detectado por pruebas de campo mediante descargas parciales de voltaje de inicio (PDIV).

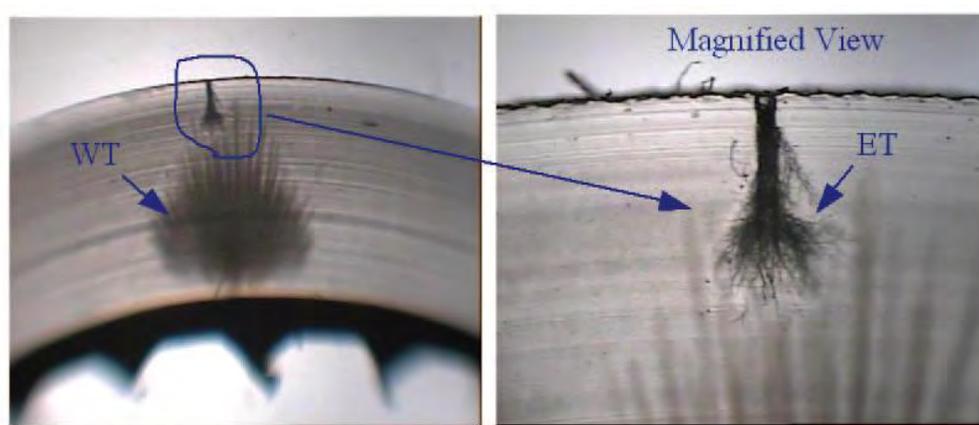


Figura 4.32. Árbol de agua de tipo ventoso (WT) y árbol eléctrico (ET) que crecen entre sí desde pantallas opuestas (Mashikian y Szatkowski, 2006).

Los árboles eléctricos que crecen de las pantallas en ambos lados de un WT, se muestran en la Figura 4.33, también ilustra el caso de un WT largo (puenteando el aislamiento) que emana de la pantalla del conductor de un cable de 15 kV-XLPE con bajo funcionamiento en el servicio. Este cable había estado en servicio durante 25 años (Mashikian y Szatkowski, 2006).

El WT ventoso cubrió todo el grosor de la pared aislante y se observaron ET que emanaban de las pantallas a ambos lados del árbol de agua. La vista ampliada muestra que las ramas de los árboles estaban muy cerca cuando la prueba de resistencia se interrumpió (Mashikian y Szatkowski, 2006).

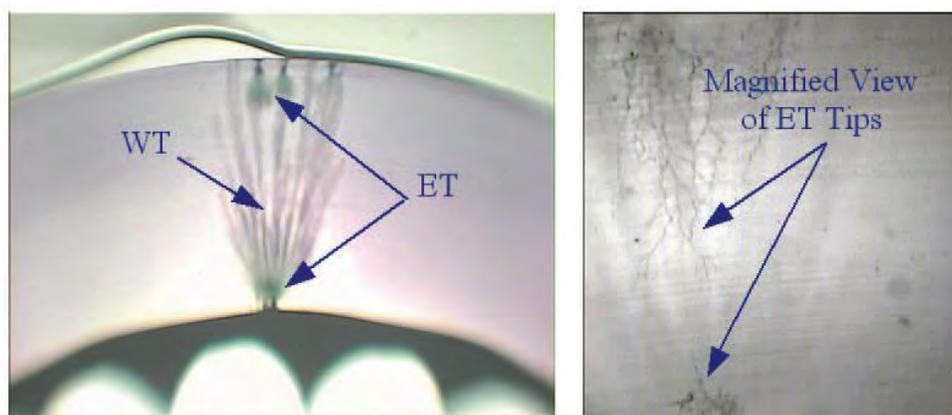


Figura 4.33. Árboles eléctricos (ET), con puntas cercanas a la unión, a ambos lados de un largo árbol de agua ventoso (WT) (Mashikian y Szatkowski, 2006).

#### 4.1.4.1 Simulación para una delaminación

Para esta simulación se introdujo una delaminación (aire) en la pantalla semiconductor del aislamiento del cable de potencia como se muestra en la Figura 4.34. Como se observa en la Figura 4.35, el campo eléctrico presenta no uniformidad en las terminaciones del defecto (valor más elevado) y en parte que cubre hacia el aislamiento de un valor más bajo. Por ende, posible formación de los arboles eléctricos.

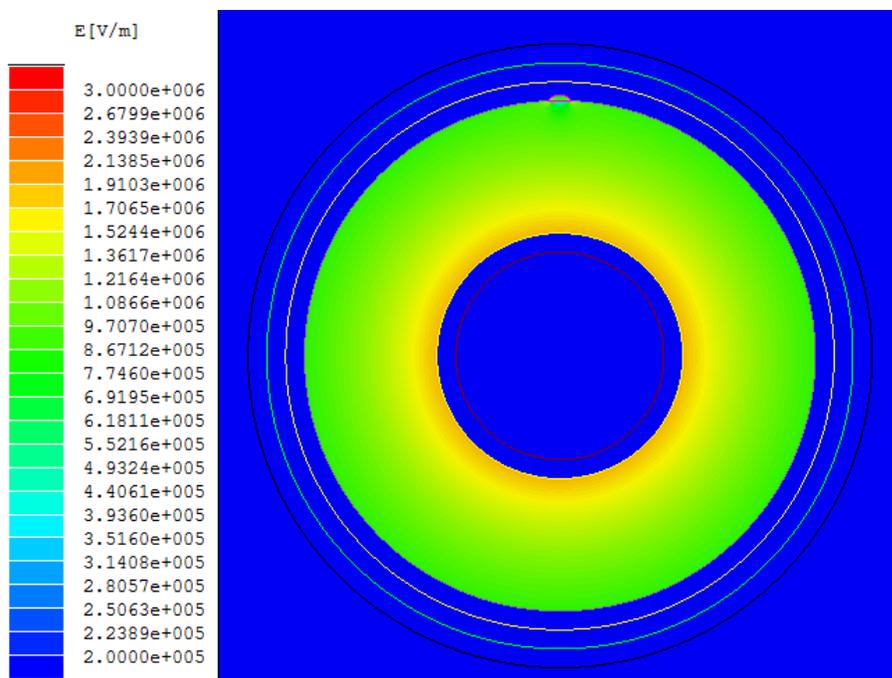


Figura 4.34. Delaminación en la pantalla semiconductor.

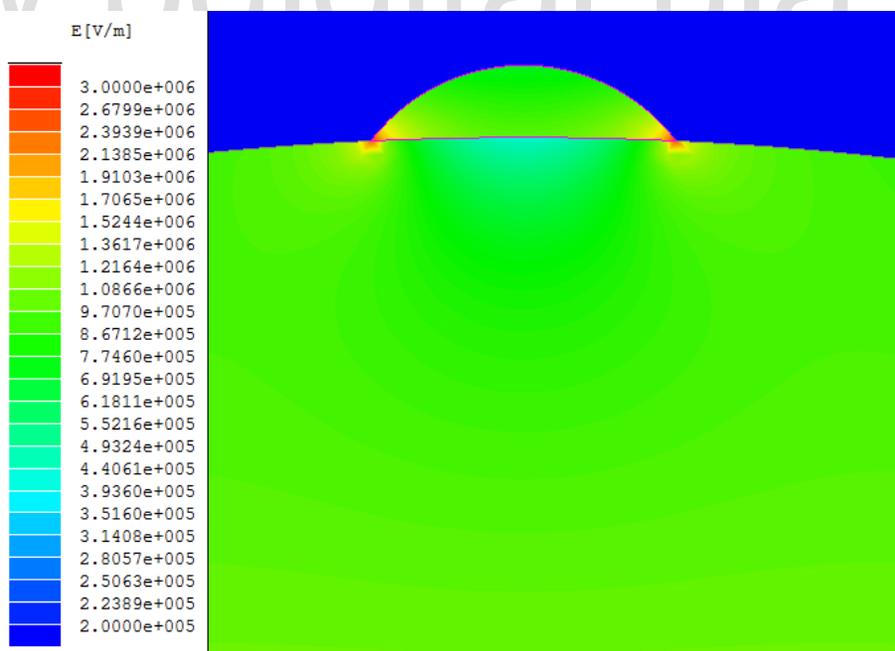


Figura 4.35. Vista ampliada de la delaminación.

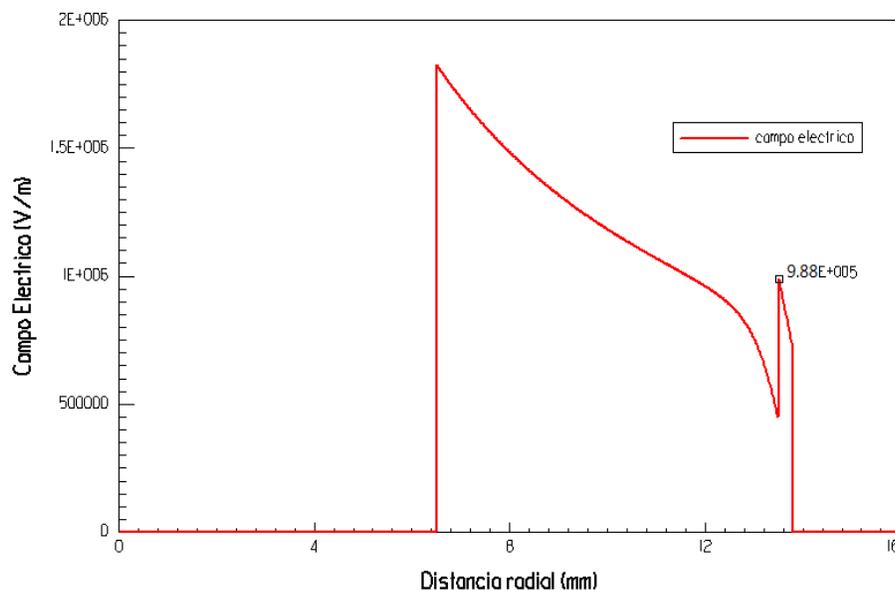


Figura 4.36. Campo eléctrico presentado mediante una delaminación.

Como se visualiza en el gráfico de la Figura 4.36 el campo eléctrico en el interior es más elevado debido a la presencia de aire, y en la parte adyacente hacia el interior del aislamiento su comportamiento es de un valor menor, el cual conlleva a la formación de arborescencia.

## 4.2 DEFECTOS DEBIDO A LA DEGRADACIÓN Y ENVEJECIMIENTO

### 4.2.1 Árboles de Agua

Se presenta los estudios realizados sobre arboles de agua y como se originan a lo largo del aislamiento de los cables de potencia.

Las impurezas pueden difundirse en aislamiento de cable PE o XLPE ya que estos cables usualmente no poseen cubierta de plomo, sino una cubierta de PVC o PE y blindaje de cinta metálica. Por lo tanto, están abiertos a su entorno (Toshikatsu y Greenwood, 1983). Hasta ahora, los fenómenos atribuidos a los efectos ambientales en los cables PE y XLPE son:

1. Arbolado de agua o arbolado electroquímico
2. Árbol de sulfuro - arbolado químico

El primer fenómeno se produce cuando el aislamiento se somete tanto al agua como al campo eléctrico, mientras que este último es una consecuencia del ataque de sulfuro al aislamiento. Ambos forman patrones similares a los árboles que generalmente reducen el voltaje de ruptura del aislamiento (Toshikatsu y Greenwood, 1983).

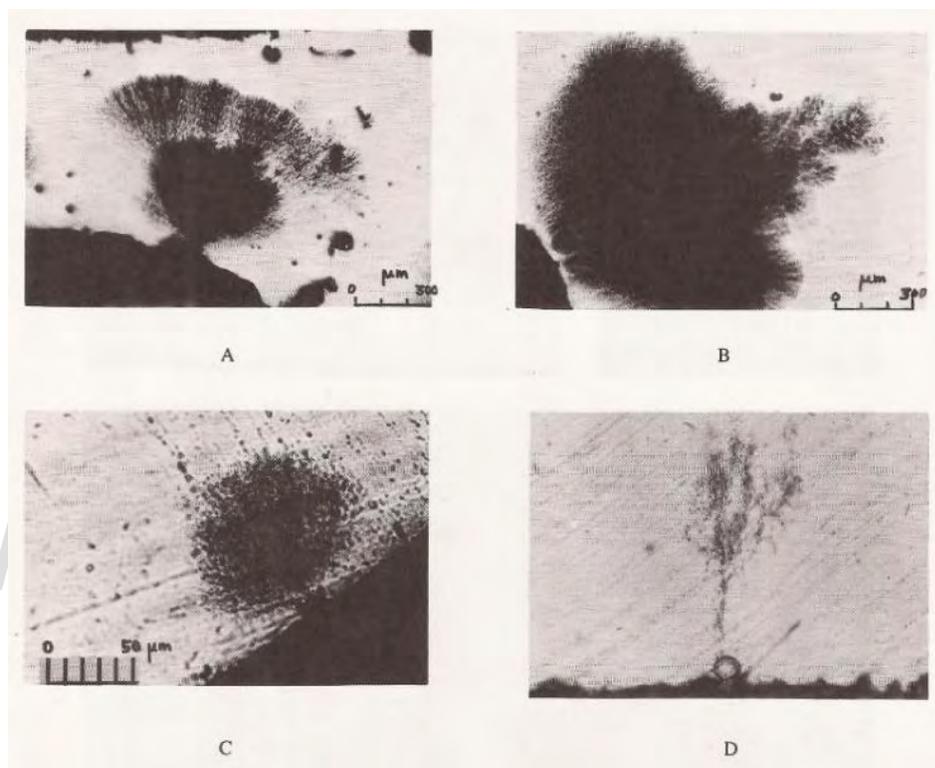


Figura 4.37. Árboles de agua encontrados en cables XLPE (Toshikatsu y Greenwood, 1983).

