

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA
BAJO IMPULSOS DE ALTA FRECUENCIA**

**CARDONA DÍAZ YONY ALEJANDRO
DOVAL HIGUITA BRYAN SMITH**

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y A FINES
INGENIERÍA ELÉCTRICA
MEDELLÍN
2018**

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA
BAJO IMPULSOS DE ALTA FRECUENCIA**

**CARDONA DÍAZ YONY ALEJANDRO
DOVAL HIGUITA BRYAN SMITH**

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electricista

Asesor

**Diego Mauricio Tauta
Mag. En Ingeniería Eléctrica**

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y A FINES
INGENIERÍA ELÉCTRICA
MEDELLÍN
2018**

Tabla de contenido

Agradecimientos

Introducción	14
1. Planteamiento del problema	16
1.1. Descripción.....	16
1.2. Formulación	17
2. Justificación	18
3. Objetivos.....	19
3.1. Objetivo general	19
3.2. Objetivos específicos.....	19
4. Marco teórico.....	20
4.1. Ubicación geográfica de Colombia.....	20
4.1.1. Precipitaciones en Colombia.....	20
4.1.2. Nivel cerámico.	20
4.1.3. Descargas eléctricas atmosféricas o rayo.....	21
4.1.4. Tipos de sobretensiones generadas por las descargas atmosféricas.....	25
4.2. Sistemas de puesta a tierra	27
4.2.1. Características del suelo.....	28
4.2.2. Métodos de medición para los parámetros eléctricos del terreno	31
4.3. Tensiones.....	39
4.3.1. Tensión de paso.....	40
4.3.2. Tensión de contacto.	40
4.3.3. Tensiones transferidas.....	40
4.3.4. Consideraciones finales de los sistemas de puestas a tierra.....	41
4.4. Efectos de alta frecuencia en los sistemas de puesta a tierra	42
4.4.1. Impedancia	43
4.4.2. Ionización del suelo	43

4.5.	Flameo inverso	44
4.5.1.	Longitud efectiva	45
4.6.	Análisis del comportamiento de los sistemas de puestas a tierra inmersos en efectos transitorios.....	47
4.7.	Pautas de diseño para sistemas de puestas a tierras considerando impulsos de alta frecuencia	65
4.7.1.	Pasos principales para el diseño, construcción y verificación de un SPT	66
4.7.2.	Tipo de material	72
5.	Metodología.....	75
5.1.	Tipo de estudio	75
5.2.	Método	75
5.3.	Instrumentos de recolección de información	75
5.3.1.	Fuentes primarias.....	75
5.3.2.	Fuentes secundarias.....	76
6.	Conclusiones.....	77
7.	Recomendaciones	79
8.	Referencias bibliográficas	80
9.	Anexos.....	1
Anexo 1.	1
Anexo 2.	4
Anexo 3.	1

Agradecimientos

Agradecimiento Yony Cardona

Doy gracias a Dios por ser mi piedra, mi soporte, por edificarme día a día y ayudarme a no desfallecer en los duros momentos de mi vida.

A mi esposa, por ser el amor de mi vida, mi compañera fiel, por darme el amor incondicional y estar a mi lado en las concurrencias de este caminar.

A mis hijas por ser el motor que me impulsa a seguir adelante, a no desfallecer.

Mis padres, por ser el regalo más bello que la vida me ha dado, por criarme en valores y fe.

Agradecimientos Bryan Doval

Agradezco primeramente a Dios por la bendición de ser formado en ingeniería eléctrica, por bendecirme día a día, mañana a mañana, noche a noche, por nunca dejarme desvanecer ante la crueldad de la vida, por su amor, padre, Amén.

En segundo, a mis padres Orgel y Adelfa, mis primeros profes, por ese amor infinito y el apoyo desmedido en cada comentario, por las palabras de aliento y motivación en cada encrucijada de mi vivir, por el aporte a diario a mi existencia. Les amo de la manera más bella que un hombre puede amar.

A mis hermanas Mabe, Niko y Elo por su amor, por ser ustedes quienes impulsan mi obrar bien, por ser quienes me alientan a ser cada día mejor, por permitirme enseñarles y tener la honra de ser su espejo.

A mis abuelos maternos y paternos por su cariño y buenos deseos.

Para mi flaca, a ti con quien he compartido momentos increíbles llenos de todo, a ti quien me enseñó de respeto, fidelidad, de amores eros; a ti, gracias por la compañía y tu amor bonito.

A Rosana y Jairo por acogernos en su familia, por extender sus brazos, por apoyo inmenso que nos brindaron. A ustedes, Dios les pague.

Agradecimientos generales

Agradecemos a nuestra Institución Universitaria Pascual Bravo, por acogernos como estudiantes y moldearnos e instruirnos en conocimientos y valores que sin duda serán indispensables en nuestras vidas.

Agradecemos a nuestro profesor y asesor Diego Mauricio Tauta, por todo su valioso aporte en la asignatura de Redes Eléctricas II y en especial en su dedicación, tiempo y esmero como guía para que este proyecto pudiese lograrse. A él le deseamos éxitos en su vida profesional y esperamos continúe siendo el mejor de los docentes de ingeniería eléctrica de nuestra institución.

Agradecimientos también a todos los docentes quienes, a través de sus enseñanzas en la tecnología e ingeniería, nos forjaron en conocimiento e hicieron de la ingeniería eléctrica nuestra pasión. Gratos recuerdos a los profes Nubia, Blanquita, Nallybe, Mónica, María Isabel, Tauta, Juan Ardila, Edison Murillo, Mario Arrieta, Jorti, Margarita, entre otros y otras.

Por último y no menos importantes a cada uno de nuestros compañeros con los que compartimos momentos dulces, amargos, de risas, de juegos, momentos de pasteles y demás pequeñas cosas que nos dejan una enseñanza. A todos, uno fuerte abrazo.

Lista de figuras

<i>Ilustración 1.</i> Mapa niveles cerámicos Colombia.....	21
<i>Ilustración 2.</i> Estructura tripolar de la nube	22
<i>Ilustración 3.</i> Rayo positivo y rayo negativo descendente.	23
<i>Ilustración 4.</i> Rayo positivo y negativo ascendente.....	24
<i>Ilustración 5.</i> Sobretensiones transitorias debidas al aumento del potencial de tierra.....	26
<i>Ilustración 6.</i> Método Wenner	32
<i>Ilustración 7.</i> Aplicación del método Wenner. Medida de resistividad del terreno, línea de 13,2 kV, soporte tipo poste en fibra.	32
<i>Ilustración 8.</i> Esquema del método de Schlumberger-Palmer	34
<i>Ilustración 9.</i> Modelado de dos capas.....	36
<i>Ilustración 10.</i> Trayectoria de la corriente en suelo homogéneo y multicapa	37
<i>Ilustración 11.</i> Esquema de medición método de los dos puntos	38
<i>Ilustración 12.</i> Medición de puesta a tierra con método de los tres puntos.	39
<i>Ilustración 13.</i> Tensión de paso y contacto.....	40
<i>Ilustración 14.</i> Diagrama flameo inverso.	45
<i>Ilustración 15.</i> Longitud efectiva para un electrodo corto (a) y un electrodo largo (b).....	46
<i>Ilustración 16.</i> Conductor recto de potencial constante.....	48
<i>Ilustración 17.</i> Conductor segmentado.	48
<i>Ilustración 18.</i> Segmentación del contrapeso.	49
<i>Ilustración 19.</i> Configuración de la malla. Nodo de inyección de la corriente (0,0-0,5).....	53
<i>Ilustración 20.</i> Esquemático de la torre.	54
<i>Ilustración 21.</i> Modelo de impedancia de torres.....	56
<i>Ilustración 22.</i> Modelo teórico de circuitos de un electrodo de tierra.	61

Lista de tablas

Tabla 1. Campo magnético estático generado por el rayo en función de la intensidad, medido a distintas distancias del punto de impacto.	26
Tabla 2. Máxima tensión de contacto admisible para un ser humano.....	27
Tabla 3. Valores de impedancia en respuesta a la frecuencia	54
Tabla 4. Valores de referencia para resistencias de puestas a tierra.	66
Tabla 5. Máxima tensión admisible por el ser humano	67
Tabla 6. Perfil de resistividad	69

Resumen

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA BAJO IMPULSOS DE ALTA FRECUENCIA

**CARDONA DÍAZ YONY ALEJANDRO
DOVAL HIGUITA BRYAN SMITH**

Tiene como alcance este trabajo en modalidad monográfica investigativa el conocer los comportamientos surgidos a los sistemas de puestas a tierra que son impactados por las descargas atmosféricas, y arriaz de esto como objetivo principal se pretende elaborar un esbozo de manual de buenas prácticas para el diseño, construcción, montaje e instalación de sistemas de puestas a tierra que se encuentren inmersos en cambios transitorio de alta frecuencia.

Los rayos que traen consigo altas corrientes, altas tensiones y frecuencias, generan un comportamiento atípico de esos sistemas de protección, lo cual conlleva a realizar un profundo y riguroso análisis de las etapas de diseño, modelación, construcción y puesta en función del sistemas de protección de tierra, lo anterior en aras se continuar garantizando la funcionabilidad del sistema eléctrico y las cargas asociadas, como también la seguridad de las personas circundantes del mismo, cuando se está bajo riesgos de las descargas atmosféricas.

La metodología utilizada para la realización de este proyecto se basa en un rastreo documental en fuentes bibliográficas primarias y secundarias, que brinden información acerca de los efectos del rayo en los sistemas de puestas a tierra, los niveles cerámicos del territorio colombiano, comportamiento del suelo bajo impulsos repentinos de frecuencia y demás factores que conlleven a satisfacer cada uno de los objetivos trazados para este proyecto.

Dentro del desarrollo de este proyecto, se encuentra que los sistemas de puesta a tierra tienen distintos comportamientos al incremento repentino de la frecuencia. Esto quiere decir, que los parámetros eléctricos del SPT cambian, pudiendo afectar notoriamente el correcto funcionamiento del sistema eléctrico como ya se hizo mención. De manera más clara, los diseños de los sistemas de puesta a tierra, actualmente se orientan esencialmente a las

frecuencias industriales o bajas, desestimando las frecuencias súbitas que trae las descargas atmosféricas.

Los hallazgos de esta investigación arrojan que las altas frecuencias crean cambios notorios en la impedancia de la puesta a tierra, llegando a afectar el funcionamiento para el cual son instalados los SPT; esta impedancia impide una rápida descarga a tierra de las fallas.

De igual forma esta investigación permite orientar al diseñador la forma constructiva del sistema de puesta a tierra contemplando los impulsos repentinos de frecuencia.

De esta investigación se puede concluir que los diseñadores de SPT deben converger entre altas y bajas frecuencias para un correcto funcionamiento de estos, de igual forma estos diseños deben estar acompañados de herramientas computacionales para lograr una mayor fiabilidad en el sistema.

De igual forma se puede concluir que la forma constructiva desempeña un factor fundamental en el sistema, por ello se observa que las disposiciones de los elementos crean mejores reacciones a la evacuación de las fallas.

Palabras claves: rayos, sistemas de puesta a tierra, impedancia, electrodo, resistencia de puesta a tierra, alta y baja frecuencia.

Abstract

ANALYSIS OF THE BEHAVIOR OF GROUNDING SYSTEMS UNDER HIGH FREQUENCY PULSES

**CARDONA DÍAZ YONY ALEJANDRO
DOVAL HIGUITA BRYAN SMITH**

The aim of this work is to study the behaviors arising from grounding systems which are impacted by atmospheric discharges.

Lightning brings with them high currents, high voltages and frequencies, generating an atypical behavior of these protection systems, which leads to a deep and rigorous analysis of design, modeling, construction and start-up of them. To continue guaranteeing the functionality this in order of the electrical system and the associated loads, as well as the safety of people around the same, when it is under risk of atmospheric discharges.

The methodology used to develop this project is based on a documentary tracking of primary and secondary bibliographic sources, which provide information about the effects of lightning on the grounding systems, the keraunic levels of Colombian territory, soil behavior sudden impulses of frequency and other factors that lead to satisfying each of the objectives set for this project.

Within the development of this project, it was founded grounding systems have different behavior to sudden increase in frequency. This means electrical parameters of the grounding systems change, being able to noticeably affect the correct functioning of the electrical system as already mentioned. More clearly, the designs of grounding systems are currently based or include only power frequency or low frequencies, rejecting the sudden frequencies brought by atmospheric discharges.

The findings of this investigation show that the high frequencies create noticeable changes in the impedance of grounding, arriving to affect the operation for which they are installed; this impedance prevents a quick grounding of the faults.

In the same way this research allows to guide the designer the constructive form of the grounding system contemplating the sudden impulses of frequency.

From this research it can be concluded that grounding systems designers must converge between high and low frequencies for correct operation of these, in the same way these designs must be accompanied by computational tools to achieve greater reliability in the system.

In the same way it can be concluded that the constructive form plays a fundamental factor in the system, for that reason it is observed that the disposition of the elements creates better reactions to the evacuation of the faults.

Keywords: lightning, grounding systems, impedance, electrode, grounding resistance, high and low frequency.

Glosario

Corrosión: ataque a una materia y destrucción progresiva de la misma, mediante una acción química, electroquímica o bacteriana.

Puesta a tierra: grupo de elementos conductores equipotenciales, en contacto eléctrico con el suelo y una masa metálica de referencia común, que distribuye las corrientes eléctricas de falla en el suelo o en la masa. Comprende electrodos, conexiones y cables enterrados.

Rayo: la descarga eléctrica atmosférica o más conocida común mente como rayo, es un fenómeno físico que se caracteriza por una transferencia de carga eléctrica de una nube hacia la tierra.

Resistividad aparente: es la propiedad que tiene el terreno, para conducir electricidad, es conocida además como la resistencia específica del terreno. En su medición, se promedian los efectos de las diferentes capas que componen el terreno bajo estudio, ya que éstos no suelen ser uniformes en cuanto a su composición, obteniéndose lo que se denomina Resistividad aparente.

Suelo o terreno: capa de productos de meteorización, llena de vida, que se encuentra en el límite entre la roca inerte de la corteza y la atmosfera.

Tierra: masa conductiva de la tierra con potencial cero. En los sistemas eléctricos, es una expresión que generaliza todo referente a conexiones con tierra.

Introducción

Colombia se encuentra geográficamente privilegiado, en toda su extensión goza de fauna, flora y riquezas minerales. Es este último, cuenta como unos de los factores principales para que, en el territorio colombiano, precisamente en la región del bajo cauca antioqueño, zona norte del departamento de Antioquia; se propicien las elevadas estadísticas de precipitaciones y como consecuencia, las descargas atmosféricas.

Las descargas atmosféricas o rayo como particular mente son denominados, generan gran impacto sobre el sistema eléctrico, teniendo una repercusión directa sobre sobre el comportamiento los sistemas de puesta a tierra; comprometiendo su fiabilidad y la seguridad de las personas ante estas repentinas fallas eléctricas.

