



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**ESTUDIO DEL EFECTO EN EL FACTOR DE DISIPACIÓN ($\tan \delta$) A
MUY BAJA FRECUENCIA DE LA PÉRDIDA DE CONTACTO ENTRE
EL APANTALLAMIENTO DEL AISLAMIENTO Y CONDUCTORES DE
NEUTRO EN CABLES DE POTENCIA**

Br. Rosana Coromoto Pernía Márquez

Mérida, Abril, 2010

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**ESTUDIO DEL EFECTO EN EL FACTOR DE DISIPACIÓN ($\tan \delta$) A
MUY BAJA FRECUENCIA DE LA PÉRDIDA DE CONTACTO ENTRE
EL APANTALLAMIENTO DEL AISLAMIENTO Y CONDUCTORES DE
NEUTRO EN CABLES DE POTENCIA**

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero electricista

www.bdigital.ula.ve

Br. Rosana Coromoto Pernía Márquez
Tutor: Dr. Jean Carlos Hernández Mejía

Mérida, Abril, 2010

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**ESTUDIO DEL EFECTO EN EL FACTOR DE DISIPACIÓN ($\tan \delta$) A
MUY BAJA FRECUENCIA DE LA PÉRDIDA DE CONTACTO ENTRE
EL APANTALLAMIENTO DEL AISLAMIENTO Y CONDUCTORES DE
NEUTRO EN CABLES DE POTENCIA**

Br. Rosana Coromoto Pernía Márquez

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. Ricardo Isaac Stephens Labrador
C.I. 15.175.313

Prof. Jesus Abelardo Velazco Ochoa
C.I. 8.088.307

Prof. Jean Carlos Hernández Mejía
C.I. 12.778.547

DEDICATORIA

El esfuerzo aplicado a la realización de este trabajo, lo dedico primeramente a Dios Todopoderoso y a mis padres José Pernía y Coromoto Márquez, autores de mi existencia y de mi realización personal, espiritual y profesional. A mis hermanos (as), familiares y a José Heriberto Jaimes por su paciencia, apoyo y confianza en toda mi carrera y en el transcurso de este trabajo.

Rosana C. Pernía M.

www.bdigital.ula.ve

AGRADECIMIENTOS

Por su valiosa colaboración para la culminación exitosa del presente trabajo, quiero expresar mi sincero agradecimiento al Profesor Jean Carlos Hernández por su excelente trabajo como tutor y por la paciencia brindada. A la ilustre Universidad de Los Andes y a todos los profesores y empleados de la escuela de Ingeniería Eléctrica quienes de una u otra forma contribuyeron a la culminación de mi carrera y a la de este trabajo.

Rosana C. Pernía M.

www.bdigital.ula.ve

Br. Rosana C. Pernía M. “Estudio del Efecto en el Factor de Disipación ($\text{Tan}\delta$) a muy baja frecuencia de la Pérdida de Contacto entre el Apantallamiento del Aislamiento y Conductores de Neutro en Cables de Potencia” **Universidad de Los Andes. Tutor: PhD. Jean Carlos Hernández M. Abril 2010.**

RESUMEN

Los cables de potencia para sistemas de distribución son sometidos a importantes y rigurosas pruebas de diagnóstico tanto en el proceso de fabricación de los mismos como en la instalación y en servicio. La mayoría de las técnicas utilizadas para el diagnóstico de cables de potencia están enfocadas a detectar cambios en el sistema de aislamiento a través de mediciones del factor de disipación o tangente delta ($\text{Tan}\delta$) a frecuencia muy baja de 0.1 Hz, en las cuales para estimar el $\text{Tan}\delta$ se ha utilizado el circuito equivalente del aislamiento, ya que existe una creencia generalizada en la comunidad científica de que los modos de falla de los cables son principalmente debidos al envejecimiento y degradación del aislamiento del sistema de cable de potencia; sin embargo existen otros modos de fallas relacionados con la pérdida de contacto entre el apantallamiento del aislamiento y los conductores de neutro ya que ésta puede causar descargas parciales externas al cable causando daños al apantallamiento del aislamiento y posteriormente al aislamiento. En este trabajo se utiliza un modelo de quadripolo por unidad de longitud para estimar el valor del $\text{Tan}\delta$, este modelo considera la pérdida de contacto, con éste y la ayuda de los programas Maxwell[®] (SV) y MatLab[®] mediante simulaciones, se estudia y se analiza el efecto en el $\text{Tan}\delta$ cuando los problemas de pérdida de contacto están presentes.

Descriptores: Factor de disipación, $\text{Tan}\delta$, cables de potencia, pérdida de contacto, Muy baja frecuencia (VLF).

ÍNDICE GENERAL

APROBACIÓN.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
RESUMEN.....	v
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO	pp.
-----------------	------------

1 OBJETIVOS Y ASPECTOS PRELIMINARES

1.1. Objetivo General.....	3
1.2. Objetivos Específicos.....	3
1.3 Planteamiento del Problema.....	3
1.4 Justificación.....	4
1.5 Metodología.....	4

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Concepto de Cable.....	6
2.2 Cables de Potencia para Distribución.....	6
2.3 Historia del Cable de Potencia para Distribución.....	7
2.4 Estructura Básica de los Cables de Potencia para Distribución.....	8
2.4.1 Conductor.....	9
2.4.2 Apantallamiento del Conductor.....	11
2.4.3 Aislamiento.....	12
2.4.4 Apantallamiento del Aislamiento.....	13
2.4.5 Neutro.....	14
2.4.6 Chaqueta.....	15
2.5 Principales Problemas en los Cables de Potencia.....	16
2.6 Problemas en el Neutro.....	16
2.6.1 Pérdida de Contacto entre el Apantallamiento del Aislamiento y los Conductores de Neutro.....	17
2.7 Pruebas de Diagnóstico en Cables de Potencia para Sistemas de Distribución.....	18
2.7.1 Prueba del Factor de Disipación (FD) o Tangente Delta ($\tan \delta$).....	18
2.7.2 Pruebas de Descargas Parciales.....	22
2.7.3 Limitaciones en la Medición del $\tan \delta$	22
2.8 Resumen.....	23

3 MODELADO DE LA PÉRDIDA DE CONTACTO ENTRE EL APANTALLAMIENTO DEL AISLAMIENTO Y LOS CONDUCTORES DE NEUTRO

3.1 Modelo de los Problemas de Pérdida de Contacto.....	24
3.2 Desarrollo y Análisis de las Ecuaciones para el Modelo de Quadripolo por Unidad de Longitud Cuando no existen Problemas de Pérdida de Contacto.....	28
3.3 Desarrollo y Análisis de Ecuaciones para hallar el Tan δ Usando el Modelo de Quadripolo por Unidad de Longitud Cuando se tienen Problemas de Pérdida de Contacto.....	30
3.4 Desarrollo y Análisis de las Ecuaciones para el Modelo de Quadripolo por Unidad de longitud cuando se considera que no existe el Parámetro r_y	36
3.5 Desarrollo de Ecuaciones para hallar el Tan δ Considerando Problemas Distribuidos y Localizados de Pérdida de Contacto.....	39
3.6 Resumen.....	41

4 SIMULACIONES Y ESTUDIO Y DEL CABLE DE POTENCIA UTILIZANDO MAXWELL[®] (SV)

4.1 Descripción del Programa Maxwell [®] (SV).....	42
4.2 Influencia de la Pérdida de Contacto en el Campo Eléctrico del Cable.....	43
4.2.1 Simulaciones en Maxwell [®] (SV).....	43
Simulación Cuando no Existen Problemas de Pérdida de Contacto.....	43
Comprobación de los resultados obtenidos en Maxwell [®] (SV).....	46
Simulación Cuando Existen Problemas de pérdida de Contacto.....	48
4.3 Determinación de los Parámetros del Aislamiento y la Resistencia de Contacto.....	55
4.4 Comprobación de los Resultados Obtenidos en Maxwell [®] (SV) para los Parámetros del Aislamiento.....	56
4.5 Resumen.....	57

5 ANÁLISIS DEL EFECTO EN EL FACTOR DE DISIPACIÓN (TAN δ) CUANDO EXISTEN PROBLEMAS DE PÉRDIDA DE CONTACTO

5.1 Simulaciones en MatLab [®] para el Análisis del Tan δ Cuando Existen Problemas de Pérdida de Contacto.....	58
5.1.1 Simulación en MatLab cuando la Resistencia de Contacto (r_x) y la Resistencia de los Propios Conductores de Neutro (r_y) son Iguales a Cero.....	59
5.1.2 Simulación en MatLab [®] Cuando se Tienen Problemas de Pérdida de Contacto.....	60

5.1.3 Simulación en MatLab® Cuando se Tienen Problemas de Pérdida de Contacto, Considerando los Valores de Resistencia de Contacto Obtenidos en Maxwell® (SV).....	63
5.1.4 Simulación en MatLab® para Diferentes Espesores de la Capa de Pérdida de contacto.....	68
5.2 Resumen.....	72
CONCLUSIONES.....	73
RECOMENDACIONES.....	75
REFERENCIAS.....	76
APÉNDICE.....	77
ANEXOS.....	81

www.bdigital.ula.ve

LISTA DE FIGURAS

Figura	pp.
2.1 Sección longitudinal de un cable de potencia para distribución con neutro concéntrico (http://www.centelsa.com).....	9
2.2 Sección transversal de un conductor de siete hilos (http://www.centelsa.com).....	10
2.3 Sección transversal de un conductor de siete hilos, forma comprimida y compacta (http://www.centelsa.com).....	10
2.4 Distribución del campo eléctrico para un conductor con su respectivo apantallamiento (http://www.centelsa.com).....	12
2.5 Ilustración de la sección longitudinal y transversal de un cable afectado por la corrosión y mineralización (Hernández, 2008).....	17
2.6 Distribución del campo eléctrico para un conductor con su respectivo apantallamiento (http://www.centelsa.com).....	18
2.7 Circuito eléctrico equivalente para hallar el $\tan \delta$ y su diagrama fasorial.....	19
3.1 Circuito equivalente que considera los problemas de pérdida de contacto.....	25
3.2 Circuito equivalente cuando no existen problemas de pérdida de contacto.....	25
3.3 Circuito equivalente cuando existen problemas de pérdida de contacto.....	26
3.4 Modelo de quadripolo por unidad de longitud cuando se tiene problemas de pérdida de Contacto.....	26
3.5 Problemas localizados de pérdida de contacto (Hernández, 2008).....	27
3.6 Problemas localizados de pérdida de contacto (Hernández, 2008).....	28
3.7 Radio interno y externo del aislamiento.....	29
3.8 Modelo de quadripolo por unidad de longitud cuando se tiene problemas de pérdida de contacto, en el dominio del tiempo.....	31
3.9 Modelo de quadripolo por unidad de longitud cuando se tiene problemas de pérdida de contacto, en el dominio de la frecuencia.....	31
3.10 Modelo de quadripolo generalizado.....	32
3.11 Dos modelos de quadripolo generalizado conectados en cascada.....	33
3.12 Un número n de quadripolos generalizados conectados en cascada.....	34
3.13 Modelo de quadripolo por unidad de longitud cuando se considera que no existe el parámetro r_y	36
3.14 Modelos de quadripolo por unidad de longitud cuando se considera que no existe el parámetro r_y , conectados en cascada.....	37
3.15 Voltaje común V_x en el modelos de quadripolo por unidad de longitud, cuando se considera que no existe el parámetro r_y , conectados en cascada.....	37
3.16 Quadripolo equivalente por unidad de longitud cuando se considera que no existe el parámetro r_y	38

3.17 Ilustración de la matriz de la función de transferencia para cada segmento, cuando los problemas están localizados en el cable.....	40
4.1 Dibujo en Maxwell [®] (SV) de la sección transversal de un cable XLPE-15 KV.....	44
4.2 Campo eléctrico para en un cable XLPE-15 Kv, cuando existe buen contacto entre el apantallamiento del aislamiento y conductores de neutro.....	46
4.3 Dibujo en Maxwell (SV) de la sección transversal de un cable XLPE-15 KV con problemas de pérdida de contacto.....	48
4.4 Campo eléctrico para en un cable XLPE-15 Kv con problemas de pérdida de contacto	49
4.5 Campo eléctrico para un cable XLPE-15 Kv con neutro concéntrico y problemas de pérdida de contacto.....	
4.6 Campo eléctrico para un cable XLPE-15 Kv con neutro concéntrico y capa de pérdida de contacto con características eléctricas de un suelo árido	50
	52
4.7 Campo eléctrico para un cable XLPE-15 Kv con neutro concéntrico y capa de pérdida de contacto con características eléctricas de un suelos húmedos (agua dulce)	53
4.8 Campo eléctrico para un cable XLPE-15 Kv con neutro concéntrico y capa de pérdida de contacto con características eléctricas de suelos rocosos	54
4.9 Campo eléctrico para un cable XLPE-15 Kv con neutro concéntrico y capa de pérdida de contacto con características eléctricas de suelos pantanosos.....	55
4.10 Matriz de admitancia obtenida del programa Maxwell [®] (SV).....	58
5.1 Tan δ en función de la longitud considerando r_x y r_y igual a cero.....	59
5.2 Tan δ en función de la longitud cuando se tienen problemas distribuidos en el neutro.	61
5.3 Tan δ en función de la longitud cuando se tienen problemas distribuidos en el neutro, usando r_x para los tipos de suelos considerados.....	64
5.4 Tan δ en función de la longitud cuando se tienen problemas distribuidos en el neutro, usando r_x para los tipos de suelos considerados y r_y cero.....	65
5.5 Tan δ en función de la longitud cuando se tienen problemas distribuidos en el neutro, usando r_x cuando la capa de pérdida de contacto es aire y r_y cero	66
5.6 Tan δ en función de la longitud cuando se tienen problemas distribuidos en el neutro, usando r_x cuando la capa de pérdida de contacto es aire y r_y 2000 Ω/m	67
5.7 r_x en función del espesor de la capa de pérdida de contacto	69
5.8 Tan δ en función de la longitud cuando se tienen problemas distribuidos en el neutro, considerando los valores de r_x de la tabla 5.3	70
5.9 Tan δ en función del espesor de la capa de pérdida de contacto.....	72

LISTA DE TABLAS

Tabla	pp.
2.1 Característica del cobre y del aluminio (http:// www.centelsa.com).....	11
2.2 Características de los materiales para chaqueta (http://www.centelsa.com).....	15
2.3 Tan δ y evaluaciones del estado del cable (IEEE Std 400, 2002).....	22
4.1 Geometría de un cable XLPE-15 KV (Nikolajevic S, 1999).....	44
4.2 Resultados del cálculo teórico del campo eléctrico y su comparación con los de Maxwell [®] (SV)	47
4.3 Características eléctricas de suelos (http://www.smeter.net)	51
4.4 Resultados teóricos y del programa Maxwell [®] (SV).....	57
5.1 Incremento en magnitud del Tan δ	62
5.2 Resistencias de contacto para un cable XLPE-15 KV	63
5.3 Resistencias de contacto para distintos espesores de la capa de pérdida de contacto	64
5.4 Tan δ para distintos espesores de la capa de pérdida de contacto.....	71

www.bdigital.ula.ve

INTRODUCCIÓN

El crecimiento actual de la demanda de energía eléctrica y las distancias a las cuales se tiene que transmitir requiere de niveles de tensión elevados para lograr una calidad de energía óptima; por esta razón, los cables de potencia han tenido una considerable evolución tecnológica convirtiéndose en producto de instalación práctica de gran importancia en la distribución de la energía eléctrica.

Para garantizar la continuidad y confiabilidad del servicio, ha sido necesario el desarrollo de técnicas para el diagnóstico de cables de potencia, capaces de evaluar la condición de su aislamiento, las cuales han sido enfocadas principalmente a detectar cambios en las propiedades eléctricas del aislamiento; debido a una creencia generalizada, en la comunidad científica, de que los modos de falla de los cables son principalmente debido al envejecimiento y degradación del aislamiento; investigaciones recientes (Hernández, 2008) han sido la motivación para el presente trabajo de investigación, ya que las mismas demuestran que existen otros modos de fallas relacionadas con la pérdida de contacto entre el apantallamiento del aislamiento y los conductores de neutro; esta pérdida es de suma importancia ya que puede presentar descargas parciales externas al cable causando daño al apantallamiento y posteriormente conlleva a una eventual falla.

La pérdida de contacto se puede presentar cuando el cable no tiene chaqueta protectora exterior y existe corrosión en los conductores del neutro, o mineralización en los mismos; además por degradación del material semiconductor del apantallamiento del aislamiento en el cable.

Este trabajo de investigación tiene por objeto estudiar y analizar el cambio en la magnitud del factor de disipación equivalente ($\tan \delta$) a muy baja frecuencia cuando existe pérdida de contacto entre el apantallamiento del aislamiento y conductores de neutro en cables de potencia. Se desconoce como la pérdida de contacto afecta las mediciones del factor de disipación ($\tan \delta$) a muy baja frecuencia; ya que en el circuito equivalente del aislamiento

usado para estimar dicho factor, no se considera la existencia de la pérdida de contacto. Por lo tanto; cuando los problemas de pérdida de contacto están presentes en el cable, la prueba de diagnóstico $\tan \delta$ puede arrojar una evaluación incorrecta del mismo.

En este trabajo se estudiará el cable cuando los problemas de pérdida de contacto están presentes en el mismo, considerando una capa a la cual se le llamará capa de pérdida de contacto, entre el apantallamiento del aislamiento y los conductores de neutro; Esta capa puede estar constituida de diversos materiales, dependiendo de las condiciones a las cuales se encuentre expuesto el cable. Utilizando un modelo de quadripolo por unidad de longitud, simulaciones realizadas en Maxwell® (SV) y simulaciones realizadas en MatLab® se demostrara que el valor del $\tan \delta$ equivalente se ve afectado, con un aumento en su magnitud, cuando la capa de pérdida de contacto es de aire.

Este trabajo esta compuesto de cinco capítulos; en el Capítulo I se presentan los objetivos, el planteamiento del problema, la justificación y la metodología del trabajo de grado. En el Capítulo II el marco teórico, donde se define el concepto de cable, se describe la estructura y las principales características del cable de potencia para distribución, también se presentan en éste las pruebas de diagnóstico que se realizan a los cables. Luego en el Capítulo III se introduce el modelo de quadripolo por unida de longitud, cuando los problemas de pérdida de contacto están presentes en el cable; además, se desarrollan las ecuaciones para hallar el $\tan \delta$ en éste caso. En el Capítulo IV se hace referencia al programa Maxwell® (SV) y se realizan simulaciones en el mismo utilizando la geometría de un cable típico de XLPE-15 kV para observar el comportamiento del campo eléctrico y obtener la resistencia de contacto del modelo de quadripolo por unidad de longitud ya mencionado. En el Capítulo V, se muestran una serie de graficas hechas en MatLab® que permiten analizar y estudiar el efecto en la magnitud de la pérdida de contacto entre el apantallamiento del aislamiento y los conductores de neutro. Por último se presentan las conclusiones y recomendaciones para futuros trabajos.

CAPÍTULO I

OBJETIVOS Y ASPECTOS PRELIMINARES

En este Capítulo se presenta el objetivo general y los específicos, el planteamiento del problema, la justificación y la metodología empleada en el trabajo de grado.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Estudiar el cambio en la magnitud del factor de disipación equivalente ($\tan \delta$) a muy baja frecuencia cuando existe pérdida de contacto entre el apantallamiento del aislamiento y conductores de neutro en cables de potencia.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Los objetivos específicos de este trabajo son los listados a continuación.

- Conducir revisión bibliográfica.
- Aplicar y adaptar modelos existentes para alcanzar el objetivo general.
- Realizar simulaciones e interpretar los resultados.

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los cables de potencia antes de su instalación y en servicio, son sometidos a importantes y rigurosas pruebas que garantizan su calidad y confiabilidad. Las pruebas de diagnóstico han estado enfocadas solamente a detectar cambios en las propiedades eléctricas del aislamiento a

través de la medición del factor de disipación ($\tan \delta$) a muy baja frecuencia (VLF) de 0.1 Hz. El propósito principal de este proyecto de grado se basa en dar un nuevo enfoque en la medición del $\tan \delta$, estudiando como la pérdida de contacto afecta su medición a muy baja frecuencia, ya que en el circuito equivalente del aislamiento usado para estimarlo se considera que no existe dicha pérdida de contacto, y de cómo dicha medición está relacionada con los parámetros eléctricos del aislamiento.

1.4 JUSTIFICACIÓN

El desarrollo de técnicas para el diagnóstico de cables de potencia que sean capaces de evaluar la condición de su aislamiento ha sido principalmente enfocado solamente a detectar cambios en las propiedades eléctricas del aislamiento; por ejemplo, la presencia de defectos a través de la medición de descargas parciales o la presencia de árboles acuosos a través de la medición del factor de disipación ($\tan \delta$) a VLF. Esto se debe principalmente a la existencia de una creencia generalizada, en la comunidad científica, de que los modos de falla de los cables son generalmente debidos al envejecimiento y degradación del aislamiento del sistema de cables de potencia.

Sin embargo, trabajos de investigación recientes demuestran que existen otros modos de falla relacionados con la pérdida de contacto entre el apantallamiento del aislamiento y los conductores de neutro; por ejemplo, la pérdida de contacto puede ser causada por la corrosión de los conductores del neutro cuando el cable no tiene chaqueta protectora exterior, mineralización de los conductores de neutro en el mismo caso o degradación del material semiconductor del apantallamiento del cable. La pérdida de contacto es importante ya que ésta puede causar descargas parciales externas al cable causando daños al apantallamiento y posteriormente al aislamiento conllevando a una eventual falla.

1.5 METODOLOGÍA

La metodología empleada en éste trabajo es la siguiente.

- Recopilación de información bibliográfica necesaria acerca del cable de potencia.
- Recopilación de información sobre los principales problemas en el cable de potencia y los problemas ocasionados por la pérdida de contacto entre el apantallamiento del aislamiento y los conductores de neutro.
- Implementación de modelos que consideren los problemas de pérdida de contacto.
- Realización de simulaciones en Maxwell[®] (SV) y MatLab[®] con el fin de analizar y estudiar el cambio en la magnitud del $\tan \delta$ a muy baja frecuencia cuando los problemas de pérdida de contacto están presentes en el cable.

www.bdigital.ula.ve

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

En este Capítulo se presentan los conceptos básicos de sistemas de cable de potencia para distribución, así como también, la estructura básica, los principales problemas y las pruebas de diagnóstico; en los cables de potencia.

2.1 CONCEPTO DE CABLE

Se llama cable a un conductor o conjunto de ellos, recubierto de un material aislante (Hernández, 2008).

Los cables cuyo propósito es conducir electricidad se fabrican generalmente de cobre, debido a la excelente conductividad de este material o de aluminio que aunque posee menor conductividad, es más económico.

2.2 CABLES DE POTENCIA PARA SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

Cuando se requiere llevar grandes cantidades de energía eléctrica, donde la utilización de las líneas aéreas no es factible ya sea por condiciones técnicas, de seguridad o ambientales es necesaria la utilización de cables. Estos cables tienen muchas aplicaciones, entre las que se pueden mencionar: redes de distribución de energía, puentes para cruces viales, centros urbanos, acometidas para centros comerciales, entre otras.

El rango de tensión para los cables de potencia en distribución es de 6 a 36 kV (Hernández, 2008).

Las instalaciones de los cables de potencia para distribución, puede hacerse a través de canalizaciones, en bandejas porta cables o directamente enterrados; de acuerdo con los requerimientos para cada aplicación.

2.3 HISTORIA DEL CABLE DE POTENCIA PARA SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

El uso de los cables de potencia para la distribución de la energía tubo su auge en la década de 1880, con la aparición de las lámparas de iluminación (del tipo incandescente), tanto a nivel residencial como urbano, en la ciudad de New York. Con el incremento de los sistemas de iluminación, se hizo necesario reemplazar la mayoría de las líneas aéreas de por una alternativa de cable que brindara mayor seguridad a los usuarios y menor ocupación del espacio; como respuesta a estos requerimientos surgieron los cables subterráneos, convirtiéndose en practica común y natural al principio del siglo XX. Las primeras versiones de cable de potencia para distribución surgieron con aislamiento en papel impregnado de aceite o caucho vulcanizado, éstos fueron los primeros en ser comercializados en el año 1884 (Hernández, 2008).

Los cables de potencia desde sus inicios han tenido una gran mejora tecnológica con la invención de nuevos materiales, diseños y procesos de fabricación. Un importante avance se dio cuando se utilizó por primera vez en 1933 el polietileno (PE) como material de aislamiento en cables de radiofrecuencia; hacia 1950 se empleo como material de aislamiento en cables para sistemas de distribución de la energía eléctrica, perfilándose como uno de los materiales que se encargaría de sustituir los anteriores aislamientos, debido a sus reducidas pérdidas dieléctricas y su facilidad de procesamiento. Inicialmente el aislamiento utilizado para los cables en los Estados Unidos era de polietileno de alto peso molecular (HMWPE), el espesor de este tipo de aislamiento proporciona una gran rigidez mecánica, además, resistencia química y protegen contra la mayoría de sustancias orgánicas e inorgánicas; los cables de

HMWPE se han utilizado desde los años de 1951 en los sistemas de distribución para tensiones de hasta 35 kV. El HMWPE fue por primera vez introducido como material aislante para media tensión en cables de distribución subterránea residencial en la década de 1960. En 1963 con la invención del polietileno reticulado (XLPE), la tecnología de aislamiento con HMWPE fue rápidamente abandonada ya que el XLPE es capaz de soportar mayores temperaturas y con un conductor de menor calibre la misma corriente de un cable de HMWPE. Los cables con aislamiento de XLPE comenzaron a fallar prematuramente en ambientes húmedos, en algunos casos con menos de 10 años de servicio; debido a la presencia de árboles acuosos, los cuales son canales en forma de árboles encontrados en el aislamiento de los cables causados por la presencia de humedad y ante la existencia de un campo eléctrico, a la larga conducirán a la creación de descargas parciales (PD), que crecen logrando un fallo en el aislamiento (Hernández, 2008).

En la década de 1980 se realizaron avances importantes para el control de los árboles acuosos, surgiendo de esta manera el aislamiento de polietileno reticulado resistente a los árboles acuosos (TR-XLPE), este nuevo aislamiento incluye una tecnología desarrollada para retardar el crecimiento de los árboles acuosos. En la década de 1960 aparece el aislamiento de caucho de etileno propileno (EPR), con excelente aplicabilidad cuando se requiere de mayor flexibilidad que la de los cables aislados con XLPE, pero también son sensibles a los árboles acuosos, además, las pérdidas en el dieléctrico para los cables EPR son más altas que las de un equivalente XLPE o TRXLPE, por lo que el uso de EPR para tensiones superiores a los 69 kV no es recomendable.

Hoy en día los más populares son los cables de aislamiento con TRXLPE y EPR, pero algunas compañías de suministro eléctrico también utilizan XLPE.

2.4 ESTRUCTURA BÁSICA DE LOS CABLES DE POTENCIA PARA SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

Los cables más utilizados en los sistemas de distribución en mediana tensión, tienen un solo conductor; su diseño básico no ha cambiado en los últimos cien años (Hernández, 2008), sin

embargo, con el descubrimiento de nuevos materiales y técnicas de fabricación se han creado una gran variedad de cables para distintas aplicaciones.

La figura 2.1 muestra la sección longitudinal de un cable de potencia para distribución con neutro concéntrico. Comenzando por el centro del cable, la estructura del mismo está compuesta por: conductor, apantallamiento del conductor, aislamiento, apantallamiento del aislamiento, neutro concéntrico (conjunto de hilos concéntricos) y la chaqueta.