Los árboles de agua que se muestran en la Figura 4.37. se obtuvieron para cables con capas semiconductoras de tela que presentaban alguna irregularidad y propiedad higroscópica. Los avances recientes en la tecnología de cable permiten reducir las irregularidades o asperezas mediante la extrusión simultánea de capas semiconductoras y el aislamiento de polietileno. Esto hace que el tiempo para la nucleación de los árboles de agua sea más largo.

La observación microscópica de muestras de aislamiento PE y XLPE de cables de alta tensión recuperados del servicio (1 con casi 20 años de servicio) reveló que algunas muestras presentaban manchas que podían llamarse árboles. Un típico árbol encontrado en alguna de las

muestras se presenta en la Figura 4.38 (Toshikatsu y Greenwood, 1983). De acuerdo con la referencia, la dirección del crecimiento de los patrones del árbol esencialmente es paralela a las líneas del campo eléctrico.

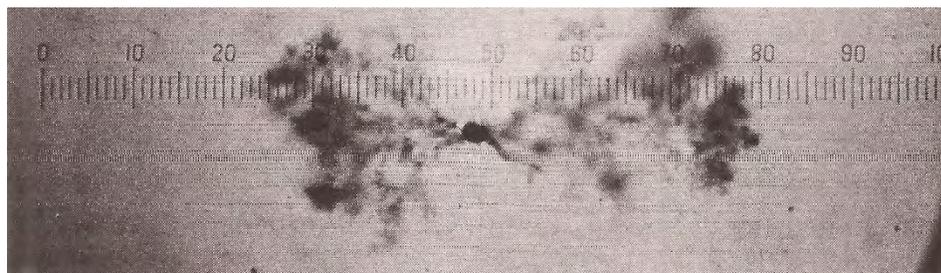


Figura 4.38. *Bow-tie*, árbol desarrollado en cables de polietileno (Toshikatsu y Greenwood, 1983).

Lazo de corbata, aparecen en los contaminantes dentro del aislamiento, la mayoría son más cortos que  $250\ \mu\text{m}$ , pero algunos llegan hasta  $3\ \text{mm}$ , y en micro-cavidades. Este tipo de árboles es probablemente el más encontrado en todo el cable extruido (incluyendo el sistema de apantallamiento) (Toshikatsu y Greenwood, 1983).

#### 4.2.1.1 Simulación de los distintos árboles de agua

En este caso de estudio se mostrará cómo afectan los árboles de agua de tipo ventoso al aislamiento XLPE en cables de potencia. Para una mejor apreciación de su efecto, se realizaron tres estudios en distintos tamaños en proporción del ancho del aislamiento. Su permitividad relativa se tomó de un valor de 5 (Burkes, 2014), en cual anteriormente se utilizó para el modelado del árbol de agua y su efecto.

A continuación, se agrega un árbol de agua al cable donde es 33% a través del ancho del aislamiento. Este valor fue elegido porque menor que esto no tiene tanto efecto en el campo eléctrico. Se muestra en la Figura 4.39.

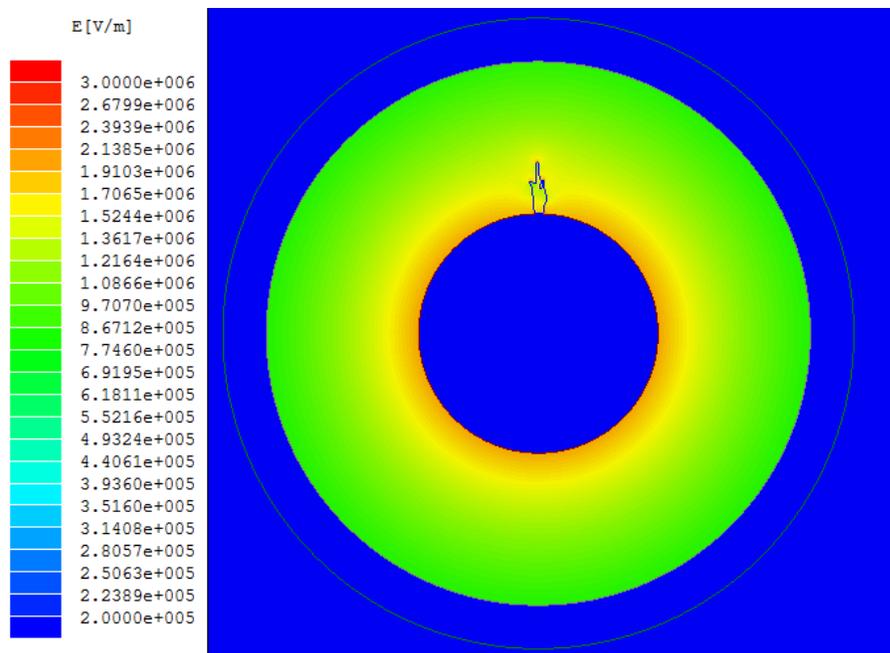


Figura 4.39. Árbol de agua desarrollado un 33% del aislamiento del cable.

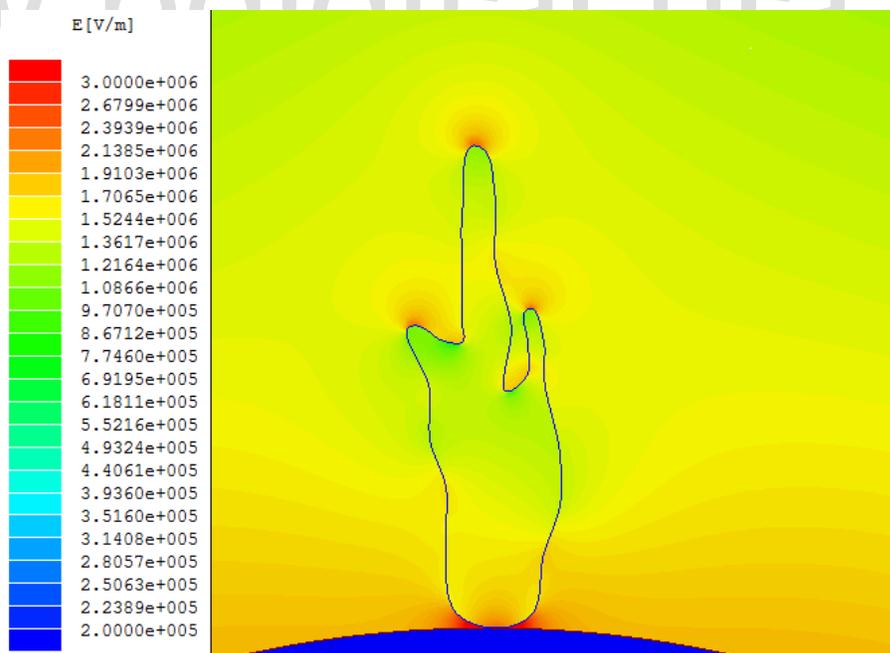


Figura 4.40. Efecto del campo eléctrico frente a un árbol de agua.

Con el árbol de agua insertado en el cable, se puede ver que el campo eléctrico que lo rodea comienza a distorsionarse (Figura 4.40), el cual se ve más afectado en donde inicia su crecimiento y en las puntas, a futuro puede empezar a crecer el árbol eléctrico.

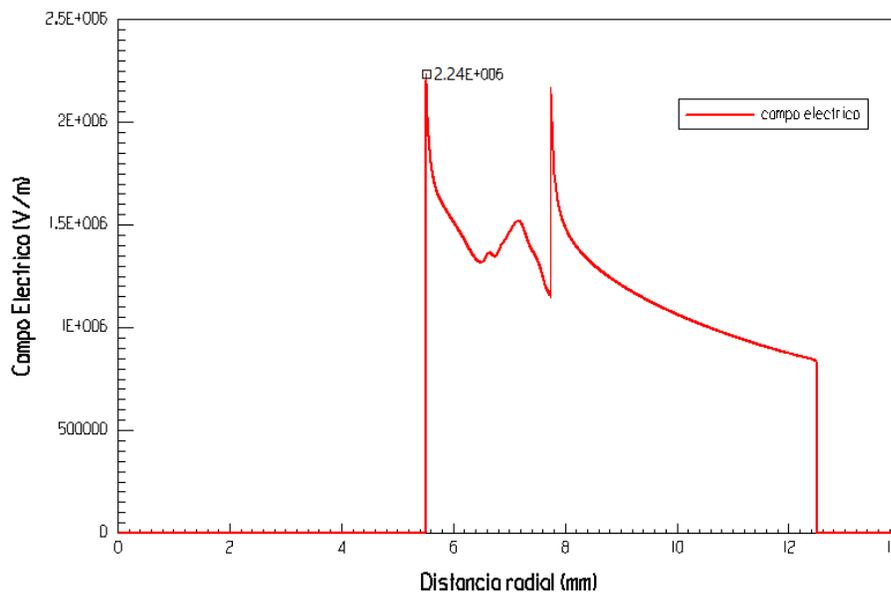


Figura 4.41. Campo eléctrico debido a un árbol de agua de tipo ventoso.

Para su efecto en el campo eléctrico para un árbol de agua de tipo ventoso que ha crecido un 33% aproximadamente en el aislamiento del cable de potencia se muestra en la Figura 4.41, su mayor valor se encuentra ubicado en la parte donde emana el WT.

En la Figura 4.42, el árbol de agua crece hasta el 67% a través de la distancia entre el conductor hacia el neutro concéntrico.

El efecto de mayor concentración del campo eléctrico se encuentra en donde inicia el árbol de agua como se observa en la Figura 4.43, a su vez el gráfico muestra las variaciones que este efecto presenta en su interior.

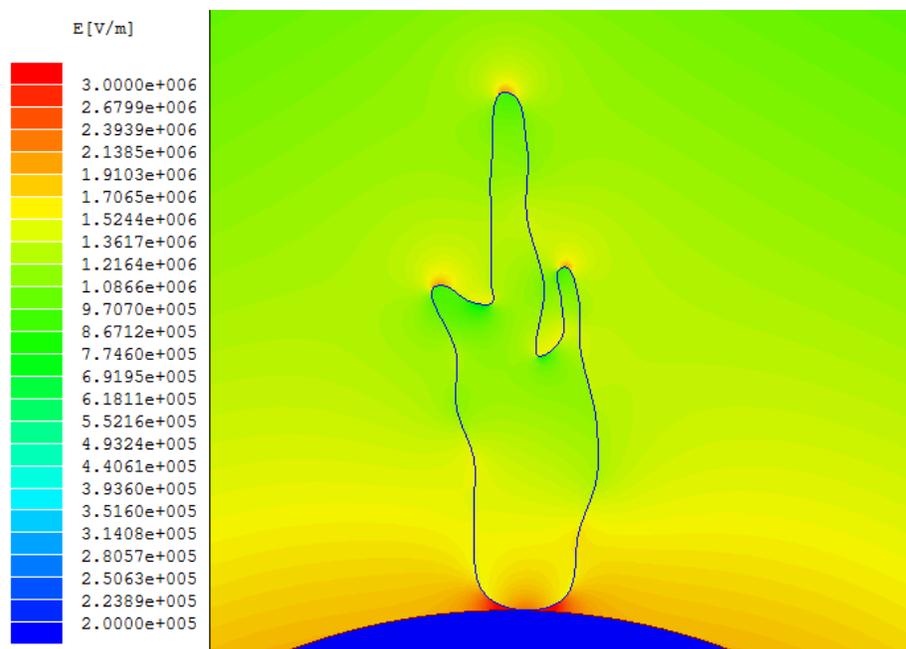


Figura 4.42. Árbol de agua a una 67% del aislamiento.