Las altas frecuencia que traen consigo las descargas atmosféricas, son el principal generador de cambios y reacciones de los componentes y medios donde yace el sistema de puesta a tierra. Esto debido a las estandarizaciones de los parámetros de diseño y construcción basados en las frecuencias industriales de 50 Hz y 60 Hz determinadas entonces por las normativas internacionales.

No obstante, se ha demostrado mediante estudios realizados a suelos y sistemas de puesta a tierra que estos sufren variaciones con referente a la resistividad, permitividad, impedancia, entre otros factores cuando se chocan con corrientes transitorias de alta frecuencia igual o superior a 1 MHz, generada por los rayos.

Hoy en día los diseños de puestas a tierras estudian la convergencia de las altas y bajas frecuencias en un mismo sistema, con el objetivo de continuar garantizando la continuidad del servicio eléctrico, la seguridad de las personas y el correcto funcionamiento de los equipos asistidos por la red eléctrica. Es por ello que los nuevos lineamientos para los criterios de diseños de estos sistemas, se enfocan también en el estudio del comportamiento y las variaciones que pueden ocasionar las descargas atmosféricas en este sistema de puesta a tierra.

La modelación correcta de los sistemas de puesta a tierra para los efectos transitorios de las frecuencias, implica una correcta consideración de los parámetros eléctricos del suelo, medio en el cual se desarrollan estos fenómenos, es por ello que, en el desarrollo de esta

investigación, se abordan dichos comportamientos que lleven a al diseñador a contemplar los cambios que sufre el SPT.

1. Planteamiento del problema

1.1. Descripción

Los Sistemas de Puesta a Tierra, en adelante SPT, son diseñados y construidos para salvaguardar la integridad física de las personas y los equipos conectados a una red eléctrica. El sistema de puesta a tierra se convierte en el camino más corto a tierra por el cual debe circular la corriente cuando el sistema entra en falla. Típicamente los trazos preliminares de los SPT se consideran a partir de las frecuencias industriales, es decir; frecuencias de 50 y 60 ciclos por segundo. Sin embargo, en altas frecuencias ocasionadas por las descargas atmosféricas, se obtiene una transformación del comportamiento de los sistemas de puesta a tierra, y dicha variación posiblemente puede afectar el desempeño de la misma, incumpliendo con su intención principal.

De igual forma, el incremento repentino de la frecuencia genera variaciones de los parámetros del suelo, tanto la permitividad, como la resistencia en el terreno son resentidos por las fluctuaciones de la frecuencia. Es por ello que la modelación adecuada del sistema puesta a tierra, implica una correcta consideración de los parámetros eléctricos, debido que es el medio por el que se desarrolla el fenómeno. (Moreno Ospina, Valencia Velásquez, Cárdenas Agudelo, & Villa Acevedo , 2007)

Por otro lado, debido a su ubicación geográfica, Colombia se convierte en uno de los países que posee mayor nivel cerámico en el mundo, así lo afirma Daniel Aranguren Doctor de la Universidad Nacional de Colombia, quien se dedica a estudiar este fenómeno. Es entonces, que las descargas eléctricas son fenómenos naturales a los cuales se les atribuye las elevaciones de las corrientes que ponen en peligro la vida de personas, el desempeño de los equipos y cualesquier participe de la energía eléctrica.

Es entonces, donde se debe tener en consideración las afectaciones que ocasionan los rayos sobre los sistemas de puesta a tierra, para el correcto diseño, realización e instalación de éste. Los SPT de las torres de transmisión de energía eléctrica son aquellos que generalmente sufren cambios bruscos en su comportamiento al ser penetrados por corrientes de alta frecuencia, es por ello que en Colombia se requiere hacer una correcta modelación del sistema dada las implicaciones de las descargas atmosféricas.

1.2. Formulación

Los SPT pueden considerarse como la mejor protección de un sistema eléctrico, sin embargo, no siempre su función se conserva según lo planteado y aún más cuando este se inmerge en perturbaciones transitorias; es por ello esta investigación procurará dar respuesta a los siguientes interrogantes:

¿De qué manera afectan las descargas atmosféricas a los SPT? ¿Cuál es el comportamiento de los SPT cuando son inmersos en corrientes de alta frecuencia? y ¿Cuál sería la mejor forma de diseño de un sistema de puesta tierra teniendo en cuenta el comportamiento de éste ante impacto de descargas atmosféricas?

2. Justificación

Colombia se encuentra entre las zonas con mayor propensión a los rayos por sus condiciones geográficas, sumado a la alta humedad y su ubicación en la zona tropical, que genera nubes de tormentas muy grandes (El Tiempo, 2015). Estrechando un poco más el espectro, Medellín es considerada como unas de las ciudades con mayor número de descargas atmosféricas del mundo (El Colombiano, 2016), por su parte la National Geographic, determinó que Cáceres municipio del Bajo Cauca antioqueño se registraron cerca de 80.000 rayos en el último año (El Tiempo, 2017; National Geographic España, 2017). Lo anterior cobra relevancia al expresar que las descargas atmosféricas son los artífices de los cambios bruscos y repentinos que padecen los SPT con las altas frecuencias.

Las normativas internacionales estandarizaron los parámetros de diseño de los sistemas de puesta a tierra, bajo consideraciones de bajas frecuencias de 50 Hz y 60 Hz, no obstante, se ha demostrado mediante estudios realizados que los suelos y SPT sufren variaciones con referente a la resistividad, permitividad, impedancia, entre otros factores cuando se chocan con corrientes transitorias de alta frecuencia. Estos erróneos diseños son posibles focos de peligro para el ser humano, animal que se encuentre circundante al área de incidencia, de igual forma la disminución del buen funcionamiento de los equipos.

De tal manera, este trabajo investigativo proyecta como resultado final la realización del esbozo para un manual de buenas prácticas en el diseño de los sistemas de puesta a tierra que se encuentran bajo impulsos de altas frecuencias. Como también se busca contribuir con el desarrollo y fortalecimiento de esta área de la ingeniería que aún no se tiene múltiples desarrollos.

De la misma forma, este ejercicio investigativo beneficia a la Institución Universitaria Pascual Bravo en la forma de generar una mayor motivación en investigaciones a futuro acerca de estos sistemas u otro poco tratados.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Analizar el comportamiento de los sistemas de puesta a tierra bajo impulsos de alta frecuencia ocasionados por descargas atmosféricas.

3.2. Objetivos específicos

- Realizar un rastreo bibliográfico acerca de los sistemas de puesta a tierras, nivel cerámico en Colombia y los efectos que causan las descargas atmosféricas en el comportamiento del SPT.
- Identificar los principales factores que impactan en los sistemas de puestas a tierras que se hallan bajo impulsos de altas frecuencias.
- Desarrollar manual de buenas prácticas para el diseño de sistemas de puestas a tierras que se encuentren bajo impulsos de alta frecuencia ocasionados por descargas atmosféricas.

4. Marco teórico

4.1. Ubicación geográfica de Colombia

El territorio colombiano se encuentra localizado geográficamente al noroeste de América del Sur en la zona Ecuatorial, lo que motiva a la existencia de una gran variedad de condiciones climáticas en toda la extensión del país. Esta ubicación da a Colombia múltiples corrientes de vientos que traen consigo nubes cargadas, dando origen a los ciclos de lluvia que afectan de innumerables formas al territorio colombiano; una de estas afectaciones se podría evidenciar son las descargas atmosféricas.

4.1.1. Precipitaciones en Colombia.

Las precipitaciones en Colombia están dadas por la situación geográfica ya mencionada de forma anterior, esto favorece el desarrollo de nubosidad y lluvias que inciden directamente en el comportamiento y el régimen de las precipitaciones del territorio nacional. En promedio Colombia presenta una variabilidad de 500 mm de precipitaciones anuales al norte del país en la Guajira, mientras que, en zonas de la región pacífica, especialmente el Chocó, el régimen de precipitaciones puede llegar hasta los 12.000 mm en promedio (FIDEICOMISO CREG, Keraunos SAS, 2014).

El efecto de las precipitaciones es la ocurrencia de descargas eléctricas atmosféricas o rayos, vientos y lluvias intensas, y en general todas las condiciones climáticas denominadas mal tiempo.

4.1.2. Nivel ceráunico.

Se define de manera relativa como ceráunico a la medición y caracterización de las tormentas eléctricas en una zona de la superficie del globo. Está dado por el número anual de días de tormenta en un lugar específico. De esta manera, un día de tormenta se define como un día de calendario local durante el cual un trueno es escuchado al menos una vez en una ubicación dada. El rango en el que el trueno es audible está alrededor de los 15 km, con un rango máximo de 25 km. Con los primeros estudios de la actividad eléctrica atmosférica realizados en Colombia a principios de la década de los 90, se realizó una aproximación a las

características del rayo a nivel espacial y temporal. De estas primeras investigaciones se publicó el primer mapa de niveles ceráneos de Colombia donde se observaban las zonas más críticas del número de días de tormenta al año, como lo son el medio y bajo Magdalena, el sur del Valle del Cauca y sobre las ciudades de Medellín, en especial la zona del Bajo Cauca antioqueño y Ocaña en Norte de Santander (FIDEICOMISO CREG, Keraunos SAS, 2014).

Para la visualización de la actividad o incidencia de rayos en el territorio colombiano, se tomará como base la figura a continuación.

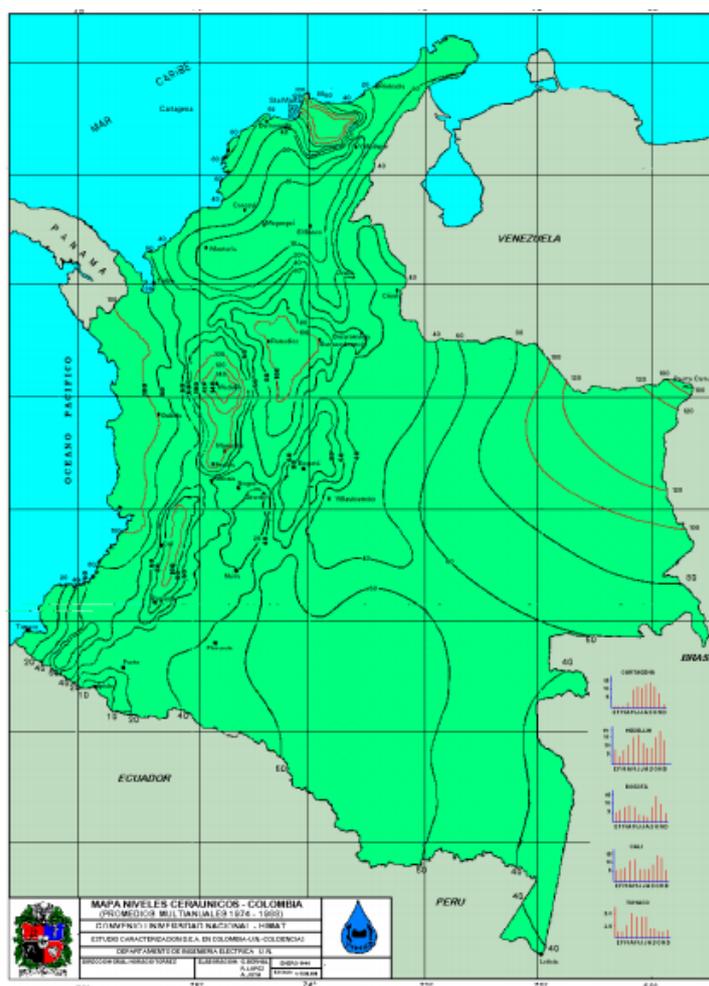


Ilustración 1. Mapa niveles ceráneos Colombia

Fuente: extraído de Norma Técnica Colombiana – NTC4552.

4.1.3. Descargas eléctricas atmosféricas o rayo.

La descarga eléctrica atmosférica o como comúnmente es llamado Rayo, es un fenómeno físico que se caracteriza por la transferencia de carga eléctrica de una nube hacia la tierra, de la tierra hacia la nube, entre dos nubes, al interior de una nube o hacia la ionosfera (Norma

Técnica Colombiana NTC 4552, 2004). Para efectos de este trabajo, se presenta mayor interés y objeto de estudio la forma rayos nube a tierra, esto es debido a la influencia de estos sobre los seres vivos, sistemas eléctricos, específicamente a los sistemas de transmisión de energía eléctrica, de igual manera también crea perturbaciones en los sistemas de comunicaciones y aún más en los electrónicos.

De tal forma, la nube presenta una estructura de carga tripolar, con una región de carga principal negativamente cargada y comprendida entre dos regiones cargadas positivamente, en la imagen expuesta a continuación se puede observar lo anteriormente expuesto.



Ilustración 2. Estructura tripolar de la nube

Fuente: extraído de <http://ramanujan25449.blogspot.com.co/2015/01/rayos-y-truenos.html>

Tipos de rayos.

Para esta clasificación, se basa en lo propuesto por K. Berger, donde el investigador sustenta que los rayos se clasifican según el sentido de su desplazamiento y la polaridad de la nube que se descarga. Según el planteamiento de Berger, existen 4 tipos de rayos, en términos de la dirección del movimiento entre nube y tierra: ascendente o descendente y en términos del signo de la carga del líder que inicia la descarga: positivo o negativo, estos se definirán de manera detallada a continuación.

Según la polaridad de la nube

- **Rayo negativo:** cuando la nube está cargada negativamente y la tierra, positivamente. Los rayos negativos son muy frecuentes en lugares en los que el terreno es llano y el clima templado. Estadísticamente, el 90% de los rayos son de polaridad nube negativa. (Schneiderelectric, 2010).

- **Rayo positivo:** cuando la nube está cargada positivamente y la tierra, negativamente. Estos rayos son muy extraños y peligrosos. (Schneiderelectric, 2010)

Según el sentido de desplazamiento

- **Rayo descendente:** cuando el rayo se dirige de la nube al suelo. Este tipo de rayo es muy frecuente en climas cálidos y donde el terreno es muy llano. (Schneiderelectric, 2010)
- **Rayo ascendente:** cuando el rayo se dirige desde el suelo hasta la nube. Este tipo de rayo, mucho más destructivo que el anterior, se crea, especialmente, en lugares montañosos o donde existen prominencias importantes. (Schneiderelectric, 2010)

Las ilustraciones a continuación, muestra en la figura 3 los rayos negativos descendente, rayos positivos descendente; de igual forma en la figura 4 se puede observar los rayos negativos ascendentes, los rayos positivos ascendentes respectivamente.