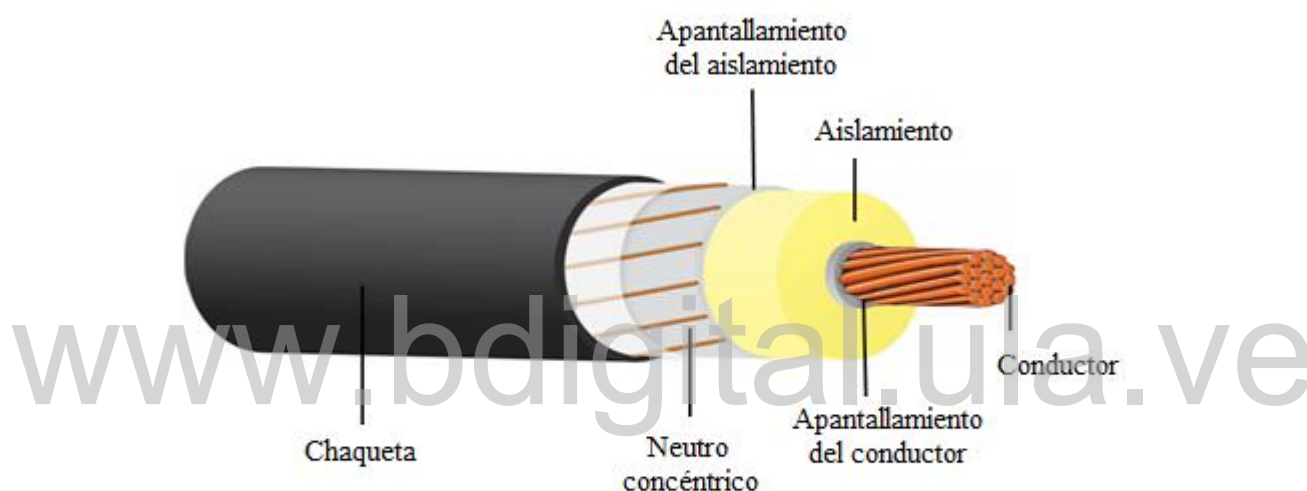


Figura 2.1 Sección longitudinal de un cable de potencia para distribución con neutro concéntrico ([http:// www.centelsa.com](http://www.centelsa.com))

2.4.1 Conductor

El conductor tiene como función proporcionar el camino galvánico para que circule la corriente eléctrica, puede ser de cobre o aluminio, sólido o trenzado. El número de hilos que debe poseer un conductor depende del calibre del mismo y de parámetros mecánicos como la flexibilidad; se emplean conductores unifilares con secciones de hasta 16.8 mm^2 (calibre 5

AWG), para secciones mayores se utilizan conductores multifilares; un conductor sólido tiene menor flexibilidad en comparación con un conductor trenzado.

La figura 2.2 muestra la sección transversal de un conductor calibre 2 AWG conformado por siete hilos. A los espacios libres que quedan entre hilos adyacentes se les conoce como intersticios del conductor.

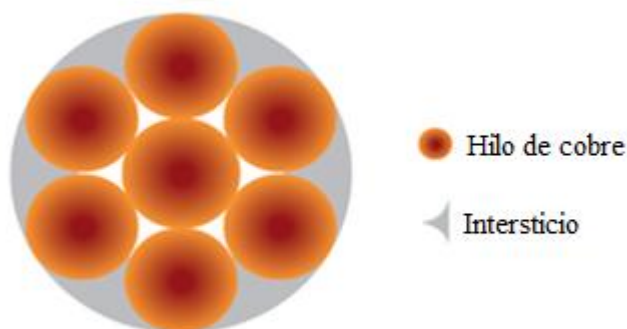


Figura 2.2 Sección transversal de un conductor de siete hilos ([http:// www.centelsa.com](http://www.centelsa.com))

La forma de la reunión de los hilos siempre es helicoidal; sin embargo, la posición y forma de los hilos durante el proceso de reunión (cableado) puede ser controlada, en forma comprimida o compacta, con el fin de reducir la extensión de los intersticios y a su vez con la idea de proporcionar una interfaz aún más suave en la superficie externa del conductor como se puede observar en la figura 2.3.

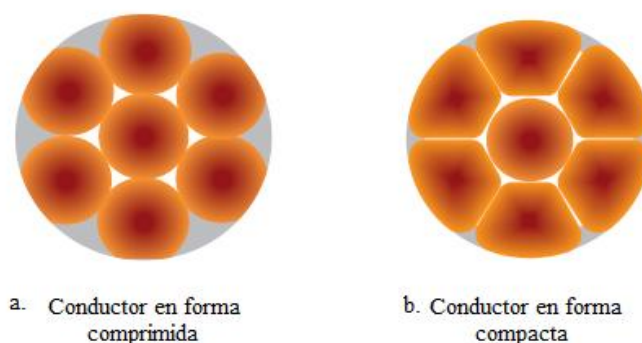


Figura 2.3 Sección transversal de un conductor de siete hilos, forma comprimida y compacta ([http:// www.centelsa.com](http://www.centelsa.com))

En cuanto al material del conductor, la tarea de selección del mismo no es fácil; éste puede ser de cobre o de aluminio y cada uno posee sus propias características que pueden resultar favorables o no, a la hora de aplicar criterios para la instalación como: caída de tensión a lo largo del cable, característica de material de aislamiento, flexibilidad, el método de instalación, peso y costo. La principal razón para utilizar el cobre es su excelente conductividad eléctrica o, en otras palabras su baja resistencia eléctrica. La resistencia del aluminio es 65 % más alta que la del cobre; por lo tanto, para conducir la misma corriente eléctrica, un conductor de aluminio necesitaría una sección transversal de 65 % más grande que uno de cobre. Pero el aluminio, además, de ser menos conductivo es tres veces mas liviano que el cobre; entonces, cada uno de estos materiales tiene sus propias áreas de aplicación como conductor. En la tabla 2.1 se muestran algunas de las características más relevantes del cobre, específicamente cobre suave y del aluminio.

Tabla 2.1 Característica del cobre y del aluminio ([http:// www.centelsa.com](http://www.centelsa.com))

	Cobre suave	Aluminio
Densidad g/cm ³	8,89	2,705
Resistividad Ω-mm ² /km	17,241	28,172
Conductividad (% IACS)	100,0	61,2
Resistencia a la corrosión	Excelente	Buena

2.4.2 Apantallamiento del Conductor

El apantallamiento del conductor es una capa de material termoestable (generalmente polietileno con característica semiconductor) que recubre al conductor cableado, penetrando en los intersticios de los hilos de la capa exterior del conductor para darle una forma circular, evitando así los efectos del elevado campo eléctrico entre los mismos, lo cual no es un efecto deseable en el aislamiento porque disminuye su capacidad de resistencia al voltaje. Esta capa de material también es conocida como primera capa semiconductor. El apantallamiento del conductor tiene como función que el campo eléctrico sea radial a partir de su superficie, evitando concentraciones

puntuales de campo, obteniéndose así una superficie equipotencial alrededor de esta primera capa. El conductor y el apantallamiento del conductor se encuentran al mismo potencial cuando se activa el cable. La figura 2.4 muestra la distribución del campo eléctrico para un conductor con su respectivo apantallamiento.

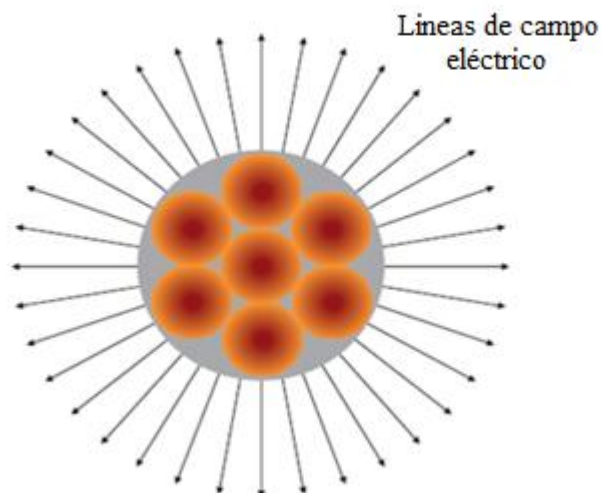


Figura 2.4 Distribución del campo eléctrico para un conductor con su respectivo apantallamiento
([http:// www.centelsa.com](http://www.centelsa.com))

2.4.3 Aislamiento

Para los cables en estudio se requiere de una separación entre el conductor de fase y el neutro. Para media tensión los niveles de voltaje y los espacios reducidos que se manejan en estos cables hacen necesaria la presencia de un medio aislante que sea capaz de brindar la rigidez necesaria contra las fugas de corriente, fallas entre la fase y el neutro del sistema y que pueda confinar el campo eléctrico producido por el conductor al interior de él mismo. El aislamiento tiene como función principal controlar la tensión en aislación, es capaz de soportar el voltaje de operación con una temperatura de funcionamiento de 75° ó 90°.

Existen distintos tipos de materiales, que cumplen con los requisitos para el correcto funcionamiento del cable, usados como aislante. Sin embargo, son las características eléctricas, térmicas y mecánicas que destacan uno u otro tipo de material, según sean las exigencias de su empleo,

por lo que es posible suministrar cables para condiciones y aplicaciones especiales. El aislamiento puede ser clasificado como laminado o de aislamiento extruido. El tipo de aislamiento laminado, esta representado exclusivamente por cables de aislamiento de papel con cubierta de plomo (PILC). El aislamiento de papel impregnado es la aplicación más antigua; En general, el papel esta impregnado con aceite o gel con las propiedades dieléctricas adecuadas para cumplir con su función de aislamiento (Hernández, 2008). El segundo tipo de aislamiento, el aislamiento extruido, pueden ser clasificados como de termoplásticos o de termoestable; definiendo a un termoplástico *como aquel material plástico que a temperatura ambiente es suave y deformable, se derrite cuando se calienta y se endurece en un estado vítreo cuando se enfría lo suficiente, por lo tanto, es un material moldeable con la temperatura (Heinhold, 1973).* Dentro de la clasificación de termoplástico se encuentra el aislamiento de polietileno (PE), que se divide ,a su vez ,en polietileno de bajo peso molecular (LMWPE) conocido también como PE de baja densidad (LDPE), y polietileno de alto peso molecular (HMWPE) también conocido como PE de alta densidad (HDPE). Un termoestable es un material plástico que luego de un proceso de polimerización se vuelve infusible e insoluble, es decir, no pierden sus propiedades químicas con la temperatura y arden al ser sometidos a altas temperaturas, siendo imposible volver a moldearlos (Heinhold, 1973). En la clasificación de los termoestables se encuentra los aislamientos de XLPE, TR-XLPE, y EPR; siendo estos últimos los de uso más popular.

El XLPE es el tipo de material de aislamiento más usado en los cables de potencia para distribución.

2.4.4 Apantallamiento del Aislamiento

El apantallamiento o pantalla del aislamiento, básicamente tiene la misma función que el apantallamiento del conductor, su finalidad es proporcionar un interfaz suave entre el aislamiento y el neutro. Esta pantalla es una capa de material semiconductor que recubre al aislamiento. Su objetivo es permitir el confinamiento homogéneo de las líneas del campo eléctrico al interior del aislamiento; esta es una función complementaria a la de la primera capa semiconductor que recubre al conductor. Esta capa de material también es conocida comúnmente como segunda capa semiconductor. De acuerdo con las prácticas de instalación, este material puede estar firmemente adherido al aislamiento o puede ser de fácil remoción, siendo este último caso el más usado por las empresas distribuidoras de energía. El apantallamiento del aislamiento asegura que la tensión

fuera del cable esté, al potencial de tierra. El grupo de los conductores, el apantallamiento del conductor, el aislamiento, y el apantallamiento del aislamiento es conocido como el núcleo del cable. El núcleo del cable está diseñado para mantener el campo eléctrico dentro del aislamiento de él mismo, y llevar la corriente eléctrica mientras disipa el calor generado por el conductor durante la vida útil del cable (Hernández, 2008).

2.4.5 Neutro

El neutro o pantalla metálica del cable, consiste en un conjunto de hilos concéntricos (neutro concéntrico) o en una cinta de metal, por lo general de cobre, que se colocan sobre el apantallamiento del aislamiento para mantener la parte exterior del núcleo del cable al potencial de tierra, lo cual ofrece protección contra el contacto accidental.

El neutro también está diseñado para llevar a las corrientes de falla, parásitas, y corrientes desequilibradas. El neutro puede ser de plomo, aluminio o de cobre en una gran variedad de diseños, que incluyen cintas delgadas, conductores cilíndricos y sólidos o corrugados (Hernández, 2008). El neutro debe ser continuo a lo largo de la longitud del cable y debe tener un buen contacto con el apantallamiento del aislamiento para garantizar que la zona exterior del núcleo del cable se encuentre al potencial de tierra. La falta de un buen contacto puede generar un voltaje gradiente entre el apantallamiento del aislamiento y pantalla metálica; situación que puede causar descargas eléctricas provocando daños en el apantallamiento del aislamiento y posteriormente en el aislamiento. Finalmente esto conducirá a un fallo del cable (Hernández, 2008).

Es importante tener presente la capacidad de corriente de corto circuito del neutro, de la misma forma en la que se tiene en cuenta para el conductor. Esta capacidad viene dada por el contenido de cobre y los materiales que están en contacto directo con la pantalla. En condiciones de corto circuito la temperatura del material del apantallamiento o de la chaqueta (materiales que eventualmente estarán en contacto con la pantalla metálica) puede crecer rápidamente debido a los niveles de corriente que se alcanzan en la falla y dado que estos materiales tienen una temperatura límite, ésta no debe ser sobrepasada ya que causaría daños irreversibles en el cable.

2.4.6 Chaqueta

La chaqueta es el elemento que recubre el cable y que quedará finalmente expuesto al medio, es una cubierta de protección que proporciona un aislamiento adicional. El material de la chaqueta debe cumplir con los siguientes aspectos: Resistencia a la humedad, a los rayos ultravioleta, al impacto y la abrasión y resistencia a los hidrocarburos, así como también retardante de la llama.

Los materiales típicos incluyen policloruro de vinilo (PVC), PE clorosulfonado, PE, LDPE, PE lineal de baja densidad (LLDPE), PE de densidad media (MDPE), HMWPE, y el nylon (Hernández, 2008). En la tabla 2.2 se muestra algunas características de los materiales mas utilizados para la chaqueta de un cable.

Tabla 2.2 Características de los materiales para chaqueta ([http:// www.centelsa.com](http://www.centelsa.com))

Propiedades	PVC	PE
Eléctricas	B	E
Flamabilidad	MB	R
Flexibilidad	E	B
Bloqueo de humedad	B	E
Resistencia al agua	MB	E
Resistencia a la abrasión	MB	MB
Resistencia a los hidrocarburos	MB	MB
E: Excelente MB: Muy Bueno B: Bueno R: Regular D: Deficiente		

En la tabla 2.2 se puede observar que de acuerdo al medio al que estará expuesto el cable, se hace la elección de que material de chaqueta es conveniente para el mismo.

2.5 PRINCIPALES PROBLEMAS EN LOS CABLES DE POTENCIA

Los principales problemas en los cables, se desarrollan en el aislamiento de los mismos. Las fallas en los cables se producen por la pérdida de aislamiento entre fase y neutro/cubierta, entre núcleos, en empalmes, terminaciones y por envejecimiento. También se dan fallas por la influencia de terceros, roedores, excavaciones y envejecimiento prematuro.

Un problema en los cables aislados con PE es el desarrollo de árboles acuosos, los cuales están constituidos por cavidades microscópicas estructuradas presentes en el aislamiento del cable. El crecimiento de estas estructuras provoca la aparición de árboles eléctricos, y por lo tanto, con la degradación del aislamiento del cable, aparecerán descargas parciales que provocarán un cortocircuito y por lo tanto una falla (Hernández, 2008).

2.6 PROBLEMAS EN EL NEUTRO

Resientes investigaciones (Hernández, 2008) muestran que existen fallas relacionadas con problemas en el neutro, las cuales avanzan a la creencia generalizada de la comunidad científica, de que los modos de falla de los cables son principalmente debidos al envejecimiento y degradación del aislamiento del sistema de cable de potencia. Los problemas en el neutro, son causados por la corrosión y la mineralización en los conductores de neutro. La corrosión puede producirse en la interfaces entre el metal y sus alrededores, ésta es acelerada por la presencia de agua y el pH del suelo (Hernández, 2008).

En la figura 2.5 se muestra los efectos de la corrosión y la mineralización en los cables, en la figura 2.5 (a) se observa un cable que sufrió los efectos de la corrosión causando la ruptura de un conductor de neutro y daño al apantallamiento del aislamiento, la figura 3.1 (b) muestra un pobre contacto entre los conductores de neutro y el apantallamiento del aislamiento debido a la mineralización.



a. Daños por corrosión



b. Pérdida de contacto debida a la mineralización

Figura 2.5 Ilustración de los efectos de la corrosión y mineralización en los cables
(Hernández, 2008)

2.6.1 Pérdida de Contacto entre el Apantallamiento del Aislamiento y los Conductores de Neutro

Un problema que se presenta con el neutro es la pérdida de contacto del mismo con el apantallamiento del aislamiento, esta pérdida de contacto puede ser causada por la corrosión o mineralización de los conductores de neutro cuando el cable no tiene chaqueta protectora exterior. El problema de pérdida de contacto también puede presentarse por degradación del material semiconductor del apantallamiento del aislamiento del cable aunque éste tenga chaqueta protectora.

En la figura 2.6 se muestra la sección longitudinal y transversal de un cable en las que se ilustran la pérdida de contacto entre el apantallamiento del aislamiento y los conductores del neutro por los efectos de la corrosión y la mineralización.

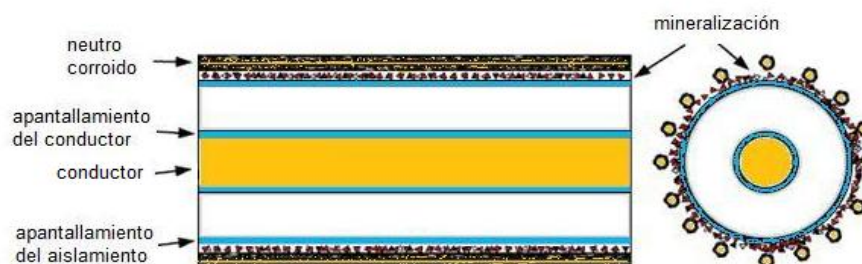


Figura 2.6 Ilustración de la sección longitudinal y transversal de un cable afectado por la corrosión y mineralización (Hernández, 2008)

Como ya se ha mencionado, la pérdida de contacto puede causar descargas parciales externas al cable causando daño al apantallamiento y posteriormente al aislamiento conllevando a una eventual falla.

2.7 PRUEBAS DE DIAGNÓSTICO EN CABLES DE POTENCIA PARA SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

Los cables de potencia para sistemas de distribución son sometidos a importantes y rigurosas pruebas tanto en el proceso de fabricación de los mismos como en la instalación y en servicio. Estas pruebas permiten diagnosticar y predecir problemas en la calidad del cable, básicamente en el aislamiento del mismo, ya que es en éste que se desarrollan los principales problemas que conducen a fallas en el cable. Estas pruebas de diagnóstico son de carácter no destructivo, se hacen para tratar de predecir la esperanza de vida que le queda al cable y dar prioridad, de ser necesario, al remplazo del mismo. Permiten localizar prematuramente los defectos en los cables antes de que estos se conviertan en averías. Las principales pruebas de diagnóstico son: $\tan \delta$ y pruebas de Descargas Parciales.

2.7.1 Prueba del Factor de Disipación (FD) o Tangente Delta ($\tan \delta$)

El Factor de Disipación (FD) o Tangente Delta ($\tan \delta$) es un método de diagnóstico y medición que permite juzgar la condición del aislamiento en cuanto a la cantidad de corrientes de fuga y por lo tanto

disipación de energía que el aislamiento deje pasar hacia el exterior a través de la pantalla metálica. El cable se aproxima a las propiedades de un condensador perfecto si el aislamiento del mismo está libre de defectos, por lo que el conductor y el neutro se asemejan a las placas en paralelo de un condensador separadas por el material de aislamiento. En un condensador perfecto, el voltaje y la corriente están desfasados 90° , por lo tanto, la corriente por el aislamiento es capacitiva. Si existen defectos en el aislamiento, la resistencia en el mismo disminuye, resultando en un aumento de la corriente por dicha resistencia; entonces, la corriente y la tensión ya no están desfasados 90° . A medida en que el cambio de fase es menor a 90° es indicativo del nivel de contaminación en el aislamiento, por lo tanto, de su calidad y fiabilidad. Esta pérdida en ángulo por lo tanto, se mide y se analiza para verificar las condiciones del cable en prueba.

El sistema de aislamiento es representado por un circuito eléctrico equivalente, que consta de dos elementos, un condensador y una resistencia. Para la medición del equivalente $\tan \delta$ se aplica una tensión alterna V , al aislamiento del cable; la corriente total es el resultado de la contribución de la corriente por el condensador y la corriente por la resistencia. La fuente se puede energizar a una frecuencia de 60 Hz o a VLF de 0,1 Hz. En la figura 2.5 se muestra el circuito eléctrico equivalente para hallar el $\tan \delta$ con su respectivo diagrama de fasorial.

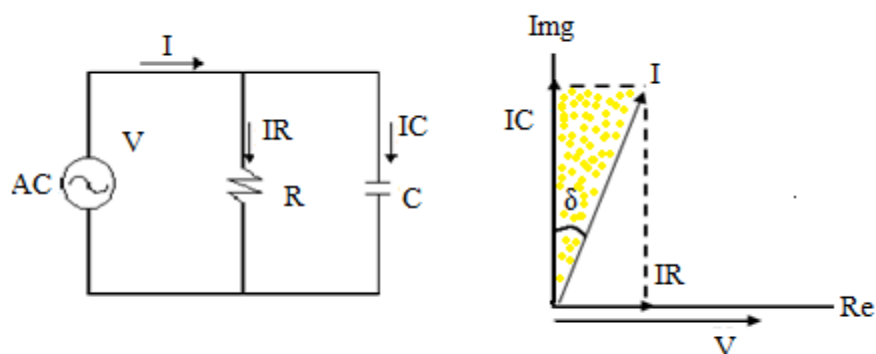


Figura 2.7 Circuito eléctrico equivalente para hallar el $\tan \delta$ y su diagrama fasorial

El circuito eléctrico equivalente resulta de la contribución de todos los elementos (capacitivos y resistivos) en el aislamiento, a lo largo de la longitud del cable. Por lo tanto, esta contribución da como resultado una resistencia R equivalente y un capacitor C equivalente que representan en paralelo el

circuito equivalente del aislamiento del cable al cual se le aplica una tensión alterna V halla el valor del $\text{Tan } \delta$.

Para una tensión aplicada V en el aislamiento, la corriente de fuga viene dada por la corriente por la resistencia equivalente, $I_R=V/R$, y la corriente por el condensador equivalente es $I_C=V/(1/\omega C)$. En la medición del $\text{Tan } \delta = I_R/I_C$ (cateto opuesto / cateto adyacente, del triángulo resaltado en la figura 2.7), podemos determinar la calidad de aislamiento del cable. A medida que el ángulo δ es mayor, es indicativo de un aumento de la corriente por la resistencia del aislamiento I_R , por lo tanto cuanto mayor es el ángulo δ , mayor es el deterioro en el aislamiento del cable.

El $\text{Tan } \delta$ en función de los parámetros del circuito eléctrico equivalente esta dado por la siguiente ecuación.

$$\text{FD} = \text{Tan } \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{V/R}{V/(\frac{1}{\omega C})} = \frac{1}{\omega RC} \quad (2.1)$$

Donde, R es la resistencia equivalente en el sistema de aislamiento en ohms (Ω), C es el capacitor equivalente en el sistema de aislamiento en Faradios (F), ω es la frecuencia angular en rad/s. El $\text{Tan } \delta$ evalúa la condición general del aislamiento en el sistema de cable.

En la prueba de diagnóstico en fábrica, para un cable nuevo XLPE, el valor de $\text{Tan } \delta$ es muy pequeño, por lo general menos de 0,0001 (Hernández, 2008); este valor va aumentando con el tiempo a medida que disminuye la vida útil del cable.

En las pruebas de campo, la medida del $\text{Tan } \delta$ es realizada con el segmento de cable desconectado de la red de distribución y energizado con una fuente aislada del sistema con una frecuencia de corriente alterna fija, normalmente de 60 ó 0.1 Hz (IEEE, 2002). Este segmento es típicamente alimentado con los niveles de voltaje de U_0 y $2.0 U_0$; donde, U_0 el voltaje de fase a tierra del cable en prueba (Hernández, 2008). Los cables eléctricos de

potencia han sido estudiados en VLF. En la práctica, es conveniente realizar las mediciones de $\tan \delta$ a VLF de 0.1 Hz. Con la implementación de una fuente de 0.1 Hz, en comparación con una de 60 Hz, el tamaño de la fuente se reduce, ya que en el momento de la energización de la misma, las exigencias energéticas son menores, por lo tanto, requiere una fuente de menor potencia; además, de la ecuación 2.1 se puede observar que el valor del $\tan \delta$ depende del inverso de la frecuencia, por lo tanto, para una frecuencia de 60 Hz el $\tan \delta$ tendría un valor muy pequeño, lo que disminuye la resolución de la medida; por estas razones se recomienda realizar estas pruebas a VLF de 0.1 Hz (IEEE Std 400, 2001).

Como ya se menciona, el valor del $\tan \delta$ va aumentando con el tiempo a medida que disminuye la vida útil del cable, es decir, va envejeciendo. El estado o condición del cable es evaluado de acuerdo a los estándares fijados por la IEEE Std 400, como se muestra en la tabla 2.3. La tabla muestra dos criterios diferentes, basados en el valor del $\tan \delta$, que se aplican para el diagnóstico del aislamiento en el sistema de cable; El primer criterio, establecido en la cláusula 8.4 de la IEEE Std 400 y conocido comúnmente como el "Tip-Up" del valor $\tan \delta$, utiliza la diferencia de valores $\tan \delta$ para determinados niveles de tensión, donde se califica el estado del cable como: Bueno, Deteriorado, Altamente Deteriorado. El segundo criterio, establecido en la cláusula 9.7 de la IEEE Std 400 utiliza simplemente la magnitud del valor $\tan \delta$ para calificar el estado del cable como: Bueno y Necesario Reemplazo, para una tensión de prueba de U_0 . Ambos criterios son válidos para 0.1 Hz y aislamiento XLPE (IEEE Std 400, 2002). Desafortunadamente, no existen criterios unificados en las mediciones del $\tan \delta$ para diferentes materiales de aislamiento y frecuencias (Hernández, 2008).

Tabla 2.3 Tan δ y evaluaciones del estado del cable (IEEE Std 400, 2002)

Evaluación	Tan δ		Tip-Up [1e-3]
	U_0	$2U_0$	U_0 a $2 U_0$
	Cláusula 8.4		
Bueno †	—	$< 1,2 \cdot 10^{-3}$	$< 0,6 \cdot 10^{-3}$
Deteriorado	—	$1,2 \cdot 10^{-3}$ a $2,2 \cdot 10^{-3}$	$0,6 \cdot 10^{-3}$ a $1 \cdot 10^{-3}$
Altamente Deteriorado	—	$> 2,2 \cdot 10^{-3}$	$> 1 \cdot 10^{-3}$
	Cláusula 9.7		
Bueno †	$< 4,0 \cdot 10^{-3}$	—	—
Necesario Reemplazo	$\geq 4,0 \cdot 10^{-3}$	—	—
†: Aprobada la evaluación del sistema de cable, es decir, ninguna acción de mantenimiento es necesaria.			

Por ejemplo, cuando el aislamiento XLPE es probado en 0.1 Hz con un voltaje de prueba de $1.0 U_0$, según la cláusula 9.7 (IEEE Std 400, 2001), el cable debería ser reemplazado cuando el Tan δ es mayor que $4,0 \times 10^{-3}$.