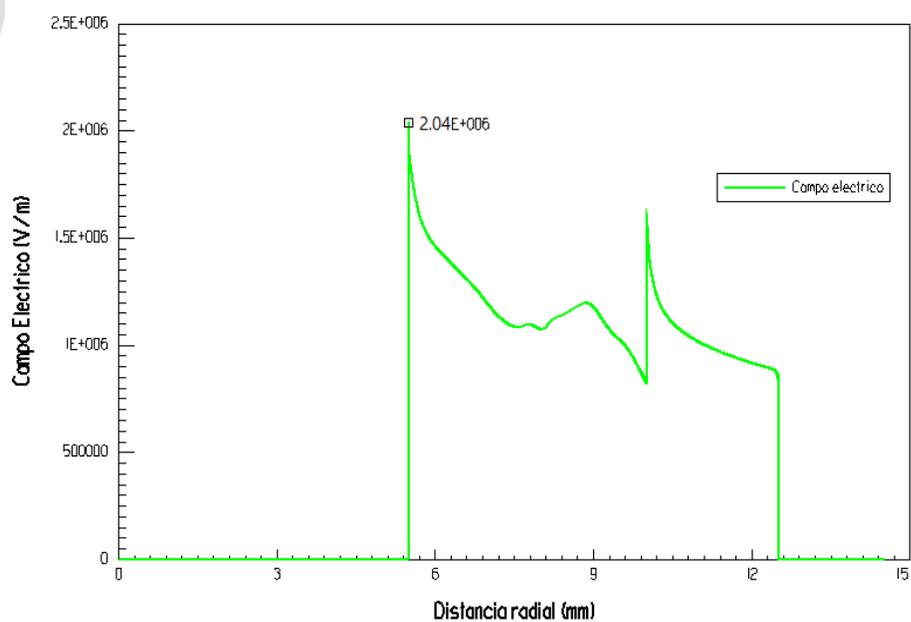


Figura 4.43. Distribución del campo eléctrico en presencia de un árbol de agua.

Cuando el árbol de agua cruza el 90% del aislamiento, la amplificación del campo eléctrico en la extremidad es perceptiblemente mayor que el campo eléctrico normal del cable. Esto hará que el aislamiento de la punta se rompa muy rápido. Por lo tanto, el árbol de agua crecerá con velocidades muy rápidas hasta que llegue al conductor (Burkes, 2014). Finalmente, el árbol de agua ha crecido 100% a través del aislamiento y está tocando el neutro concéntrico (puenteando) como se muestra en la Figura 4.44.

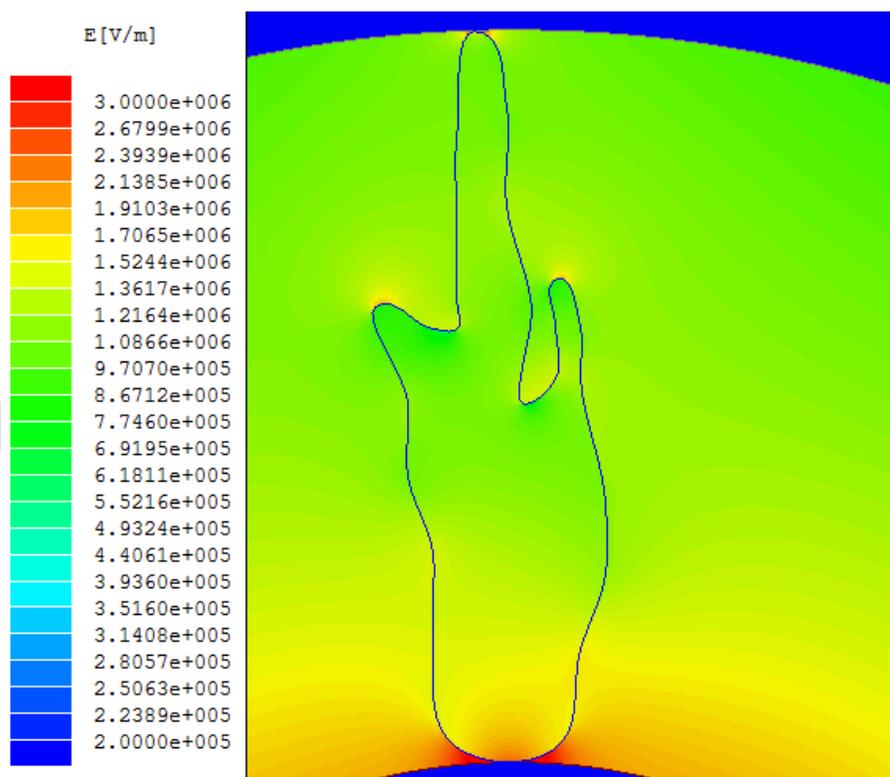


Figura 4.44. Árbol de agua al 100% de su crecimiento.

En el gráfico de la Figura 4.45 se observa el campo eléctrico dentro del árbol de agua que ha crecido al 100%, con lo cual está puenteando el aislamiento, su efecto siempre es de mayor incremento en parte inicial de crecimiento lo cual lo podemos observar en la Figura 4.45. Para los 3 casos de estudios del WT, se observa que sus valores de incremento son muy

similares, pero el de mayor riesgo, para causar una falla, será siempre el que ha crecido en su totalidad.

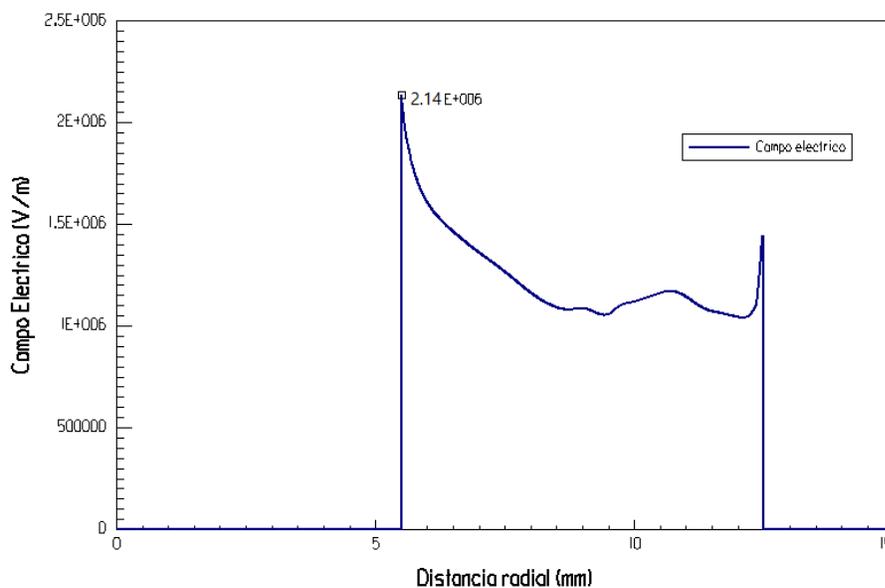


Figura 4.45. Distribución del campo en el interior de un árbol de agua que puentea el aislamiento.

En la siguiente simulación (Figura 4.46) se muestra el modelado de un árbol de agua de tipo lazo de corbata (*bow-tie*), para este caso de estudio también se considera la permitividad relativa de 5, como anteriormente se usó en el árbol de agua tipo ventoso, el tamaño considerado para este tipo de árbol de agua es de 300  $\mu\text{m}$  de longitud aproximadamente. Generalmente el crecimiento de este tipo de árboles de agua parte de impurezas (Burkes, 2014) en el medio del aislamiento.

Las ramas crecen desde el volumen de aislamiento radialmente hacia ambas pantallas, dándoles la apariencia de un lazo de corbata (Figura 4.47). Tienen una cantidad limitada de humedad disponible. Esto se debe al hecho de que sólo una pequeña cantidad de humedad se encuentra alrededor de la partícula en el centro del aislamiento. Por lo tanto, no tienen una gran fuente de humedad a extraer y no pueden crecer lo suficientemente grande para romper el aislamiento. Esto significa que nunca causarán la falla del cable y no son de interés al estudiar el estado de los cables (Burkes, 2014).

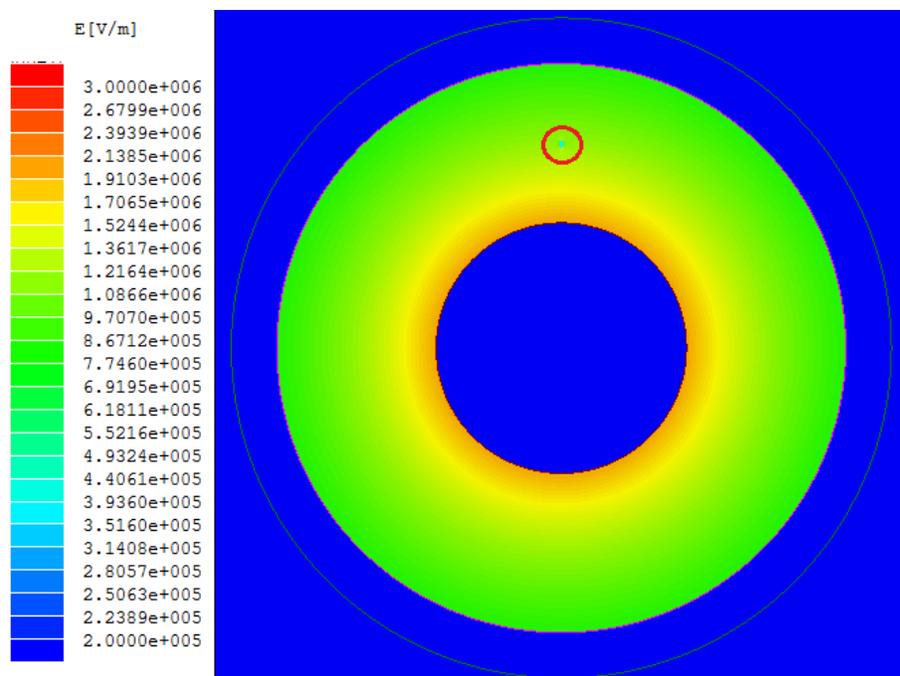


Figura 4.46. Árbol de agua (*bow-tie*) el centro del aislamiento.

www.bdigital.ula.ve

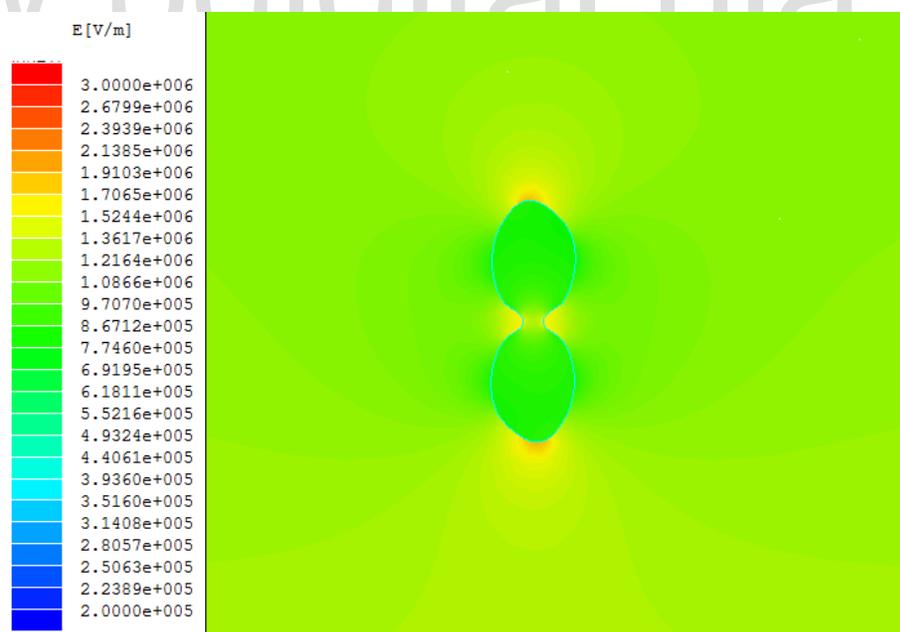


Figura 4.47. Efecto del campo eléctrico en presencia de un árbol de agua lazo de corbata en el aislamiento del cable de potencia.

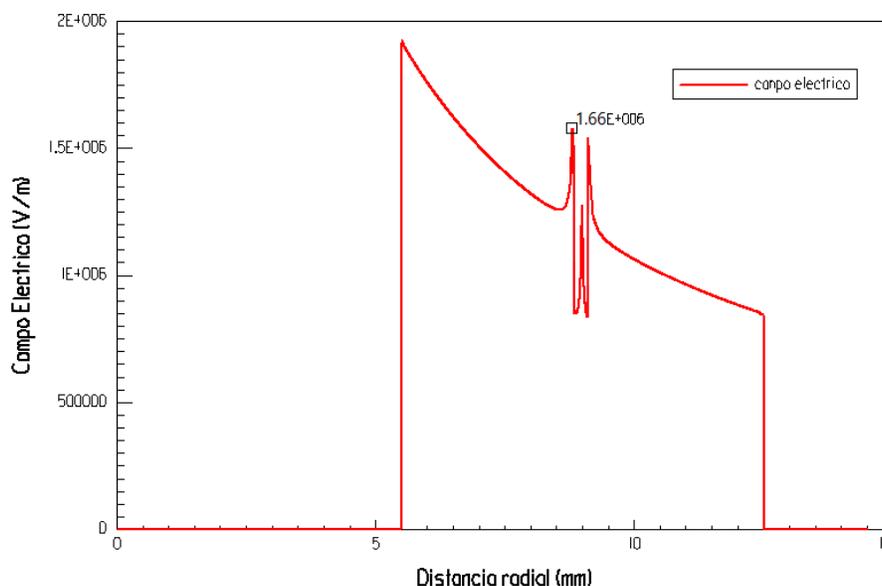


Figura 4.48. Efecto del campo en el aislamiento al introducir un lazo de corbata.