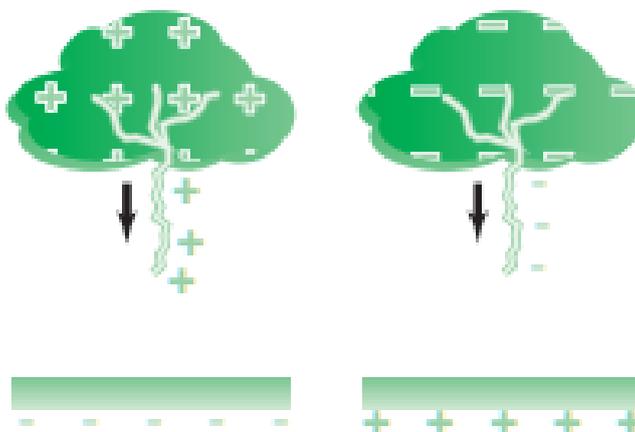


Ilustración 3. Rayo positivo y rayo negativo descendente.

Fuente: extraído de Protección contra sobretensiones transitorias. Baja tensión. Guía 2010, pag. 16

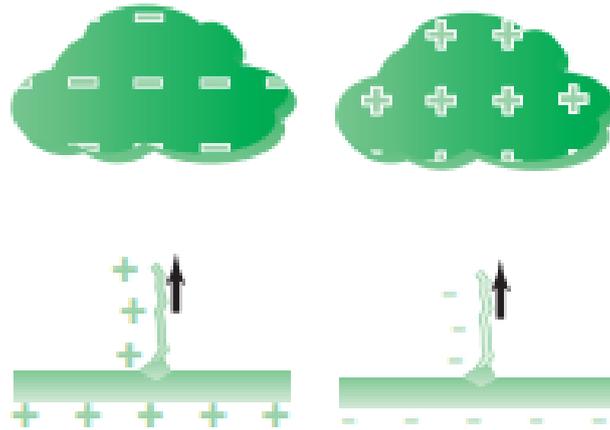


Ilustración 4. Rayo positivo y negativo ascendente.

Fuente: extraído de Protección contra sobretensiones transitorias. Baja tensión. Guía 2010, pág. 16.

Parámetros característicos de los rayos. Los rayos poseen ciertos parámetros que deben ser considerados como importantes al momento de estudiar el efecto que causan. Dichos parámetros se enlistan a continuación:

- **\hat{I}_{pico}** : intensidad de pico para calcular el incremento de potencial de tierra.
- **$(di/dt)_{\text{máx}}$** : frente de subida para calcular las tensiones inducidas y las caídas de tensión a través de las inductancias, así como el espectro de frecuencias de la perturbación.
- **$I^2 dt$** : parámetro de energía proporcional útil para calcular los efectos dinámicos (fuerzas resultantes).
- **Idt** : carga eléctrica útil para calcular la volatilización de materia en el punto de impacto de la caída del rayo.

Efectos principales del rayo. La corriente del rayo es una corriente eléctrica de alta frecuencia, del orden de 1 MHz. Además de los efectos de inducción y de sobretensiones, provoca los mismos efectos que toda corriente de alta frecuencia cuando circula por un conductor (Schneiderelectric, 2010). Es por ello el presente trabajo se enfoca de manera concreta en esos efectos que causan las altas frecuencias que traen consigo las descargas atmosféricas en los sistemas de puesta a tierra, esta incidencia se evidencia primordialmente sobre las redes áreas, debido a que se encuentran propensas a ser colisionadas por este.

- **Efectos térmicos:** fusión en los puntos de impacto del rayo y efecto Joule debido a la circulación de corriente, pudiendo provocar incendios

- **Efectos electrodinámicos:** las corrientes de rayo circulan por los conductores paralelos creando unas fuerzas de atracción o repulsión entre los cables y provocando roturas o deformaciones mecánicas.
- **Efectos de deflagración:** el canal de rayo provoca una dilatación del aire y una compresión hasta unos 10 m de distancia. Un efecto de onda de choque rompe los vidrios y tabiques, y puede proyectar a personas o animales a algunos metros de distancia. Esta onda se transforma al mismo tiempo en onda sonora: trueno.

4.1.4. Tipos de sobretensiones generadas por las descargas atmosféricas

Otro efecto que ocasionan las descargas atmosféricas, son las sobretensiones transitorias; de estas se distinguen tres tipos en función de la caída del rayo.

Sobretensiones transitorias conducidas: la caída de un rayo directo sobre una línea de distribución de energía, crea una onda de corriente que se propaga por ambas partes del punto de impacto. Estas sobretensiones tienen la facilidad de extenderse por varios kilómetros, de no contar con un drenaje de descarga, estas podrían llegar hasta los usuarios del sistema y afectar los equipos. (Schneiderelectric, 2010)

Sobretensiones transitorias inducidas: la caída de un rayo sobre un poste, árbol o irregularidad en el terreno será equivalente a una antena de gran longitud que emite un campo electromagnético muy elevado. La radiación emitida induce corrientes transitorias en las líneas eléctricas. (Schneiderelectric, 2010)

Tabla 1. *Campo magnético estático generado por el rayo en función de la intensidad, medido a distintas distancias del punto de impacto.*

Pico de intensidad del rayo (kA)	Campo magnético estático generado por el rayo (A/m)		
	a 10 m del rayo	a 100 m del rayo	a 10 km del rayo
10	$1,6210^2$	16	$1,9210^{-2}$
20	$3,2210^2$	32	$3,8210^{-2}$
30	$4,8210^2$	48	$5,8210^{-2}$
70	$1,12210^3$	$1,1210^2$	13.210^{-2}
100	$1,6210^3$	$1,6210^2$	19.210^{-2}
140	$2,2210^3$	$2,2210^2$	27.210^{-2}
200	$3,2 \times 10^3$	$3,2 \times 10^2$	38×10^{-2}

Fuente: reelaborado por autores a partir de Tabla 3.3 de Protección contra sobretensiones transitorias. Baja tensión. Guía 2010, pág. 18.

Sobretensiones transitorias debidas al aumento de potencial de tierra: la caída de un rayo sobre el terreno provoca una fuerte elevación del potencial de tierra en una zona de algunos kilómetros alrededor. Por otro lado, si el rayo cae en un pararrayos, el potencial de tierra aumentará cuando este dirija la corriente a tierra. Este aumento de potencial puede inducir sobretensiones elevadas en los cables subterráneos y provocar la elevación de la tensión de las conexiones a tierra.



Ilustración 5. Sobretensiones transitorias debidas al aumento del potencial de tierra
Fuente: extraído de Protección contra sobretensiones transitorias. Baja tensión. Guía 2010, Pág. 19.

Dado que la conductividad del suelo tiene valores finitos, la corriente de descarga se distribuye por debajo de la superficie de la tierra en todas las direcciones, con zonas de alta conductividad que toman una mayor parte de la corriente y la transportan a largas distancias, hasta que se establece el equilibrio de potencial final en el suelo situado por debajo de la nube.

4.2. Sistemas de puesta a tierra

El término puesta a tierra de manera simple es un camino de drenaje, de igual manera también puede ser considerado como un camino corto, fácil y seguro a tierra, y tiene como función principal minimizar las posibles tensiones transitorias que puedan ocurrir en momento de una falla. Su construcción de manera general es una conexión entre el equipo y la tierra física, esta conexión a tierra se realiza introduciendo uno o varios electrodos, en la tierra, seguidos de un conductor eléctrico que va hasta el equipo. Típicamente los electrodos son de cobre, aluminio o hierro galvanizado, su utilización dependerá muchos factores entre ellos quizás el principal son de las condiciones del terreno. En el desarrollo del documento se ampliará las aplicaciones del material.

Toda instalación eléctrica realizada en el territorio colombiano, debe estar regido por el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas- RETIE; y de acuerdo a esta normativa, toda instalación tiene que disponer de un Sistema de Puesta a Tierra- SPT, para evitar que personas en contacto con la misma, tanto en el interior como en el exterior, queden sometidas a tensiones de paso, de contacto o transferidas, que superen los umbrales de soportabilidad del ser humano cuando se presente una falla (Ministerio de Minas y Energía- MinMinas, 2013).

Tabla 2. Máxima tensión de contacto admisible para un ser humano.

Tiempo de despeje de la falla [ms]	Máxima tensión de contacto admisible (rms AC) para público en general. [V]	Máxima tensión de contacto admisible (rms AC) para personas de 50 kg. [V]
Mayor a dos segundos	50	82
Un segundo	55	116
700	70	138
500	80	164
400	130	183
300	200	211
200	270	559
150	300	299
100	320	366
50	345	518

Fuente: elaborado por autores a partir del RETIE

la tabla anterior muestra la máxima tensión que podría soportar el ser humano; para la columna dos aplica a sitios con acceso al público en general, la columna tres aplica para instalaciones de media, alta y extra alta tensión, donde se tenga la presencia de personal que conoce el riesgo y está dotado de elementos de protección personal.

De acuerdo con lo descrito en el artículo 15 del RETIE, los objetivos principales de un SPT son en primer lugar la seguridad de las personas, como segundo la protección de las instalaciones y tercero, la compatibilidad electromagnética. De igual manera la norma colombiana define las funciones del sistema de puesta a tierra.

- Garantizar condiciones de seguridad a los seres vivos.
- Permitir a los equipos de protección despejar rápidamente las fallas.
- Servir de referencia común al sistema eléctrico.
- Conducir y disipar con suficiente capacidad las corrientes de falla, electrostática y de rayo.
- Transmitir señales de RF en onda media y larga.
- Realizar una conexión de baja resistencia con la tierra y con puntos de referencia de los equipos.

La gran mayoría de los diseños de puesta a tierra, son planteados para frecuencias industriales de entre 50 Hz y 60 Hz, por consiguiente, la estructura planteada en el RETIE, solo se contempla para bajas frecuencia, dejando aún lado el diseño de esas para las altas frecuencias que son generadas por las descargas atmosféricas. Por lo anterior el enfoque de este trabajo investigativo pretende arrojar como resultado una guía práctica para el diseño de los sistemas de puesta a tierra que se encuentren inmersos bajo los impulsos de alta frecuencia.

4.2.1. Características del suelo

Cabe mencionar, que se emplearan términos que convergen para ambos tipos de diseños, es decir para baja y alta frecuencia, es por lo anterior que a continuación se desglosa nociones compartidas en referencia al diseño de los sistemas de puesta a tierras de manera general.

Características físicas del terreno

Las condiciones y características de los suelos donde se implementan o construyen los sistemas de puesta a tierra, desempeñan un papel importante en el funcionamiento idóneo de este, es por esto que unas de las pautas principales para el diseño de los SPT es conocer el suelo. A continuación, se definirán los rasgos a tener en consideración del análisis de tierras.

4.2.1.1.1. Estratigrafía. La geología se refiere a estratigrafía como la superposición de los diferentes estratos o capas de tierra que forman un área concreta. En la topografía colombiana no es común encontrar un terreno completamente homogéneo, las variaciones de las capas presentan diversas naturalezas que generan diferentes cambios en las resistividades, lo que conlleva a realizar múltiples mediciones y modelados de capas para conocer la resistividad de un terreno específico en desplazamientos laterales y de profundidad. Lo anterior son criterios fundamentales para el diseño de los sistemas de puesta a tierra.

4.2.1.1.2. Humedad. Se considera que a una mayor humedad disminuye la resistividad del terreno. Por ende, zonas aledañas a ríos, a cuencas o al mar quizás los terrenos más propicios para la construcción de un SPT debido a que ofrecen poca resistencia al paso de la corriente. No obstante, es necesario considerar que el hecho de la presencia de agua en la superficie del terreno no significa necesariamente que esté presente una baja resistividad. (Roy B. & Joseph A., 2007).

4.2.1.1.3. Salinidad. Las sales minerales que naturalmente tienen los suelos, facilitan la conducción de la corriente disminuyendo de manera considerable la resistividad. En el mercado actual, existen múltiples productos químicos uno de ellos es la Bentonita que al añadir este en el sitio donde se construye los sistemas de puesta a tierra, mejora las condiciones del suelo cuando son muy resistivos.

4.2.1.1.4. Estacionalidad. Es cierto que tanto la temperatura como la humedad e incluso la salinidad del suelo permutan a lo largo del año dependiendo de la estación climatológica en que se esté; por fortuna el territorio colombiano tan solo sufre dos estaciones (invierno, verano), más sin embargo se debe considerar este factor debido a los cambios bruscos que pueda sufrir el sistema generado por las estaciones.

Temperatura. El incremento de temperatura en un conductor eléctrico cualesquiera, influye sobre la velocidad del movimiento de los iones, lo que facilita la conducción eléctrica, disminuyendo consecuentemente la resistividad. Sin embargo, cuando la temperatura se encuentra elevada, cercana a los 100 °C, provoca evaporación, disminuyendo la humedad del suelo, ocasionado el aumento de la resistividad. Por otra parte, cuando la temperatura alcanza a estar muy baja alrededor de 0 C, crea presencia de hielo y por las condiciones cristalinas del mismo, genera de igual forma aumento de la resistividad en el terreno (German M, 2007). El equilibrio de esta variable es lo ideal para el óptimo funcionamiento del sistema de puesta a tierra, pero al ser una condición física misma de la zona y el terreno donde se implementará el SPT, se convierte en no controlable y el tratar de hacerlo resulta ser algo no práctico, sin embargo, es posible minimizar los riesgos, diseñando y tomando como parámetro el peor de los casos.

Parámetros eléctricos del suelo

La caracterización de los suelos se hace algo compleja por la no hominización de este. Para el territorio colombiano debido a su posición geográfica como anteriormente se describió, genera una condición de irregularidad más expresiva. Por esto para la implementación de un sistema de puesta a tierra no solo de debe conocer los criterios físicos y minerales del suelo, que determinan básicamente el tipo de material a introducir en el suelo, sino también los parámetros eléctricos que inciden en la topología constructiva y dimensionamiento del SPT.

4.2.1.1.5. Permitividad eléctrica. Constante eléctrica como también es llamada a la Permitividad, hace referencia a la facilidad o la tendencia de un material al ser polarizado ante un campo eléctrico. Esta, tomada en función de la frecuencia, puede adoptar valores reales o complejos. Generalmente no es no es considerada como una constante ya que puede variar con la posición en el medio, la frecuencia del campo aplicado, la humedad o la temperatura, entre otros parámetros.

La unidad de medida es faradio/metro [F/m], la cual es expresada frecuentemente por su valor relativo con respecto a la del vacío: $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$, donde ϵ_0 es la Permitividad del vacío. La Permitividad cobra importancia al estudiar los fenómenos transitorios, debido a la

variación de este parámetro con la frecuencia y el contenido de la humedad, lo que influye en la propagación de la corriente en el suelo (Moreno Ospina, Valencia Velásquez, Cárdenas Agudelo, & Villa Acevedo, 2007).