2.7.2 Pruebas de Descargas Parciales

La prueba de descargas parciales es una de las pruebas que permite juzgar la calidad del aislamiento en un cable, Aunque esta prueba es muy apropiada para la detección de imperfecciones del aislamiento, su implementación en campo es bastante laboriosa ya que requiere de elementos para la reducción del nivel del ruido eléctrico en las mediciones, haciendo necesario el uso de fuentes independientes de voltaje, filtros, apantallamientos entre otros. Una de las ventajas de llevar a cabo este tipo de prueba es que permite determinar el tipo de imperfección y a la vez su localización. Las desventajas más marcadas corresponden con la capacitación del personal para realizar dicha prueba y los equipos asociados para la implementación en campo de la misma.

2.7.3 Limitaciones en la Medición del $\tan \delta$

El $\tan \delta$ como cualquier otra técnica de diagnóstico de cables de potencia no está libre de problemas; Estas cuestiones son importantes porque pueden influir en el resultado de la evaluación de diagnóstico y por lo tanto, conducir a una evaluación incorrecta del cable. Uno de los problemas en las mediciones del $\tan \delta$, es que esta técnica evalúa la condición general del aislamiento en el sistema de cable, por lo tanto, la utilidad de ésta podría verse limitada por su incapacidad para dar información más específica; por ejemplo, cuando los problemas en el aislamiento se encuentran de manera localizada, el cable no puede ser evaluado correctamente. En este caso, las pruebas adicionales pueden ser necesarias para dar cuenta a esta particular situación (Hernández, 2008).

Además el circuito eléctrico equivalente, mostrado en la figura 2.5, usado para estimar el valor del $\tan \delta$ (IEEE Std 400, 2001), no considera problemas importantes e influyentes en esta medición, como lo son: los daños en el neutro causados principalmente por la corrosión y la pérdida de contacto entre el apantallamiento del aislamiento y los conductores de neutro. Por otra parte, Los resultados de los dos criterios establecidos en la norma (IEEE Std 400, 2001) a menudo se interpretan con las recomendaciones que figuran en la misma.

2.8 RESUMEN

En este Capítulo se ha introducido información básica e importante para el desarrollo de los siguientes; el objetivo principal de este trabajo es el estudio del efecto en el $\tan \delta$ a muy baja frecuencia cuando existe pérdida de contacto entre el apantallamiento del aislamiento y los conductores de neutro, para esto es necesario un circuito equivalente que considere este problema ya que como se mostro en este Capítulo el circuito equivalente usado para estimar el $\tan \delta$ presenta ciertas limitaciones y no considera dichos problemas de pérdida de contacto; por esta razón en el siguiente Capítulo se modelan estos problemas y se presenta un modelo de quadripolo por unidad de longitud que los considera.

CAPÍTULO III

MODELADO DE LA PÉRDIDA DE CONTACTO ENTRE EL APANTALLAMIENTO DEL AISLAMIENTO Y LOS CONDUCTORES DE NEUTRO

En este Capítulo se presentan modelos que consideran los problemas de pérdida de contacto entre el apantallamiento del aislamiento y los conductores de neutro, así como también un modelo por unidad de longitud que considera los problemas de pérdida de contacto y se desarrollan ecuaciones basadas en este modelo para determinar el $\tan \delta$.

3.1 MODELO DE LOS PROBLEMAS DE PÉRDIDA DE CONTACTO

Cuando existe corrosión en los conductores de neutro o pérdida de contacto entre el apantallamiento del aislamiento y los conductores de neutro el valor del equivalente $\tan \delta$ se ve afectado por la contribución de una resistencia serie equivalente. En la figura 3.2 se muestra el circuito equivalente que considera los problemas de pérdida de contacto, donde la resistencia serie (R_s) resulta del equivalente de la resistencia del apantallamiento del conductor (R_{cs}), resistencia del apantallamiento del aislamiento (R_{is}), y la resistencia de contacto entre el apantallamiento del aislamiento y el neutro o la resistencia de los propios conductores de neutro (R_N). R_i es la resistencia equivalente en el sistema de aislamiento en ohms (Ω), C_i es el capacitor equivalente en el sistema de aislamiento en Faradios (F) (Hernández, 2008).

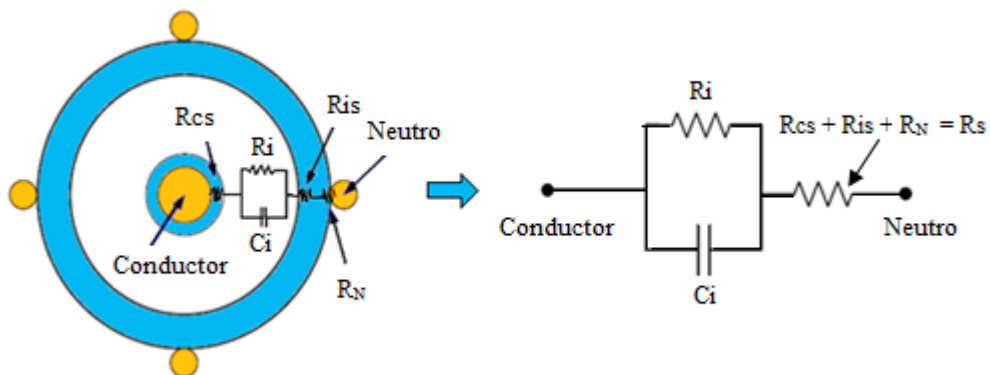


Figura 3.1 Circuito equivalente que considera los problemas de pérdida de contacto (Hernández, 2008)

Cuando no existen problemas de pérdida de contacto la resistencia equivalente serie se puede despreciar, es decir, en condiciones normales dicha resistencia es muy pequeña en comparación con los parámetros del aislamiento (R_i , C_i) (Hernández, 2008). En la figura 3.3 se muestra el circuito equivalente usado para hallar el $\tan \delta$ cuando no existen problemas de pérdida de contacto, en la misma se puede observar que para este caso el circuito usado es el del aislamiento.

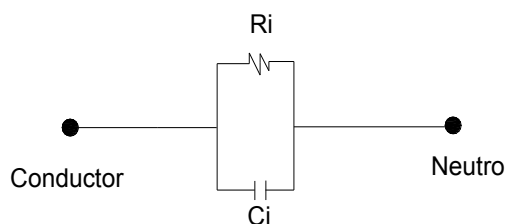


Figura 3.2 Circuito equivalente cuando no existen problemas de pérdida de contacto

Cuando existen problemas de pérdida de contacto es necesario considerar la contribución de la resistencia serie equivalente, ya que el incremento del valor de R_N puede ser significativo en comparación con los parámetros del aislamiento, por lo tanto, el valor de $\tan \delta$ se verá

afectado. En la figura 3.4 se muestra el circuito equivalente que considera los problemas de pérdida de contacto, en el que se asume que existe buen contacto entre el aislamiento y el apantallamiento del aislamiento, por lo que, se desprecia R_{is} ; análogamente considerando un buen contacto entre el conductor y el apantallamiento del conductor, también se desprecia R_{cs} .

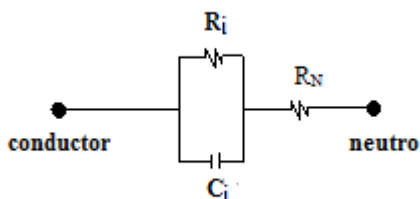


Figura 3.3 Circuito equivalente cuando existen problemas de pérdida de contacto

El incremento de la R_N se debe a los problemas en el neutro, a causa de la corrosión, la mineralización en los conductores de neutro y por envejecimiento y degradación del material semiconductor del apantallamiento del aislamiento (Hernández, 2008). En este trabajo se le denomina a éstos, problemas de pérdida de contacto.

Para modelar los problemas de pérdida de contacto, es usado un modelo de quadripolo (red de dos puertos) por unidad de longitud (Hernández, 2008). Este modelo se muestra en la figura 3.4.

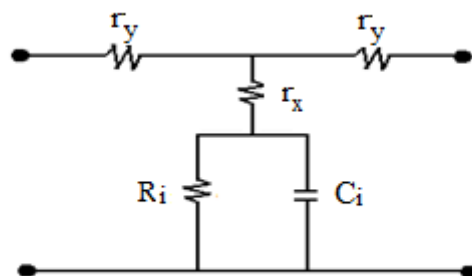


Figura 3.4 Modelo de quadripolo por unidad de longitud cuando se tiene problemas de pérdida de contacto

En la figura 3.4, R_i y C_i representan los parámetros del aislamiento por unidad de longitud, estos parámetros son los mismos utilizados cuando no existen problemas de pérdida de contacto; r_x representa la resistencia de contacto por unidad de longitud, entre el apantallamiento del aislamiento y los conductores de neutro, y r_y representa la resistencia de los propios conductores de neutro. Los parámetros que se muestra en la Figura 3.4 se encuentran en cada unidad de longitud, por lo tanto, como la longitud del segmento de cable aumenta, el efecto de los parámetros de r_x y r_y también aumenta y de esta manera se espera que incremente el valor del $\text{Tan } \delta$ equivalente cuando los problemas de pérdida de contacto estén presentes en el segmento de cable (Hernández, 2008).

El avance del modelo de quadripolo por unidad de longitud sobre el circuito equivalente usado para estimar el $\text{Tan } \delta$ radica en que este modelo considera los problemas de pérdida de contacto; además, para este caso, el $\text{Tan } \delta$ dependerá de la longitud del cable. Por lo tanto, cada unidad de longitud (por ejemplo, cada metro) del segmento de cable, es representada con este modelo lo que permite obtener información localizada del problema de pérdida de contacto.

Los problemas de pérdida de contacto pueden estar localizados o distribuidos a lo largo del cable; Se dice que existen problemas localizados si sólo porciones del segmento de cable presentan el problema, por el contrario si todo el segmento de cable presenta el problema, son distribuidos (Hernández, 2008).

En la figura 3.5 se muestra un segmento de cable con problemas localizados de pérdida de contacto.

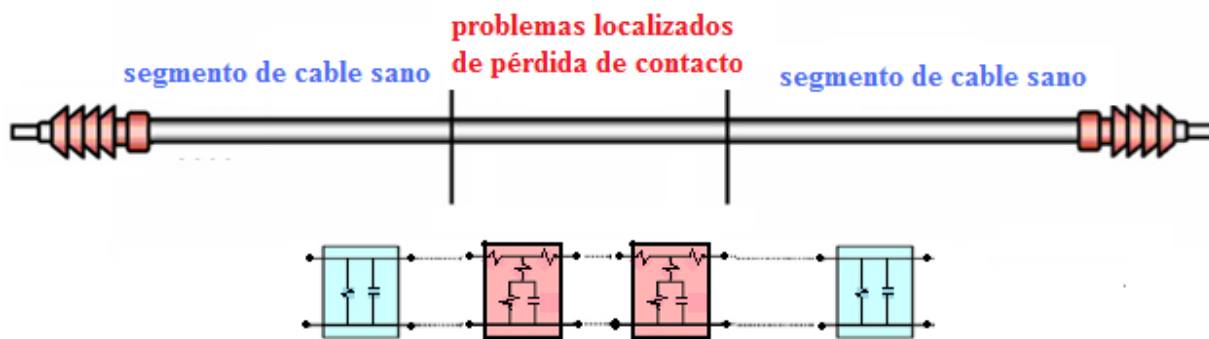


Figura 3.5 Problemas localizados de pérdida de contacto (Hernández, 2008)

En la figura 3.5 se observa dos modelos de quadripolo; en azul, quadripolos cuando el segmento de cable está sano, es decir, no presenta los problemas de pérdida de contacto, por lo tanto, los parámetros r_x , r_y no se consideran y el segmento de cable se representa con un sólo modelo de quadripolo que corresponde al circuito equivalente del aislamiento (Hernández, 2008) ya que como se muestra más adelante en la sección 3.2 de este Capítulo cuando no existen problemas de pérdida de contacto el $\text{Tan } \delta$ es independiente de la longitud del cable.

En rojo, quadripolos cuando en el segmento de cable están presentes los problemas de pérdida de contacto, en los cuales se consideran los parámetros r_x y r_y ; por lo tanto, por cada unidad de longitud del segmento de cable con estos problemas, se representa un modelo de quadripolo.

En la figura 3.6 se muestra un cable con problemas distribuidos de pérdida de contacto distribuidos.



Figura 3.6 Problemas distribuidos de pérdida de contacto (Hernández, 2008)

En la figura 3.6 se puede observar los quadripolos rojo, a lo largo de todo el segmento de cable representando problemas distribuidos de pérdida de contacto.

3.2 DESARROLLO Y ANÁLISIS DE ECUACIONES PARA EL MODELO DE QUADRIPOLO POR UNIDAD DE LONGITUD CUANDO NO EXISTEN PROBLEMAS DE PÉRDIDA DE CONTACTO

Cuando no existen los problemas de pérdida de contacto, los parámetros r_x y r_y son cero; por lo tanto, el modelo de quadripolo por unidad de longitud se reduce al circuito mostrado en la figura 3.2 donde sólo se consideran los parámetros del aislamiento. La ecuación 3.15 muestra el $\text{Tan } \delta$ en función de los parámetros del aislamiento.

$$\text{Tan } \delta = \frac{1}{\omega \cdot r_i \cdot C_i} \quad (3.1)$$

Los parámetros r_i , C_i se calculan con las ecuaciones 3.2 y 3.3 respectivamente (Carl, 1981).

$$r_i = \frac{\rho}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{\text{Ln}\left(\frac{b}{a}\right)}{l} \quad [\Omega] \quad (3.2)$$

$$C_i = 2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \frac{l}{\text{Ln}\left(\frac{b}{a}\right)} \quad [F] \quad (3.3)$$

En las ecuaciones 3.2 y 3.3; l corresponde a la longitud del cable en metros (m), a y b corresponde al radio interno y externo del aislamiento, respectivamente (como se muestra en la figura 3.7), respectivamente. ρ es la resistividad eléctrica del material aislante en $\Omega\text{-m}$ y ε es la permitividad del mismo material en F/m.

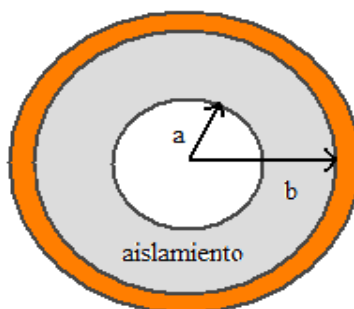


Figura 3.7 Radio interno y externo del aislamiento

Sustituyendo las ecuaciones 3.2 y 3.3 en 3.1 resulta la ecuación 3.4

$$\text{Tan } \delta = \frac{1}{\omega \cdot \frac{\rho}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{\text{Ln} \left(\frac{b}{a} \right)}{l} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \frac{l}{\text{Ln} \left(\frac{b}{a} \right)}} \quad (3.4)$$

Cancelando términos y reacomodando la ecuación 3.4 puede escribirse como se muestra a continuación en la ecuación 3.5.

$$\text{Tan } \delta = \frac{1}{\omega \cdot \rho \cdot \varepsilon} \quad (3.5)$$

De la ecuación 3.5 se puede observar que cuando se consideran sólo los parámetros del aislamiento para hallar el valor del Tan δ , el mismo no depende de la longitud ni de las dimensiones del cable en cuestión; esto es importante, ya que el segmento de cable sin problemas de pérdida de contacto (caso de problemas localizados de pérdida de contacto) se puede representar como un sólo quadripolo equivalente como se puede observar en la figura 3.5 de la sección 3.1.

3.3 DESARROLLO Y ANÁLISIS DE ECUACIONES PARA HALLAR EL TAN δ USANDO EL MODELO DE QUADRIPOLO POR UNIDAD DE

LONGITUD CUANDO SE TIENEN PROBLEMAS DE PÉRDIDA DE CONTACTO

A continuación se analiza y se muestran las ecuaciones para hallar el $\text{Tan } \delta$ equivalente cuando existen problemas de pérdida de contacto.

Como ya se mencionó, para modelar los problemas de pérdida de contacto, se utiliza un modelo de quadripolo por unidad de longitud, como el mostrado en la figura 3.4. En la figura 3.8, se muestra el modelo anteriormente mencionado en el dominio del tiempo.

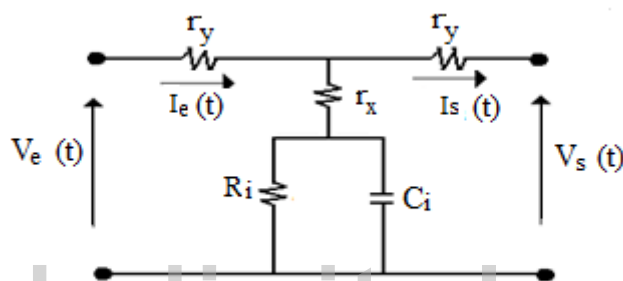


Figura 3.8 Modelo de quadripolo por unidad de longitud cuando se tiene problemas de pérdida de contacto, en el dominio del tiempo

En la figura 3.8, $V_{e(t)}$ y $V_{s(t)}$ representan el voltaje de entrada y salida en el quadripolo respectivamente, en V. Luego $I_{e(t)}$ e $I_{s(t)}$ representan la corriente de entrada y salida en el quadripolo respectivamente, en A; r_i la resistencia del aislamiento por unidad de longitud, en $\Omega\cdot\text{m}$; C_i la capacitancia en el aislamiento por unidad de longitud en F/m; r_x la resistencia de contacto entre el apantallamiento del aislamiento y los conductores de neutro, en $\Omega\cdot\text{m}$; y r_y la resistencia de los conductores de neutro en Ω/m .

Para establecer una relación entre las variables de entrada y las variables de salida es necesario transformar el modelo del quadripolo en el dominio de la frecuencia, mediante la transformación de Laplace. En este caso todos los elementos del modelo están representados como impedancia y s es el parámetro de Laplace; el modelo de quadripolo en el dominio de la frecuencia es mostrado en la figura 3.9.

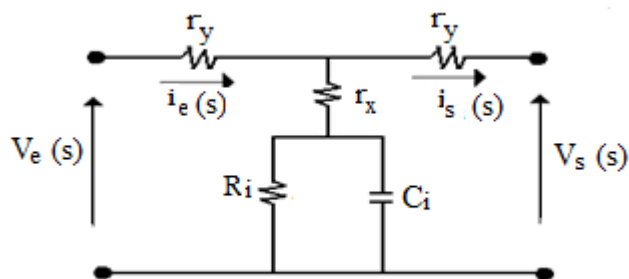


Figura 3.9 Modelo de quadripolo por unidad de longitud cuando se tiene problemas de pérdida de contacto, en el dominio de la frecuencia

El quadripolo de la figura 3.9 puede ser representado como un quadripolo generalizado como se puede observar en la figura 3.10; donde, \mathbf{X}_e se define como el vector de variables de entrada; \mathbf{X}_s como el vector de variables de salida y M como la matriz de la función de transferencia en trayectoria directa.

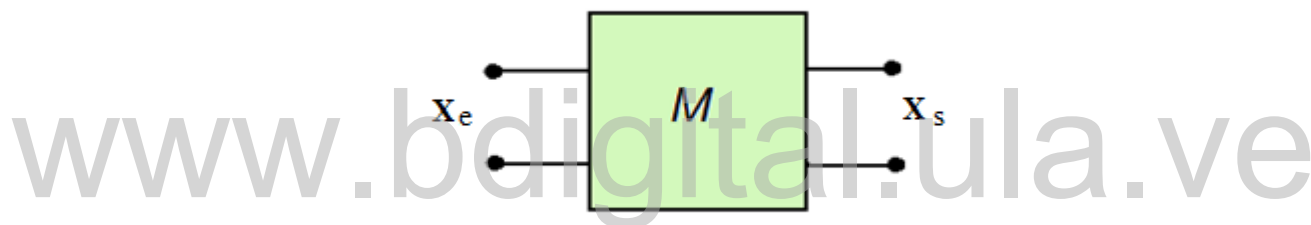


Figura 3.10 Modelo de quadripolo generalizado

La relación entre \mathbf{X}_e , \mathbf{X}_s y M se muestra en la ecuación 3.5 donde se observa que la matriz de la función de transferencia expresa la relación entre el vector de variables de entrada y el vector de variables de salida.

$$\mathbf{X}_s = M \cdot \mathbf{X}_e \quad (3.5)$$

En la ecuación 3.6 y 3.7 se define el vector de variables de entrada y el vector de variables de salida respectivamente.

$$\mathbf{X}_e = \begin{bmatrix} V_e(s) \\ i_e(s) \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$\mathbf{X}_s = \begin{bmatrix} v_s(s) \\ i_s(s) \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Aplicando teoría de quadripolos se obtiene la matriz de la función de transferencia mostrada en la ecuación 3.8. En el apéndice se muestra en detalle el desarrollo de esta ecuación.

$$M = \frac{1}{r_i + r_x + s c_i r_i r_x} \begin{bmatrix} r_y + r_i + r_x + (r_y + r_x) s c_i r_i & -(2r_i + 2r_x + r_y) r_y - (2r_x r_y + r_y^2) s c_i r_i \\ -1 - s c_i r_i & r_y + r_i + r_x + (r_y + r_x) s c_i r_i \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

En la figura 3.11 se muestra el caso de dos quadripolos generalizados conectados en cascada, cada uno con su respectiva matriz de función de transferencia. Esta situación se puede relacionar con el cable cuando se tienen problemas de pérdida de contacto, donde cada unidad de longitud del segmento de cable con dichos problemas se representa con un modelo de quadripolo.

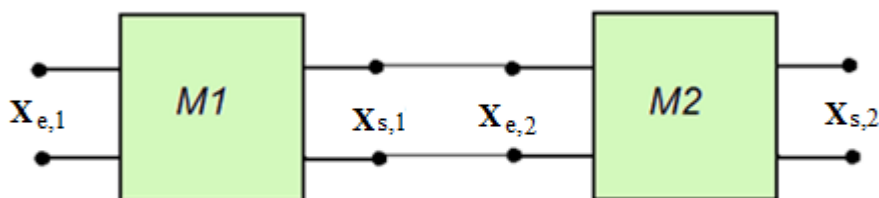


Figura 3.11 Dos modelos de quadripolo generalizado conectados en cascada

La relación entre el vector de variables de entrada y salida del quadripolo 1 y 2 se muestra en la ecuación 3.9 y 3.10 respectivamente.

$$\mathbf{X}_{s,1} = M_1 \cdot \mathbf{X}_{e,1} \quad (3.9)$$

$$\mathbf{X}_{s,2} = \mathbf{M}_2 \cdot \mathbf{X}_{e,2} \quad (3.10)$$

Como los quadripolos generalizados están conectados en cascada, entonces $\mathbf{X}_{s,1}$ es igual a $\mathbf{X}_{e,2}$ y la relación de ambos se muestra en la siguiente ecuación.

$$\mathbf{X}_{s,2} = \mathbf{M}_2 \cdot \mathbf{M}_1 \cdot \mathbf{X}_{e,1} \quad (3.11)$$

En la figura 3.12 se muestra el caso cuando se tiene un número n de modelos de quadripolos generalizados conectados en cascada. En la situación específica del cable, cuando éste presenta los problemas de pérdida de contacto, n será el número de unidades de longitud con dichos problemas; por ejemplo, el número de metros en los que el cable presenta pérdida de contacto entre el apantallamiento del aislamiento y los conductores de neutro.

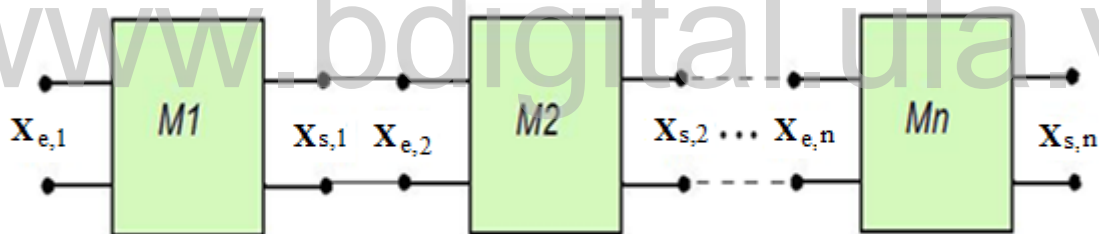


Figura 3.12 Un número n de quadripolos generalizados conectados en cascada

La relación entre el quadripolo generalizado número 1 y el quadripolo generalizado n se muestra en la ecuación 3.12.

$$\mathbf{X}_{s,n} = \mathbf{M}_n \mathbf{M}_{n-1} \dots \mathbf{M}_2 \mathbf{M}_1 \mathbf{X}_{e,1} \quad (3.12)$$

Si los n quadripolos tienen la misma configuración de circuitos equivalente, entonces las matrices de transferencia son iguales y la ecuación 3.13 se puede generalizar como se muestra en la siguiente ecuación.

$$\mathbf{X}_{s,n} = \mathbf{M}^n \mathbf{X}_{e,1} \quad (3.13)$$

En la ecuación 3.8 se representa la relación entre el vector de variables de entrada y salida de un sistema equivalente, donde el sistema equivalente es definido como un modelo de quadripolo generalizado que tiene por matriz de función de transferencia \mathbf{M}^n . Representa todos los quadripolos individuales conectados en cascada.

De la ecuación 3.13 el vector de variable de entrada puede ser expresado en términos del vector de variables de salida de la siguiente manera.

$$\mathbf{X}_{e,1} = \mathbf{M}^{-n} \mathbf{X}_{s,n} \quad (3.14)$$

El inverso de la matriz de la función de transferencia se define en la ecuación 3.15 mostrada a continuación.

$$\mathbf{M}^{-n} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Luego la ecuación 3. 9 se puede escribir de la siguiente manera como se muestra en la ecuación 3.16 (a) y 3.16 (b).

$$\mathbf{X}_{e,1} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \mathbf{X}_{s,n} \quad (a) \quad (3.16)$$

$$\begin{bmatrix} V_{e1} \\ i_{e1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sn} \\ i_{sn} \end{bmatrix} \quad (b)$$

Si la corriente de salida es cero ($i_{s,n} = 0$), las variables de entrada son,

$$V_{e1} = A V_{sn} \quad (a) \quad (3.17)$$

$$i_{e1} = C v_{sn} \quad (b)$$

Por lo tanto, la impedancia de entrada equivalente es,

$$Z_e = \frac{v_{e,1}}{i_{e,1}} = \frac{A}{C} \quad (3.18)$$

Usando la impedancia de entrada equivalente (Z_e), el equivalente $\text{Tan } \delta$ del sistema de quadripolos conectado en cascada puede ser calculado como se muestra en la ecuación 3.19 (Hernández, 2008).

$$\text{Tan } \delta = \text{Tan} (\pi/2 + \angle Z_e) \quad (3.19)$$

El procedimiento y la ecuación (3.19) para hallar el $\text{Tan } \delta$ puede ser utilizado para cualquier configuración del sistema de cable.

3.4 DESARROLLO Y ANÁLISIS DE ECUACIONES PARA EL MODELO DE QUADRIPOLO POR UNIDAD DE LONGITUD CUANDO SE CONSIDERA QUE NO EXISTE EL PARÁMETRO r_y .

Considerando para el modelo de quadripolo de la figura 3.6 que no existe el parámetro r_y , la resistencia de los propios conductores de neutro, como se muestra en la figura 3.13

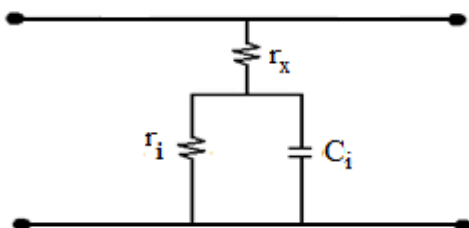


Figura 3.13 Modelo de quadripolo por unidad de longitud cuando se considera que no existe el parámetro r_y

Si se conectan un número n de quadripolo, por unidad de longitud cuando sólo se considera la resistencia de contacto, como se muestra en la figura 3.14, recordando que los parámetros r_x , r_i , C_i están expresados por unidad de longitud, es decir, son iguales en cada unidad de longitud; se busca conocer la impedancia de entrada para hallar el $\tan \delta$ con la ecuación 3.18 y 3.19 de este Capítulo.