Se observa en la Figura 4.48 que su mayor efecto en el comportamiento del campo es en las ramas del árbol de agua *bow-tie* pero su incremento no sobrepasa el máximo valor del campo eléctrico dentro del aislamiento, aun así afecta la uniformidad del campo.

#### 4.2.2 Árbol Eléctrico

La causa principal del fallo del aislamiento del cable subterráneo, es debido a la formación de árboles eléctricos desde un defecto. El defecto en la estructura de aislamiento puede ser de tipo conductor/no conductor (Sarathi y otros, 2011). El tamaño y la forma de la imperfección varía el campo eléctrico local, que altera la forma del árbol y su modo de propagación.

Cuando se conecta un alto voltaje al electrodo de una aguja, el campo eléctrico local cerca de la punta de la aguja aumenta y si el campo eléctrico local excede la resistencia a la rotura del material, la descarga parcial incide y provoca un daño inicial localizado a la estructura de aislamiento formando un árbol. Seleccionando cuidadosamente la magnitud de la tensión de operación para el inicio del árbol, se generaron y analizaron diferentes patrones de árboles. La

Figura 4.49 muestra las fotografías ópticas de diferentes tipos de árboles eléctricos formados en el espécimen del cable XLPE bajo los voltajes AC. Se observan, un árbol de tipo arbusto (Fig. 4.49a), un árbol convencional (Fig. 4.49b), un árbol de tipo fibrilar (Figura 4.49c) y un árbol intrínseco (Fig. 4.49d) los cuales se forman en la punta del electrodo de aguja, que está conectado a alto voltaje. La Figura 4.49e muestra una trayectoria de descomposición típica formada en la estructura de aislamiento debido a la propagación del árbol eléctrico y que termina en el electrodo de tierra (Sarathi y otros, 2011).

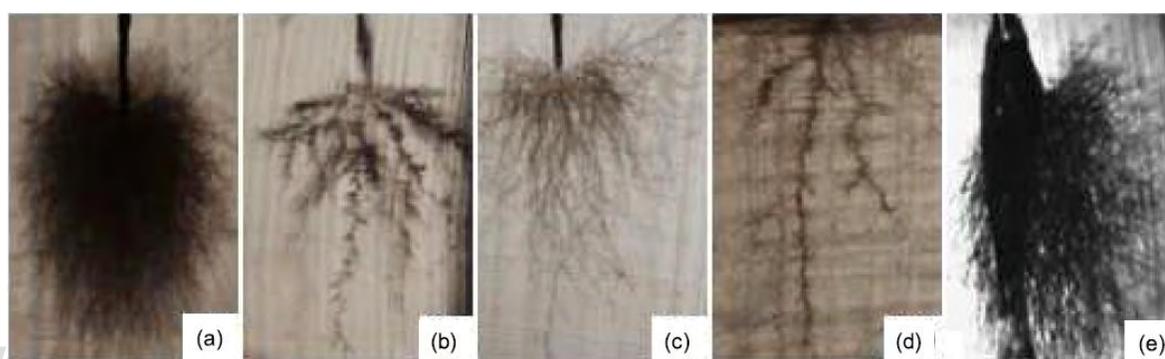


Figura 4.49. Árbol eléctrico en cable con aislamiento XLPE bajo tensión de AC, (a) árbol de tipo arbusto, (b) árbol convencional, (c) árbol de tipo fibrilar, (d) árbol de tipo intrínseco, (e) árbol que provoca la ruptura del aislamiento (Sarathi y otros, 2011).

El árbol de agua es un mecanismo de deterioro "silencioso" porque no hay PD detectables durante su crecimiento. Un árbol de agua suele causar falla al convertirse a un árbol eléctrico, y esto es cuando pueden ocurrir las PD (Toman, 2003). A menudo, una sobretensión transitoria inicia el árbol eléctrico adyacente a un árbol de agua desarrollado, como resultado de descargas parciales.

En árboles de agua más avanzados, existe una mayor densidad de micro-cavidades llenas de agua, lo que aumenta la constante dieléctrica dentro del mismo, lo cual provoca un incremento correspondiente en tensión eléctrica en el aislamiento, adyacente a las puntas del árbol de agua. A medida que la punta del árbol se aproxima a otro incremento de tensión en el aislamiento, el campo local puede llegar a ser suficientemente grande, particularmente si el cable

se somete a un voltaje transitorio para iniciar un árbol eléctrico. El árbol eléctrico se inicia ya sea, desde las puntas del árbol de agua, o desde el incremento de la tensión en el aislamiento o en la interfaz. Una vez que un árbol eléctrico ha iniciado, las PD hacen que el árbol eléctrico crezca y se propague rápidamente a través del aislamiento, en relación con la tasa de crecimiento de los árboles de agua (Toman, 2003).

Los árboles eléctricos tienen una estructura de canal ramificado aproximadamente orientada a lo largo de las líneas de campo eléctrico. Típicamente, los diámetros de los canales son (1 a 20)  $\mu\text{m}$ , y generalmente cada canal tiene (5 a 25)  $\mu\text{m}$  de longitud antes de que se ramifique (Haddad y Warne, 2004). Existen pruebas considerables de que la ramificación está determinada por el campo eléctrico local, que está muy distorsionado por los electrones atrapados, que emanan las descargas dentro del árbol.

#### 4.2.2.1 Simulación del árbol eléctrico

Para este caso de estudio se modeló un árbol eléctrico, partiendo su crecimiento de las puntas de un árbol de agua (Figura 4.50), debido al incremento del campo eléctrico en esa área específica. Su tamaño es de 700  $\mu\text{m}$  de longitud en sus ramificaciones, su composición parte de un material conductor por el cual se utilizó carbón y tiene una conductividad de  $2.8 \cdot 10^4$  S/m. Se tomó este tamaño para una mejor visualización de su efecto; en su totalidad desde el inicio desde el árbol de agua cubre un 33% del ancho del aislamiento.

Se puede observar en la Figura 4.51 como afecta el crecimiento de un árbol eléctrico el campo en el aislamiento del cable de potencia, en las ramificaciones (puntas del árbol eléctrico) del ET más cercano al neutro concéntrico es donde mayor magnitud del campo eléctrico se concentra, en consecuencia, este ET eventualmente podría llegar a una posible ruptura del aislamiento.

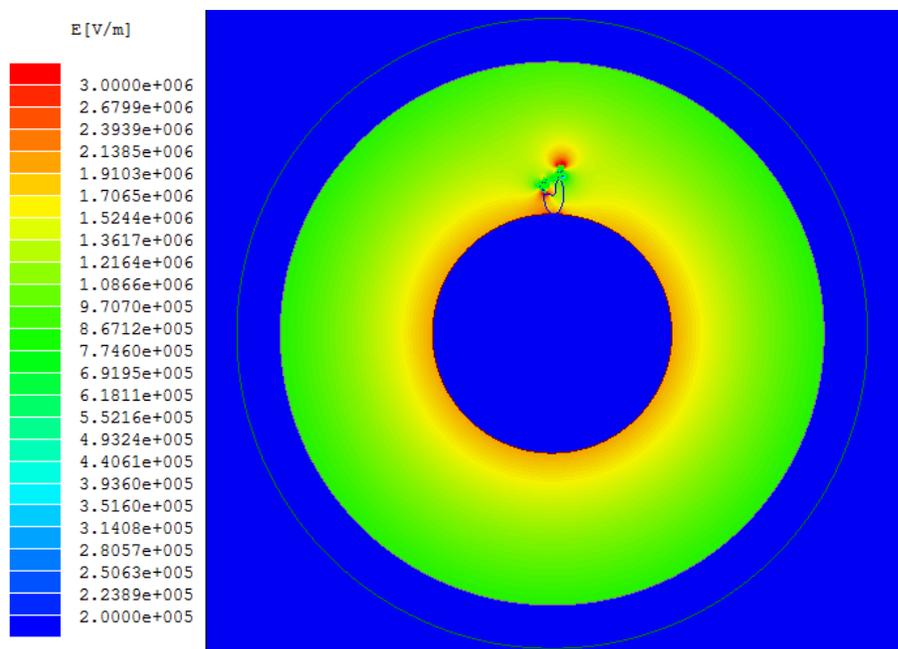


Figura 4.50. Árbol eléctrico que crece en las puntas de un árbol de agua.

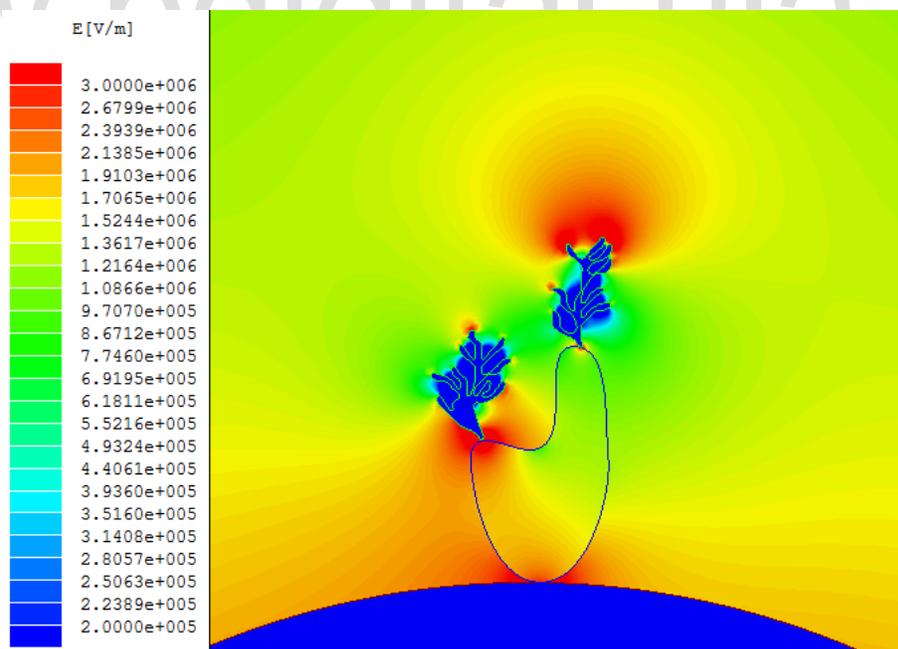


Figura 4.51. Comportamiento del campo debido a un árbol eléctrico.

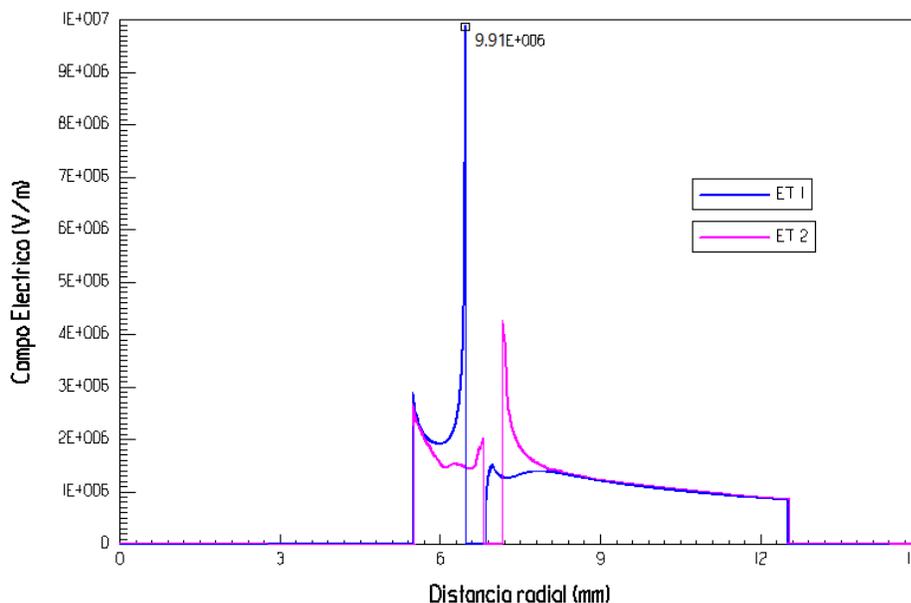


Figura 4.52. Efecto de los árboles eléctricos de la Figura 4.51. ET1 campo eléctrico para el ET de la izquierda, y ET2 para el ET de la derecha.