4.2.1.1.6. Permeabilidad magnética. Está definida como la capacidad de una sustancia o medio para atraer y hacer pasar a través de ella campos magnéticos, la cual está dada por la relación entre la inducción magnética existente y la intensidad de campo magnético que aparece en el interior de dicho material. Se relaciona mediante la convergencia del flujo magnético y la intensidad del campo magnético $\mu = \frac{B}{H}$. En cierta forma para las aplicaciones de los SPT no es un factor determinante, dado que presenta un valor muy cercano al vacío y por tal razón, se asume como $\mu_r = 1$.

4.2.2. Métodos de medición para los parámetros eléctricos del terreno

De manera general las ecuaciones que se emplean normalmente para el cálculo de la resistencia de los sistemas de puesta a tierra están expresadas en hipótesis de terrenos homogéneos. Los métodos aplicados en los diseños de sistemas de puestas a tierra, conducen a la obtención de la resistividad aparente, que se define como aquella correspondiente a un terreno completamente homogéneo; en el cual, para una disposición de picas y una corriente inyectada, se produce una elevación del potencial equivalente a la de un terreno no homogéneo. La interpretación de los datos hallados de resistividad aparente es la parte más ardua del proceso. Los modelos de terreno más utilizados son el terreno uniforme y el modelo de dos capas. (Pérez López, 2016)

Medición de la resistividad del terreno

El primer paso para el diseño y la construcción de un sistema de puesta a tierra, lleva a la realización de un dictamen de la capacidad conductiva del terreno, lo que se infiere en la materialización de la resistividad del terreno. Esta se define como la resistencia de un metro cúbico de tierra medido entre superficies opuestas paralelas de una porción de material de longitud y sección uniforme unitaria. Esta resistividad del suelo en gran medida, depende de la conducción del agua contenida en él, siendo en parte un proceso electrolítico. (Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, 1993).

De acuerdo con lo expresado por German Moreno Ospina y otros, en fundamentos e ingeniería de las puestas a tierras, el resultado de esta medición determina en gran parte, la facilidad y la forma como se distribuirá la corriente en el suelo, determinando a su vez, la distribución de potenciales en este, y con ellos las características constructivas que debería tomar el sistema de puesta a tierra con el objetivo de cumplir con las mínimas condiciones de seguridad en el área dispuesta para su implementación.

4.2.2.1.1. Método de Wenner. Este método planteado por Frank Wenner, es el método más preciso y popular, debido que obtiene la resistividad del suelo para capas profundas sin enterrar los electrodos a dichas profundidades; el método consiste separar de forma progresiva en línea recta a una distancia “a” pequeños electrodos de corriente y de tensión en cuatro huecos en el suelo, a una profundidad “b”. En la figura a continuación se ilustra la distribución de los electrodos.

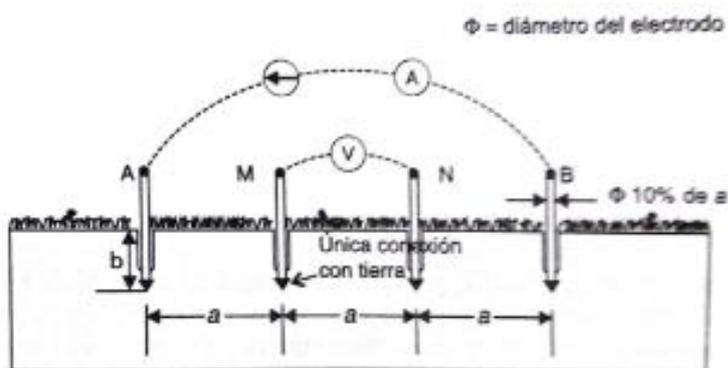


Ilustración 6. Método Wenner

Fuente: fundamentos e ingeniería de las puestas a tierra. Pág. 24



Ilustración 7. Aplicación del método Wenner. Medida de resistividad del terreno, línea de 13,2 kV, soporte tipo poste en fibra.

Fuente: autores

Para el cálculo de la resistividad aparente del suelo, se realiza con la siguiente fórmula

$$\rho = \frac{4\pi Ra}{\left(1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{2a}{4a^2 + 4b^2}\right)}$$

Donde R corresponde al valor leído en el equipo (telurómetro), o a la razón entre la diferencia de tensión y la corriente inyectada es decir $R = \frac{V}{I}$. Dado que en la práctica la distancia “a” es mucho mayor que la profundidad de enterramiento “b”, esto es $a > 20b$, la ecuación para el cálculo de la resistividad aparente se simplifica de la siguiente manera:

$$\rho = 2\pi Ra$$

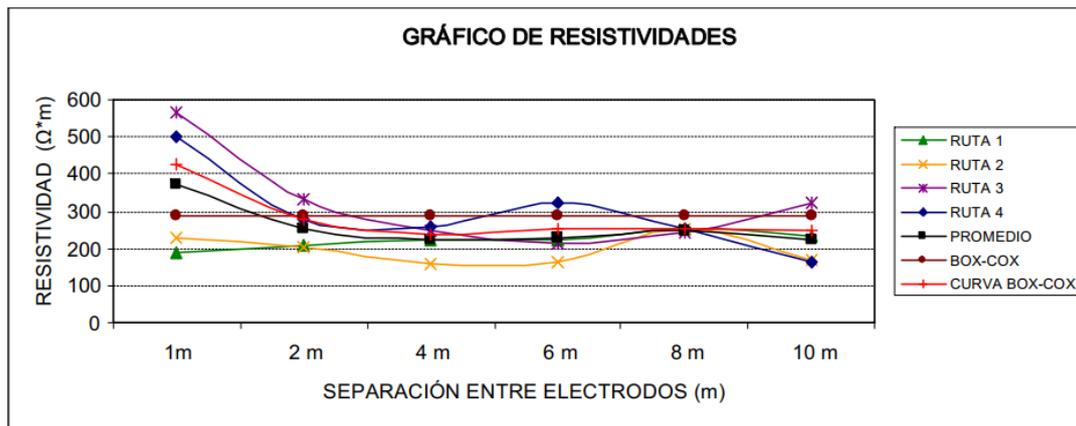
Pero si el valor de la profundidad es considerable en comparación con la distancia en los electrodos; es decir $b > 4a$, el valor de la resistividad aparente también puede ser calculado como esta ecuación: $\rho = 4\pi Ra$

Para determinar el cambio de la resistividad del suelo con la profundidad, el espaciamiento entre electrodos se varía desde unos pocos metros hasta un espaciamiento igual o mayor que la máxima dimensión esperada del sistema de puesta a tierra; por ejemplo, la mayor distancia posible entre 2 puntos de una malla, o la profundidad de las varillas. La norma IEEE81, establece teóricamente, que los electrodos deben ser puntos de contacto o electrodos hemisféricos de radio “b”, sin embargo, en la práctica, cuatro barras se colocan generalmente en línea recta a intervalos de “a”, enterradas a una profundidad no superior a 0.1 a. Entonces, el diseñador puede asumir $b = 0$. (IEEE Power and Energy Society , 2012)

El espaciamiento “a” del electrodo se interpreta como la profundidad aproximada a la cual se lee la resistividad del suelo. Para caracterizar la variación de la resistividad del suelo dentro de un área específica, se deben realizar varios grupos de medidas con los cuales se crean perfiles, realizados en diferentes direcciones.

Las diferentes lecturas tomadas con varios espaciamientos alineados dan un grupo de resistividades que se interpretan perfil, que, al hacer graficadas contra el espaciamiento, indican si hay capas diferentes de suelo; lo que generan una idea de su respectiva profundidad y resistividad. La imagen a continuación ilustra el concepto anterior (Empresas Públicas de Medellín - EPM, 2008).

Gráfica 1. Perfil de resistividades.



4.2.2.1.2. Método de Schlumberger-Palmer. En este arreglo, al igual que en el de Wenner, los electrodos de emisión (corriente) y medición (tensión) están situados en línea recta, la variante de este arreglo radica en que la separación entre electrodos es, aunque simétrica, desigual para la correspondiente entre los electrodos de tensión y entre estos y los de corriente.

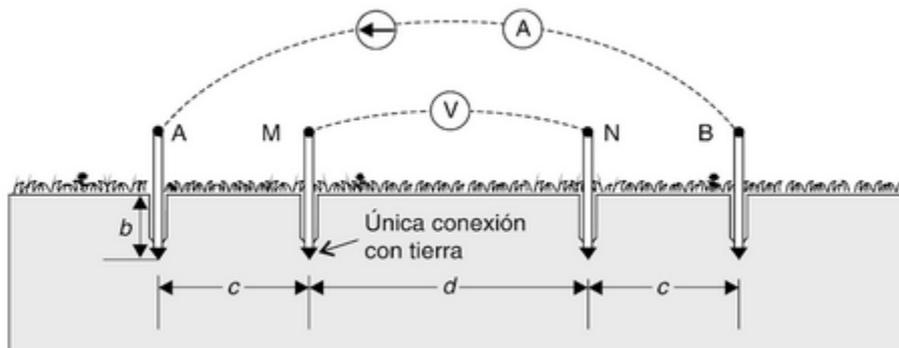


Ilustración 8. Esquema del método de Schlumberger-Palmer

Fuente: Idem

En este método los electrodos deben ubicarse cerca a sus correspondientes de emisión, incrementando así la tensión leída por el equipo, lo cual es una fortaleza del método, debido a que, en los valores muy reducidos, propios de la aplicación de este método en grandes separaciones, disminuyen la confiabilidad del valor arrojado por el equipo. De tal forma que en las que se planea una exploración de grandes profundidades, es benéfico la implementación de este método.

El procedimiento para obtener el modelado del terreno consiste en separar progresivamente los electrodos, alrededor de un punto central permanente, denominado punto

de máxima exploración. La fórmula con la cual se realizan los cálculos se describe de la siguiente forma $\rho = \frac{\pi c(c+d)}{d}$, donde:

R: valor leído por el equipo (telurómetro)

c: separación entre el electrodo de corriente y su correspondiente tensión.

d: separación entre los electrodos de tensión

Modelado del suelo

Un terreno uniforme es aquel en el que la variación tanto lateral como vertical de la resistividad del terreno es poco notable, es por ello que cuando el terreno presente altas variaciones en la resistividad se emplea modelos multicapa, que aproxima normalmente al modelo de dos capas o bicapa.

Modelo de dos capas. El método de las dos capas consiste en la modelación del suelo en dos capas de resistividad uniforme con base en los valores de resistividad tomados en el terreno. Cuando la resistividad aparente medida en un sitio no es uniforme, los datos pueden ser interpretados para obtener la mejor capa de dos capas equivalente. El proceso básicamente implica una búsqueda iterativa de dichos valores de dos capas contemplados como P1, P2 y h. (Hans R. & J.K. , 1992)

Continuando con lo anteriormente planteado, si a medida que aumenta la profundidad de las medidas se producen resultados de resistividad similares, luego un cambio brusco y luego otra serie de resultados similares, se evidencia que la resistividad debe ser estimada mediante un modelo de terreno de dos capas, esto se presenta cuando los terrenos no son homogéneos e isótropos. Se puede entonces realizar un cálculo aproximado de la resistividad de la capa superior e inferior formando dos grupos con las resistividades previas y posteriores al salto y realizando la media aritmética de las resistividades pertenecientes a cada grupo.

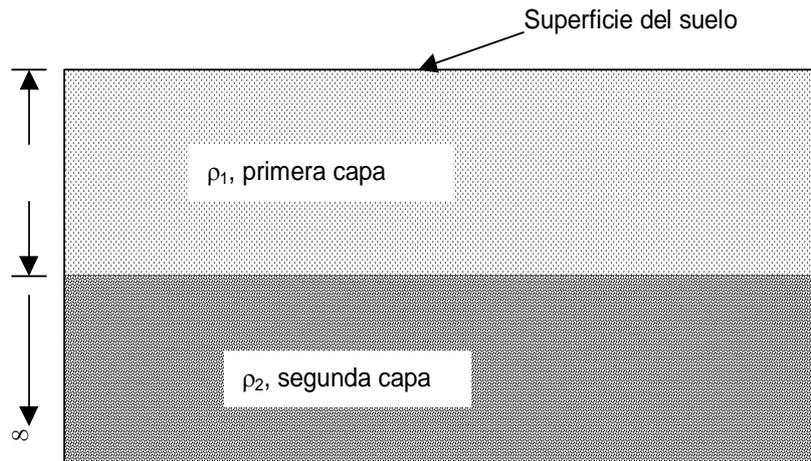


Ilustración 9. Modelado de dos capas

Fuente: extraído de Medición de resistividades de los suelos frente a variaciones de frecuencia. G. Carona; R. Acuña.

Sea ρ_1 la resistividad de la capa superficial y ρ_2 la resistividad de la capa inferior:

- $\rho_1 > \rho_2$ y el grosor de la capa superficial no es muy grande, las corrientes pasaran rápidamente a la capa inferior reduciéndose las tensiones de paso y contacto. La adición de picas a la malla disminuirá la resistencia de puesta a tierra significativamente. A medida que la capa superior es más gruesa, el sistema se comportará como si se tratara de un suelo uniforme de resistividad ρ_1 .
- Si $\rho_1 < \rho_2$ las corrientes fluirán más en superficie, lo que provocará mayor densidad de corriente en el perímetro de la malla y gradientes de tensión que pueden resultar peligrosos. (Pérez López, 2016)

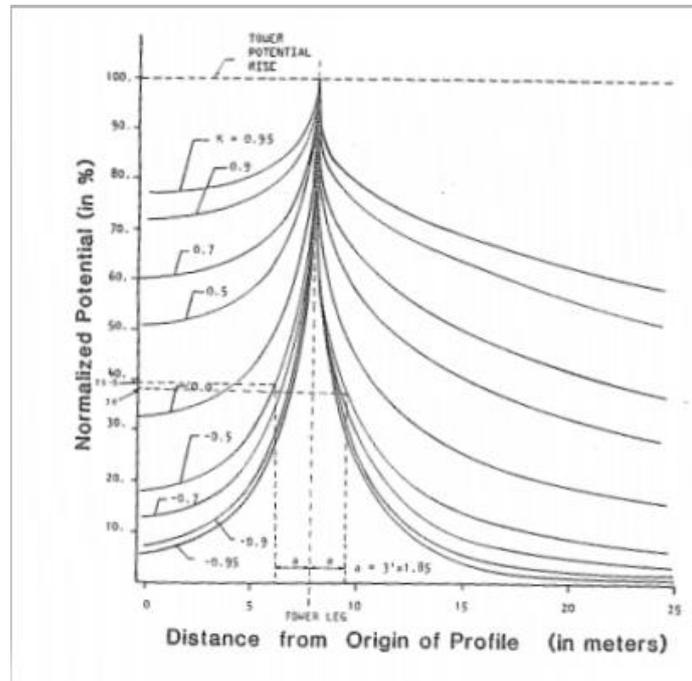
Generalmente, para un sistema de puesta a tierra en suelo uniforme o en suelo de dos capas con ρ_1 menor que ρ_2 (suelo de capa superior resistividad menor que la capa inferior resistividad del suelo, un factor de reflexión positivo), la densidad de corriente es mayor en los conductores en los bordes exteriores de la rejilla de tierra. En un suelo de dos capas con ρ_1 mayor que ρ_2 (el suelo en la capa superior es más resistente que el suelo de la capa inferior, un factor de reflexión negativo), la densidad de corriente es más uniforme sobre todos los conductores del sistema de puesta a tierra. Esto se debe a la tendencia de la corriente de la rejilla a descender hacia la capa de menor resistividad, en lugar de subir hacia afuera y hacia la capa superior más resistente (IEEE STANDARDS ASSOCIATIONS, 2013).