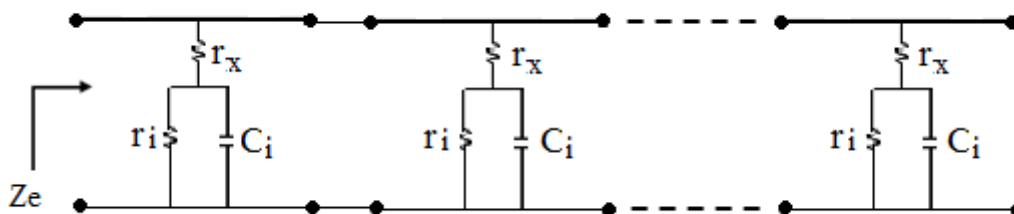


Figura 3.14 Modelos de quadripolo por unidad de longitud cuando no existe el parámetro r_y , conectados en cascada

Como ya se mencionó los parámetros r_i , r_x , C_i son iguales para cada quadripolo; por lo tanto, usando teoría de circuitos, un voltaje común V_x puede asociarse a estos como se muestra en la figura 3.15.

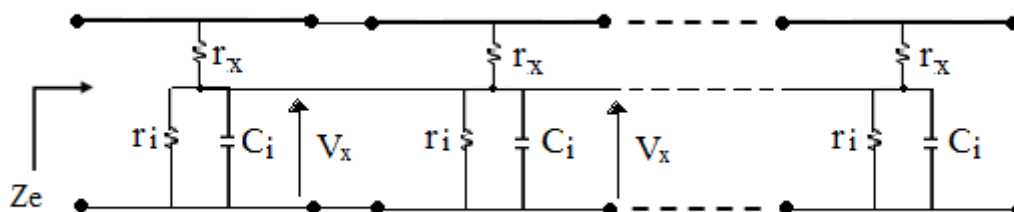


Figura 3.15 Voltaje común V_x en el modelos de quadripolo por unidad de longitud, cuando se considera que no existe el parámetro r_y , conectados en cascada

El modelo de la figura 3.15 se reduce al quadripolo mostrado en la figura 3.16 para hallar la impedancia de entrada; donde n representa el número de modelos de quadripolos conectados en cascada y Z_e la impedancia de entrada equivalente.

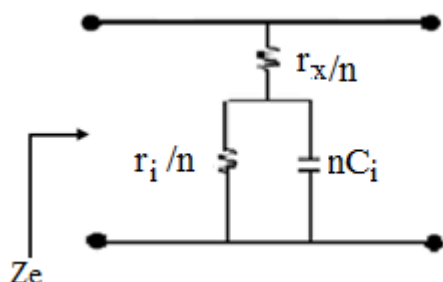


Figura 3.16 quadripolo equivalente por unidad de longitud cuando se considera que no existe el parámetro r_y

La impedancia de entrada equivalente de la figura 3.16 se halla como se muestra en las ecuaciones 3.20 y 3.21 mostradas a continuación.

$$Z_e = \frac{r_x}{n} + \frac{r_i}{r_i \cdot sC_i \cdot n + n} \quad (3.20)$$

$$Z_e = \frac{1}{n} \cdot \left(r_x + \frac{r_i}{r_i \cdot sC_i + 1} \right) \quad (3.21)$$

De la ecuación 3.21 se observa que n es un número real, por lo tanto, el ángulo de la Z_e no dependerá de este valor. El $\text{Tan } \delta$, como se muestra en la ecuación (3.19) de la sección 3.3 de este Capítulo, depende del ángulo de la impedancia de entrada, por lo tanto, el valor del mismo no se ve afectado con n , en consecuencia cuando sólo se considera la resistencia de contacto, el valor del $\text{Tan } \delta$ se mantiene constante independientemente de la longitud del cable en cuestión.

3.5 DESARROLLO DE ECUACIONES PARA HALLAR EL TAN δ CONSIDERANDO PROBLEMAS DISTRIBUIDOS Y LOCALIZADOS DE PÉRDIDA DE CONTACTO

Cuando los problemas de pérdida de contacto se encuentran de manera distribuida en el cable, como se muestra en la figura 3.6 de la sección 3.1, el procedimiento a seguir para hallar el Tan δ equivalente, es el mismo desarrollado en la sección 3.3 de éste Capítulo. Por lo tanto, se halla la matriz de la función de transferencia M , luego ésta se invierte y con la ecuación 3.8 se halla la impedancia de entrada equivalente y con la ecuación 3.19 se halla el Tan δ equivalente.

Cuando los problemas de pérdida de contacto se encuentran localizados en el cable, el procedimiento a seguir para hallar el Tan δ equivalente es el siguiente.

- Se halla la matriz de la función de transferencia siguiendo de igual forma el procedimiento desarrollado en la sección 3.3 de éste Capítulo; esto para cada segmento por separado como se ilustra en la figura 3.17, donde M_1 representa la matriz de la función de transferencia para el primer segmento de cable sano, M_2 la del segmento de cable con problemas de pérdida de contacto y M_3 la del segundo segmento de cable sano.

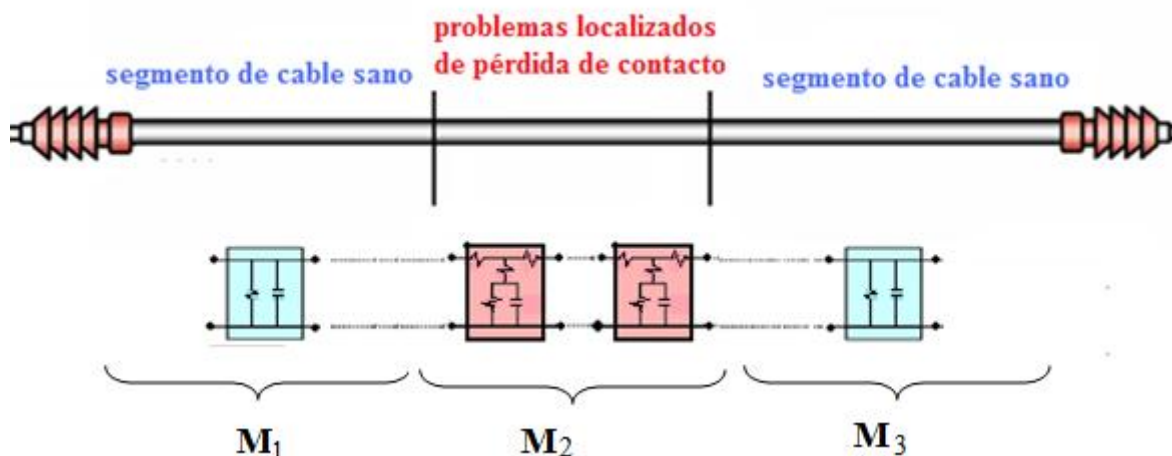


Figura 3.17 Ilustración de la matriz de la función de transferencia para cada segmento, cuando los problemas están localizados en el cable

- Luego como los quadripolos están conectados en cascada se puede hallar una Matriz de función de transferencia equivalente M_e como se muestra en la ecuación 3.22

$$M_e = M_1 \cdot M_2 \cdot M_3 \quad (3.22)$$

- Se invierte M_e para hallar la impedancia de entrada equivalente con la ecuación 3.18 de la sección 3.3 de este Capítulo y con la ecuación 3.19 del mismo, se halla el $\text{Tan } \delta$ equivalente.

Además del $\text{Tan } \delta$ equivalente, se puede hallar el $\text{Tan } \delta$ para cada segmento de cable y de esta manera se obtiene información localizada del mismo en el cable. Por ejemplo, para hallar el $\text{Tan } \delta$ del segmento de cable con problemas localizados de pérdida de contacto de la figura 3.17, se invierte M_2 para hallar la impedancia de entrada equivalente en el mismo con la ecuación 3.18 de la sección 3.3 de este Capítulo y con la ecuación 3.19, se halla el $\text{Tan } \delta$.

3.6 RESUMEN

El modelo de quadripolo por unidad de longitud, considera los problemas de pérdida de contacto; dichos problemas pueden estar localizados o distribuidos en el cable. Con este modelo se puede hallar tanto la condición general del segmento de cable como la localizada; es decir, cuando los problemas de pérdida de contacto están presentes de manera localizada en el cable, con la implementación del modelo de quadripolo por unidad de longitud es posible hallar el $\text{Tan } \delta$ equivalente para todo el cable o simplemente, hallar el $\text{Tan } \delta$ de manera localizada para el segmento de cable del que se requiera la información.

www.bdigital.ula.ve

CAPÍTULO IV

SIMULACIÓN Y ESTUDIO DEL CABLE DE POTENCIA UTILIZANDO EL PROGRAMA MAXWELL[®] (SV)

En este Capítulo se utiliza el programa Maxwell[®] (SV) para simular el comportamiento del campo eléctrico del cable, así como además, para obtener los valores de los parámetros del aislamiento y de la resistencia de contacto.

4.1 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA MAXWELL[®] (SV)

Maxwell[®] (SV) es un programa, en su versión para estudiantes, para el análisis de campos electromagnéticos el cual utiliza un análisis de elementos finitos para resolver problemas en dos dimensiones (2D).

Para analizar un problema en Maxwell[®] (SV) es necesario especificar la geometría adecuada, las propiedades del material y las excitaciones para un dispositivo o sistema de dispositivos. Dadas las especificaciones mencionadas, el programa automáticamente crea la malla necesaria para el análisis de elementos finitos; sin embargo, ésta malla puede ser redefinida por el usuario de acuerdo a sus requerimientos de cálculo. El programa iterativamente calcula el campo de la solución deseada, electrostática o magnetostática; además cantidades especiales de interés como capacitancia, inductancia, torque entre otras (Ansoft Corporation, 2002).

Maxwell[®] (SV) proporciona diferentes alternativas de soluciones para el análisis, las cuales pueden ser: magnetostática, electrostática, corriente de Foucault, conducción DC, conducción AC.

4.2 INFLUENCIA DE LA PÉRDIDA DE CONTACTO EN EL CAMPO ELÉCTRICO DEL CABLE

Como ya se ha mencionado, en condiciones normales, es decir, cuando no existen los problemas de pérdida de contacto el campo eléctrico debe estar contenido en el aislamiento del cable. Ésta subsección ilustra que ocurre con el campo eléctrico del cable cuando se presentan dichos problemas de pérdida de contacto, usando Maxwell[®] (SV).

4.2.1 Simulaciones en Maxwell[®] (SV)

Para analizar la influencia de la pérdida de contacto entre el apantallamiento del aislamiento y los conductores de neutro en el campo eléctrico del cable de potencia, se realizan en Maxwell[®] (SV) simulaciones para un cable XLPE- 15 kV en condiciones normales y cuando los problemas de pérdida de contacto estén presentes en el mismo.

- **Simulación cuando no existen problemas de pérdida de contacto**

Para realizar las simulaciones se utiliza la geometría de un cable XLPE- 15 kV que se muestra en la tabla 3.1, la cual se muestra a continuación.

Tabla 4.1 Geometría de un cable XLPE-15 kV (Nikolajevic S, 1999)

Conductor	Diámetro = 8,8 mm
Apantallamiento del conductor	Espesor = 0,5 mm
Aislamiento	Espesor = 2,4 mm
Apantallamiento del aislamiento	Espesor = 0,6 mm
Neutro	Espesor = 1,9 mm

Con los datos de la tabla 4.1 se realiza en Maxwell[®] (SV) el dibujo de la sección transversal del cable, como se observa en la figura 4.1.

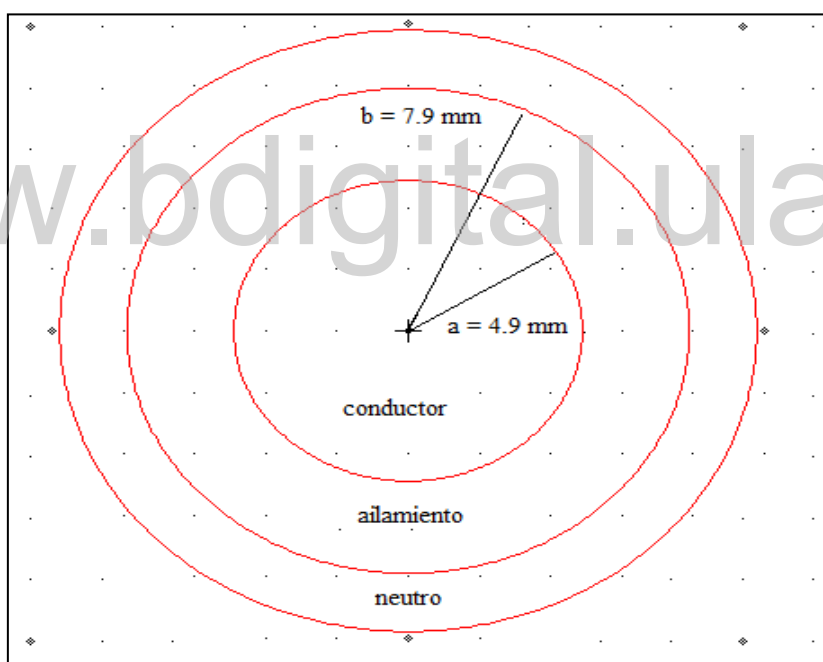


Figura 4.1 Dibujo en Maxwell[®] (SV) de la sección transversal de un cable XLPE-15 kV

Para la figura 4.1 se asume que hay un buen contacto entre el apantallamiento del aislamiento y los conductores de neutro y por razones de simplicidad en el dibujo y que en este caso se desea es verificar que, efectivamente, el campo eléctrico se encuentre en el

interior del aislamiento no se dibujaron los apantallamientos, sin embargo, sus espesores fueron tomados en cuenta.

Para realizar las simulaciones se utilizó un voltaje de 8,7 KV que corresponde al valor nominal de tensión eficaz entre fase y tierra para un cable de 15 kV. También es necesario asignar los materiales de cada elemento dibujado en la sección transversal del cable. Para el conductor se asignó cobre, para el aislamiento XLPE y para el neutro cobre.

El campo eléctrico es una medida que se origina a partir de los movimientos de las cargas eléctricas con relación al punto en que se hace la observación (Carl, 1981), por lo tanto, en ésta simulación se escoge la solución del tipo electrostático y se calcula el campo eléctrico en todo el volumen del cable. La figura 4.2 muestra el resultado de la simulación, donde se puede observar el campo eléctrico para un cable XLPE-15 kV, cuando existe buen contacto entre el apantallamiento del aislamiento y los conductores de neutro.

En la figura 4.2 se puede observar que el campo eléctrico se encuentra contenido en el interior del aislamiento del cable; la mayor intensidad, en color rojo, del mismo se encuentra en la periferia del conductor con un valor de $3,7273 \times 10^6$ V/m. Además por ser materiales conductores usados en el conductor y el neutro el campo eléctrico en los mismos es cero.

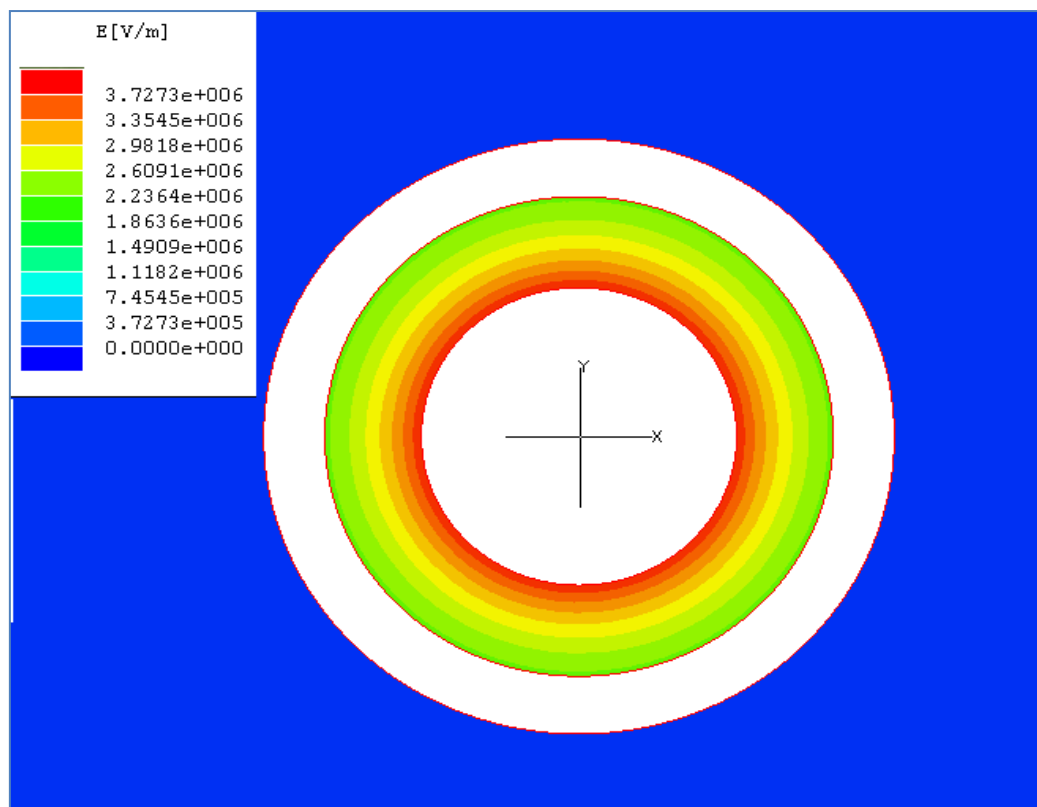


Figura 4.2 Campo eléctrico para en un cable XLPE-15 kV, cuando existe buen contacto entre el apantallamiento del aislamiento y conductores de neutro

Los resultados obtenidos en Maxwell[®] (SV) se pueden comprobar teóricamente, y así verificar la confiabilidad del programa.

- **Comprobación de los resultados obtenidos en Maxwell[®] (SV)**

Utilizando la teoría de campos electromagnéticos y las ecuaciones 4.1, 4.2 y 4.3 (Carl, 1981), se obtiene teóricamente la magnitud del campo eléctrico.

$$D = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot l \cdot r} = \epsilon \cdot E \quad [\text{C/m}^2] \quad (4.1)$$

En la ecuación 4.1, D representa la densidad de campo eléctrico en C/m^2 , Q la carga eléctrica en C , ϵ la permitividad del material en F/m , l la longitud en m , r un radio que se puede particularizar entre los límites a y b , es decir, $a < r < b$ y E representa el campo eléctrico en V/m . De la ecuación 4.1 se despeja E , quedando la ecuación (4.2) mostrada a continuación.

$$E = \frac{D}{\epsilon} = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot l \cdot r} \quad (4.2)$$

El valor de Q se obtiene de la ecuación (4.3).

$$Q = C \cdot V = 2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot \frac{l}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \cdot V \quad (4.3)$$

En la ecuación 4.3, C representa la capacitancia en F y V el voltaje en V . Sustituyendo 4.3 en 4.2, resulta la ecuación 4.4.

$$E = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot \frac{l}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \cdot V}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot r \cdot l} = \frac{V}{r \cdot \ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad [V/m] \quad (4.4)$$

Utilizando los valores usados en la simulación para el voltaje y los radios a y b , se calcula el campo eléctrico particularizando para $r = 4,9$ mm y $r = 7,9$ mm. Los resultados del cálculo teórico y su comparación con los de Maxwell[®] (SV) se muestran en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 Resultados del cálculo teórico del campo eléctrico y su comparación con los de Maxwell[®] (SV)

r (mm)	E teórico (V/m)	E Maxwell[®] (SV) en (V/m)	Error %
4,9	$3,7173 \times 10^6$	$3,7273 \times 10^6$	0,26
7,9	$2,3056 \times 10^6$	$2,2364 \times 10^6$	3

De los resultados mostrados en la tabla 4.2, se puede decir que el máximo error porcentual en el valor del campo eléctrico obtenido en el programa Maxwell[®] (SV) con respecto al valor teórico corresponde a un 3 %, lo cual es un porcentaje relativamente pequeño por lo cual este programa es confiable en sus resultados y se seguirá utilizando para el desarrollo de este trabajo.

- **Simulación cuando existen problemas de pérdida de contacto**

En este caso, cuando hay problemas de pérdida de contacto, es decir, se pierde el contacto entre apantallamiento del aislamiento y los conductores de neutro; se considera una capa adicional a la cual se le denominará, capa de pérdida de contacto. Para el dibujo de la sección transversal de la figura 4.3 se utiliza la geometría del cable XLPE-15 kV de la tabla 4.1 y para la capa de pérdida de contacto se asume igual al del apantallamiento de aislamiento, es decir, de 0,6 mm.

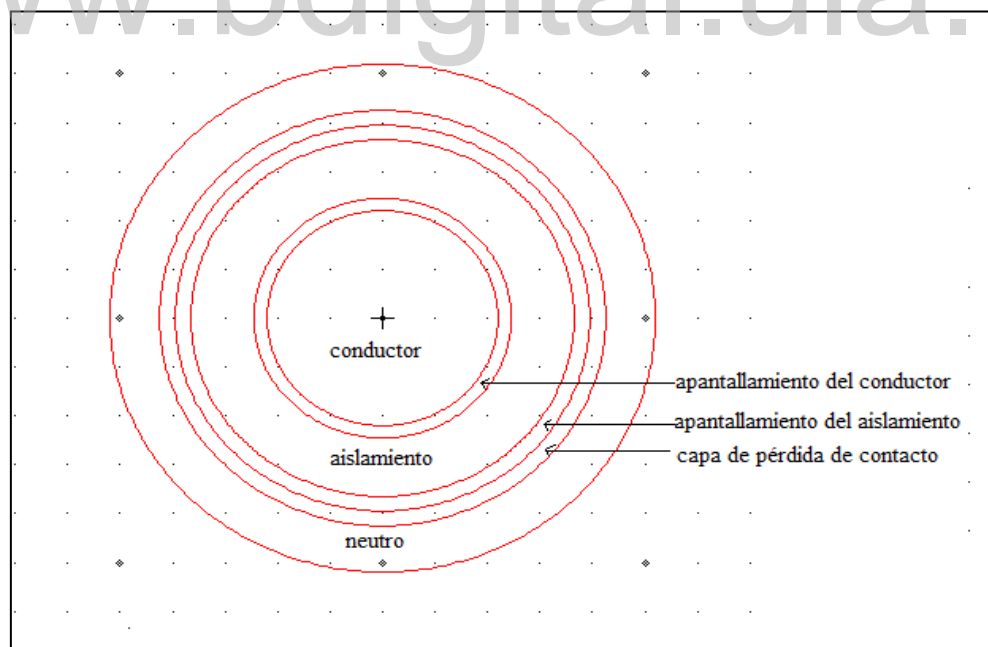


Figura 4.3 Dibujo en Maxwell (SV) de la sección transversal de un cable XLPE-15 KV con problemas de pérdida de contacto

Los materiales utilizados para la simulación son: cobre para el conductor y el neutro, XLPE para el aislamiento, XLPE semiconductor con $\rho = 1000 \Omega\cdot\text{m}$ para el apantallamiento del conductor, XLPE semiconductor con $\rho = 500 \Omega\cdot\text{m}$ para el apantallamiento del aislamiento (Hernandez, 2008) y aire para la capa de pérdida de contacto. En la figura 4.4 se muestra el resultado de la simulación, donde se observa el campo eléctrico en un cable XLPE-15 kV con problemas de pérdida de contacto.

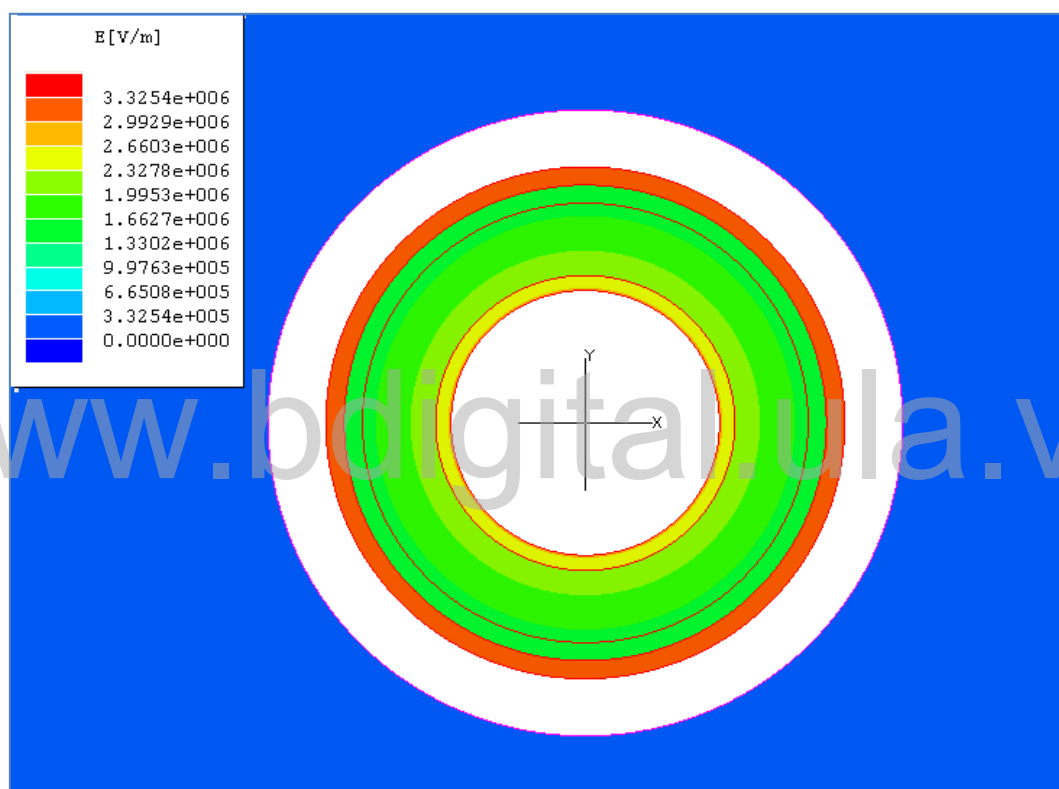


Figura 4.4 Campo eléctrico para en un cable XLPE-15 kV con problemas de pérdida de contacto

De la figura 4.4 se observa que el máximo campo eléctrico se encuentra en la capa de pérdida de contacto con un valor de $3,3254 \times 10^6$ V/m, este valor es suficiente para producir descargas parciales externas al cable provocando la degradación y deterioro del apantallamiento del aislamiento y posteriormente al aislamiento (Hernández, 2008). El mismo comportamiento se observa en la figura 4.5 cuando se tienen neutros concéntricos y problemas

de pérdida de contacto, pero en este caso el máximo campo eléctrico tiene un valor de $4,1813 \times 10^6$ V/m, es decir, una intensidad de campo eléctrico 25,73 % más grande con respecto al valor de $3,3254 \times 10^6$ V/m, obtenido cuando se tiene el neutro sólido en forma cilíndrica.