Al observar la Figura 4.52 se concluye, aunque su efecto es mayor para el ET1 en el área donde se da el inicio de su crecimiento a partir de un WT, también se visualiza el mismo efecto para el ET2, pero de un menor incremento en el campo eléctrico, dicho valor de ET1 es notable en cuanto al máximo campo eléctrico dentro del cable de potencia cuando no hay presencia de ningún defecto.

## 4.3 MANO DE OBRA E INSTALACIÓN

### 4.3.1 Corte

La descarga parcial (PD) constantemente se menciona en conjunto con cavidades o micro-cavidades en el aislamiento o en las interfaces con las pantallas. Los únicos casos de PD de esta categoría descubiertos por el personal de instalación de cables, habían sido causados por la delaminación entre las pantallas y el aislamiento o por lesiones físicas ocasionadas en el

aislamiento del cable o su pantalla durante la fabricación, el transporte o la instalación (Mashikian y Szatkowski, 2006).

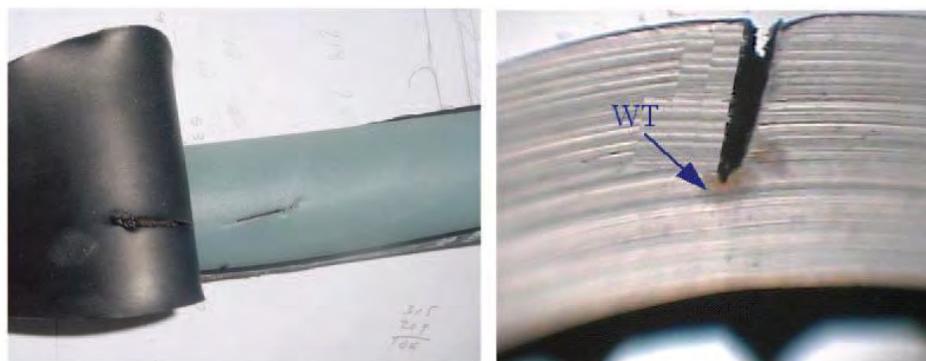


Figura 4.53. Corte profundo, con más del 50% del aislamiento, realizado durante la instalación (Mashikian y Szatkowski, 2006).

La Figura 4.53 representa un defecto encontrado en un sitio de PD con un voltaje de inicio de 17 kV. Se encontró un hilo neutro penetrando con un corte que se extendía a más del 50% del aislamiento. La existencia de un WT sugiere que este defecto probablemente había sido causado durante la instalación hace más de 25 años, o en alguna reparación posterior. Probablemente la PD estaba ocurriendo en la superficie aislante. Estos no son en absoluto casos aislados de cables instalados con imperfecciones, generalmente son causadas por manipulación brusca. En casos excepcionales, se han encontrado huecos en el aislamiento XLPE que han sido sometido a temperaturas excesivamente altas (Mashikian y Szatkowski, 2006).

#### 4.3.1.1 Simulación del corte

Para este caso en particular en el cual se tomó como referencia un corte (Figura 4.53) ocasionado durante la instalación de un cable de potencia. Se introdujo una imperfección (aire) hasta el 50% del aislamiento aproximadamente como efecto del corte originado, y observar que efecto proporciona en el cable XLPE. En la Figura 4.54 se muestra como el corte atraviesa desde la cubierta hasta el aislamiento.

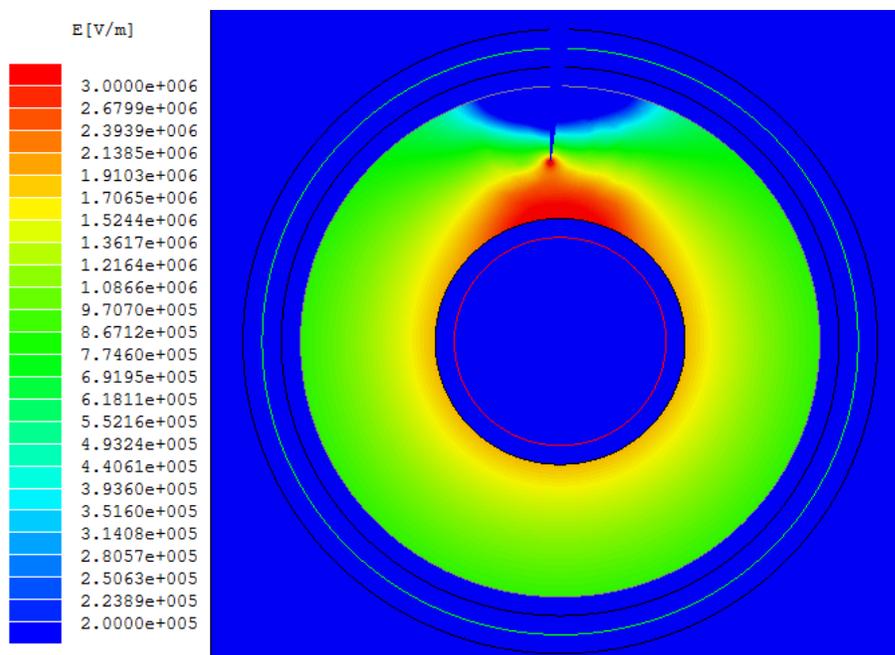


Figura 4.54. Corte en el aislamiento durante la instalación.

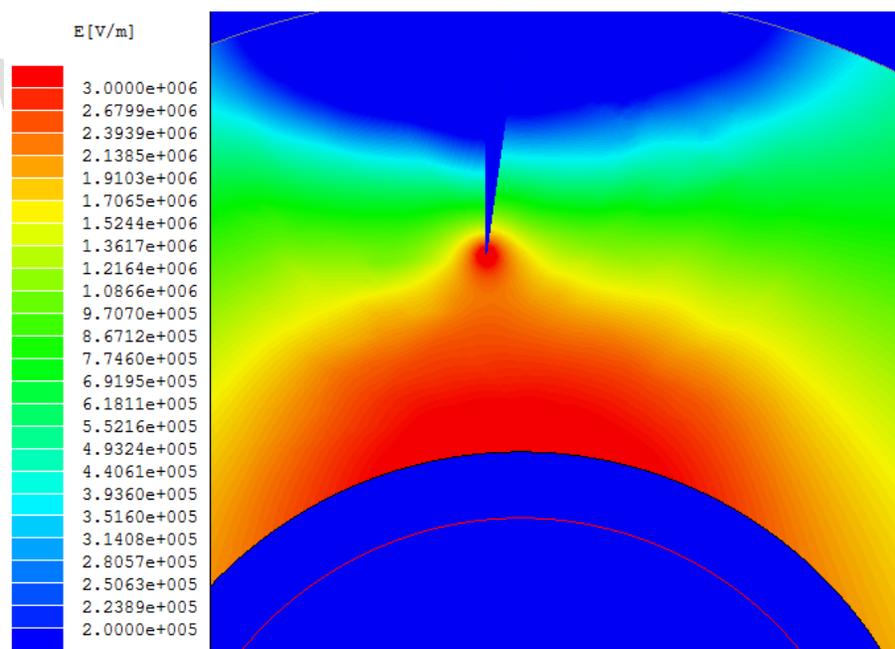


Figura 4.55. Efecto Campo eléctrico ocasionado por una incisión.

En la Figura 4.55 se representa el efecto ocasionado por la incisión, el campo eléctrico es de mayor valor en la punta del defecto, ya que por su forma puntiaguda hace que se produzcan

descargas parciales y en un área muy pequeña, esto provoca que se concentre el campo eléctrico en esta área específica. Este defecto deforma el campo eléctrico en gran parte del aislamiento en comparación a otros antes ya estudiados, por ende es de gran importancia su estudio, el cual produciría la ruptura del aislamiento en un tiempo más rápido. En cuanto a un mejor entendimiento de este efecto ocasionado se representa en la Figura 4.56 y su mayor incremento el campo eléctrico en sus adyacencias.

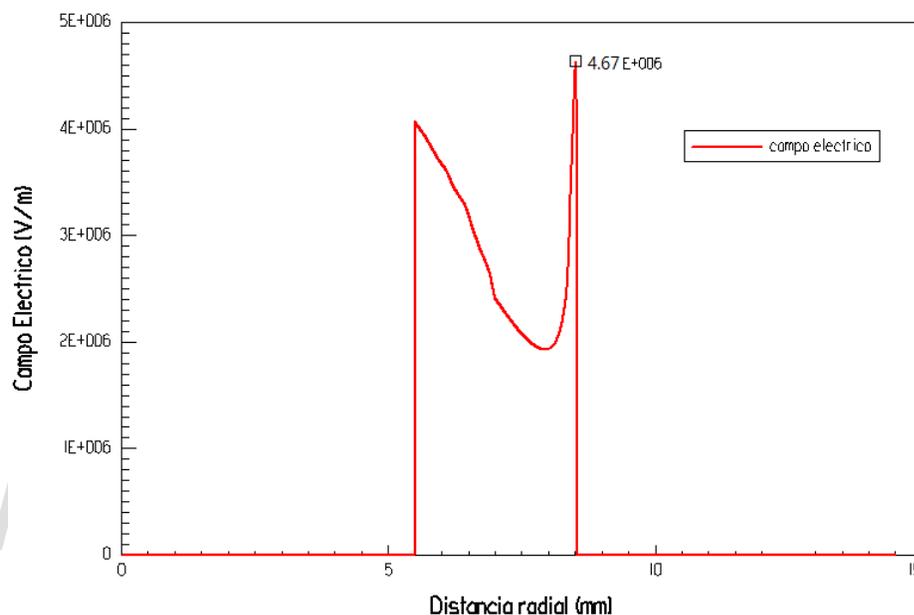


Figura 4.56. Distribución del campo eléctrico ocasionado por un corte en el aislamiento.

#### 4.4 SUMARIO

En este Capítulo se plantearon los casos de estudios encontrados en la revisión literaria, para luego realizar su respectiva simulación mediante el programa Maxwell, el cual nos muestra la magnitud del campo eléctrico y como pierde su uniformidad al introducir los diferentes defectos. Con los resultados obtenidos nos servirá de referencia para la comparación de las posteriores simulaciones el en siguiente Capítulo.

# CAPÍTULO 5

## SIMULACIONES MEDIANTE COMSOL

### *MULTIPHYSICS*<sup>®</sup>

Para este Capítulo se inicia con la descripción del programa COMSOL y del módulo empleado para las simulaciones. Se explica la interface física utilizada y el método en el cual se basa su análisis, finalmente se presenta los resultados obtenidos en dichas simulaciones.

#### 5.1 DESCRIPCION DEL PROGRAMA COMSOL

COMSOL *Multiphysics*<sup>®</sup> es un paquete de software que proporciona un entorno completo e integrado para el modelado, análisis y resolución por elementos finitos, mediante simulación para aplicaciones de fenómenos físicos 3D en ingeniería, especialmente fenómenos acoplados, o multifísicos, como problemas con: fluidos, estructuras térmicas, electromecánicas, eléctricas entre otros, que permitan definir una geometría 3D (COMSOL, 2014). Presenta un conjunto completo de herramientas para crear e implementar aplicaciones personalizadas con interfaces de usuario basadas en los modelos COMSOL; usted puede modificarlo para requisitos particulares a sus propias necesidades. COMSOL dispone de una amplia variedad de posibilidades de programación especificando el mallado, cargas, y la visualización previa de análisis (preproceso) para luego ejecutar el postproceso y observar sus resultados finales.

##### 5.1.1 Modulo de interfaz utilizado

El módulo AC / DC es utilizado por ingenieros y científicos para comprender, predecir y diseñar campos eléctricos y magnéticos en aplicaciones estáticas, de baja frecuencia y

transitorias. Simulaciones de este tipo resultan en productos y métodos de ingeniería más potentes y eficientes. Permite a sus usuarios predecir con rapidez y precisión las distribuciones de campos electromagnéticos, las fuerzas electromagnéticas y la disipación de potencia en un diseño propuesto. En comparación con los prototipos tradicionales, COMSOL ayuda a reducir los costos y puede evaluar y predecir entidades que no son directamente medibles en experimentos. También permite la exploración de condiciones de operación que destruirían un prototipo real o serían peligrosas (COMSOL, 2014).

La interfase física AC / DC formula y resuelve la forma diferencial de las ecuaciones de Maxwell junto con las condiciones iniciales y de contorno. Las ecuaciones se resuelven utilizando el método de elementos finitos (FEM) con discretización de elementos de borde numéricamente estable en combinación con algoritmos de última generación para el pre-acondicionamiento y la solución de los sistemas de ecuaciones dispersas resultantes. Los resultados se presentan en la ventana gráfica a través de gráficos predefinidos de campos eléctricos y magnéticos, corrientes y tensiones o como expresiones de las magnitudes físicas que se pueden definir libremente, y las cantidades derivadas tabuladas (por ejemplo, resistencia, capacitancia, inductancia, fuerza electromagnética y Torque) obtenido de una simulación (COMSOL, 2014).