En el modelo de suelo de dos capas puede representarse por un suelo de capa superior de profundidad finita sobre una capa inferior de profundidad infinita. El cambio brusco en la

resistividad en los límites de cada capa de suelo se puede describir por medio de un factor de reflexión. El factor de reflexión, K , está definido por la ecuación. $k = (\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1)$.

En la gráfica siguiente se evidencia que entre más bajo sea el valor de K para ρ_2 , mejor será la penetración de la corriente y la disipación de la misma.

Gráfica 2. Características del factor K



Lobada, M, en 1990 en el seminario de protección de equipos sensibles contra rayos y transitorios electromagnéticos, en la ciudad de Bogotá, plantea la simulación de la corriente dispersada por el suelo, cuando este es homogéneo y en dos capas horizontales, esta se expone a continuación.

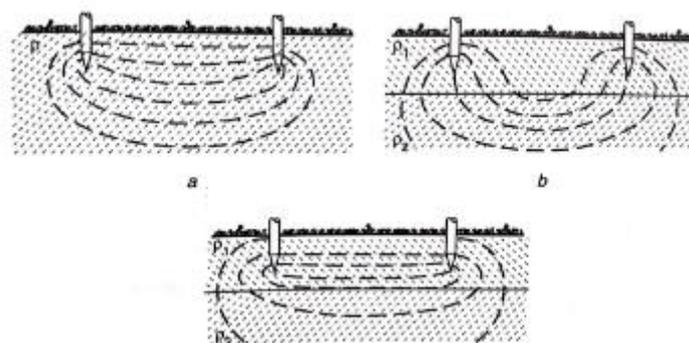


Ilustración 10. Trayectoria de la corriente en suelo homogéneo y multicapa
Fuente: Fundamentos e ingeniería de puestas a tierras. Pág. 37

Por otra parte Estudios realizados por Thapar, B., and Gross, E. T. B., en “Grounding grids for high voltage stations - part IV: Resistance of grounding grids in nonuniform soil, como también, Dawalibi, F. P., and Mukhedkar, D., “Influence of ground rods on grounding systems,” citados la norma IEEE 80, establece que para aplicaciones de diseño que incluyen disposiciones de puesta a tierra relativamente simples de electrodos enterrados en un en un suelo razonablemente uniforme, los métodos aproximados proporcionados en otras partes de la guía serán adecuados para obteniendo un diseño realista con márgenes de seguridad adecuados. Sin embargo, para diseños que impliquen una gran puesta a tierra área, rejillas de formas irregulares, etcétera, o donde la resistividad del suelo es claramente muy no uniforme, el diseñador debe decidir si se necesitan métodos más sofisticados como la modelación de la resistividad del terreno por el método de dos capas (IEEE STANDARDS ASSOCIATIONS, 2013).

4.2.2.1.3. Método de los dos puntos. En este método se mide la resistencia total entre el electrodo o puesta a tierra por medir, y un electrodo auxiliar; el valor medio en ohmios es el deseado. Debido a características propias de la medición, este método es aplicable para sistemas de puestas a tierras pequeños. Se implementa solo donde no se requiere con mucha precisión el valor de resistencia.

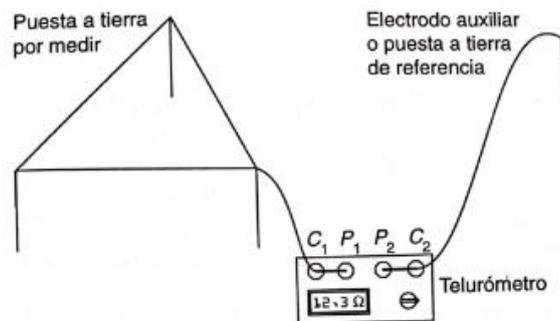


Ilustración 11. Esquema de medición método de los dos puntos

Fuente: Fundamentos de ingeniería de las puestas a tierra. Pág. 63.

4.2.2.1.4. Método de los tres puntos. Este método, consiste en medir la resistencia de tierra; aumentado cada vez la profundidad de la medida separando los electrodos una mayor distancia para cada medida. (Cardona Torres & Acuña Herrera, 2000). El método también incluye el uso de dos electrodos auxiliares, cuyas resistencias a tierra se designan como r_2 y r_3 , mientras que la del electrodo bajo medición se designa como r_1 . Como lo plantea en el libro fundamentos e ingenierías de puesta a tierra, se recomienda r_1, r_2 y r_3 sean de la misma

magnitud. Este método no estandariza una ubicación precisa de los electrodos, de tal forma que pueden estar situados en cualquier lugar del terreno donde se realice la medición, respetando sí unas separaciones mínimas entre electrodos.

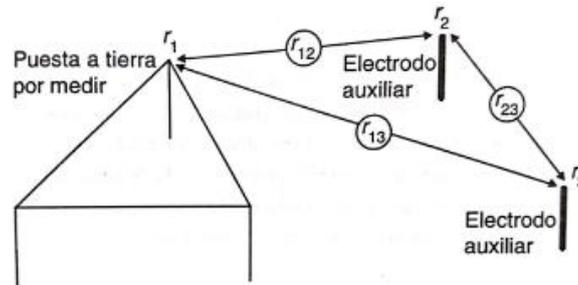


Ilustración 12. Medición de puesta a tierra con método de los tres puntos.

Fuente: IDEM

De la disposición anterior resulta la siguiente ecuación $r_1 = \frac{r_{12} - r_{23} + r_{13}}{2}$. Para efectos prácticos, las normas realizan la recomendación de la distancia de los tres electrodos sea de por lo menos 5 m y preferiblemente de 10 m o más.

4.2.2.1.5. Método de la caída de potencial. Este método posee varias modalidades y es aplicable a cualquier tipo de medición de impedancia de puesta a tierra. Este método consiste en pasar una corriente desde la puesta a tierra hasta un electrodo de corriente puesto en tierra remota y medir la diferencia de potencial entre el electrodo bajo medición y el electrodo de potencial. La relación entre la diferencia de potencial y la corriente da una resistencia de puesta a tierra. Los tres electrodos deben estar alineados.

El electrodo de potencial, es situado inicialmente en cercanías de la puesta a tierra a medir, y posteriormente se desplaza gradualmente en dirección del electrodo de corriente en línea recta a este; en este trayecto se realiza un registro de mediciones de resistencia. Con los valores obtenidos, se grafican estos versus la distancia que recorrió el electrodo de potencial, en el valor donde se estabiliza la curva, se toma como valor de resistencia de puesta a tierra.

4.3. Tensiones

La norma colombiana RETIE en el capítulo 15, versículo 4, manifiesta que para todo buen diseño de puesta a tierra debe reflejarse en el control de las tensiones de paso y de contacto.

4.3.1. Tensión de paso. Se define como la tensión a que quedaría sometida una persona al dar un paso mientras se está inyectando corriente en el área en que se desplaza, dados los gradientes de potencial en la superficie del suelo. Esta se origina cuando los pies cierran circuito a través del cuerpo, entre puntos a diferente potencial. Se puede indicar de manera breve, que la tensión de paso es aquella que se aplica al cuerpo cuando los pies se encuentran a una distancia de aproximadamente 1.0 m, cuando se disipa corriente a tierra en los alrededores (Empresas Publicas de Medellín, 2011); en la figura siguiente se ilustra lo anteriormente expresado.

4.3.2. Tensión de contacto. Cuando durante una inyección de corriente a tierra una persona hace contacto con una superficie metálica puesta a tierra que estará a un potencial igual al de la máxima elevación del potencial a tierra de la malla de puesta a tierra, mientras está parada en un punto del suelo, que estará a un potencial menor, queda sometida entre el punto de contacto (probablemente su mano) y el punto de apoyo en el suelo (probablemente sus pies) a una tensión de contacto; por lo tanto, se puede decir de manera resumida, que la tensión de contacto es aquella que se aplica al cuerpo al tocar un equipo puesto a tierra, estando parado en el suelo, cuando se disipa corriente a tierra en las cercanías. (Empresas Publicas de Medellín, 2011). En la figura a continuación se detalla la forma de tensión.

4.3.3. Tensiones transferidas. Son tensiones de contacto que aparecen en puntos apartados de la malla de tierra, debido a trasferencia del sistema a través de un medio, como cables de control, neutros de baja tensión, entre otros.

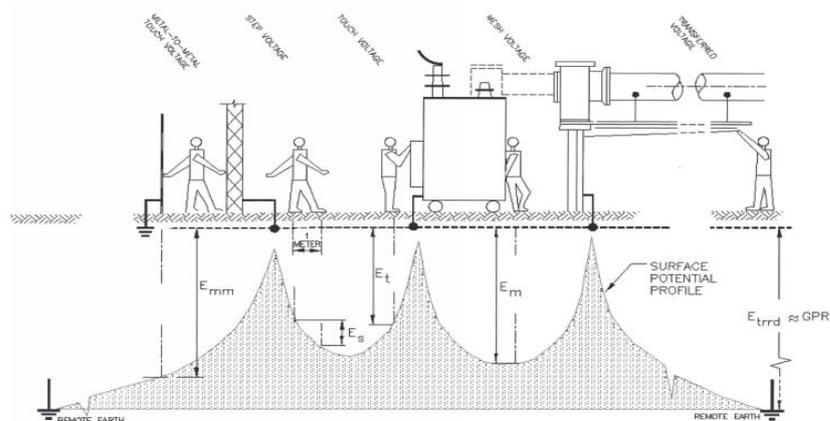


Ilustración 13. Tensión de paso y contacto.

Fuente: IEEE80

4.3.4. Consideraciones finales de los sistemas de puestas a tierra

Como se ha hecho mención en el desarrollo del trabajo, las precipitaciones en Colombia están dadas por la situación geográfica del territorio colombiano, favoreciendo el desarrollo de nubosidad y lluvias que inciden directamente en el origen de las descargas atmosféricas que, para objetos de este escrito, son el principal factor los cambios repentinos en las variables eléctricas de los SPT. Estas descargas eléctricas naturales, traen consigo elevadas corrientes eléctrica de alta frecuencia, del orden de 1 MHz. Además de los efectos de inducción y de sobretensiones, provoca los mismos efectos que toda corriente de alta frecuencia cuando circula por un conductor o medio, esos efectos se desarrollaran de manera más clara en el contenido a continuación.

Es importante nuevamente mencionar, que los sistemas de puesta a tierra que se analizarán son aquello que se diseñan y construyen para garantizar la operatividad permanente en los tendidos eléctricos aéreos, esto debido a su facilidad de colisión con los rayos. Por ello a lo largo de este contenido, se desarrollaron temáticas que confluyen en los SPT sin importar la frecuencia del sistema en el cual esté inmerso, las características del suelo, métodos de medición, las variables eléctricas, entre otros.

De lo anterior se logra inferir que los diseños actuales de los sistemas de puestas a tierras, no prevén en su totalidad las consecuencias que generan los impulsos repentinos de altas frecuencias generadas por las descargas eléctricas naturales, ni tienen en cuenta todos los parámetros que influyen en el diseño del sistema para este tipo de comportamientos; por ello los esbozos y simulaciones comprende solo las frecuencias industriales, buscando mitigar principalmente las tensiones de paso y contacto.

Es por ello que en el contenido que se desarrolla a continuación, se pretende ilustrar los efectos transitorios que impactan sobre los sistemas de puesta a tierra cuando en este incide una descarga atmosférica, especialmente las variaciones repentinas y momentáneas que sufre la impedancia del SPT; generando esta grandes valores de tensiones de paso y contacto, aunque este último sea más predominante en las frecuencias industriales, sin embargo, las altas frecuencias ocasionadas por las DA de igual manera, producen desgastes en los aislamientos de los conductores, detrimento de los suelos artificiales o tratamientos a los suelos.

4.4. Efectos de alta frecuencia en los sistemas de puesta a tierra

Como ya se ha hecho mención en lo desarrollado hasta momento en el presente trabajo, las altas frecuencias que se originan con las descargas atmosféricas, y colisionan generalmente sobre las redes eléctricas aéreas, generan un comportamiento distinto en los componentes del SPT que ocasionalmente se evidencia en las bajas frecuencias de 50 y 60 Hz. Muchas veces los diseñadores de este sistema de protección, obvian estas condiciones, lo cual puede ser causal de fallas, llevando a constantes salidas de línea perjudicando la fiabilidad del servicio eléctrico, de igual forma generan grandes tensiones de paso y contacto. Esto es debido a que los esbozos no prevén el aumento de la impedancia ante una descarga atmosférica.

En este capítulo de la monografía, se referencian múltiples aportes de estudiosos que se han encargado de demostrar ese comportamiento diferente de los componentes de los sistemas de protección de fallas a tierra, ante estos niveles súbitos de tensión y corriente con altas frecuencias de impulso.

Muchos autores han hablado acerca de la impedancia como factor principalmente afectado ante el poder del rayo, mientras otros se enfocan en demostrar otras teorías, las cuales nos conllevan a pensar en un nuevo modelo de cálculo de sistemas de puesta a tierra.

Estos modelamientos son acompañados por herramientas computacionales para los cálculos propicios, estas, también son grandes aportes que ha dejado la investigación de estos autores para dar solución a la dispersión de las corrientes cuando se tienen grandes impedancias.

Colombia ha tenido una participación profunda en estos nuevos conceptos de los sistemas de puesta a tierra vistos desde la alta frecuencia, las universidades han encaminado a sus investigadores aportar acerca de ello. La Institución Universitaria Pascual Bravo, no es ajena a este conocer y es a través de esta monografía investigativa que pretende aportar a este nuevo tratado, generando a partir del mismo los cimientos investigativos en el comportamiento de los SPT ante impulsos de alta frecuencia.

Es también objeto de este capítulo, las posibles formas constructivas de los sistemas de puesta a tierra, basados en las características de las altas frecuencias.

4.4.1. Impedancia

La impedancia es la única propiedad eléctrica inherente a todos los materiales o componentes eléctricos, y describe la oposición que ofrecen al paso de la corriente alterna, a una frecuencia dada. Se define, a partir de la ley de Ohm, como el cociente entre la tensión aplicada a una material, componente o circuito y la corriente resultante (Areny, 2006).