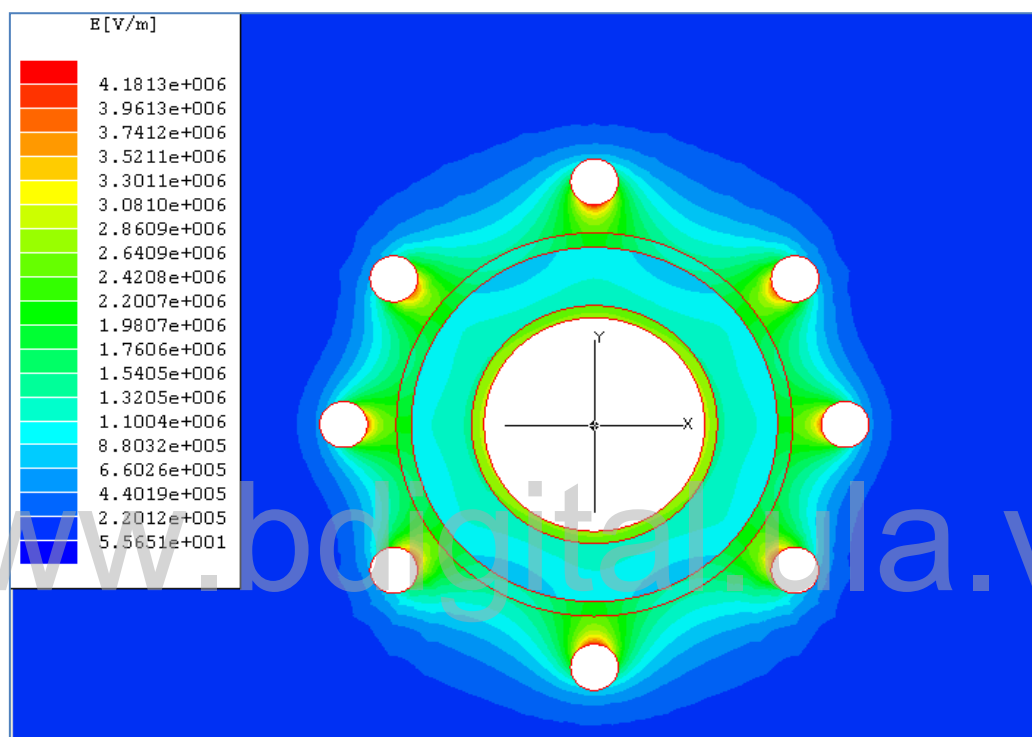


Figura 4.5 Campo eléctrico para un cable XLPE-15 kV con neutro concéntrico y problemas de pérdida de contacto

La capa de pérdida de contacto puede estar constituida de diversos materiales, por ejemplo, si los cables están enterrados esta capa podría ser definida con las características eléctricas del suelo, donde dichas características pueden variar dependiendo del tipo de suelo como se puede observar en la tabla 4.3.

Tabla 4.3 Características eléctricas de suelos (<http://www.smeter.net>)

Tipo de suelo	ρ [Ω .m]	Permitividad relativa ϵ_r
Suelos áridos	> 20000	3
Suelos húmedos (agua dulce)	1000	80
Suelos rocosos	500	10
Suelos pantanosos	130	13

Los resultados de las simulaciones en Maxwell[®] (SV) para los diversos tipos de suelos de la tabla 4.3 se muestran a continuación.

En la figura 4.6 se observa el comportamiento del campo eléctrico, del cable en estudio, cuando la capa de pérdida de contacto tiene las características eléctricas de suelos áridos, en la misma se puede apreciar que la mayor intensidad del campo eléctrico se encuentra en el apantallamiento del conductor con un valor de $4,0724 \times 10^6$ V/m que representa un 2,67 % menor, en comparación con el máximo campo eléctrico de $4,1813 \times 10^6$ V/m, obtenido cuando la capa de pérdida de contacto es de aire.

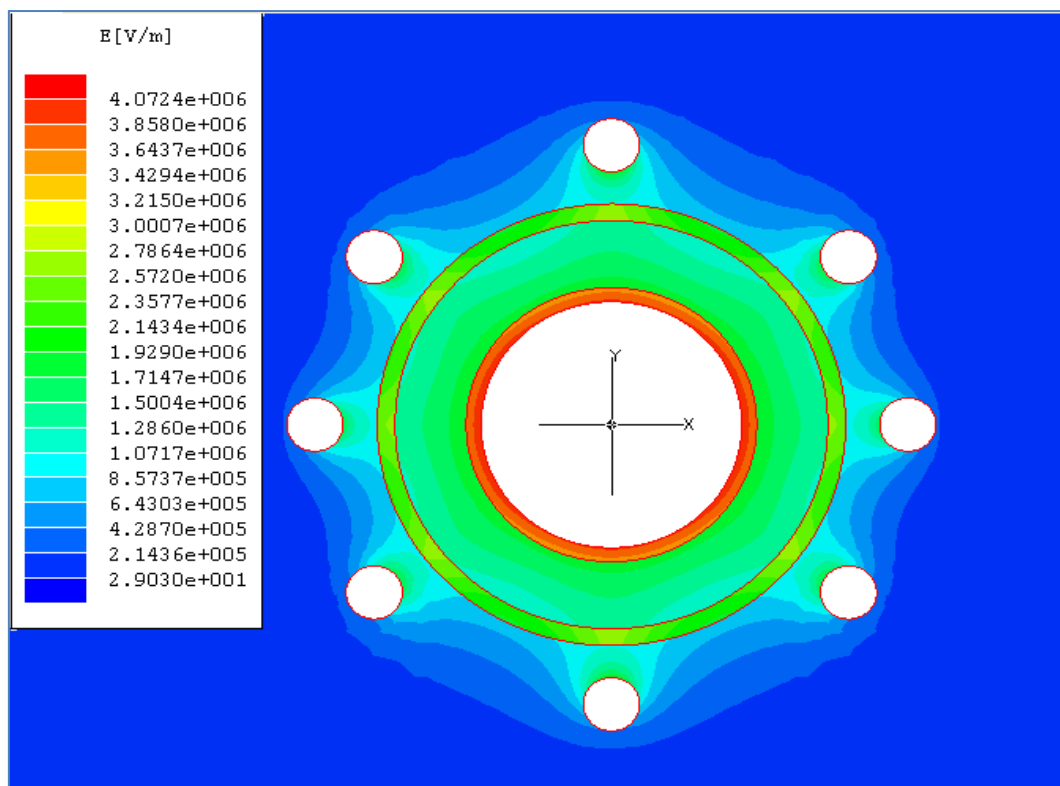


Figura 4.6 Campo eléctrico para un cable XLPE-15 kV con neutro concéntrico y capa de pérdida de contacto con características eléctricas de un suelo árido

La figura 4.7 muestra el comportamiento del campo eléctrico para un cable XLPE-15 kV cuando la capa de pérdida de contacto tiene las características eléctricas de suelos húmedos (agua dulce), donde se observa que al igual que en la figura 4.6 el campo eléctrico de mayor intensidad se encuentra contenido en el apantallamiento del conductor pero con un valor de $4,9607 \times 10^6$ V/m, este valor es casi un 18,64 % mayor al valor de $4,1813 \times 10^6$ V/m, que corresponde al máximo campo eléctrico cuando la capa de pérdida de contacto es de aire; además, el campo eléctrico alrededor de los neutro concéntricos se hace uniforme con un valor $2,6109 \times 10^5$ V/m.

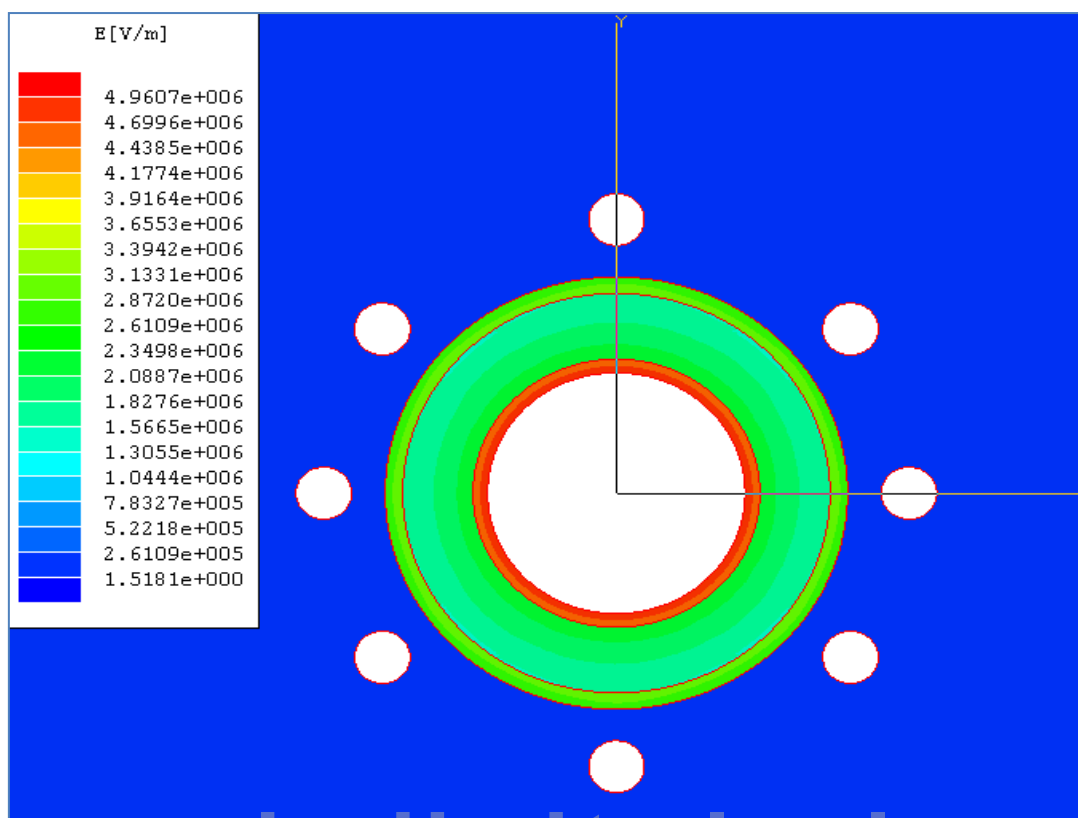


Figura 4.7 Campo eléctrico para un cable XLPE-15 kV con neutro concéntrico y capa de pérdida de contacto con características eléctricas de un suelos húmedos (agua dulce)

La figura 4.8 muestra el comportamiento del campo eléctrico para un cable XLPE-15kV cuando la capa de pérdida de contacto tiene las características eléctricas de suelos rocosos, donde al igual que para suelos áridos y suelos húmedos (agua dulce) el máximo campo eléctrico se encuentra en el apantallamiento del conductor y el mínimo alrededor de los conductores de neutro, el máximo campo tiene un valor de $4,6818 \times 10^6$ V/m y el menor un valor de $2,4642 \times 10^5$ V/m.

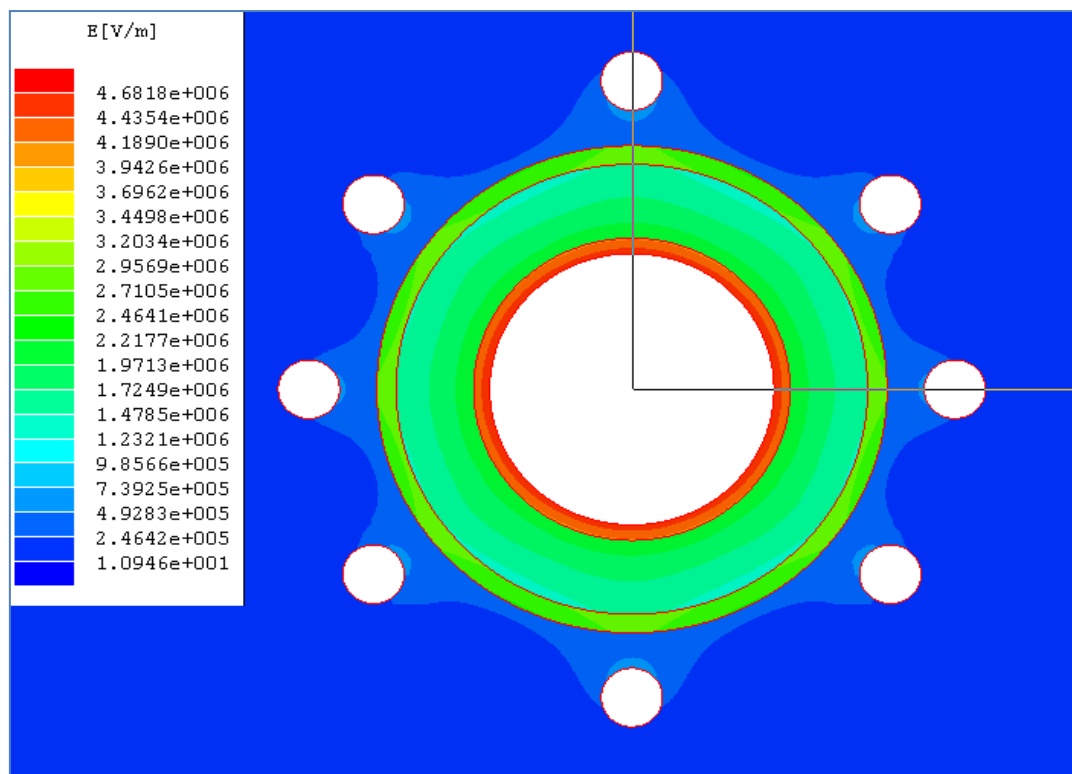


Figura 4.8 Campo eléctrico para un cable XLPE-15 kV con neutro concéntrico y capa de pérdida de contacto con características eléctricas de suelos rocosos

Cuando la capa de pérdida de contacto tiene las características eléctricas de suelos pantanosos, se observa igual que en las últimas tres figuras anteriores que el mayor campo eléctrico se encuentra contenido en el apantallamiento del conductor, esta vez con un valor de $4,7523 \times 10^6$ V/m como se observa en la figura 4.9 mostrada a continuación.

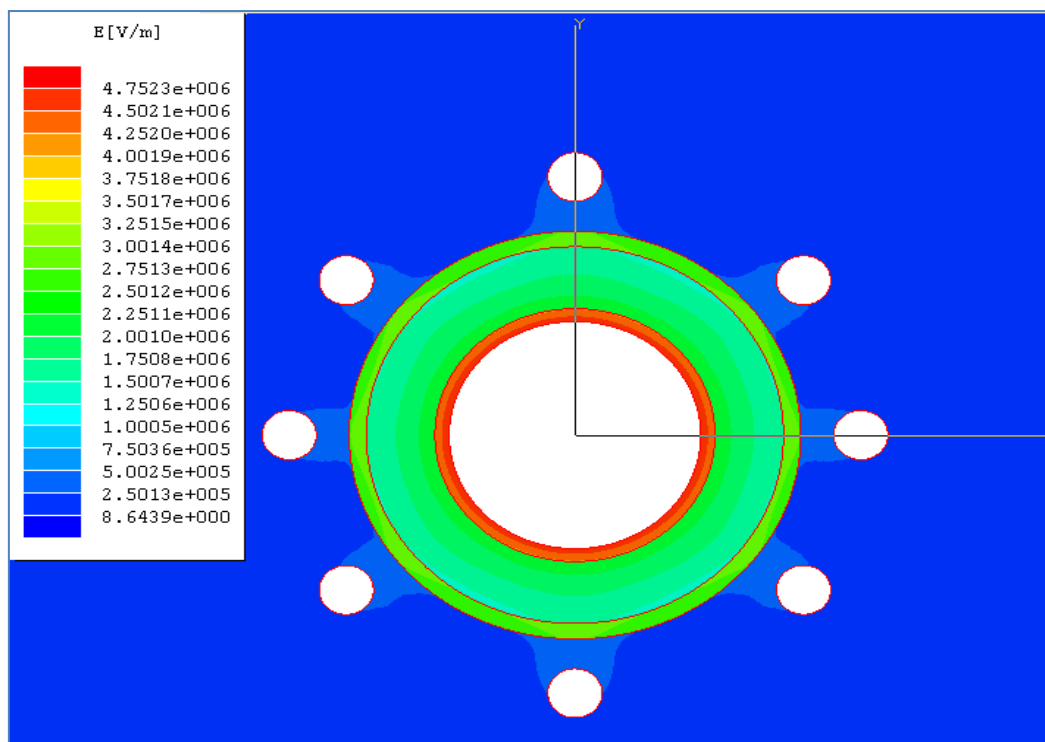


Figura 4.9 Campo eléctrico para un cable XLPE-15 kV con neutro concéntrico y capa de pérdida de contacto con características eléctricas de suelos pantanosos

Se puede decir entonces, que cuando la capa de pérdida de contacto está formada por los suelos mencionados, el campo eléctrico de mayor intensidad se encuentra recogido en el interior del apantallamiento del aislamiento.

4.3 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL AISLAMIENTO Y LA RESISTENCIA DE CONTACTO

Para hallar el $\tan \delta$ es necesario determinar los parámetros del aislamiento (R_i, C_i) en el caso de que no existan problemas de pérdida de contacto, de lo contrario, también se debe determinar la resistencia de contacto (r_x) y la resistencia de los propios conductores de neutro (r_y) es conocida y corresponde a un valor de $2000 \Omega/m$ que representa una muy severa corrosión en los mismos conductores (Hernández, 2008). El programa Maxwell[®] (SV) determina el valor de dichos parámetros realizando un análisis de conducción AC, generando

una matriz de admitancia (Y), por ejemplo la matriz de admitancia para el dibujo de la figura 4.1 se muestra en la figura 4.10

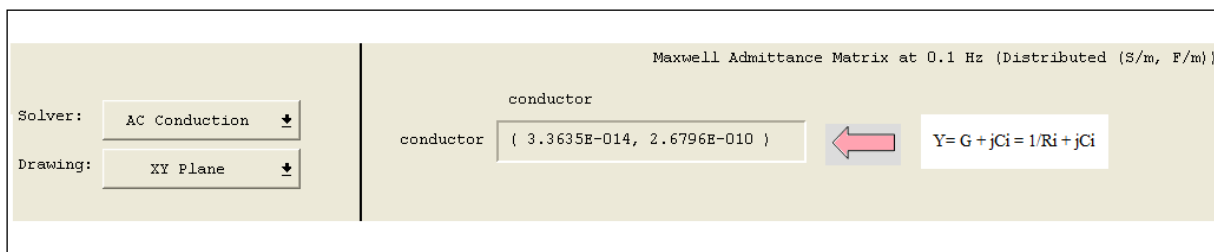


Figura 4.10 Matriz de admitancia obtenida del programa Maxwell® (SV)

En la figura 4.10 se muestra la matriz de admitancia y su relación con los parámetros del aislamiento. El parámetro r_x se halla de manera similar considerando en el dibujo la capa de pérdida de contacto.

4.4 COMPROBACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN MAXWELL (SV) PARA LOS PARÁMETROS DEL AISLAMIENTO

Los resultados obtenidos en Maxwell® (SV) se comprueban con las ecuaciones (3.16) y (3.17) del Capítulo III, y con la ecuación (3.15) se comprueba el valor del $\tan \delta$ que debe ser 0,0002 ($\tan \delta$ típico del aislamiento de XLPE) porque se está considerando que no se tienen problemas de pérdida de contacto.

La tabla 4.4 muestra los resultados teóricos y los obtenidos en Maxwell® (SV).

Tabla 4.4 Resultados teóricos y del programa Maxwell[®] (SV)

R _i (Teórico) en Ω	$2,970 \times 10^{13}$
R _i (Maxwell) en Ω	$2,973 \times 10^{13}$
C _i (Teórico) en F	$2,679 \times 10^{-10}$
C _i (Maxwell) en F	$2,679 \times 10^{-10}$
Tan δ (Teórico)	$2,000 \times 10^{-4}$
Tan δ (Maxwell)	$1,998 \times 10^{-4}$
Error % del Tan δ	0,1 %

De la tabla 4.4 se observa que los valores teóricos y los arrojados por el programa, en el caso de R_i son virtualmente idénticos y para el caso de C_i son iguales, por lo tanto el valor del Tan δ se ve afectado con un error porcentual de sólo un 0,1 % con respecto a su valor teórico, de esta forma nuevamente se comprueba la confiabilidad del programa y por lo tanto, se seguirá usando para el cálculo de estos parámetros.

4.5 RESUMEN

En este Capítulo se realizó una breve descripción del programa Maxwell[®] (SV), éste se utiliza en el trabajo, para ilustrar el comportamiento del campo eléctrico en un cable de 15 kV con aislamiento de XLPE, cuando existen problemas de pérdida de contacto; además para determinar los parámetros del aislamiento y la resistencia de contacto entre el apantallamiento del aislamiento y los conductores de neutro, utilizados en el siguiente Capítulo para hallar el valor del Tan δ usando el modelo de quadripolo por unidad de longitud mediante un programa desarrollado en MatLab[®].

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DEL EFECTO EN EL FACTOR DE DISIPACIÓN CUANDO EXISTEN PROBLEMAS DE PÉRDIDA DE CONTACTO

En este Capítulo se analiza el efecto en el factor de disipación a VLF cuando existen los problemas de pérdida de contacto, para lo cual se utiliza el MatLab[®] y las ecuaciones desarrolladas en el Capítulo III para el modelo de quadripolo por unidad de longitud.

5.1 SIMULACIONES EN MATLAB[®] PARA EL ANÁLISIS DEL TAN δ CUANDO EXISTEN PROBLEMAS DE PÉRDIDA DE CONTACTO

Para realizar las simulaciones en MatLab[®], se desarrolló un programa con el uso de las ecuaciones para el modelo de quadripolo por unidad de longitud cuando se tienen problemas de pérdida de contacto. En el programa, se definen las variables necesarias para hallar la matriz M y siguiendo el procedimiento desarrollado en el Capítulo III se obtiene el Tan δ , luego se representa en una grafica en función de la longitud del cable o cualquier otra variable de interés.

Naturalmente, la geometría del cable utilizada para las simulaciones en MatLab es la misma utilizada en las simulaciones en Maxwell[®] (SV) para un cable típico XLPE-15 kV.

5.1.1 Simulación en MatLab[®] cuando la resistencia de contacto (r_x) y la resistencia de los propios conductores de neutro (r_y) son iguales a cero

Considerando r_x y r_y igual a cero y los parámetros R_i y C_i calculados en el Capítulo IV y tabulados en la tabla 4.4, La grafica del $\text{Tan } \delta$ en función de la longitud en m se muestra a continuación en la figura 5.1.

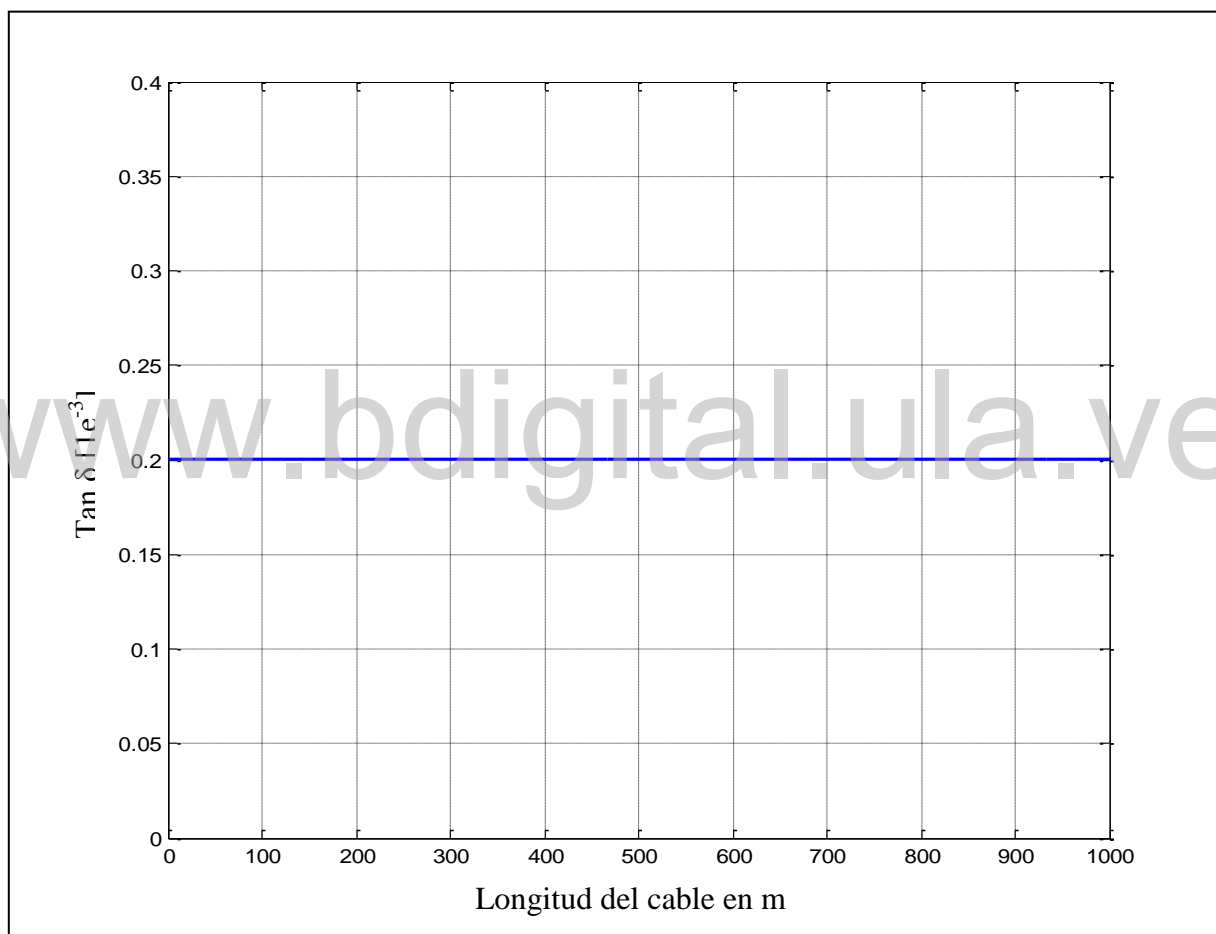


Figura 5.1 Tan δ en función de la longitud considerando r_x y r_y igual a cero

En la figura 5.1 se observa que cuando r_x y r_y se consideran cero y por lo tanto no existen problemas de pérdida de contacto, el $\text{Tan } \delta$ se mantiene en un valor de $0,2 \times 10^{-3}$ constante y es independiente de la longitud del cable; es decir, sin problemas de pérdida de contacto con el

neutro, un cable corto (200 m) tiene el mismo valor que un cable largo (1000 m), lo cual está de acuerdo con lo presentado en la sección 3.2 del Capítulo III donde se presenta que el $\tan \delta$ es independiente de la longitud bajo esta condición de operación considerada como normal. De esta forma se comprueba que el programa desarrollado en MatLab[®] para construir las graficas es correcto ya que el valor del $\tan \delta$ coincide con el calculado teóricamente en el Capítulo IV que corresponde al $\tan \delta$ del aislamiento.

5.1.2 Simulación en MatLab[®] cuando se tienen problemas de pérdida de contacto

Cuando se tienen problemas de pérdida de contacto, se usan para la simulación de este caso los parámetros del aislamiento ya calculados y mostrados en la tabla 4.4 del capítulo IV, el valor de r_y corresponde a $2000 \Omega/m$ que como ya se mencionó, en la sección 4.3 del Capítulo IV, representa una corrosión muy severa en los conductores de neutro. Para r_x se consideran, primeramente, cinco casos; concretamente, 0.1, 0.5, 1, 1.5 y 2 partes por millón (ppm) de la resistencia de aislamiento. Estos casos en ppm se consideran debido a que no existe evidencia en la literatura acerca del valor típico del parámetro r_x y los autores consideran que un buen rango de casos prácticos pueden ser cubiertos por los extremos inferior y superior de 0.1 y 0.2 ppm respectivamente. La figura 5.2 muestra la simulación cuando se tienen problemas distribuidos de pérdida de contacto y considerando los casos mencionados.