En más detalle, el módulo AC/DC trata problemas electromagnéticos estáticos y cuasi-estáticos generales para geometrías 2D, 2D con simetría axial y 3D completas. Soporta análisis armónicos en el tiempo, transitorios y estáticos. Los usuarios pueden realizar virtualmente cualquier tipo de simulación. Por ejemplo, permite acoplamientos a muchas otras físicas distintas al electromagnetismo incluyendo acústica o mecánica de estructuras, como analizar maquinaria rotatoria o determinar la respuesta frecuencial de un altavoz. Lo siguiente es que es extremadamente flexible al permitir al usuario acoplar cualquier física arbitraria, así como definir propiedades de materiales de una manera adecuada única. De hecho, el módulo viene con dos tipos de acoplamiento multi-físico preparados para maquinaria rotatoria y calentamiento inductivo (COMSOL, 2014).

## 5.2 MÉTODO DE ELEMENTO FINITO (FEM)

*Finite Element Method* (FEM) es la fuerza motriz y la herramienta dominante detrás de la ciencia computacional de hoy y la ingeniería. Este método fue desarrollado por primera vez en los Estados Unidos en la década de 1940 para estimar las tensiones en las estructuras de los aviones. Posteriormente se desarrolló para la estimación de la distribución de campos eléctricos en dieléctricos. Con la disponibilidad de programas de paquetes de software, es el método más utilizado en el mundo para la estimación del campo eléctrico (Ravindra y Wolfgang, 2011).

En general se basa en transformar las ecuaciones diferenciales en forma integral y luego usar una aproximación. Una forma de transformar estas ecuaciones es encontrar una función que minimice una integral de energía. El enfoque básico de FEM para la estimación de campo eléctrico implica la característica factual de un campo electrostático de que la energía total encerrada en toda la región del campo adquiere un valor mínimo (Ravindra y Wolfgang, 2011). En otras palabras, el potencial  $\phi$ , bajo condiciones dadas de la superficie del electrodo, debería hacer que la función de energía cerrada esté a un mínimo para un volumen dieléctrico dado "V"; por lo tanto:

$$W = \int_V \frac{1}{2} \epsilon (\text{grad } \phi)^2 dV \rightarrow \text{minimum} \quad (5.1)$$

W es la energía eléctrica almacenada en el volumen de dieléctrico considerado.

Por lo tanto, en este método el campo entre los electrodos bajo consideración se subdivide en número finito de elementos de tamaño discreto. El comportamiento de estos elementos se especifica por una serie de parámetros, por ejemplo, el potencial. El número de puntos nodales y elementos establecidos dentro de la malla se asignan identificando números enteros. La forma de estos elementos discretos se selecciona adecuadamente para ser triangular para representaciones bidimensionales (Ravindra y Wolfgang, 2011). Para las configuraciones tridimensionales de campo, "tetraedro", se considera apropiada una estructura sólida piramidal con cuatro caras triangulares planas, mostrada en la Figura 5.1.

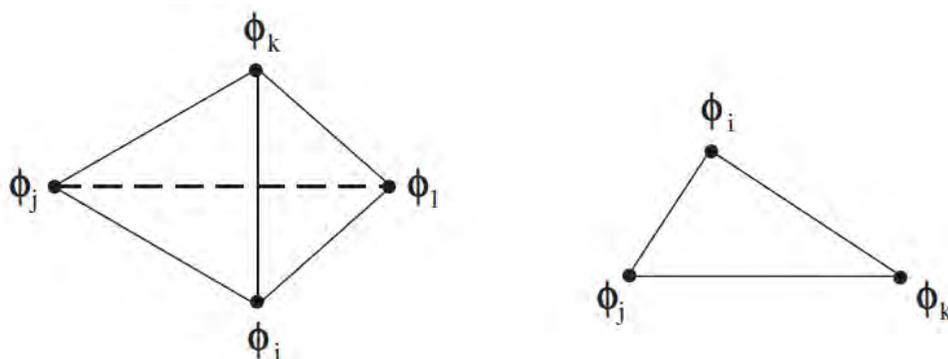


Figura 5.1. Tetraedro y triángulo en forma elemento finito discreto (Ravindra y Wolfgang, 2011).

El tamaño (dimensiones) y la orientación de los triángulos, así como los tetraedros, se distribuyen irregularmente sobre la malla generada en la región del campo, dependiendo de la magnitud del gradiente de potencial (Ravindra y Wolfgang, 2011). En los lugares donde existe mayor intensidad de campo o estrés eléctrico, elementos discretos de menor tamaño cubren la región. Figura 5.2 muestra el campo entre dos electrodos recubiertos de triángulos irregulares discretos.

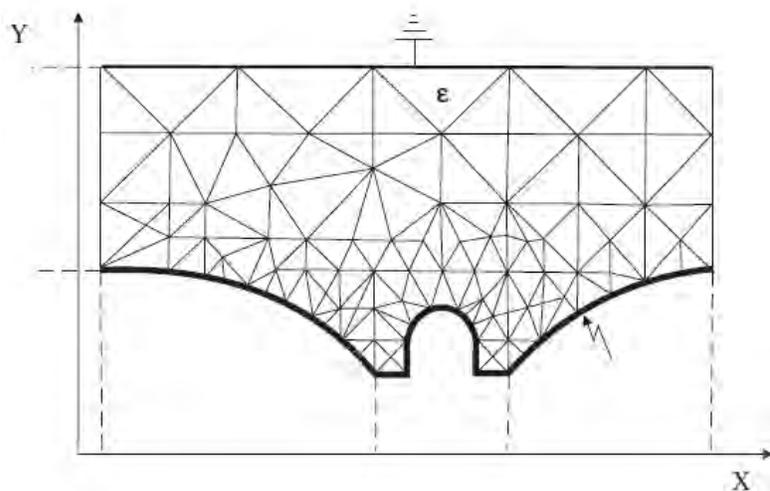


Figura 5.2. Cálculo de campo por FEM en dos dimensiones, utilizando elementos discretos triangulares (Ravindra y Wolfgang, 2011).

Se han desarrollado muchos programas de software basados en FEM. Estos requieren los detalles de la geometría, configuración del electrodo y las propiedades del dieléctrico/dieléctrico ( $\epsilon_r$ ). Para los problemas bidimensionales, la elección del número de elementos discretos determina el tamaño de los triángulos en diferentes regiones del campo. Se puede elaborar un trazado de líneas equipotenciales para toda la región de campo entre los electrodos para un porcentaje deseado de diferencia de potencial entre las líneas (Ravindra y Wolfgang, 2011).

El FEM conduce a técnicas comparativamente más simples para estimar campos en superficies de electrodos muy curvadas y delgadas con diferentes materiales dieléctricos. Sin embargo, su idoneidad permanece principalmente para campos débilmente no uniformes y simétricos, que pueden ser fácilmente representados por geometrías bidimensionales. Para las configuraciones de campo tridimensionales complicadas, hay reservas en su aplicación (Ravindra y Wolfgang, 2011).

### **5.3 CÁLCULO DEL EFECTO DEL CAMPO EN LA CAPACITANCIA**

Un condensador típico está compuesto de dos objetos conductores con un dieléctrico entre ellos. La aplicación de una diferencia de tensión entre estos objetos da lugar a un campo eléctrico (COMSOL, 2014). Este campo eléctrico existe no sólo directamente entre los objetos conductores, sino que se extiende a cierta distancia, un fenómeno conocido como un campo de borde. Para predecir con exactitud la capacitancia de un condensador, el dominio utilizado para modelar el campo debe ser suficientemente grande, y deben usarse las condiciones de contorno apropiadas.

### 5.3.1 Definición del Modelo y Resultado

Para el ejemplo de la Figura 5.3 modela un condensador de placas paralelas que consta de dos discos de metal y su estudio se realiza dentro de un volumen esférico de aire. El tamaño de la esfera trunca el espacio de modelado. También se aborda la elección de la condición de contorno (COMSOL, 2014).

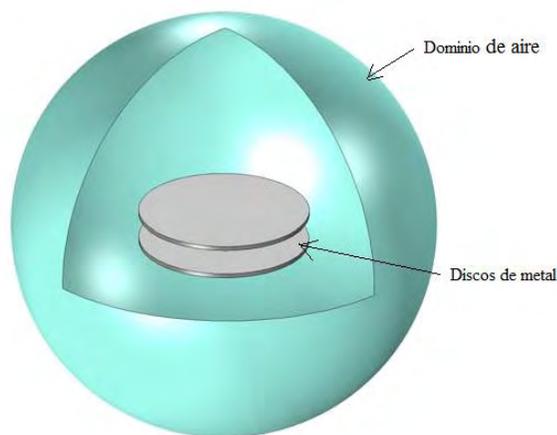


Figura 5.3. Condensador simple que consta de dos discos de metal en un dominio de aire (COMSOL, 2014).

Una de las placas se especifica como tierra, con una tensión de 0 V. La otra placa tiene una tensión especificada de 1 V. Es sólo la diferencia en la tensión entre estas placas que afecta a la capacitancia y la intensidad del campo eléctrico (COMSOL, 2014).

En la Figura 5.4 es mostrado el mallado que ha generado el simulador COMSOL, para la realización de su respectivo análisis en el comportamiento del campo eléctrico en toda la estructura de estudio.

La frontera de la esfera del aire puede considerarse como una de dos situaciones físicas diferentes, puede tratarse como una superficie perfectamente aislante, a través de la cual la carga no puede redistribuirse, o como una superficie perfectamente conductora, sobre la cual el potencial no variará. La realización del modelado de la superficie perfectamente aislante es la

condición de límite de carga cero. Esta condición límite también implica que las líneas de campo eléctrico son tangenciales al límite (COMSOL, 2014).

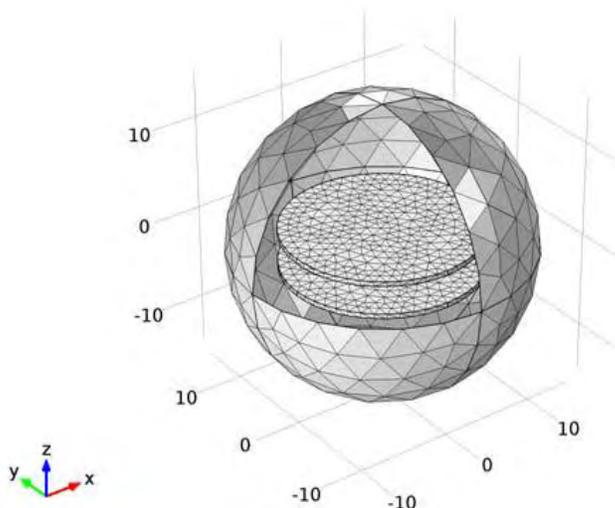


Figura 5.4 Configuración del mallado utilizado para el análisis (COMSOL, 2014).

www.bdigital.ula.ve

r\_air(1)=15.000 Multislice: Electric field norm (V/m) Arrow Volume: Electric field

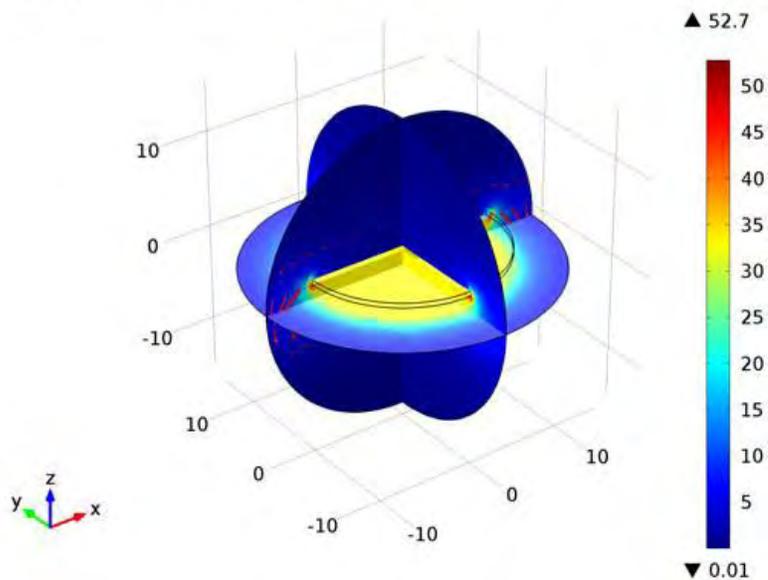


Figura 5.5. La norma de campo eléctrico (multi-rebanadas) y el campo eléctrico (flechas) para el caso de la condición de límite de carga cero (COMSOL, 2014).

Al estudiar la convergencia de resultados con respecto al tamaño del dominio circundante, es importante fijar el tamaño del elemento. En este modelo, el tamaño del elemento se fija a medida que se varía el tamaño del dominio (COMSOL, 2014). La Figura 5.5 representa el campo eléctrico para el caso en el que el límite de la esfera de aire es tratado como perfectamente aislante.