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{V_p \text{sen } \omega t}{I_p \text{sen } (\omega t - \theta)}$$

Con la evaluación de la impedancia, se puede concebir la idea sobre los comportamientos de los sistemas de puestas a tierra ante la inyección de descargas de alta intensidad de corriente y de muy corta duración; dichas características de los rayos. Por ello es importante determinar algunos conceptos de las impedancias.

Impedancia transitoria: es el valor de la impedancia calculada como razón entre los valores instantáneos de la tensión y la corriente, durante un transitorio en un punto determinado del electrodo de tierra.

Impedancia de impulso: Esta dado por la razón entre los valores máximos de la tensión y de la corriente ante un impulso, en un punto del electrodo de tierra.

Factor de impulso o eficiencia de impulso: es la razón entre los valores máximos entre la impedancia de impulso y la resistencia de puesta a tierra a baja frecuencia.

4.4.2. Ionización del suelo

Al igual que la impedancia, otro efecto que infiere de manera directa sobre el comportamiento de los sistemas de puesta a tierra es la ionización del suelo, por ello los autores (Moreno Ospina, Valencia Velásquez, Cárdenas Agudelo, & Villa Acevedo, 2007) lo describen como el proceso de modificación del suelo y creación de plasmas en las vecindades de los electrodos de puesta a tierra, cuando reciben una inyección de corriente de altas densidades, como ocurre con las descargas atmosféricas.

Otros estudiosos proponen que es un proceso de iniciación eléctrico y comienzan cuando el campo eléctrico en los espacios entre los granos del suelo es lo suficientemente grande para ionizar el aire de los espacios entre ellos. De manera similar, se han propuesto que el proceso de ionización es térmico; es decir que cuando se es aplicado el pulso de tensión, la corriente comienza a fluir a través del suelo, fundamentalmente por el agua presente en las partículas que componen a este. La temperatura del agua comienza a incrementar por efecto Joule, su resistividad decrece ligeramente. Luego, debido a la no uniformidad en los niveles de calentamiento, ocurre una inestabilidad térmica y la corriente fluye por las regiones de alta temperatura y por estrechos canales. Al alcanzar el punto de ebullición el agua presente en estos canales, el fenómeno de ionización ocurre. (Mousa, 1994)

Estos conceptos cobran importancia para entender la construcción de los modelos que intentan conocer la iniciación de la disrupción o la distancia a la cual un arco o corrientes pueden propagarse en el suelo. A partir de estos, se concebirán los conceptos, forma, tipo, materiales, efectos y lo concerniente al fenómeno ocasionado por las descargas atmosféricas sobre los sistemas de puesta a tierra.

4.5. Flameo inverso

Los rayos que colisionan directamente sobre las líneas de transmisión son los que originan de manera frecuentes salidas de servicio. Cuando la DA golpea la torre, una parte de la corriente deciente a través de esta y la otra restante pasa a por los cables de protección. La corriente que fluye por la torre hasta el sistema de puesta a tierra, retornará en onda de voltaje resultante de manera reflejada hasta la parte superior de la torre, y su magnitud de penderá de la impedancia que encuentre la corriente en la zapata de esta. Un nivel de tensión suficientemente alto, puede sobrecargar las líneas por medio de los aisladores y como resultado de ello se dará un *backflashover* o fleo inverso (IEEE Standard, 1997)

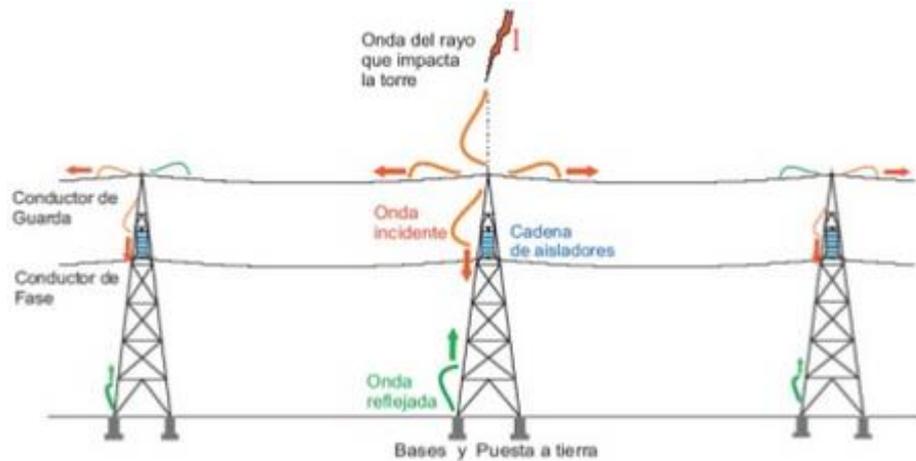


Ilustración 14. Diagrama flameo inverso.
Fuente: Transmission Line Grounding.

4.5.1. Longitud efectiva

El comportamiento de líneas de transmisión ante DA, especialmente en lo referente al mecanismo de flameo inverso, está fuertemente determinado por la impedancia de puesta a tierra de la torre. Se hace necesario un diseño del SPT de la torre capaz de descargar corrientes producidas por DA sin poner en peligro las personas que se encuentran en área cercana a la torre u ocasionar daños en equipos instalados. Es por ello, que un diseño idóneo de SPT para una torre debe entregar una impedancia de puesta a tierra de valores reducidos y a su vez con una distribución pareja de potencial sobre la superficie del suelo cercano.

Teóricamente en los suelos de alta resistividad, usualmente se realiza la instalación de electrodos horizontales denominados contrapesos, y que para bajas frecuencias presentan una baja impedancia de puesta a tierra. Lo que podría notarse, que para las frecuencias entre 0 hasta 100 Hz, la disminución de la impedancia se logra incrementando la longitud del electrodo.

En cuanto a las consideraciones de corrientes de alta frecuencia asociada a las descargas atmosféricas, un contrapeso presenta un comportamiento más confuso dado que su impedancia dependerá considerablemente de la frecuencia. Sus componentes capacitivos, inductivos y conductivos deberán representarse mediante un modelo que puede ser de parámetros distribuidos o concentrados. La naturaleza de la impedancia impulso dependerá

de la longitud del electrodo y parámetros característicos del suelo como resistividad y permitividad.

Para cada condición de resistividad del suelo y frecuencia, la impedancia de puesta a tierra mostrará un mínimo valor que define la longitud de un electrodo, por encima de la cual no se logra una disminución significativa de la impedancia de puesta a tierra. La longitud de este electrodo es denominada longitud crítica del electrodo o longitud efectiva del electrodo.

Para el caso de mallas de puesta tierra se habla de área efectiva o área crítica para aquella por encima de la cual no se obtiene una disminución significativa de la Impedancia de puesta a tierra.

En la imagen a continuación se puede observar el comportamiento de dos electrodos horizontales de tamaños corto y largo, ante una descarga de corriente tipo impulso. Se puede inferir, como el electrodo “a” logra drenar toda la corriente de descarga con la longitud de este, mientras que el electrodo “b” de manera similar evacua la descarga, pero a este le observa una pequeña parte de la longitud, la cual no interviene en el drenaje de la descarga. A lo anterior, se le denomina longitud efectiva.

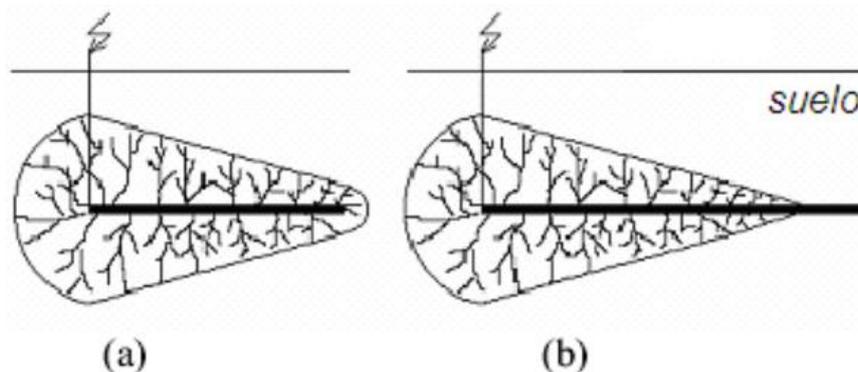


Ilustración 15. Longitud efectiva para un electrodo corto (a) y un electrodo largo (b)

Fuente: estudio de la longitud efectiva y los efectos de la ionización en la modelación de sistemas de puesta a tierra

Autores como Fabio Casas proponen una fórmula convencional y aplicable para el cálculo de la longitud efectiva de los conductores, esta se expresa a continuación (Segelectrica Ltda, 2010).

$$L_c = 50 - \frac{2}{2}(H - 15)[m]$$

Donde H es la altura de la torre.

4.6. Análisis del comportamiento de los sistemas de puestas a tierra inmersos en efectos transitorios

Continuando con las demostraciones de cambios en los parámetros eléctricos cuando se encuentran inmersos en picos instantáneos de corriente, se referencia una investigación realizada por estudiantes de la Universidad Nacional sede Medellín, que arrojó como resultado luego de realizar simulaciones con herramientas computacionales, el cambio brusco y repentino que la impedancia de un sistema de puesta a tierra cuando incide sobre ella alta frecuencia. Inicialmente para comprender los modelamientos, las teorías y los resultados obtenidos no solo por esta investigación, sino de las que a continuación se abordarán para demostrar dichas permutaciones en los comportamientos estudiados, el documento se enfoca en documentar de manera precisa información que permita conocer la forma en cómo se estructura y analiza dichos comportamientos en los elementos del SPT.

Fundamentados en el modelo Electromagnético Híbrido – HEM, que fue desarrollado por el centro de Investigación en rayos de la Universidad federal de Minas Gerais-Brasil, a lo largo de múltiples trabajos investigativos enfocados en estudios de comportamiento de elementos conductores ante efectos transitorios producidos por descargas atmosféricas – DA, se basa en las ecuaciones de Maxwell y de donde proviene el nombre de Híbrido dado que utiliza la teoría de circuitos para el balance de corrientes en los nodos de los conductores y cálculo de las tensiones nodales. (Olivera, 2001) (Visacro, 1992).

De forma resumida, la implantación del HEM consiste en dividir en un número de segmentos cada conductor de la configuración a analizar, por lo que existirá un acople entre cada uno de los segmentos y cada segmento consigo mismo, lo cual dará a la formación de una matriz de impedancias longitudinales y una matriz de impedancias transversales, las cuales son matrices cuadradas de tamaño $n \times n$. De forma ilustrativa, se tiene un conductor recto con un voltaje definido de 1V como se muestra en la siguiente imagen.

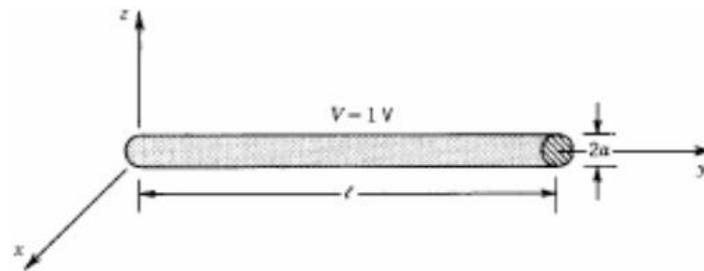


Ilustración 16. Conductor recto de potencial constante.

Fuente: Advanced Engineering Electromagnetics”, Constantine A Balanis

Si se divide el conductor en segmentos de igual longitud, podemos definir que el potencial de cualquier punto ubicado a lo largo del eje del conductor y producido por la distribución de carga superficial a lo largo de cada segmento, se puede expresar como la suma de las influencias que cada segmento tiene sobre el punto analizado. Donde la distribución de carga de cada segmento es uniforme, pero va variando de segmento a segmento, por este motivo la densidad de carga sólo depende de y' . Por lo tanto, a medida que se segmenta más el conductor la solución es más precisa y presenta menos error al momento de la realización de los análisis de los efectos variantes (Hernández & Castaño, 2007).

Gráficamente, el conductor segmentado se visualiza de la forma a continuación

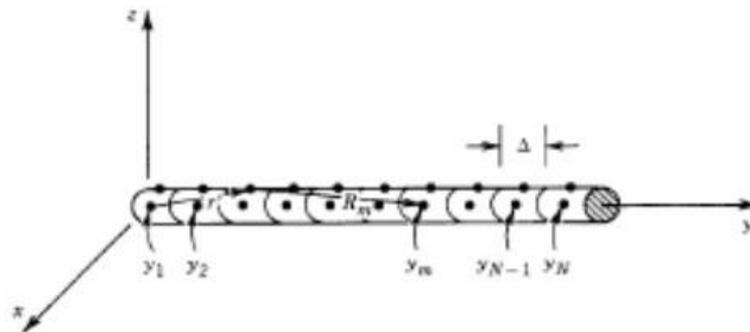


Ilustración 17. Conductor segmentado.

Fuente:Idem.

Retomando las investigaciones realizadas por las estudiantes de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, se relacionan a continuación una serie de análisis y los resultados obtenidos resultados que son el objeto de dicha monografía investigativa.

Análisis del comportamiento de electrodo horizontal con variación de la frecuencia

La simulación inicial de dicha investigación se realiza inicialmente como objeto de estudio el contrapeso con una inyección de corriente 1A, realizando variaciones de frecuencia desde

10Hz hasta 2MHz. Dicha simulación se realiza con la herramienta computacional UN_PAT, programa desarrollado por el Doctor en Ingeniería Johnny Montaña en el lenguaje de programación C++, que implementa el HEM.

Los parámetros contemplados para la simulación son los siguientes:

- material del conductor es cobre, por lo tanto, la conductividad es $\sigma = 5.8 \cdot 10^7$ siemens/m y la permeabilidad relativa es 1.
- El conductor es cilíndrico, con un radio de 0,01 m y longitud de 10m.
- El medio donde se encuentra el conductor es el suelo el cual tiene una permitividad relativa de $\epsilon_1 = 100$ y una resistividad $\rho = 100 \Omega / m$.
- El contrapeso se enterrará 0,5 m de profundidad con respecto a la superficie del suelo.