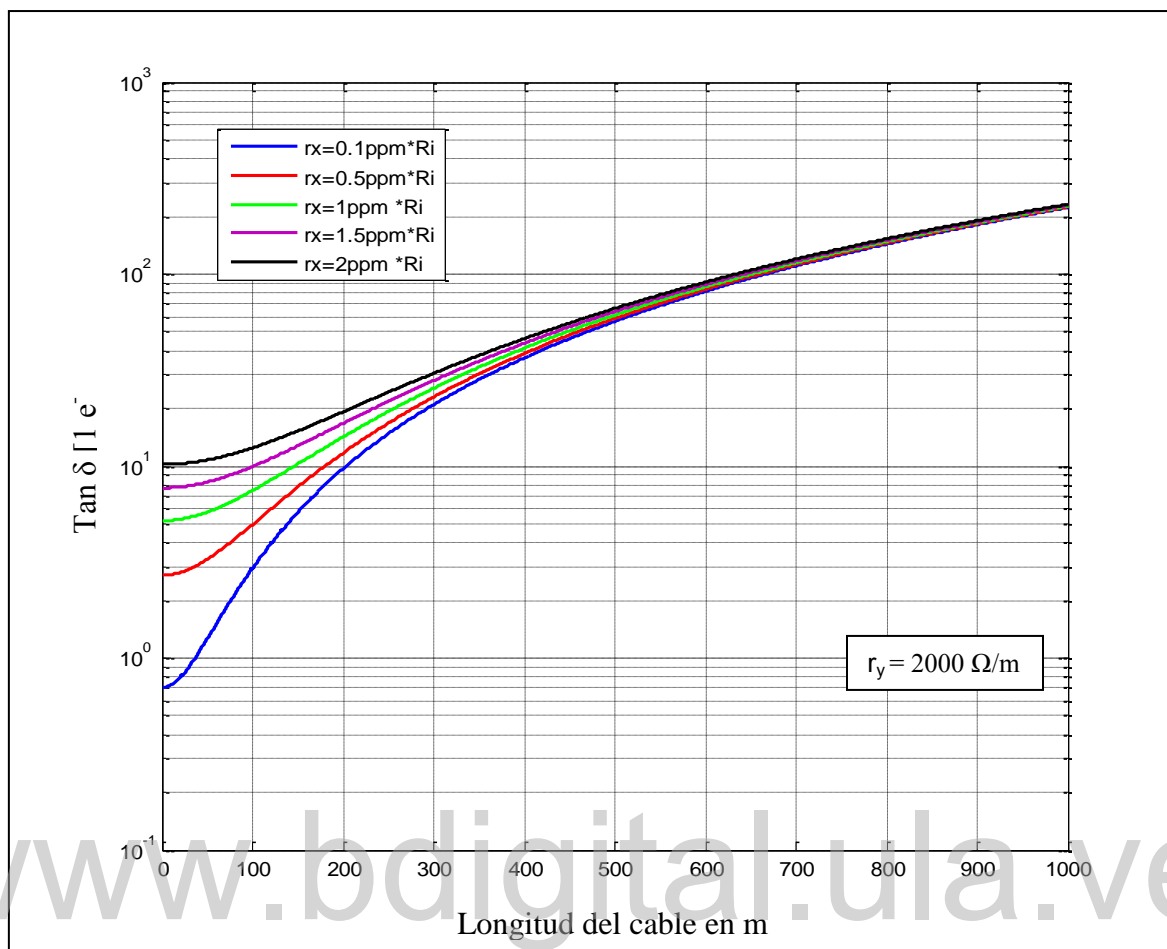


Figura 5.2 Tan δ en función de la longitud cuando se tienen problemas distribuidos en el neutro

En la figura 5.2 se observa que a medida que aumenta la resistencia de contacto en ppm, también aumenta el valor del Tan δ y éste a su vez se va incrementando con la longitud del cable, en la figura 5.2 también se observa que a partir de los 700 m aproximadamente, independientemente de la resistencia de contacto todas las curvas representadas tienden a un mismo valor y para los 1000 m el Tan δ para todas es de 0.231, lo cual significa un incremento en magnitud de 0.2308 con respecto al Tan δ del aislamiento, cuando no se tienen problemas de contacto; recordando que para éste último el valor es de 0.2×10^{-3} , por lo tanto el incremento porcentual es de 115400 % en 1000 m. Estos resultados son de gran importancia ya que indican que efectivamente los problemas de pérdida de contacto se ven reflejados en un aumento de la magnitud del Tan δ , recordando que el circuito eléctrico equivalente usado para

estimarlos es el del aislamiento y no considera dichos problemas, por lo tanto en la práctica las mediciones son a menudo interpretadas erróneamente, ya que como se observó en la figura 5.1 cuando los parámetros r_x y r_y se consideran cero el $\text{Tan } \delta$ corresponde al $\text{Tan } \delta$ del aislamiento.

En la tabla 5.1 muestran los resultados de la figura 5.2 y su incremento en magnitud del $\text{Tan } \delta$, para una longitud de 1m; donde se observa que para un incremento de 0.5 ppm en la resistencia de contacto, el valor del $\text{Tan } \delta$ se incrementa en magnitud $2,5 \times 10^{-3}$ veces.

Tabla 5.1 Incremento en magnitud del $\text{Tan } \delta$

R_x / R_i [ppm]	$\text{Tan } \delta \times 10^{-3}$	Incremento en magnitud del $\text{Tan } \delta$
0,1	0,7	-
0,5	2,7	2×10^{-3}
1	5,2	$2,5 \times 10^{-3}$
1,5	7,7	$2,5 \times 10^{-3}$
2	10,2	$2,5 \times 10^{-3}$

En la tabla 2.3 del Capítulo II, se puede observar, que para valores de $\text{Tan } \delta$ mayores a 4×10^{-3} el cable debe ser reemplazado; por lo tanto, de la tabla 5.1 se puede decir que para valores de r_x mayores a 1 ppm de la resistencia del aislamiento y con una corrosión severa en los conductores de neutro ($r_y = 2000 \Omega/\text{m}$) el cable debe ser reemplazado, pero esta evaluación es válida para una longitud de un metro; sin embargo en la figura 5.2 se observa que cuando estos problemas de pérdida de contacto están presentes de manera distribuida en todo el cable el $\text{Tan } \delta$ se va incrementando con la longitud; por lo tanto, para el rango de valores r_x de 0.1 a 2 ppm de la resistencia del aislamiento, el cable amerita ser reemplazado (según el estándar de la IEEE

5.1.3 Simulaciones en MatLab[®] cuando se tienen problemas de pérdida de contacto, considerando los valores de resistencia de contacto obtenidos en Maxwell[®] (SV)

Considerando los valores de resistencia de contacto obtenidos en Maxwell[®] (SV) se grafica el valor de $\tan \delta$ en función de la longitud del cable cuando se tienen problemas distribuidos de pérdida de contacto. Los valores de resistencia de contacto obtenidos en el programa Maxwell[®] (SV) se muestran en la tabla 5.2 para los diferentes medios de entorno en los cuales se encuentran expuestos los cables, como lo son el aire y el suelo. El espesor de la capa de pérdida de contacto para obtener los datos de la tabla 5.2, se asume de 0,3 mm considerando este un caso significativo como se puede observar mas adelante en la sección 5.1.4.

Tabla 5.2 Resistencias de contacto para un cable XLPE-15 kV

Medio de entorno	Resistencia de contacto r_x en Ω/m
Aire	$1,9773 \times 10^{11}$
Suelos áridos	118,64
Suelos húmedos (agua dulce)	5,93
Suelos rocosos	2,96
Suelos pantanosos	0,77

Graficando el $\tan \delta$ en función de la longitud y usando los valores de resistencia de contacto obtenidas para los cuatro tipos de suelos (áridos, húmedos de agua dulce, rocosos y pantanosos), se obtiene la figura 5.3, donde se observa que para este caso, las curvas (en azul) no se diferencian, es decir, son todas iguales; por lo tanto, se puede deducir que para valores relativamente pequeños de r_x el $\tan \delta$ no se ve afectado y se concluye que el cambio con la longitud lo impone la resistencia de los propios conductores de neutro como se comprobó teóricamente en el Capítulo III.

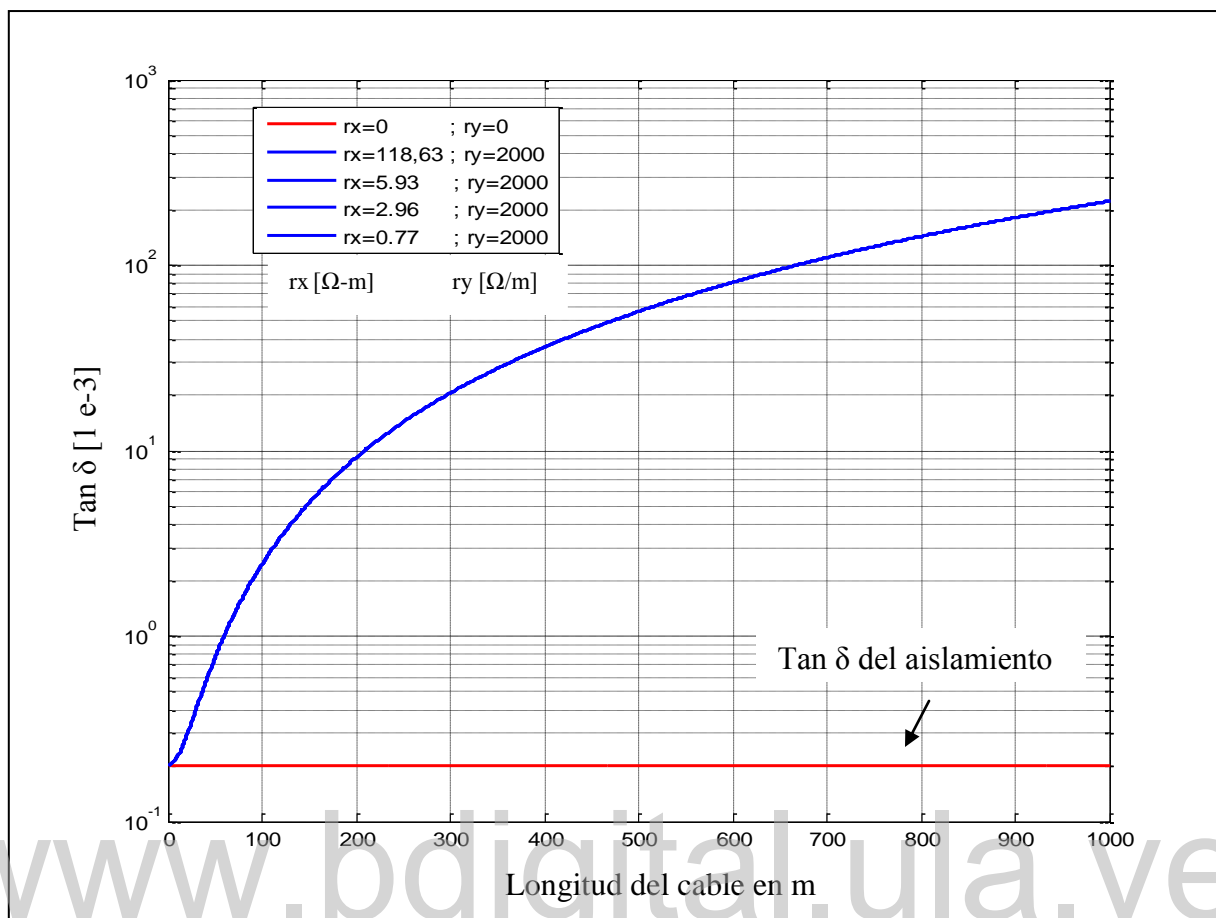


Figura 5.3 Tan δ en función de la longitud cuando se tienen problemas distribuidos en el neutro, usando r_x para los tipos de suelos considerados

Considerando r_y cero y usando los valores de resistencia de contacto obtenidas para los tres tipos de suelos ya mencionados, se grafica el Tan δ en función de la longitud; en la figura 5.4 se muestra ésta situación.

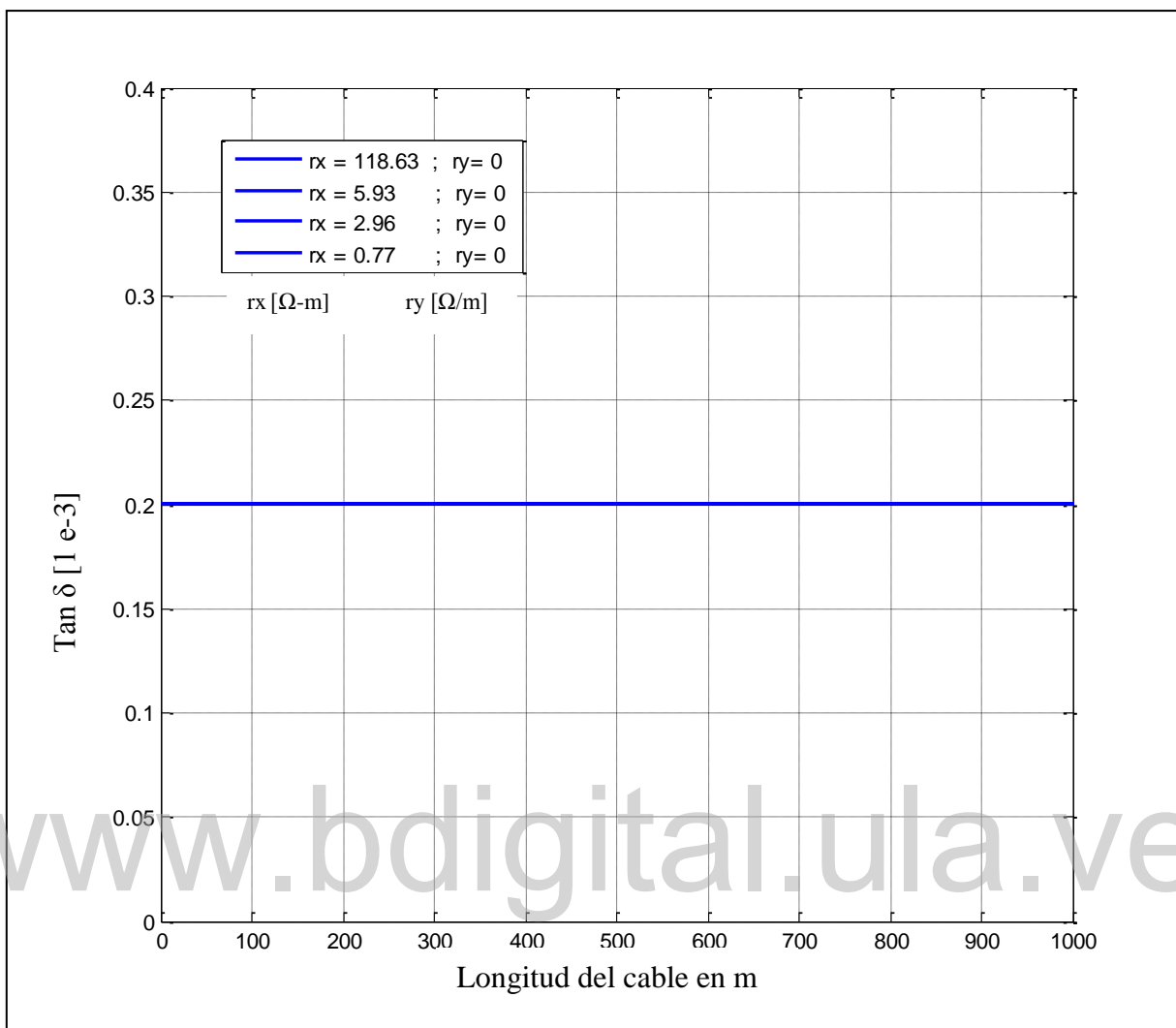


Figura 5.4 Tan δ en función de la longitud cuando se tienen problemas distribuidos en el neutro, usando r_x para los tipos de suelos considerados y r_y cero

La figura 5.4 muestra de manera clara lo mencionado anteriormente, que la magnitud del Tan δ no se ve afectada cuando los valores de r_x son relativamente pequeños y que el cambio con la longitud lo impone la r_y , ya que en la figura 5.4 el Tan δ se mantiene constante en toda la longitud del cable cuando no se considera este último parámetro.

Cuando la capa de pérdida de contacto es aire la situación cambia totalmente, ya que la resistencia de contacto es mucho más grande, como se muestra en la tabla 5.2, con un valor de $1.9773 \cdot 10^{11} \Omega\text{-m}$. La figura 5.5 muestra el Tan δ en función de la longitud cuando r_y es cero y

la resistencia de contacto la ya mencionada, cuando la capa de pérdida de contacto es aire; en la figura se observa que la magnitud del $\text{Tan } \delta$ es de 33.283, es decir, 166414 veces más grande que el valor típico del $\text{Tan } \delta$ del aislamiento (0.0002) para un cable en buen estado con aislamiento de XLPE; además se mantiene constante con la longitud porque r_y se consideró cero para esta simulación. Por lo tanto, como ya se demostró teóricamente en el Capítulo III, cuando r_y es cero, el $\text{Tan } \delta$ se mantiene constante independientemente de la longitud del cable en cuestión.

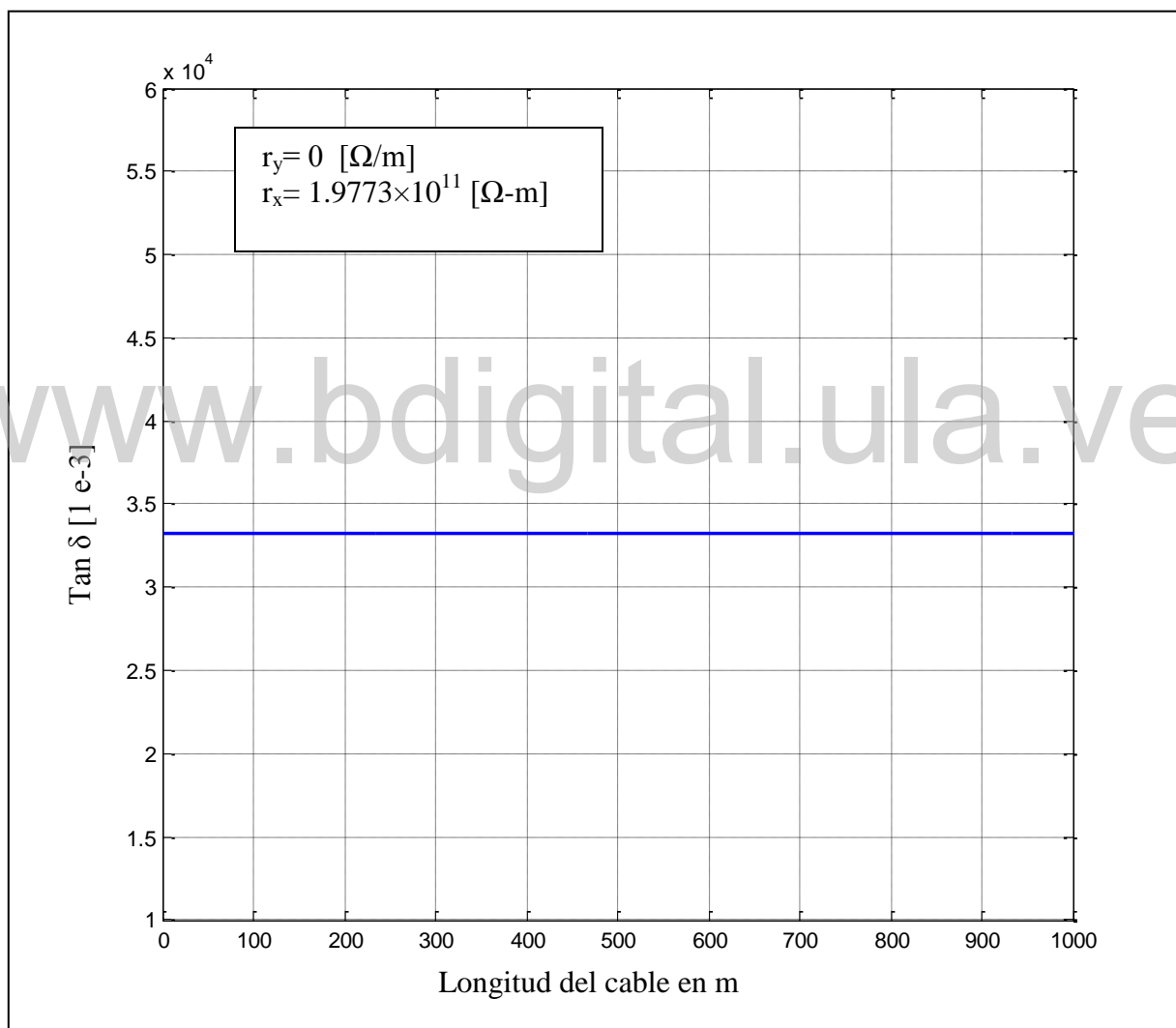


Figura 5.5 $\text{Tan } \delta$ en función de la longitud cuando se tienen problemas distribuidos en el neutro, usando r_x cuando la capa de pérdida de contacto es aire y r_y cero

Tomando en cuenta la $r_y = 2000 \text{ } \Omega/\text{m}$ y la $r_x = 1.9773 \cdot 10^{11} \text{ } \Omega\text{-m}$ cuando la capa de pérdida de contacto es aire, se graficó nuevamente el $\text{Tan } \delta$ en función de la longitud, como se muestra en la figura 5.6. En la figura 5.6 se observar que el $\text{Tan } \delta$ se mantiene constante en la longitud de los 1000 m, con un valor de 33.283 y comparando este valor con el obtenido cuando $r_y = 0 \text{ } \Omega/\text{m}$ y la $r_x = 1.9773 \cdot 10^{11} \text{ } \Omega\text{-m}$ en la figura 5.5 se puede observar que el $\text{Tan } \delta$ es igual para ambos casos; por lo tanto, para este caso el valor del $\text{Tan } \delta$ no depende de r_y sino que lo impone la r_x .

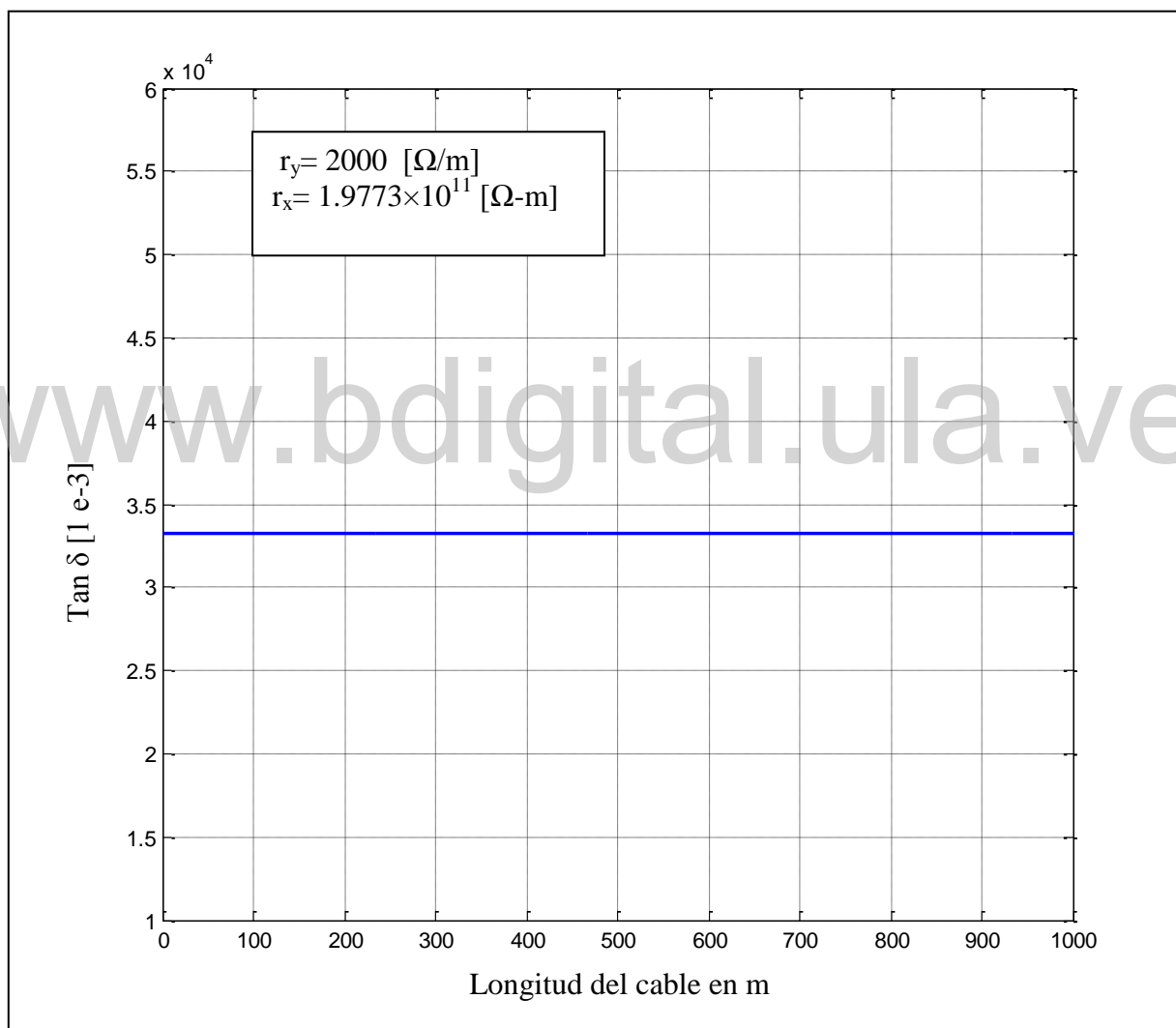


Figura 5.6 $\text{Tan } \delta$ en función de la longitud cuando se tienen problemas distribuidos en el neutro, usando r_x cuando la capa de pérdida de contacto es aire y r_y 2000 Ω/m

5.1.4 Simulaciones en MatLab[®] para diferentes espesores de la capa de pérdida de contacto

En Maxwell[®] (SV) se simuló el cable de potencia en estudio, cuando se tienen problemas de pérdida de contacto y considerando los valores de resistencia obtenidos en Maxwell[®] (SV), para diferentes espesores en la capa de pérdida de contacto; concretamente 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 y 1 mm; La capa de pérdida de contacto se consideró de aire, ya que es el caso mas significativo. Los resultados se muestran en la tabla 5.3.

Tabla 5.3 Resistencias de contacto para distintos espesores de la capa de pérdida de contacto

Esesor de la capa de perdida de contacto (mm)	rx (Ω -m)
0,1	$0,6673 \times 10^{11}$
0,2	$1,3264 \times 10^{11}$
0,3	$1,9773 \times 10^{11}$
0,4	$2,6204 \times 10^{11}$
0,5	$3,2558 \times 10^{11}$
0,6	$3,8836 \times 10^{11}$
0,7	$4,5041 \times 10^{11}$
0,8	$5,0302 \times 10^{11}$
0,9	$5,6395 \times 10^{11}$
1	$6,3231 \times 10^{11}$

De los resultados mostrados en la tabla 5.3 se puede decir que a medida que aumenta el espesor de la capa de pérdida de contacto también lo hace la resistencia de contacto, dicho comportamiento se observa de igual manera en la gráfica mostrada en la figura 5.7 donde se

hace evidente que dicho crecimiento es lineal. El crecimiento de la resistencia de contacto es de $0,6 \times 10^{11}$ veces aproximadamente, por cada 0.1 mm de crecimiento en el espesor de la capa de pérdida de contacto.