## **5.4 SIMULACIONES DE ALGUNOS DEFECTOS ENCONTRADOS EL AISLAMIENTO DEL CABLE DE POTENCIA**

En esta sección se realizaron algunas simulaciones ya antes definidas en el Capítulo 4, en este caso se procedió a simular mediante el programa computacional COMSOL *Multiphysics*<sup>®</sup>, en cual nos proporciona una mejor visualización 3-D y también nos sirvió como referencia en el análisis para el estudio mediante comparación de los datos obtenidos.

### **5.4.1 Simulación de una macro-cavidad esférica**

Para este caso de estudio se realizó una simulación de una macro-cavidad esférica (esfera de aire) de 125  $\mu\text{m}$  de radio, mediante el simulador COMSOL y observar su comportamiento en el aislamiento de XLPE (Figura 5.6). Luego de obtener estos resultados, respectivamente realizar una comparación y análisis con respecto a los macro-defectos de estas características estudiados en el Capítulo 4.

En la Figura 5.7 se observa el cambio en el comportamiento del campo eléctrico al introducir una macro-cavidad de aire en el aislamiento del cable de potencia, y como este es afectado dentro y fuera de ella. Como anteriormente se obtuvo con el simulador Maxwell su valor de mayor incremento se encuentra dentro del macro-defecto.

## Simulación de una macro-cavidad esférica.

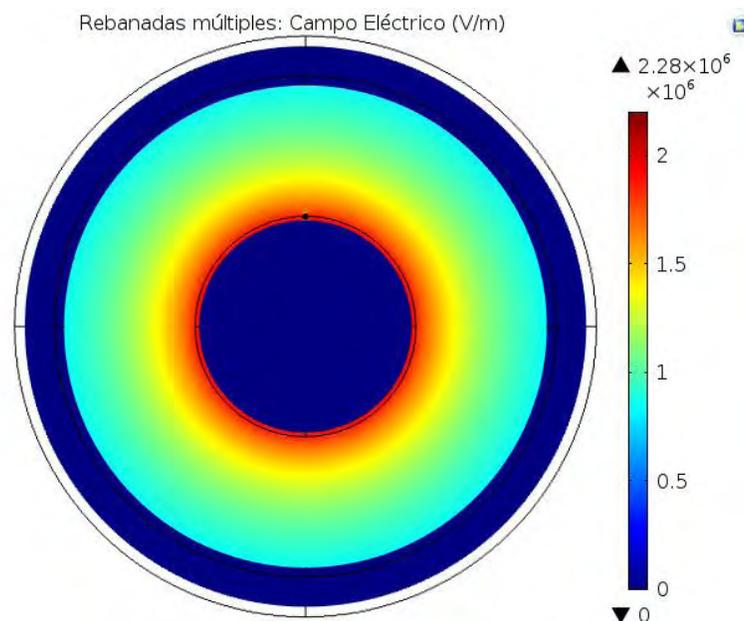


Figura 5.6. Campo eléctrico el en cable de potencia.

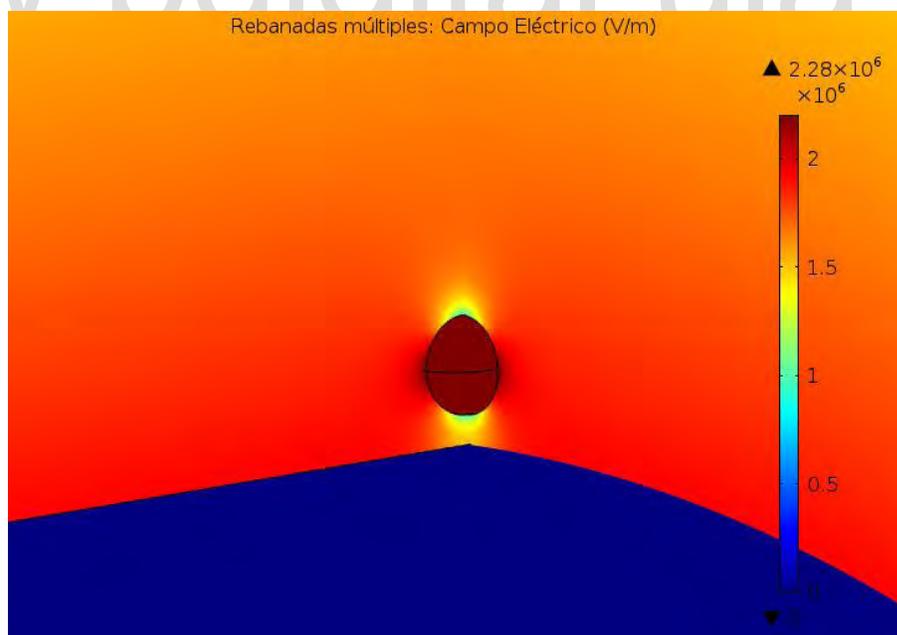


Figura 5.7. Macro-cavidad esférica cercana a la pantalla del conductor.

### 5.4.2 Simulación de una macro-cavidad elipsoidal

En esta simulación se obtuvo la magnitud del campo eléctrico en el aislamiento del cable de potencia cuando presenta un defecto, para este caso de estudio en específico se introdujo un macro-defecto de forma elipsoidal el cual se observa en la Figura 5.8, y en la cual muestra la vista de dos planos que cortan la imperfección para la visualización del campo en su entorno.

En la Figura 5.9 se muestra un acercamiento en el punto donde los planos cortan el macro-defecto y se observa cómo se afecta la uniformidad del campo. Realizando una comparación con lo obtenido anteriormente con el simulador Maxwell para este caso de estudio, el campo es de menor valor en los puntos adyacentes que se encuentran mirando hacia las pantallas (conductor y aislamiento) y se obtiene el mismo resultado.

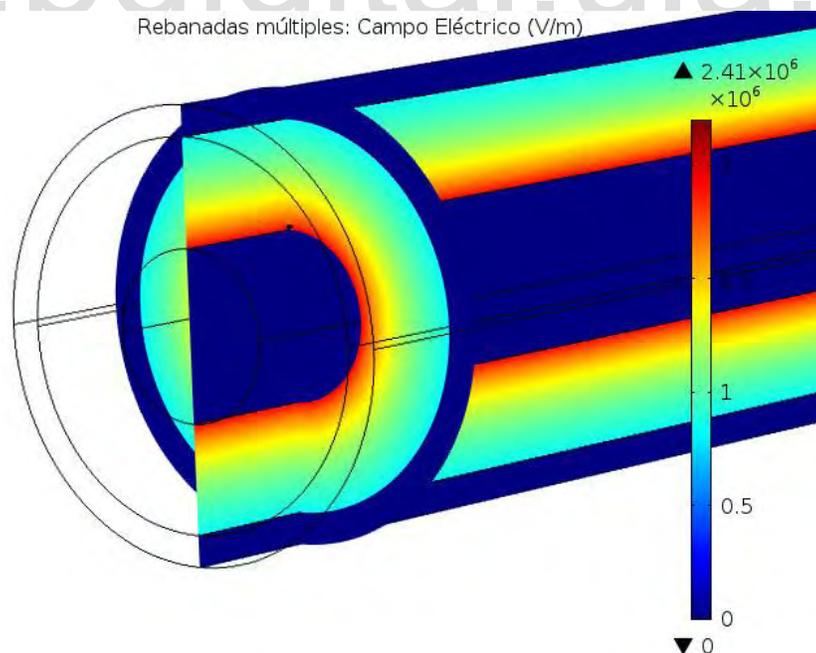


Figura 5.8. Planos de corte en el macro-defecto.

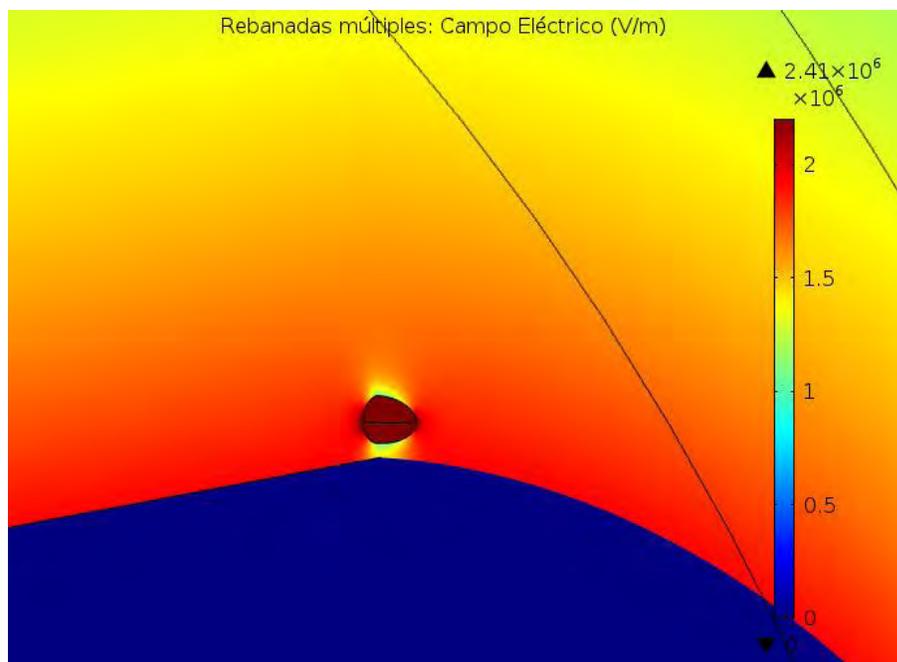


Figura 5.9. Efecto del campo eléctrico en presencia de un macro-defecto elipsoidal.

### 5.4.3 Simulación para un árbol de agua

El árbol de agua para este estudio fue modelado con formas geométricas incluidas en COMSOL como se presenta en la Figura 5.10. Su crecimiento inicia en la pantalla del conductor si se extiende hasta un 50% del ancho del aislamiento del cable de potencia.

En la Figura 5.11 se muestra la ubicación de dos planos, los cuales cortan el modelado de árbol de agua en su punto medio de inicio, allí se puede observar cómo afecta la distribución del campo eléctrico dentro y fuera de él.

Para una mejor visualización del efecto que ha ocasionado este árbol de agua se presenta una vista ampliada en la Figura 5.12, se puede observar que en la parte donde emana el WT el campo tiene un incremento considerable de su valor, siendo así un factor en su crecimiento, en la parte superior donde finaliza el árbol también se observa cómo se distorsiona el campo eléctrico y su incremento, esto promueve el crecimiento de los árboles eléctricos.

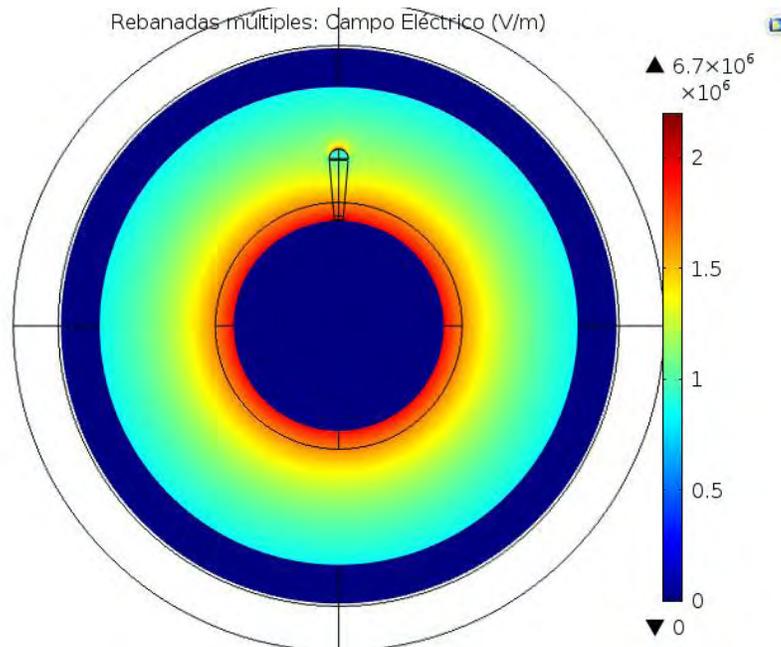


Figura 5.10. Árbol de agua modelado en COMSOL.

www.bdigital.ula.ve

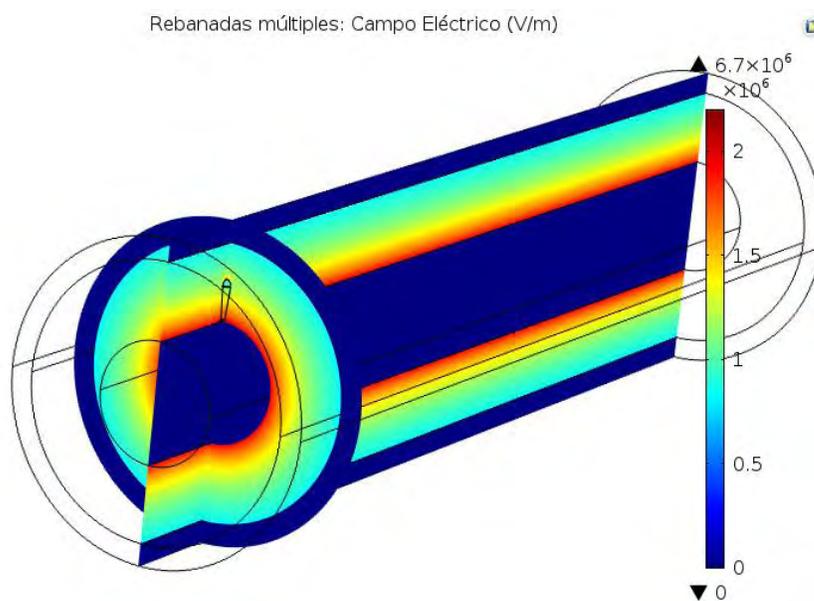


Figura 5.11. Planos interceptando el árbol de agua.