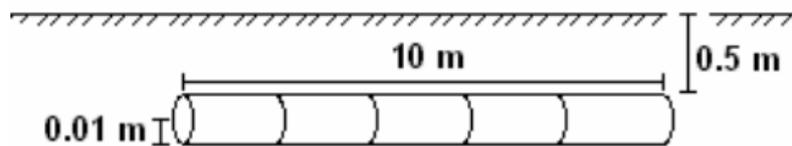
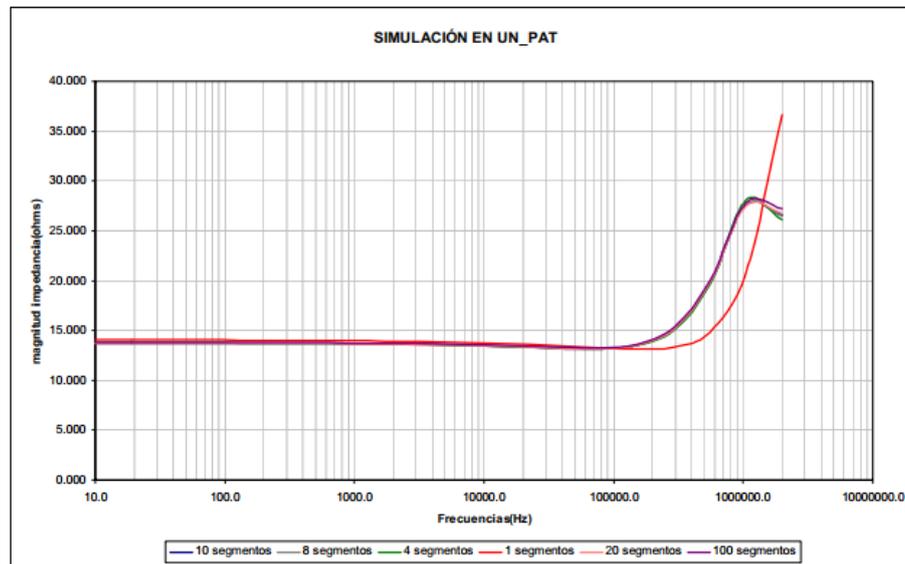


Ilustración 18. Segmentación del contrapeso.

Fuente: Tomado de TDG. Herrera y Cardona. UNAL. Pág. 24

El comportamiento de la impedancia simulados en el programa UN_PAT, se realizaron las simulaciones del contrapeso variando el número de segmentaciones para un rango de frecuencias, de lo cual se obtuvo valores de impedancias, dichos valores pueden ser revisados en Anexo 1 de este documento, de manera simular la representación gráfica de estos.

Gráfica 3. Perfil de la magnitud de la impedancia para diferentes segmentaciones del contrapeso.



Fuente: Tomado de TDG. Herrera y Cardona. UNAL. Pág. 24

Conclusiones a partir de la simulación anterior.

La frecuencia no es un parámetro determinante en la variación de la impedancia desde 10Hz hasta 100.000Hz aproximadamente, ya que la magnitud de la impedancia comienza en 14Ω cuando la frecuencia es 10Hz y permanece constante hasta 300Hz aproximadamente desde donde comienza a existir un decaimiento suave hasta 13Ω y la frecuencia es 100.000Hz

A partir de los 200.000Hz la impedancia crece hasta llegar al punto más alto (aproximadamente 27.8Ω - 28.3Ω excepto para el caso donde solo hay un segmento) y luego vuelve a decrecer (aproximadamente 26.6Ω - 27.1Ω excepto para 1 el caso de un segmento).

La segmentación es un parámetro importante para obtener cierto grado de exactitud en los resultados de impedancia.

Para las frecuencias menores a 100.000Hz se puede concluir que la magnitud de las corrientes para cada segmento es constante, esto se debe a que la impedancia en este rango de

frecuencias el efecto predominante es el resistivo, por lo que el efecto capacitivo e inductivo es despreciable a baja frecuencia.

Una de las conclusiones más importantes dentro de esta investigación y que lleva a la satisfacción y cumplimiento de los objetivos del presente escrito, radica en que a partir de un valor de frecuencia de 200 kHz aproximadamente, el valor de corriente en los 5 primeros segmentos disminuye, lo cual muestra que por el conductor no está circulando la corriente que debería ser disipada, esto se debe a que el valor de impedancia ha aumentado.

(Hernández & Castaño, 2007)

Análisis del comportamiento de electrodo vertical con variación de la frecuencia

Continuando con la investigación realizada en la tesis “comparación de metodologías para el modelado de sistemas de puesta a tierra en alta frecuencia”, se evalúa a continuación el comportamiento de los parámetros eléctricos en un electrodo vertical cuando se le es inyectada una corriente y es inmerso en variaciones de frecuencia.

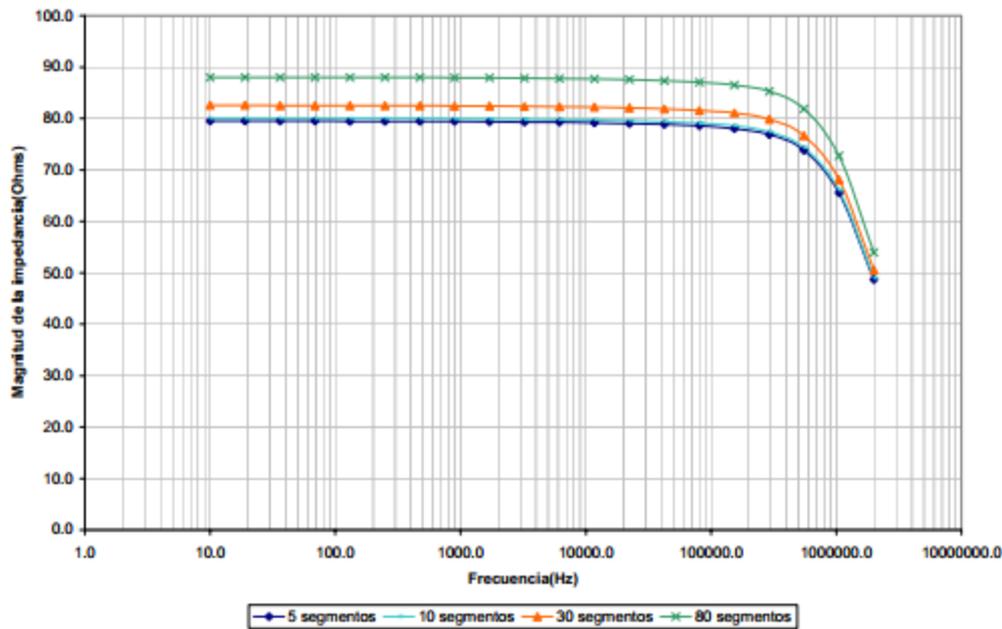
La varilla vertical tiene una longitud de 1m, con un radio de 0,01 m, la cual también dividida en diferentes números de segmentos y a la cual se le realizó inyección de corriente en el nodo inicial de coordenadas (0,0,0) con un valor de 1A.

Las características del medio y consideraciones, son las siguientes:

- El medio donde se encuentra el conductor es el suelo, el cual tiene una permitividad relativa de $\epsilon_1 = 100$ y una resistividad $\rho = 100\Omega / m$.

Como resultado se obtiene la siguiente gráfica

Gráfica 4. Variación de la impedancia con la frecuencia en electrodo vertical



Fuente: Tomado de TDG. Herrera y Cardona. UNAL. Pág. 26

De la gráfica anterior, se puede concluir que lo contrario a lo encontrado en el contrapeso, en la varilla de 1 metro de longitud el valor de impedancia disminuye a medida que aumenta la frecuencia. Se hace la aclaración que esto no sucede para todas las varillas, esto depende de la longitud de ésta y de los parámetros del medio en que se encuentra inmersa.

Análisis del comportamiento de una malla de puesta a tierra con variación de la frecuencia

Esta investigación también analizó los efectos de las DA sobre los sistemas de puestas a tierra en configuración de “malla”. Encontrando resultados significativos que conllevan a realizar propuestas de nuevos modelos de cálculos y diseños de estas protecciones.

Dichos resultados se referencian a continuación, teniendo las siguientes condiciones iniciales

- El conductor utilizado será de cobre, cilíndrico, con un radio de 0.01m, cada conductor tendrá una longitud de 10 m, su conductividad es $\sigma = 5.8 \cdot 10^7 \Omega/m$ y su permeabilidad relativa es de 1.

- El medio donde se encuentra el conductor es el suelo el cual tiene una Permitividad relativa de $\epsilon_1 = 100$ y una resistividad $\rho = 100 \Omega/m$
- La “malla” se encuentra a 0,5 m de profundidad con respecto a la superficie del suelo.

Como se realiza en las simulaciones anteriores, los conductores que conforman la malla se encuentran dividido en diez segmentos. Los nodos de la malla están determinados e la siguiente manera:

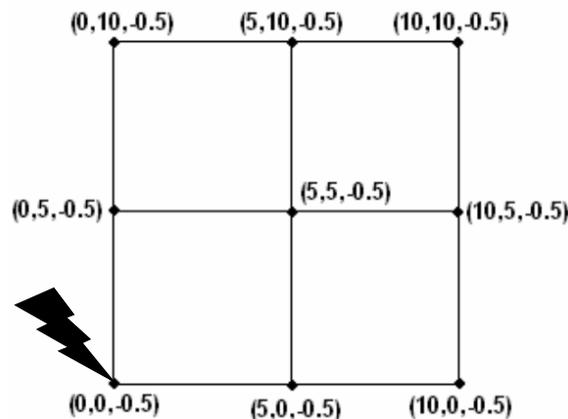


Ilustración 19. Configuración de la malla. Nodo de inyección de la corriente (0,0-0,5)
Fuente: Tomado de TDG. Herrera y Cardona. UNAL. Pág. 27

De los resultados encontrados, se puede concluir que para valores de resistencia de la malla de hasta $15,6 \Omega$ en alta frecuencia, mientras que para una frecuencia a 60 Hz a la cual se realiza los diseños de las puestas a tierra se puede obtener un valor de 5Ω . Este incremento de la impedancia debido a las altas frecuencias, no se prevé en los diseños de SPT (Hernández & Castaño, 2007).

Efectos de las descargas atmosféricas en las torres eléctricas

Es importante resaltar que garantizando la construcción de un sistema de puesta a tierra adecuado, al momento presentarse un impacto de rayo sobre la torre o cable de guarda, esta deberá drenar toda la descarga a tierra de manera rápida y evitar flameo inverso y por consecuencia la salida de la red; aumentando la fiabilidad del sistema eléctrico. Es por ello, que estudiantes de la Universidad de Antioquia, realizaron una investigación donde

analizaron el comportamiento y los efectos que tienen las descargas atmosféricas sobre las torres eléctricas, esto infiriendo directamente sobre el sistema de puesta a tierra de la misma. En la ilustración a continuación, se demuestra el diagrama equivalente de impedancias que se considera la torre para los respectivos análisis.

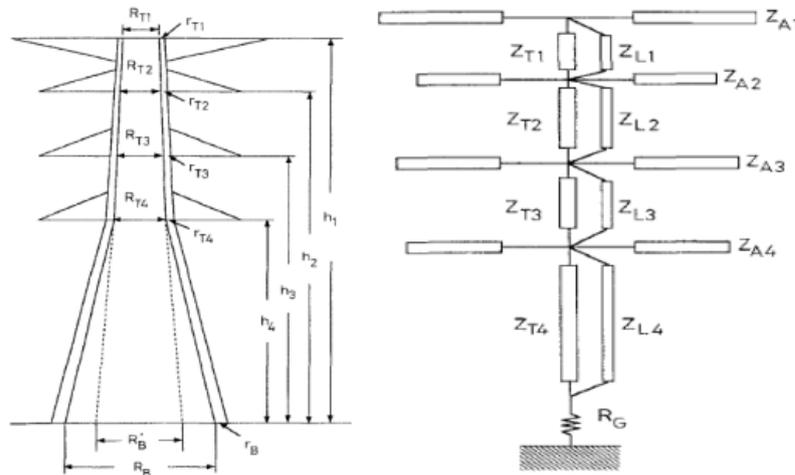


Ilustración 20. Esquemático de la torre.

Fuente: practical method for evaluating ground fault current distribution in station, towers and ground wire.

La investigación se realiza primeramente analizando la torre de manera independiente a su SPT, conservando la metodología ya conocida mediante la segmentación por HEM. Para este caso, se realiza la segmentación de la torre y se expone a una inyección de corriente a baja frecuencia y alta frecuencia, esto arroja como resultado que las altas frecuencias, afectan de manera significativa el valor de la impedancia de torre misma teniendo como consideraciones variaciones en la altura y tomando la construcción de la torre como cuerpo cilíndricos simples; en la tabla siguiente se evidencian esos cambios bruscos que sufre la impedancia a causa de las descargas atmosféricas. La información adicional para la interpretación de la tabla, se encuentra en el anexo 2 de este documento.

Tabla 3. Valores de impedancia en respuesta a la frecuencia

Caso	Zimpulso	Zbaja frecuencia	Zalta frecuencia
CG1A1	112.59	160.9	311.6
CG1A2	125.43	160.9	391.0
CG1A3	125.52	160.9	392.0
CG1A4	141.6	160.9	717.5

Fuente: adaptación realizada por autores

De esta manera se logra concluir que la impedancia se aumenta súbitamente a causa de la corriente que la atraviesa al notar cambios en la forma de los conductores, en su dirección y las uniones de la torre. De manera similar al analizar la torre con su sistema de puesta a tierra, la impedancia sufre cambios ante impulsos repentinos de alta frecuencia, pero a su vez esta investigación propone ciertas configuraciones de SPT para controlar la impedancia para altas frecuencias con valores de resistividad de terminados (Murcia, 2012).

Para comprender de manera más acertada la forma en cómo se concibe la impedancia en la torre y en su sistema de puesta a tierra, tal como se ilustró en la figura anterior (ilustración 20); se puede decir que la impedancia de la puesta a tierra consta de cuatro partes: la impedancia de unión en los cables, la impedancia de los conductores de conexión a tierra, la resistencia existente del contacto entre los conductores de conexión a tierra y el suelo, y la distribución resistencia a tierra remota (Jinliang & Zeng, 2006). La primera y segundas consideración, puede ser muy pequeña y desconsiderada para los cálculos, sin embargo, la tercera altamente ignorado en los cálculos de diseños. Donde este puede llegar a poseer un valor de resistencia muy alto cuando se está inmerso en suelos pedregosos o granulares.

En una investigación similar sobre los cambios en la impedancia a causa de las descargas atmosféricas realizada por algunos investigadores, demuestra que una vez más ese aumento súbito de este Z , ante variaciones de la frecuencia. En esta investigación analizan dos tipos de torres, a las cual no solo se estudian el incremento en la impedancia, sino los picos de tensión reflejados posterior a la reflexión de la onda; esto ratifica lo ya expuesto acerca del flameo inverso (Rondon, y otros, 2005).

En las imágenes y gráficas a continuación, se ilustran los tipos de torres analizados en dicho estudio y los valores de impedancia y tensión variantes con respecto a valor alta frecuencia inducida. Es importante resaltar, que las gráficas de tensiones, los picos de voltaje no contemplan los niveles de tensión para el análisis y además de ello, se consideran tres vanos a los costados de cada torre estudiada.