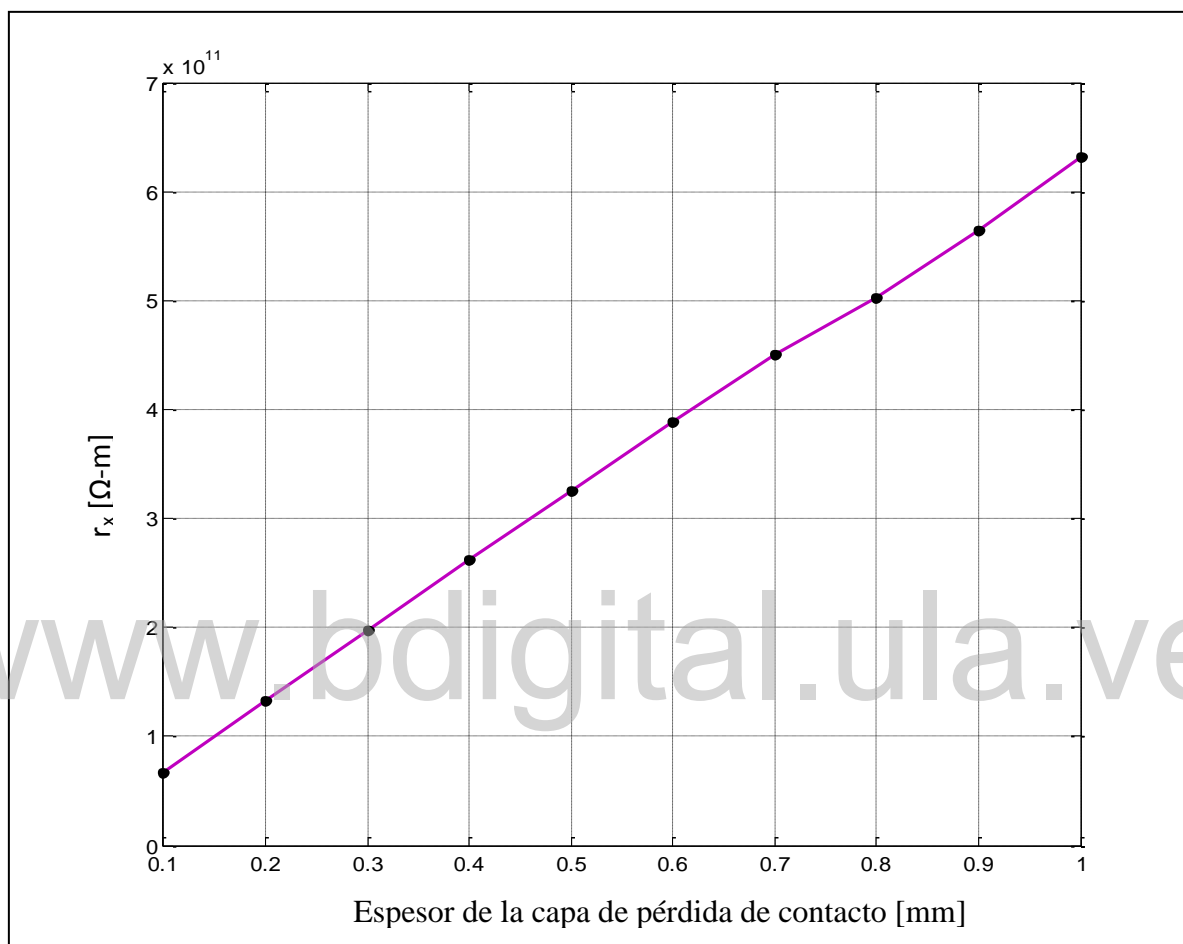


Figura 5.7 r_x en función del espesor de la capa de pérdida de contacto

En la figura 5.8 se graficó el $\tan \delta$ en función de la longitud tomando en cuenta los valores de resistencia de contacto de la tabla 5.3 para los distintos espesores de la capa de pérdida de contacto. También se observa que para una capa de pérdida de contacto de sólo 0.1 mm, para el caso en estudio que la capa mencionada es aire, la magnitud del $\tan \delta$ es de 11.2; este valor nos indica que el cable debe ser remplazado, porque como ya se mencionó para valores de $\tan \delta$ mayores a 4×10^{-3} el cable debe ser remplazado según la IEEE std. 400 (cláusula 9.7). En la figura 5.8 se observa además que el valor del $\tan \delta$ no cambia con la longitud, es decir, que

para los valores de resistencia de contacto mencionados la resistencia de los propios conductores de neutro (r_y) de $2000 \Omega/m$ para una severa corrosión considerada en éste y en los casos anteriores ya no impone un cambio con la longitud, sino que prevalece el valor de r_x .

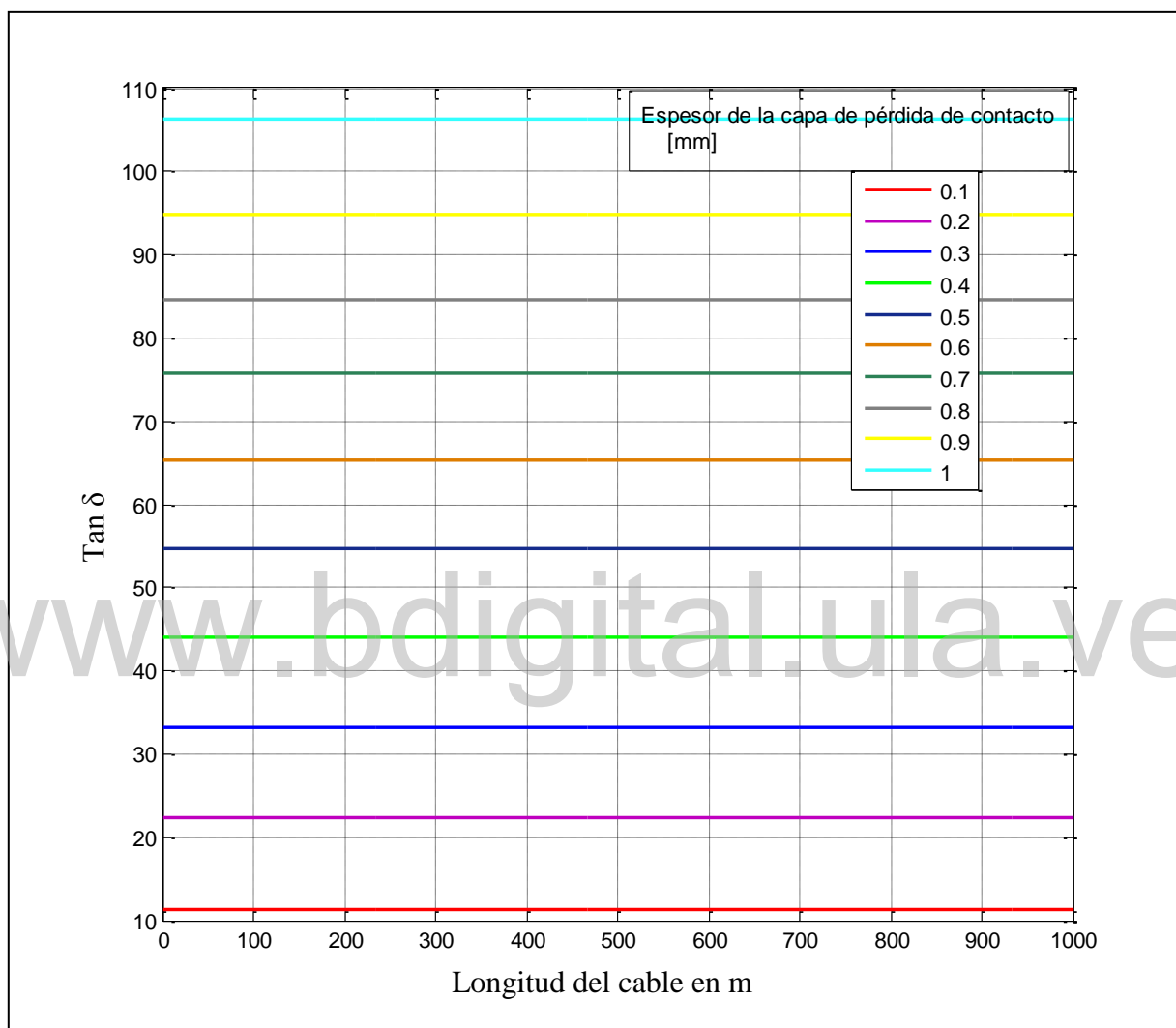


Figura 5.8 Tan δ en función de la longitud cuando se tienen problemas distribuidos en el neutro, considerando los valores de r_x de la tabla 5.3

En la tabla 5.4 se muestran los valores del Tan δ de la figura 5.8, para los diferentes espesores considerados para la capa de pérdida de contacto.

Tabla 5.4 Tan δ para distintos espesores de la capa de pérdida de contacto

Espesor de la capa de pérdida de contacto (mm)	Tan δ
0,1	11.22
0,2	22.316
0,3	33.28
0,4	44.08
0,5	54.77
0,6	65.34
0,7	75.77
0,8	84.63
0,9	94.88
1	106.38

Con los valores de la tabla 5.1 se grafica el Tan δ en función del espesor de la capa de pérdida de contacto como se muestra en la figura 5.9; en la misma se puede observar que siguiendo un comportamiento lineal, a medida que aumenta el espesor de la capa de pérdida de contacto también aumenta el valor del Tan δ .

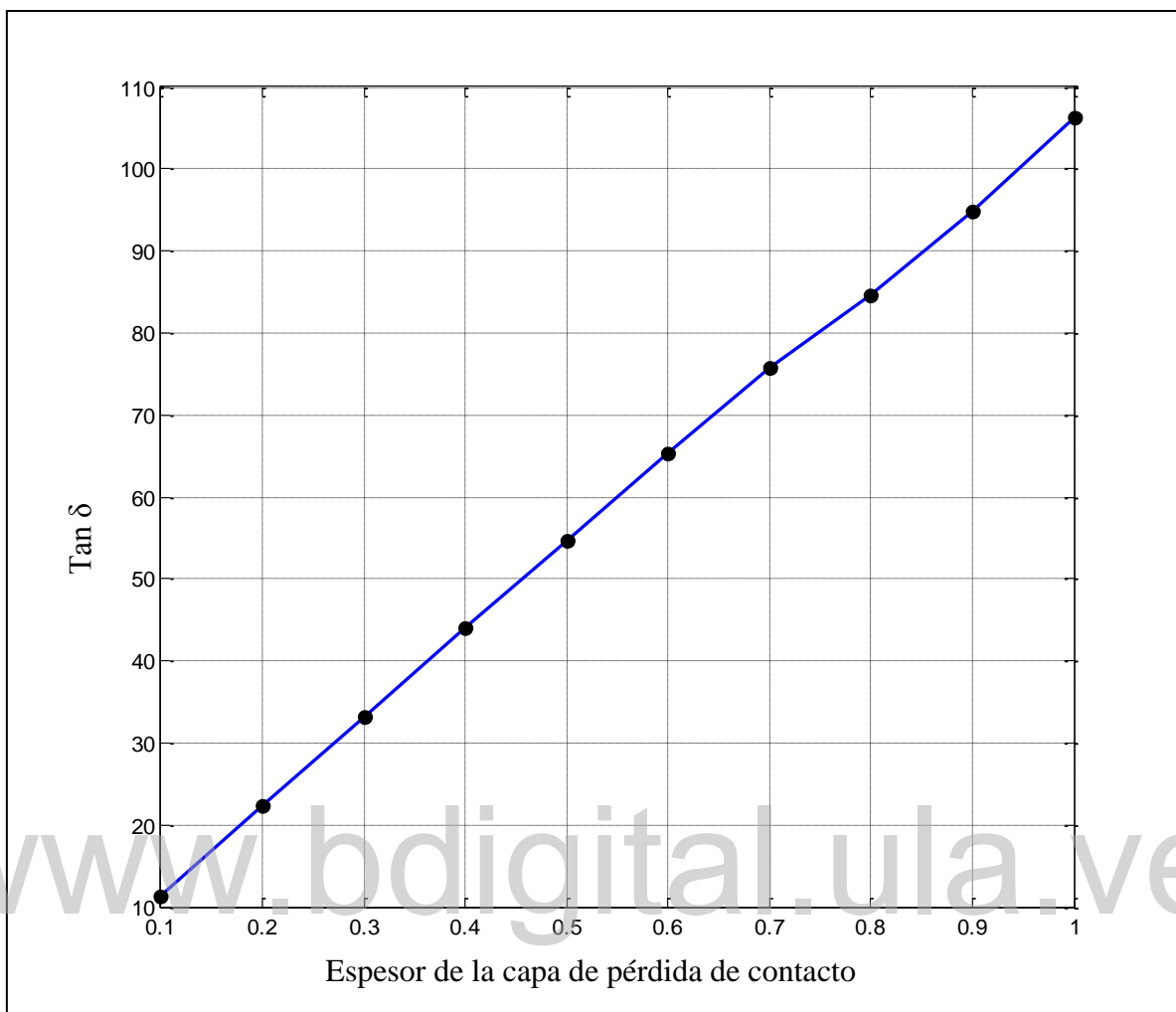


Figura 5.9 Tan δ en función del espesor de la capa de pérdida de contacto

5.2 RESUMEN

En este Capítulo se realizó una serie de simulaciones en MatLab[®] que nos permiten observar el cambio en la magnitud del Tan δ , con respecto al Tan δ del aislamiento, cuando los problemas de pérdida de contacto están presentes en el cable. Donde, para el caso más significativo, cuando la capa de pérdida de contacto es aire, se observa un incremento considerable del Tan δ y a medida que el espesor de la capa de pérdida de contacto es mayor también lo es el Tan δ .

CONCLUSIONES

En este trabajo se utilizó un modelo de quadripolo por unidad de longitud, que considera los problemas de pérdida de contacto entre el apantallamiento del aislamiento y los conductores de neutro del cable de potencia. Con éste modelo se estudió y analizó el cambio en la magnitud del Factor de disipación ($\tan \delta$) a muy baja frecuencia (VLF) de 0.1 Hz, utilizando la geometría y características de un cable de 15 kV con aislamiento de XLPE; Los análisis se llevaron a cabo usando los programas MatLab[®] y Maxwell[®] (SV) y se obtuvieron las conclusiones mostradas a continuación.

Los problemas de pérdida de contacto pueden estar localizados o distribuidos en el cable. En la práctica el circuito equivalente usado para estimar el $\tan \delta$ corresponde al circuito equivalente del aislamiento, el mismo no considera los problemas de pérdida de contacto y además evalúa la condición general sólo del aislamiento del cable, por lo tanto, su utilidad puede verse limitada ante la presencia tanto de problemas del tipo localizados en el aislamiento del cable, como de problemas de pérdida de contacto. Con el modelo de quadripolo por unidad de longitud se puede hallar tanto la condición general del segmento de cable como la localizada; es decir, cuando los problemas de pérdida de contacto están presentes de manera localizada en el cable, con la implementación del modelo de quadripolo por unidad de longitud es posible hallar el $\tan \delta$ equivalente para todo el cable o simplemente, hallar el $\tan \delta$ de manera localizada para el segmento de cable del que se requiera la información.

De las simulaciones realizadas en Maxwell[®] (SV) para observar el comportamiento del campo eléctrico en el cable y mostradas en el Capítulo IV, se puede concluir que la intensidad y distribución del campo eléctrico influyen en el cambio de magnitud del $\tan \delta$; ya que se observó que cuando la capa de pérdida de contacto es aire, recordando que para este caso el $\tan \delta$ se incrementa significativamente con respecto al $\tan \delta$ del aislamiento, el campo eléctrico de mayor intensidad se encuentra recogido en la capa de pérdida de contacto. Para los demás casos, cuando no existen problemas de pérdida de contacto y cuando la capa de pérdida

de contacto esta formada por cualquier tipo de suelo (árido, húmedo, rocoso y pantanoso), el campo eléctrico de mayor intensidad se encuentra recogido en el apantallamiento del aislamiento.

Si la capa de pérdida de contacto esta formada por los tipos de suelos mencionados, el valor de la resistencia de contacto no es lo suficientemente significativo para afectar o cambiar el valor del $\tan \delta$ del aislamiento, aunque, sí para este mismo caso el cable presenta una severa corrosión el valor del $\tan \delta$ del aislamiento se va incrementar progresivamente con el aumento de la longitud del mismo.

Cuando existe pérdida de contacto entre el apantallamiento del aislamiento y los conductores de neutro, siendo la capa de pérdida de contacto aire, el $\tan \delta$ es considerablemente superior al $\tan \delta$ del aislamiento y su valor se mantiene constante, es decir, no cambia con la longitud del cable. Para este mismo caso, se demostró que el valor de la resistencia de contacto (r_x) entre el apantallamiento del aislamiento y los conductores de neutro aumenta linealmente a medida que se incrementa el espesor de la capa de pérdida de contacto y de igual forma, con el incremento del espesor de la capa de pérdida de contacto se va incrementando significativamente el valor del $\tan \delta$, resultando para todos los casos el necesario reemplazo del cable según la IEEE Std-400.

Finalmente en este trabajo se han logrado los objetivos planteados, dando un nuevo enfoque a la medición del $\tan \delta$ y demostrando que la pérdida de contacto entre el apantallamiento del aislamiento y los conductores de neutro afectan dicha medición a muy baja frecuencia.

RECOMENDACIONES

El circuito equivalente del aislamiento, es el usado para estimar el valor del factor de disipación ($\tan \delta$) a muy baja frecuencia, se recomienda que se utilice el modelo de quadripolo por unidad de longitud, estudiado y analizado en este trabajo ya que se demostró que los problemas de pérdida de contacto afectan las mediciones del $\tan \delta$. Por lo tanto, una necesaria reevaluación de los valores estándares de la norma IEEE std. 400.

Se aconseja realizar un estudio más detallado, donde se considere otros materiales que conforme la capa de pérdida de contacto; así como también estudiar el efecto en el factor de disipación $\tan \delta$ cuando existe pérdida de contacto entre el apantallamiento del aislamiento y los conductores de neutro para otros tipos de cable, y también para frecuencias superiores a los 0.1 Hz.

Estudiar el efecto en el $\tan \delta$ cuando el cable presenta además de los problemas de pérdida de contacto defectos en el aislamiento; así como en cables con aislamiento diferente a XLPE.

En este trabajo se estudio un cable de 15 kV se recomienda considerar tipos de cables con diferentes voltajes, por ejemplo; de 25 kV ,35 kV etc.

Considerar en el estudio el caso particular de rompimiento del neutro, ya que en este trabajo sólo se tomo en cuenta el caso del neutro con una severa corrosión.

Se aconseja también comprobar los resultados obtenidos en las simulaciones realizando experimentos de laboratorio con cables reales.

REFERENCIAS

- Cables y Tecnología*. (2008). Colombia: Editorial *Litoservi S.A.* Consultado el día 28 de Abril de 2009 de la página Web de Centelsa: [http:// www.centelsa.com.co](http://www.centelsa.com.co)
- Carl, T. (1981). *Teoría Electromagnética*. México D.F: Editorial Limusa S.A
- Gómez, J. (1991). *Circuitos Eléctricos*. España: Servicio de publicaciones de la Universidad de Oviedo.
- Heinhold, L. (1973). *Cables y Conductores para transporte de energía*. Editorial DOSSAT S.A.
- Hernández, J.C. (2008). *Characterization of Real Power Cable Defects by Diagnostic Measurements*. Tesis de Doctorado, Georgia.
- IEEE Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems* (2002), IEEE Std. 400-2001,
- Martin, B. (2007) ¿ Por qué deberíamos Ensayar los Cables de M .T. a Muy Bajas Frecuencias (VLF)? . España. Consultado el día 3 de Junio de 2009 de la Web: <http://elistas.egrupos.net>
- Maxwell 2D, Version por Getting Started; A 2d Electromagnetic Problem*. (2002). Student Version, Ansoft Corporation.
- Nikolajevic, S.V. (1999). *The Behavior of Water in XLPE and EPR Cable and its Influence on the Electric Characteristics of Insulation*. IEEE Transaction on Power Delivery, Vol 14.
- R.J. Edwards. (1998). *Typical Soil Characteristics of Various*. Consultado el día 3 de Febrero de 2010 de la Web: <http://www.smeter.net>
- Tishikatsu, T. and Greenwood. (1983). “*Advanced power cable technology: present and future*”, Vol II

APÉNDICE

DESARROLLO DE LA MATRIZ DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

La figura A.1 muestra un quadripolo generalizado con sus respectivas variables de entrada (V_e , i_e) y variables de salida (V_s , i_s).

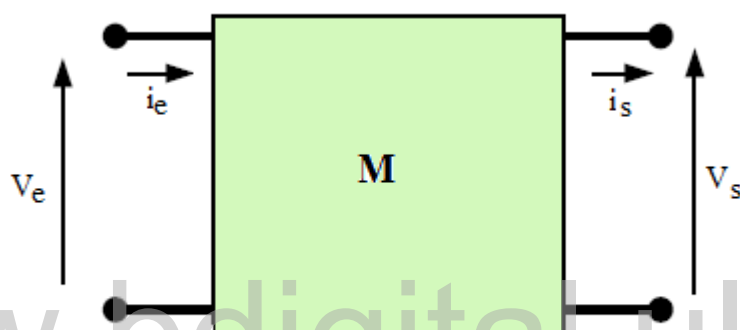


figura A.1 Variables de entrada y salida del quadripolo generalizado

Donde:

V_e = voltaje de entrada del quadripolo.

i_e = corriente de entrada del quadripolo.

V_s = voltaje de salida del quadripolo.

i_s = corriente de salida del quadripolo.

M = Matriz de la función de transferencia.

Por teoría de quadripolos (Gómez, 1991) el voltaje de entrada y de salida son los mostrados en las ecuaciones A.1 y A.2 respectivamente.

$$V_e = Z_{ee} \cdot i_e - Z_{es} \cdot i_s \quad (\text{A.1})$$

$$V_s = Z_{se} \cdot i_e - Z_{ss} \cdot i_s \quad (\text{A.2})$$

Las ecuaciones A.3 y A.4 son las obtenidas de las ecuaciones A.1 y A.2 respectivamente cuando $i_s=0$.

$$Z_{ee} = \frac{V_e}{i_e} \quad (\text{A.3})$$

$$Z_{se} = \frac{V_s}{i_e} \quad (\text{A.4})$$

Análogamente, haciendo $i_e = 0$ se obtienen las ecuaciones A.5 y A.6 mostradas a continuación.

$$Z_{es} = \frac{V_e}{i_s} \quad (\text{A.5})$$

$$Z_{ss} = \frac{V_s}{i_s} \quad (\text{A.6})$$

La matriz de la función de transferencia (M), nos permite obtener una relación entre las variables de entrada y de salida, del modelo de quadripolo por unidad de longitud. Esta relación se puede obtener si se conocen las constantes A, B, C, D conocidas como constantes generalizadas.

Las constantes generalizadas se obtienen despejando i_1 de la ecuación A.1 y sustituyendo en la ecuación A.2, como se muestran en las ecuaciones A.7 y A.8.

$$V_e = \frac{Z_{ee}}{Z_{se}} V_s + \frac{Z_{ee} Z_{ss} - Z_{es} Z_{se}}{Z_{se}} i_s \quad (\text{A.7})$$

$$i_e = \frac{1}{Z_{se}} V_s + \frac{Z_{ss}}{Z_{se}} i_s \quad (\text{A.8})$$

De donde:

$$V_e = A V_s + B i_s \quad (\text{A.9})$$

$$i_e = C V_s + D i_s \quad (\text{A.10})$$

En forma matricial:

$$\begin{bmatrix} V_e \\ i_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_s \\ i_s \end{bmatrix} \quad (\text{A.11})$$

Por teoría de quadripolos (Gómez, 1991), la relación de las variables de entrada y de salida es la mostrada en la ecuación A.12.

$$\begin{bmatrix} V_s \\ i_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D & -B \\ -C & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_e \\ i_e \end{bmatrix} \quad (\text{A.12})$$

Donde: $M = \begin{bmatrix} D & -B \\ -C & A \end{bmatrix}$

Para el modelo de quadripolo por unidad de longitud, mostrado en la figura 3.4 del Capítulo III tenemos que:

Cuando $i_s = 0$

$$Z_{ee} = \frac{V_e}{i_e} = \frac{i_e \left(r_y + \frac{r_x(r_i s C_i + 1) + r_i}{(r_i s C_i + 1)} \right)}{i_e} = \left(r_y + \frac{r_x(r_i s C_i + 1) + r_i}{(r_i s C_i + 1)} \right) \quad (\text{A.13})$$

$$Z_{se} = \frac{V_s}{i_e} = \frac{i_e \left(\frac{r_x(r_i s C_i + 1) + r_i}{(r_i s C_i + 1)} \right)}{i_e} = \frac{r_x(r_i s C_i + 1) + r_i}{(r_i s C_i + 1)} \quad (\text{A.14})$$

Cuando $i_e = 0$

$$Z_{ss} = \frac{V_s}{i_s} = \frac{i_s \left(r_y + \frac{r_x(r_i s C_i + 1) + r_i}{(r_i s C_i + 1)} \right)}{i_s} = \left(r_y + \frac{r_x(r_i s C_i + 1) + r_i}{(r_i s C_i + 1)} \right) \quad (\text{A.15})$$

$$Z_{es} = \frac{V_e}{i_s} = \frac{i_s \left(\frac{r_x(r_i s C_i + 1) + r_i}{(r_i s C_i + 1)} \right)}{i_s} = \frac{r_x(r_i s C_i + 1) + r_i}{(r_i s C_i + 1)} \quad (\text{A.16})$$

De las ecuaciones A.7 y A.9 se obtienen las ecuaciones A.17 y A.18 que corresponden a las constantes generalizadas A y B respectivamente.

$$A = \frac{Z_{ee}}{Z_{se}} = \frac{r_y + \frac{r_x(r_i s C_i + 1) + r_i}{(r_i s C_i + 1)}}{\frac{r_x(r_i s C_i + 1) + r_i}{(r_i s C_i + 1)}} = \frac{(r_y + r_x)(r_i s C_i + 1) + r_i}{r_x r_i s C_i + r_x + r_i} = \frac{r_i + r_x + r_y + (r_y + r_x)r_i s C_i}{r_i + r_x + r_x r_i s C_i} \quad (\text{A.17})$$

$$B = \frac{Z_{ee} Z_{ss} - Z_{es} Z_{se}}{Z_{se}} = \frac{\left(r_y + \frac{r_x(r_i s C_i + 1) + r_i}{(r_i s C_i + 1)} \right)^2 - \left(\frac{r_x(r_i s C_i + 1) + r_i}{(r_i s C_i + 1)} \right)^2}{\frac{r_x(r_i s C_i + 1) + r_i}{(r_i s C_i + 1)}} = \frac{(r_y^2 + 2r_x r_y)r_i s C_i + r_y(r_y + 2r_x + 2r_i)}{r_i + r_x + r_x r_i s C_i} \quad (\text{A.18})$$

Luego, de las ecuaciones A.8 y A.10 se obtienen las ecuaciones A.19 y A.20 que corresponden a las constantes generalizadas C y D respectivamente.

$$C = \frac{1}{Z_{se}} = \frac{1}{\frac{r_x(r_i s C_i + 1) + r_i}{(r_i s C_i + 1)}} = \frac{r_i s C_i + 1}{r_x r_i s C_i + r_x + r_i} \quad (\text{A.19})$$

$$D = \frac{Z_{ss}}{Z_{se}} = \frac{r_y + \frac{r_x(r_i s C_i + 1) + r_i}{(r_i s C_i + 1)}}{\frac{r_x(r_i s C_i + 1) + r_i}{(r_i s C_i + 1)}} = \frac{(r_y + r_x)(r_i s C_i + 1) + r_i}{r_x r_i s C_i + r_x + r_i} = \frac{r_i + r_x + r_y + (r_y + r_x)r_i s C_i}{r_i + r_x + r_x r_i s C_i} \quad (\text{A.20})$$

Por lo tanto, la matriz de la función de transferencia se muestra en la ecuación A.21.