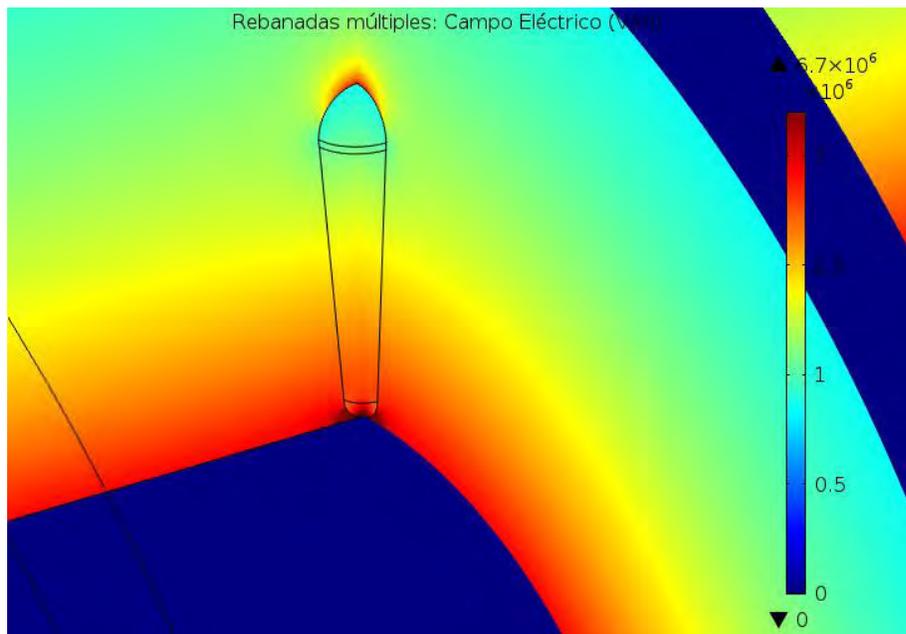


Figura 5.12. Vista ampliada del Campo eléctrico.

www.bdigital.ula.ve

## 5.5 SUMARIO

En el presente Capítulo se da a conocer la descripción del programa COMSOL y el módulo de interfaz usado para el estudio realizado, se explica el método de FEM utilizado para la estimación del campo eléctrico en las estructuras modeladas en COMSOL. Se inicia con un ejemplo de la librería de COMSOL el cual explica cómo es la capacitancia en un arreglo de placas paralelas y se muestra el mayado utilizado para el análisis del comportamiento del campo eléctrico dentro de un dominio de aire. Finalmente se realizan las simulaciones de algunos casos de defectos presentes en el aislamiento del cable, compararlos y llegar a su respectivo análisis.

## CONCLUSIONES

El propósito de esta investigación es avanzar en el campo de estudio mediante la caracterización de los defectos del cable de potencia, abordando una serie de métodos de simulación, la implementación de todos estos fenómenos utilizados facilita su interpretación a la hora de visualizar y llegar a su respectivo análisis.

La existencia y crecimiento de los árboles de agua (ventoso o lazo de corbata) representa un riesgo notorio para los aislantes de cables de potencia. Producen un incremento creciente del campo eléctrico y una disminución de la potencia eléctrica, que pueden provocar averías eléctricas en redes subterráneas para niveles de tensión de servicio, antes de la duración estimada previa a la instalación. Es por ello que hemos realizado cálculos de campo eléctrico mediante simulaciones para las diferentes configuraciones de árbol de agua en el aislamiento del cable.

Los árboles de lazo son menos importantes o menos peligrosos que los árboles ventilados debido a su menor amplificación del campo eléctrico, esto esencialmente debido a su escaso suministro de agua, son mucho más pequeños y su crecimiento es lento (limitado).

El aislamiento que contiene WT tiene una mayor permitividad (constante dieléctrica) y una mayor conductividad. Por lo tanto, la tensión aplicada dentro del árbol es menor en comparación con el aislamiento seco que lo rodea. Como resultado, los ET tienden a formarse en las áreas secas adyacentes a los árboles de agua, ya que existen sitios defectuosos con aumento del estrés eléctrico en estas áreas. Las PD no pueden ser sostenidas dentro de los WT (Mashikian y Szatkowski, 2006), pero sí ocurre en los sitios cercanos a los ET.

Las distorsiones extremas del campo en las protuberancias, las partículas extrañas (contaminantes) y las cavidades en los dieléctricos también pueden dar lugar al inicio del proceso de un árbol eléctrico.

Los beneficios de haber utilizado una herramienta como Maxwell y COMSOL, nos proporciona gran ayuda para el fácil entendimiento y visualización del efecto que ocasiona todos estos fenómenos ocurridos dentro del aislamiento del cable de potencia, ya que es una forma de fácil acceso en cuanto a la limitación de no poder realizar estudios con pruebas de laboratorio.

El análisis realizado tanto por el programa COMSOL *Multiphysics*<sup>®</sup> y Maxwell SV<sup>®</sup> fue indispensable para el cumplimiento de los objetivos planteados y lograr la culminación de esta tesis, que a su vez ha generado un gran aporte para futuros trabajos.

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

## RECOMENDACIONES

Realizar el estudio de otros defectos que deterioran el aislamiento del cable de potencia, los defectos analizados en este trabajo de grado, no son todos los casos que se pueden presentar y podrían conducir a una falla en el cable de potencia, también existen otras imperfecciones como, grietas, defectos de fábrica, diversos contaminantes encontrados, los cuales no fueron tomados para la realización de esta tesis. Todos estos defectos podrían simularse y realizar su análisis y así determinar por completo el grado de degradación del aislamiento XLPE.

Se podrían implementar estos estudios para otro nivel de tensión, aunque para un nivel de alto voltaje ocurren mayormente solo los defectos asociados a cavidades, realizar la investigación literaria pertinente sobre el diagnóstico de cables.

El modelado de los defectos utilizados en esta investigación, se pueden perfeccionar lo más parecido posible a los fenómenos ocurridos en el cable de potencia detectados por pruebas de diagnóstico. También su respectivo análisis realizarlo con otro tipo de software el cual proporcione una comparación de los datos obtenidos en esta tesis.

Para una mejora de este trabajo de grado sería el estudio de todos estos defectos con experimentos hechos en laboratorio, para lograr realizar una comparación de los datos obtenidos en simulación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ansoft Corporation. (2002). Getting Started: A 2D Electrostatic problem. Maxwell<sup>®</sup> 2D Student Version. Pittsburgh.

Barbosa, Z. (2011). *Normas de trabajo de grado*. Coordinación de Trabajo de Grado, (CTG). Escuela de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela: CTG, ULA.

Barbosa, Z. (2011). *Manual ilustrado para la elaboración del trabajo de grado*. Coordinación de Trabajo de Grado (CTG). Escuela de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela: CTG, ULA.

BRUGG Cables. (2006). High voltage XLPE cable systems. Technical user guide. Boston.

Burkes, K. (2014). *Water Tree analysis and On-Line detection algorithm using time domain relectometry*. Thesis Master of Science Electrical Engineering. Clemson University.

Cheng, D. (1997). *Fundamentos de electromagnetismo para ingeniería*. Addison Wesley Longman. México: PEARSON Education<sup>®</sup>.

COMSOL Multiphysics 5.0. (2014). Introduction to the AC/DC Module and AC/DC Module model library manual. Protected by U.S. patents listed.

Dissado, L. y Fothergill, J. (1992). *Electrical degradation and breakdown in polymers*. IEE Materials and Devices Series 9, Peter Peregrinus Ltd. London.

Fynes-Clinton, D. (2016). *PD Characteristics of typical MV XLPE power cable termination defects at VLF and power frequency test voltages*. Master of Science in Engineering (research report). Faculty of Engineering and the Built Environment, University of the Witwatersrand. Johannesburg.

Gómez, A. y López, L. (2012). *Optimización en el diseño dieléctrico de cables subterráneos*. Tesis de Pre-grado. Escuela superior de ingeniería mecánica y eléctrica, Unidad Profesional “Adolfo López Mateos”. Instituto politécnico nacional. D.F., México.

Hampton, N. (2016). *Medium voltage cables system issues*. Chapter 2. National Electric Energy Testing, Research and Applications Center (NEETRAC). Georgia tech research corporation.

Hampton, N., Hartlein, R., Lennartsson, H., Orton, H. y Ramachandran, R. (2007). *Long-life XLPE insulated power cable*. International Conference on Insulated Power Cables. Jicable-07.

Haddad, A. y Warne D. (2004). *Advances in High Voltage Engineering*. The institution of Engineering and Technology. London, United Kingdom: IET Power and Energy Series 40.

Hayt, W. y Buck, J. (2006). *Teoría Electromagnética*, (7ma Edición). México: McGraw-Hill.

Herculano, A. y Maza, C. (2010). *Manual para la instalación de cables de energía de media tensión*. Tesis de Pre-grado. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, D.F. México.

Hernández M., J. (2008). *Characterization of real power cable defects by diagnostic measurements*. Thesis Doctor of Philosophy, School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology. Georgia.

Høltø, J. y Ildstad, E. (2009). Comparison of electrical treeing in polypropylene and cross-linked polyethylene. University of Science and Technology. Norwegian.

Hyvönen, P. (2008). *Prediction of insulation degradation of distribution power cables based on chemical analysis and electrical measurements*. Department of electrical engineering, faculty of electronics, communications and automation. Helsinki University of Technology. TKK Dissertations 126, Espoo 2008. Finland.

Marquina, D. (2010). *Estudio del Efecto de la Densidad y Tamaño de Arboles Acuosos en el Factor de Disipación (Tang  $\delta$ ) a muy Baja Frecuencia en Cables de Potencia*. Tesis de Pre-grado.

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.

Mashikian, M. y Szatkowski, A. (2006, July/August). “Medium voltage cable defects revealed by off-line partial discharge testing at power frequency”. IEEE Electrical Insulation Magazine. (Vol. 22, No. 4), pp. 24-32.

Pattouras, M., Tzimas, A. y Rowland S. (2013). *The effect of material interfaces on electrical tree growth and breakdown time of epoxy resin*. IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. School of Electrical and Electronic Engineering, The University of Manchester. United Kingdom.

Pernía, R. (2010). *Estudio del Efecto en el Factor de Disipación (Tang  $\delta$ ) a muy Baja Frecuencia de la Pérdida de Contacto entre el Apantallamiento del Aislamiento y Conductores de Neutro en Cables de Potencia*. Tesis de Pre-grado. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.

Porfiri, P. (2009). *Detección, análisis y prevención de fallas en cables subterráneos técnicas de Descargas parciales – Very low frequency - Microscopia digital 3D – Rayos X*. Seminario internacional de mantenimiento en sistemas eléctricos, II SIMSE CIER2009. Bogotá, Colombia.

Ravindra, A. y Wolfgang, M. (2011). *High voltage and electrical insulation engineering*. Institute of Electrical and Electronics Engineers. (IEEE PRESS, John Wiley & Sons, Inc.). Published simultaneously in Canada. Hoboken, New Jersey.

Sarathi, R., Nandini, A, y Danikas, M. (2011). “Understanding electrical treeing phenomena in XLPE cable insulation adopting UHF technique”. Journal of electrical engineering, (Vol. 62, No. 2). pp. 73–79.

Schurch, R., Rowland, S., Bradley, R. y Withers, P. (2014, February). “Imaging and analysis techniques for electrical trees using X-ray computed tomography”. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. (Vol. 21, No. 1), pp. 53-63.

Short, T. (2004). *Electric power distribution handbook*. CRC Press LLC, 2000 N.W. Corporate Blvd. Boca Raton, Florida.

Toshikatsu, T. y Greenwood, A. (1983). *Advanced power cable technology: present and future*. (Vol. I y II). Boca Raton, Florida.

Toman, G. (2003). Medium-Voltage cables in nuclear plant applications – State of industry and condition monitoring. Electric Power Research Institute (investigation report). Department of Energy. Washington, D.C.

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)