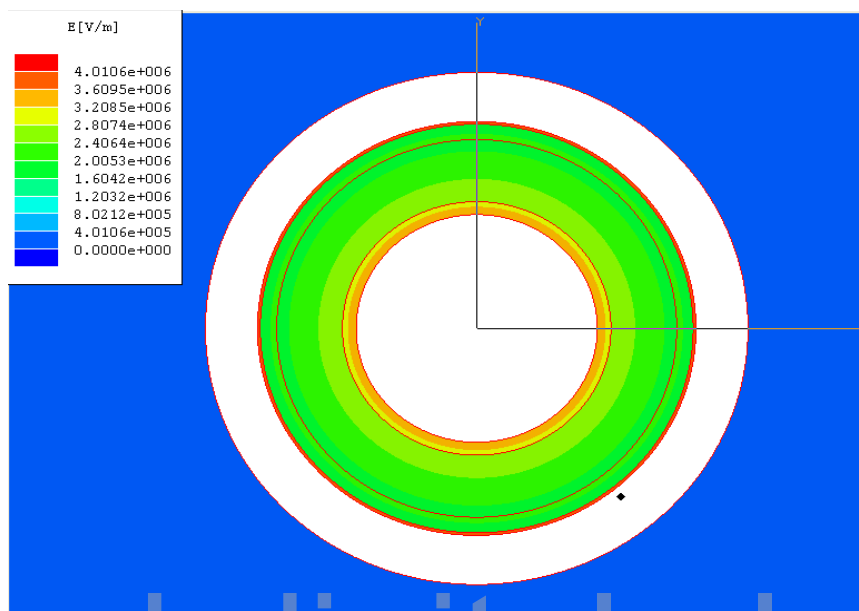
$$M = \frac{1}{r_i + r_x + s C_i r_i r_x} \begin{bmatrix} r_y + r_i + r_x + (r_y + r_x) s C_i r_i & -(2r_i + 2r_x + r_y)r_y - (2r_x r_y + r_y^2) s C_i r_i \\ -1 - s C_i r_i & r_y + r_i + r_x + (r_y + r_x) s C_i r_i \end{bmatrix} \quad (\text{A.21})$$

ANEXOS

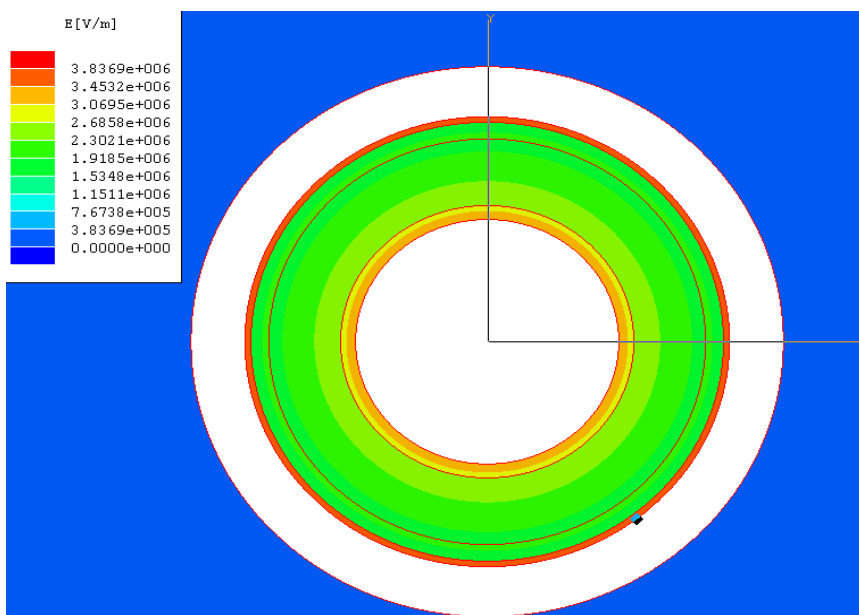
www.bdigital.ula.ve

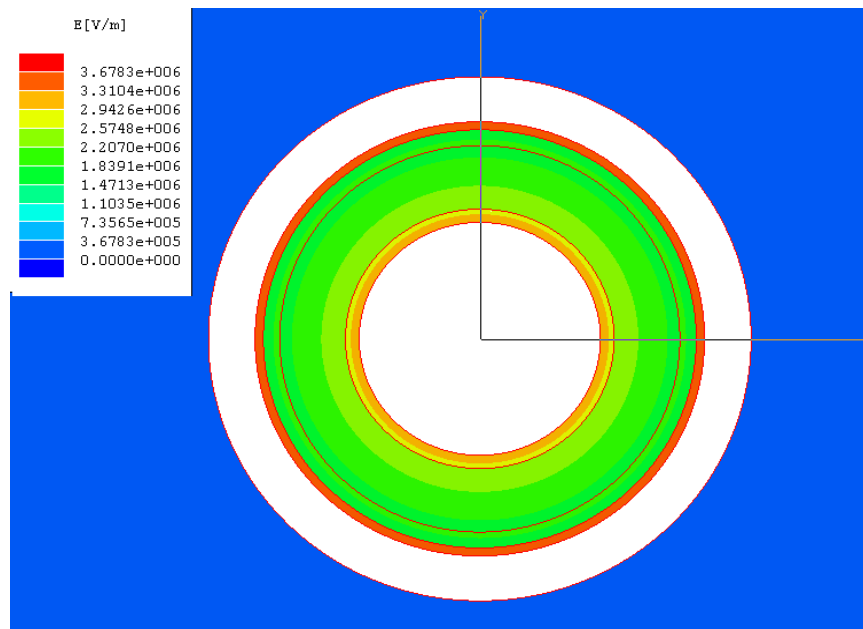
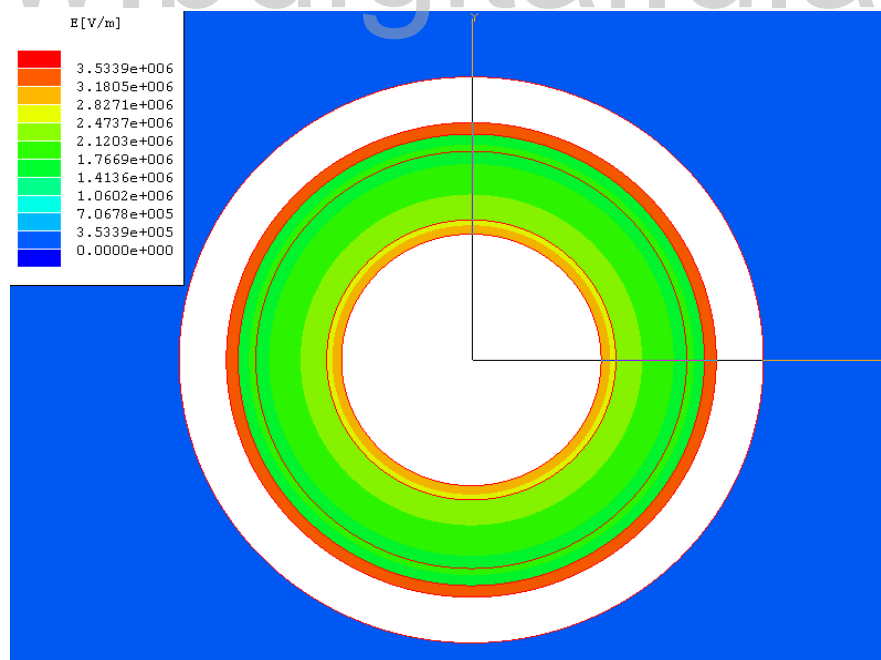
A.1. Campo eléctrico de un cable de 15 kV, con problemas de pérdida de contacto variando el espesor de la capa de pérdida de contacto (aire)

a) Capa de pérdida de contacto con espesor de 0.1 mm

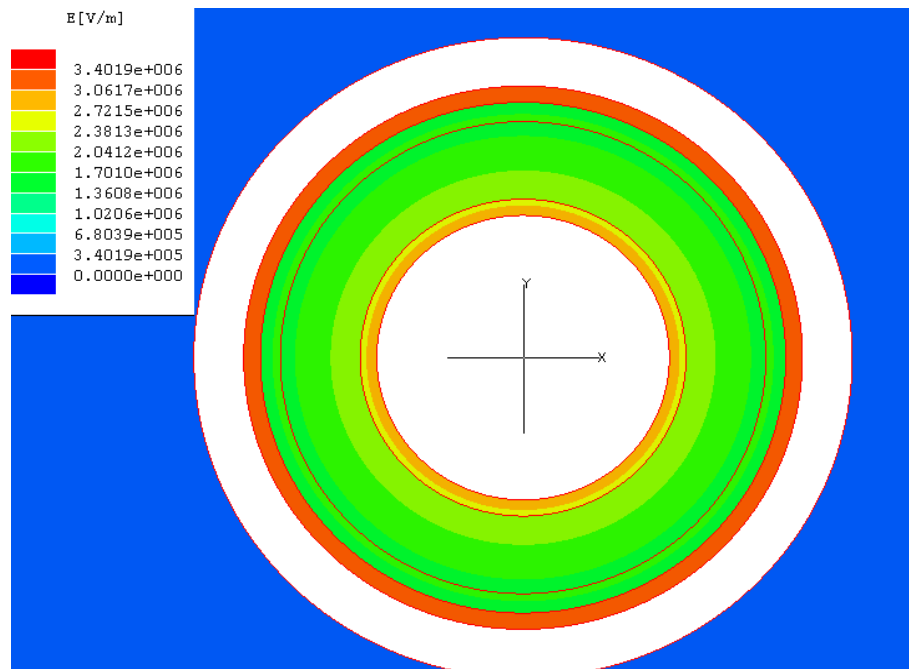


b) Capa de pérdida de contacto con 0.2 mm de espesor

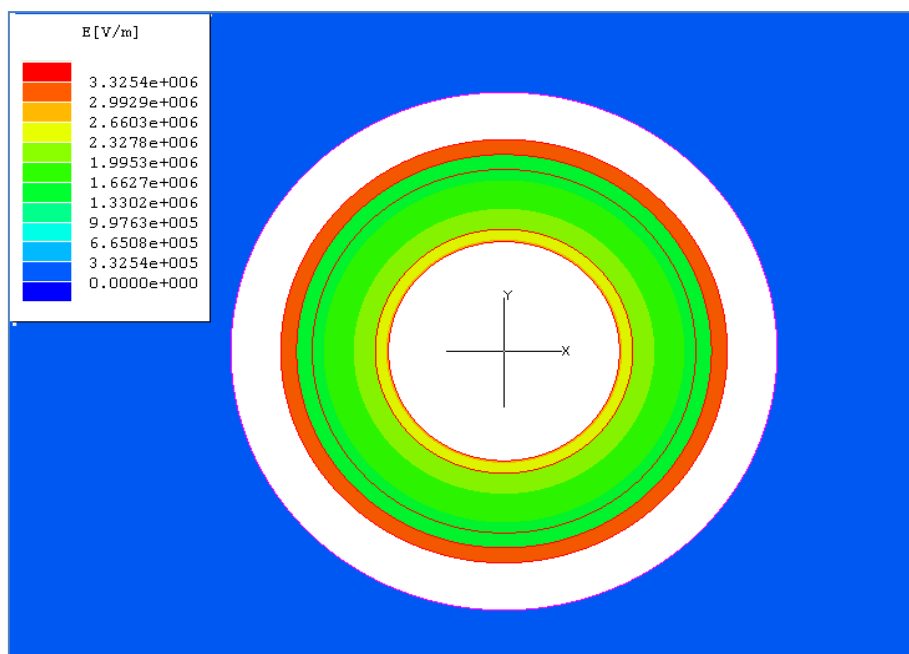


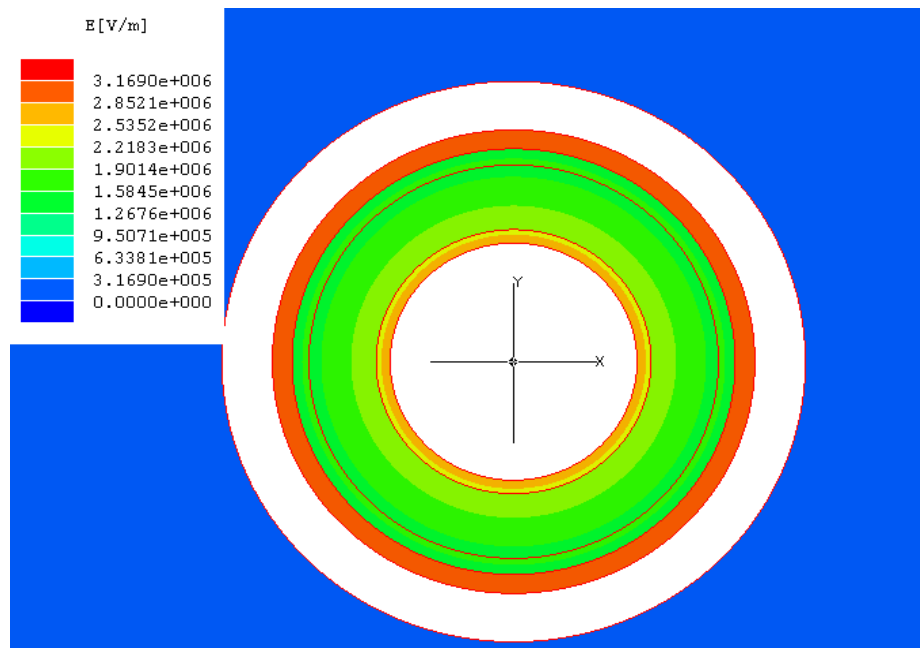
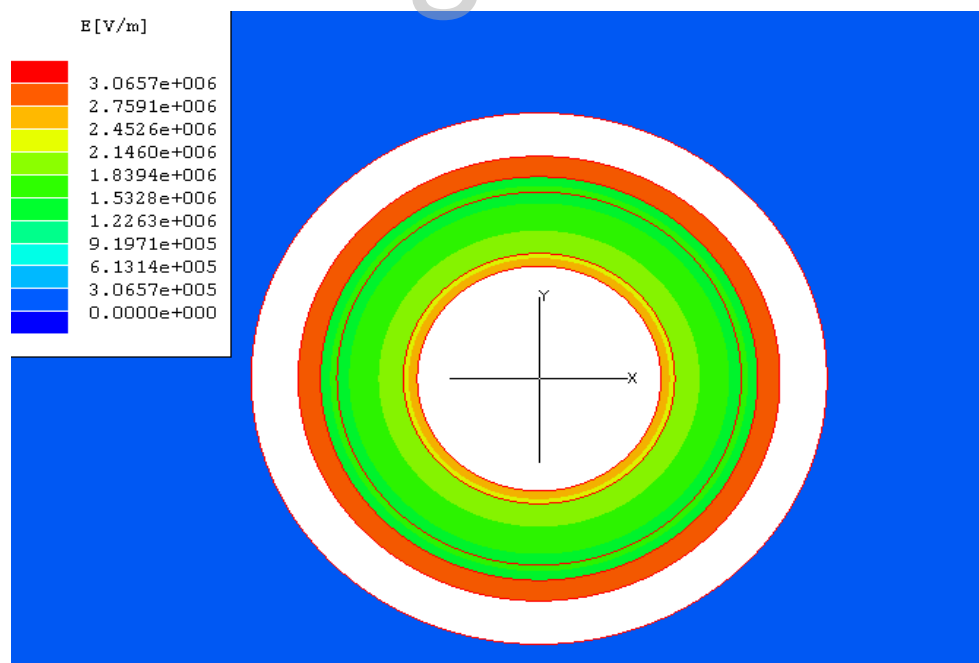
c) Capa de pérdida de contacto con 0.3 mm de espesor**d) Capa de pérdida de contacto con 0.4 mm de espesor**

e) Capa de pérdida de contacto con 0.5 mm de espesor

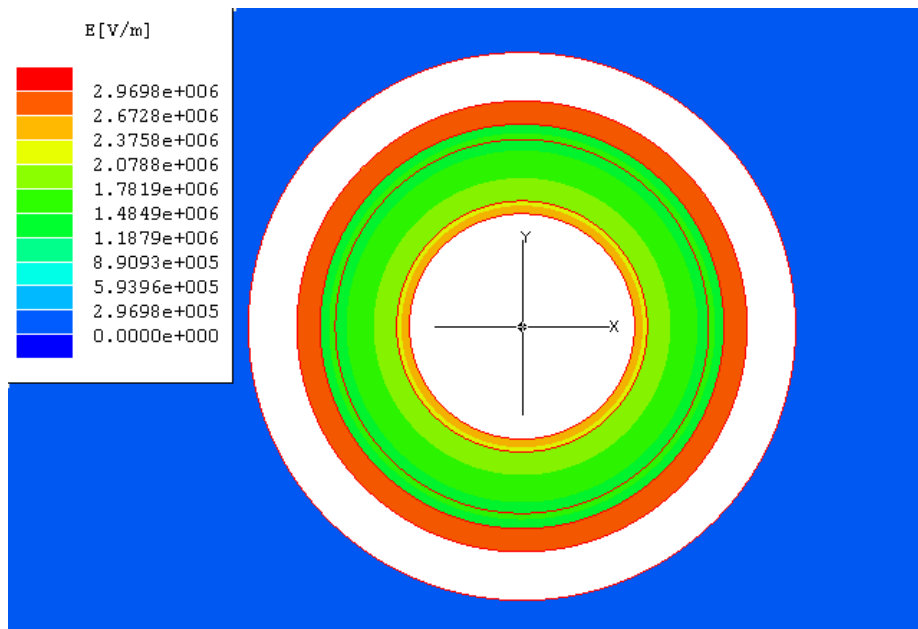


f) Capa de pérdida de contacto con 0.6 mm de espesor

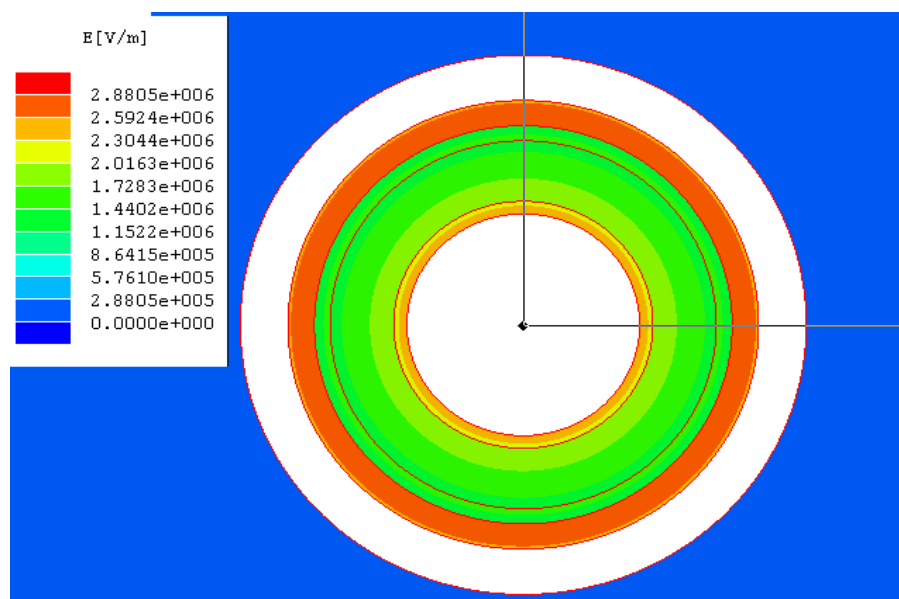


g) Capa de pérdida de contacto con 0.7 mm de espesor**h) Capa de pérdida de contacto con 0.8 mm de espesor**

i) Capa de pérdida de contacto con 0.9 mm de espesor



j) Capa de pérdida de contacto con 1 mm de espesor



A.2. Matriz de admitancia de la capa de pérdida de contacto (aire) para los espesores considerados

a) Para un espesor = 0.1 mm

	aislamiento	apant_aisl	apant_cond
aislamiento	(0.15909, 1.8E-009)	(-0.15909,-1.479E-009)	(-4.0338E-014,-3.2101E-010)
apant_aisl	(-0.15909,-1.479E-009)	(0.15909, 5.9043E-009)	(0, 0)
apant_cond	(-4.0338E-014,-3.2101E-010)	(0, 0)	(0.058376, 1.4064E-009)
cond	(0, 0)	(0, 0)	(-0.058376,-1.0854E-009)
object1	(0, 0)	(-1.4985E-011,-4.4253E-009)	(0, 0)

b) Para un espesor = 0.2 mm

Maxwell Admittance Matrix at 0.1 Hz (Distributed (S/m, F/m))			
	CAPA_PER	aislamiento	apant_aisl
CAPA_PER	(1.816E+009, 2.5037E-009)	(0, 0)	(-7.5393E-012,-2.2265E-009)
aislamiento	(0, 0)	(0.15909, 1.8E-009)	(-0.15909,-1.479E-009)
apant_aisl	(-7.5393E-012,-2.2265E-009)	(-0.15909,-1.479E-009)	(0.15909, 3.7055E-009)
apant_cond	(0, 0)	(-4.0338E-014,-3.2101E-010)	(0, 0)
cond	(0, 0)	(0, 0)	(0, 0)

c) Para un espesor = 0.3 mm

	CAPA_PER	aislamiento	apant_aisl
CAPA_PER	(1.9343E+009, 1.7888E-009)	(0, 0)	(-5.0573E-012,-1.4935E-009)
aislamiento	(0, 0)	(0.15909, 1.8E-009)	(-0.15909,-1.479E-009)
apant_aisl	(-5.0573E-012,-1.4935E-009)	(-0.15909,-1.479E-009)	(0.15909, 2.9725E-009)
apant_cond	(0, 0)	(-4.0338E-014,-3.2101E-010)	(0, 0)
cond	(0, 0)	(0, 0)	(0, 0)

d) Para un espesor = 0.4 mm

	CAP_PER	aislamiento	apant_aisl
CAP_PER	(2.0673E+009, 1.4426E-009)	(0, 0)	(-3.8162E-012,-1.127E-009)
aislamiento	(0, 0)	(0.15909, 1.8E-009)	(-0.15909,-1.479E-009)
apant_aisl	(-3.8162E-012,-1.127E-009)	(-0.15909,-1.479E-009)	(0.15909, 2.606E-009)
apant_cond	(0, 0)	(-4.0338E-014,-3.2101E-010)	(0, 0)
cond	(0, 0)	(0, 0)	(0, 0)

e) Para un espesor = 0.5 mm

Maxwell Admittance Matrix at 0.1 Hz (Distributed (S/m, F/m))

	PER_CON	aislamiento
PER_CON	(2.218E+009, 1.2456E-009)	(0, 0)
aislamiento	(0, 0)	(0.15909, 1.8E-009)
apant_aisl	(-3.0714E-012, -9.0705E-010)	(-0.15909, -1.479E-009)
apant_cond	(0, 0)	(-4.0338E-014, -3.2101E-010)
cond	(0, 0)	(0, 0)

f) Para un espesor = 0.6 mm

Maxwell Admittance Matrix at 0.1 Hz (Distributed (S/m, F/m))

	cond	perd_cont
aislamiento	(0, 0)	(0, 0)
apant_aisl	(0, 0)	(-2.5749E-012, -7.6041E-010)
apant_cond	(-0.058376, -1.0854E-009)	(0, 0)
cond	(0.058376, 1.0854E-009)	(0, 0)
perd_cont	(0, 0)	(2.3901E+009, 1.1253E-009)

g) Para un espesor = 0.7 mm

Maxwell Admittance Matrix at 0.1 Hz (Distributed (S/m, F/m))

	aislamiento	apant_aisl	apant_cond
aislamiento	(0.15909, 1.8E-009)	(-0.15909, -1.479E-009)	(-4.0338E-014, -3.2101E-010)
apant_aisl	(-0.15909, -1.479E-009)	(0.15909, 2.1347E-009)	(0, 0)
apant_cond	(-4.0338E-014, -3.2101E-010)	(0, 0)	(0.058376, 1.4064E-009)
cond	(0, 0)	(0, 0)	(-0.058376, -1.0854E-009)
perd_cont	(0, 0)	(-2.2202E-012, -6.5565E-010)	(0, 0)

h) Para un espesor = 0.8 mm

Maxwell Admittance Matrix at 0.1 Hz (Distributed (S/m, F/m))

	aislamiento	apant_aisl	apant_cond
aislamiento	(0.15909, 1.8E-009)	(-0.15909, -1.479E-009)	(-4.0338E-014, -3.2101E-010)
apant_aisl	(-0.15909, -1.479E-009)	(0.15909, 2.0561E-009)	(0, 0)
apant_cond	(-4.0338E-014, -3.2101E-010)	(0, 0)	(0.058376, 1.4064E-009)
cond	(0, 0)	(0, 0)	(-0.058376, -1.0854E-009)
perd_cont	(0, 0)	(-1.9541E-012, -5.7707E-010)	(0, 0)

i) Para un espesor = 0.9 mm

Maxwell Admittance Matrix at 0.1 Hz (Distributed (S/m, F/m))			
	aislamiento	apant_aisl	apant_cond
aislamiento	{ 0.15909, 1.8E-009 }	{-0.15909,-1.479E-009 }	{-4.0338E-014,-3.2101E-010 }
apant_aisl	{-0.15909,-1.479E-009 }	{ 0.15909, 1.995E-009 }	{ 0, 0 }
apant_cond	{-4.0338E-014,-3.2101E-010 }	{ 0, 0 }	{ 0.058376, 1.4064E-009 }
cond	{ 0, 0 }	{ 0, 0 }	{-0.058376,-1.0854E-009 }
perd_cont	{ 0, 0 }	{-1.7471E-012,-5.1594E-010 }	{ 0, 0 }

j) Para un espesor = 1 mm

Maxwell Admittance Matrix at 0.1 Hz (Distributed (S/m, F/m))			
	aislamiento	apant_aisl	apant_cond
aislamiento	{ 0.15909, 1.8E-009 }	{-0.15909,-1.479E-009 }	{-4.0338E-014,-3.2101E-010 }
apant_aisl	{-0.15909,-1.479E-009 }	{ 0.15909, 1.946E-009 }	{ 0, 0 }
apant_cond	{-4.0338E-014,-3.2101E-010 }	{ 0, 0 }	{ 0.058376, 1.4064E-009 }
cond	{ 0, 0 }	{ 0, 0 }	{-0.058376,-1.0854E-009 }
perd_cont	{ 0, 0 }	{-1.5815E-012,-4.6703E-010 }	{ 0, 0 }

A.3. Código del programa desarrollado para las simulaciones de MatLab®

```
clear all;
```

```
L=1:5000; (Longitud de 1-5000 m)
```

```
for jj=1:length(L)
```

```
    ri=2.97e13;
```

```
    ci=2.679e-10;
```

```
    rx=0.6673e11; ( este valor se cambia, según sea el caso considerado)
```

```
    ry=2000; ( este valor se cambia, según sea el caso considerado)
```

```
    f=0.1; (frecuencia)
```

```
    w=2*pi*f; (frecuencia angular)
```

```
    j=(-1)^(1/2);
```

```

s=j*w;

X=1/(ri+rx+s*ci*ri*rx);

M_11=ry+ri+rx+(ry+rx)*s*ci*ri;

M_21=(-1)-(s*ci*ri);

M_12=-(2*ri+2*rx+ry)*ry-(2*rx*ry+ry*ry)*s*ci*ri;

M_22=ry+ri+rx+(ry+rx)*s*ci*ri;

Y=[M_11 M_12; M_21 M_22];

M=X*Y;(matriz de la función de transferencia)

n=jj;(numero de quadripolos)

N=M^(-jj);(inversa de la matriz de la función de transferencia)

Zin=N(1,1)/N(2,1);

TD(jj)=tan((pi/2)+angle(Zin));

end
plot(L,TD*1000,'LineWidth',2);

xlabel('Longitud del cable en m');

ylabel('Tan ? [1e-3]');

grid on;hold on

```