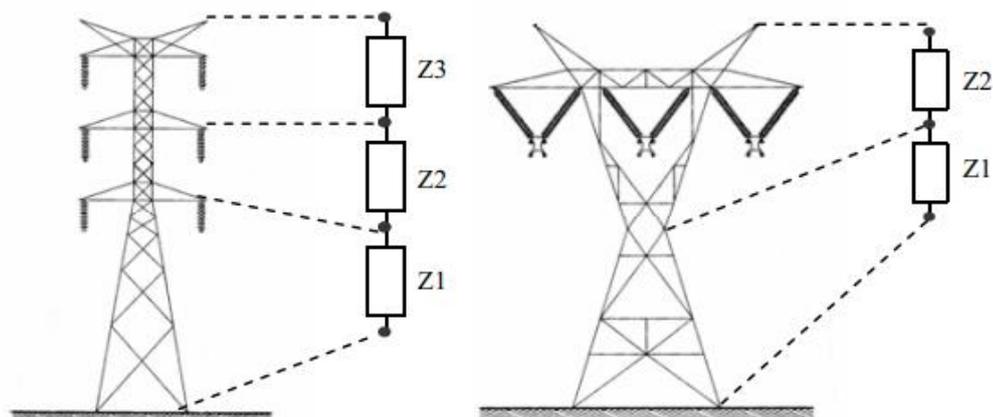
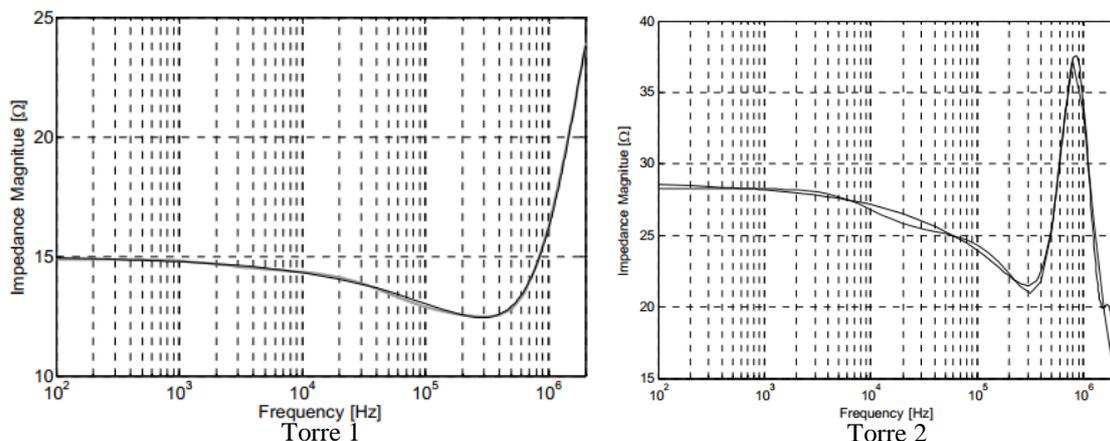


Ilustración 21. Modelo de impedancia de torres

Fuente: modelación de transitorios electromagnéticos en torres de transmisión a partir de respuestas en altas frecuencias.

Los valores de $Z \{\Omega\}$ para cada una de las torres, están representados con los siguientes; para T1 se tiene $Z1$ 226.81, $Z2$ 263.64, $Z3$ 278; mientras que para la T2 se tiene valores de $Z1$ 211.85, $Z2$ 241.38.

Gráfica 5. Respuesta de frecuencia en torres T1 y T2.



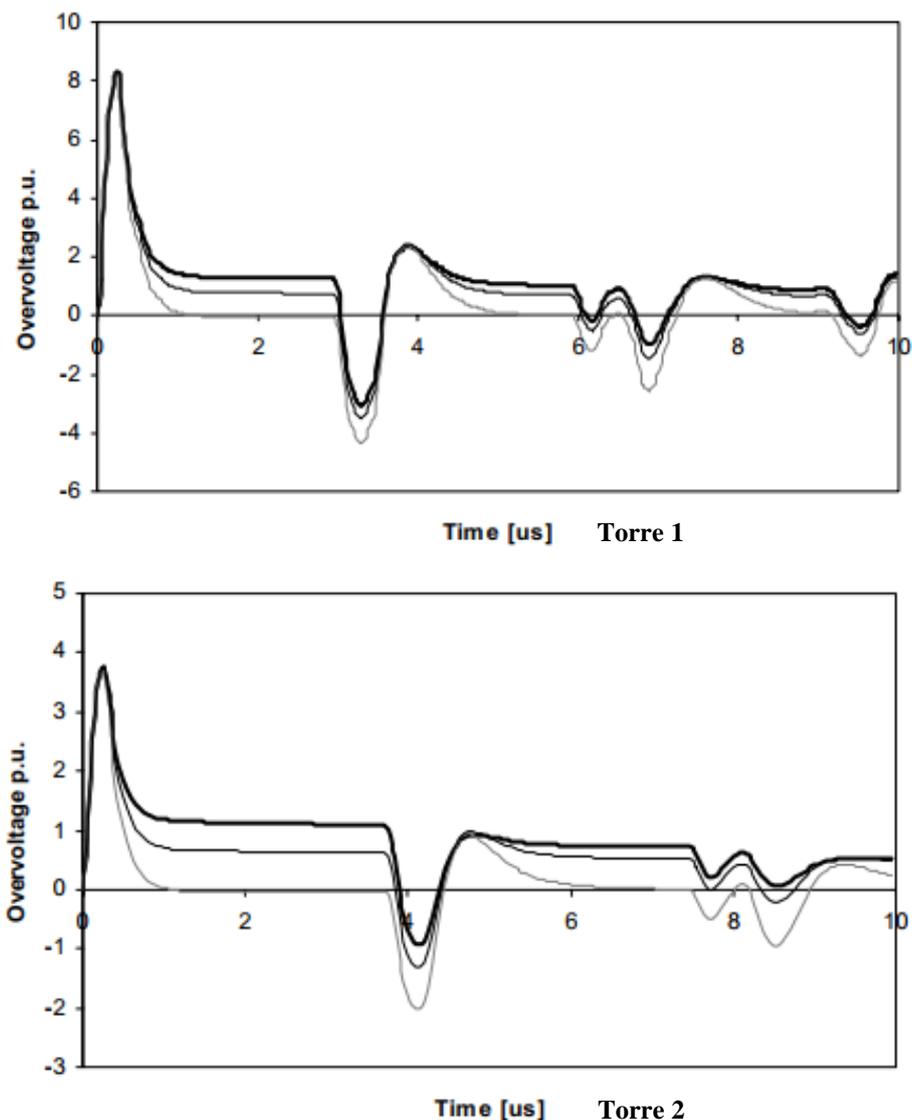
Fuente: ídem

En la interpretación de la gráfica, se observa cómo se presenta un incremento en el valor de la impedancia, ante los aumentos de los valores de la frecuencia. Concepto que se ha demostrado variante a lo largo del desarrollo de esta investigación.

De manera adicional, las gráficas siguientes muestran los niveles de tensión en las líneas, para la T1 se referencia en la línea superior, mientras que para el caso de la T2, se referencian los

niveles de tensión en las línea izquierda y derecha. Lo anterior evidencia el efecto de las altas impedancia, lo cual no permite disipar los de manera eficiente las DA en el suelo, lo que crean ondas remanentes de tensión, las cuales retornan a las cuerdas de transmisión ocasionando posibles salidas de línea.

Gráfica 6. Variación de la tensión ante diferentes valores de frecuencia en T1 y T2.

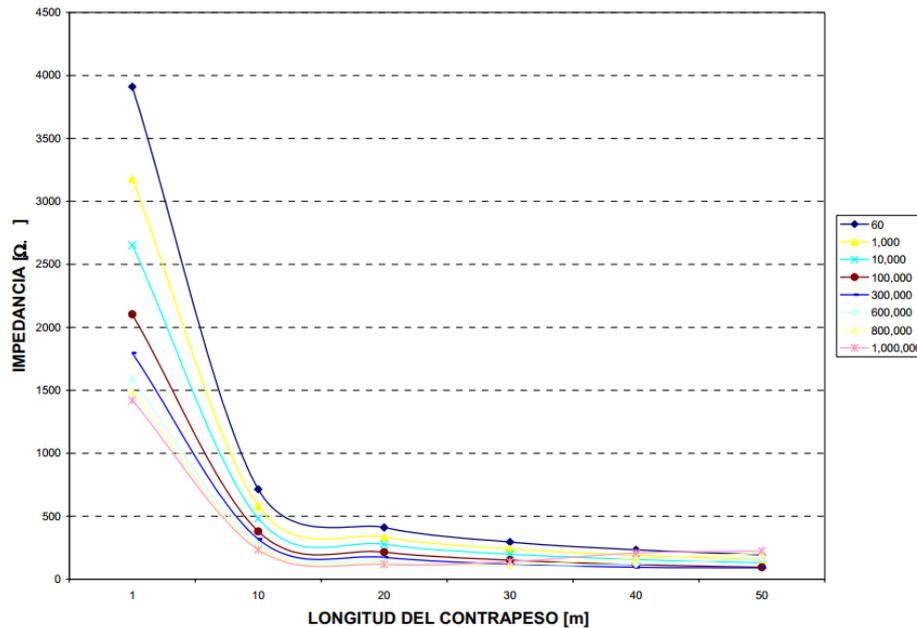


Fuente: ídem

Continuando con los antecedentes de los efectos que generan los impulsos repentinos de las DA que emergen altas frecuencias en los sistemas de puestas a tierra, se tiene que una investigación realizada por estudiantes de ingeniería eléctrica de la universidad de Antioquia sede Medellín en el 2005, describe que los contrapesos, son elementos de uso común en terrenos de alta resistividad esto, para disminuir la impedancia de la puesta a tierra, los

cuales permiten efectividad de descarga o drenaje en todas las frecuencias, permitiendo reducciones de hasta el 90% en los primeros 15m de conductor. Sin embargo, la adición de extensión o longitud de este, no se traduce en una reducción significativa de la impedancia, sobre todo ante las altas frecuencias, en donde el contrapeso ve incrementado su efecto inductivo debido al aumento de esta longitud (Barrieto, Córdoba, & López , 2005).

Gráfica 7. Impedancia VS longitud del contrapeso.



Fuente: estudio de la longitud efectiva y los efectos de la ionización en la modelación de sistemas de puesta a tierra.

Referenciando otro aporte encontrado en la misma investigación, se tiene que en terrenos cuya resistividad del suelo es baja, las altas frecuencias tienen un efecto opuesto a lo que ocurre en bajas frecuencias, ya que una vez se supera la longitud de 15 m, la impedancia muestra una leve tendencia al aumento; aportando también en resultados del aumento de la impedancia ante impulsos repentinos de alta frecuencia. Adicionalmente, se demuestra como el incremento en la longitud eleva el efecto inductivo del contrapeso conforme se aumenta la frecuencia, mostrando una tendencia claramente inductiva para contrapesos que superan los 15 m.

A su vez, esta investigación también realiza aportes en las áreas efectivas de una “malla” de puesta a tierra considerando que los suelos que tienen una baja resistividad es decir $50 \Omega \cdot m$, y en lo que se puede considerar baja frecuencia entre 60 -10000 Hz; el aumento del área del

sistema de puesta a tierra, garantiza una reducción apreciable en la impedancia configuración tipo cuadrado. Este comportamiento, a partir de los 100 m² comienza a tener un descenso menos pronunciado, debido en parte a la saturación que presenta el conductor, imposibilitando una rápida y efectiva evacuación de la corriente. Por otra parte, conforme la frecuencia se incrementa, la impedancia de puesta a tierra adquiere un valor casi constante a partir de un área de aproximadamente 20 m², tomando esta área como la efectiva para la condición del terreno en estudio.

Así mismo, se realiza la simulación y análisis a la misma configuración, incrementando la resistividad del terreno alrededor de los 1 k Ω .m, lo que arroja como resultado una impedancia casi constante oscilante entre 20 y 50 Ω a partir de los 100 m², con lo que se puede considerar como área efectiva para esta configuración en este tipo de terreno.

Por otra parte, una investigación realizada por el Dr. J Montaña y otros, acerca de la longitud efectiva en los contrapesos afirman que, para los terrenos húmedo y seco, la distribución de corriente es lineal a baja frecuencia y no depende de la longitud del conductor, mientras que para valores en alta frecuencia (2 MHz) en el suelo tipo húmedo a partir de 30 m la corriente en el conductor es prácticamente cero, debido a que en los primeros metros se dispersa toda la corriente en el terreno. Para el terreno tipo seco a partir de 80m la corriente es muy cercana a cero. Dado lo anterior, se concluye que dependiendo el tipo de terreno las longitudes de conductor a partir de las cuales no se obtiene una disminución del valor de impedancia son entre 30 y 80m, siendo las menores longitudes aquellas en terrenos de baja resistividad (Montaña, Salazar, Rondón, & Vargas, 1999). Como resultado importante de esta investigación se puede extraer que, para un diseño ideal de un sistema de puesta a tierra, se deben tener en cuenta las características del terreno y definir con base en esto cuál es la máxima longitud de conductores horizontales que se puede utilizar, con el fin de evitar uso de material extra que no contribuya a mejorar el desempeño del SPT. Dichas longitudes pueden estar entre 30 y 100 m.

Colombia es un territorio rico en sales y minerales, lo que podría decirse que posee terrenos propicios para realizar sistemas de puestas a tierras óptimos, esto sin necesidad de realizar tratamientos a sus suelos. De acuerdo a esta elaboración monográfica, el territorio

nacional posee altos niveles cerámicos, debido a su prestigiosa ubicación geográfica y la riqueza de sus suelos; lo que conlleva a tener constantes descargas atmosféricas en el año. Si se unen estos dos conceptos de riqueza mineral y descargas atmosféricas, podría explicarse el porqué del número elevado de las DA sobre la zona andina del país; y resultaría lógico pensar que un suelo donde yace infinidad de oro por mencionar uno de los minerales que se encuentran en esta región, son tan recurrentes dichos fenómenos. Emigrando al sistema eléctrico, se podrían diseñar y construir SPT de pequeñas dimensiones puesto que las descargas de los rayos serían drenadas de manera sencilla en estas condiciones.

Son estas descargas atmosféricas y los efectos que esta arrojan sobre los sistemas de puesta a tierra, los que nos permite pensar en nuevos parámetros diseños de estas protecciones, dado a que usualmente se obvian dichos comportamientos; evaluando solo las por las frecuencias industriales.

Al dejar de lado las altas frecuencias que son ocasionadas con las DA, se obvia el incremento súbito de la impedancia de puesta a tierra, permitiendo que enormes impulsos de corriente y voltaje no sean disipados rápidamente en el terreno.

Los estudiosos de los SPT, han convergido en la impedancia de puesta a tierra, que es lo más afectado ante las variaciones repentinas de la frecuencia. Lo que admite analizar de otra perspectiva los nuevos modelamientos de las protecciones de puesta a tierra, debido a que el aumento de Z en un SPT, puede ocasionar múltiples fallas en el sistema eléctrico, muertes entre otras; al no permitir la supresión de la descarga del rayo.

Las corrientes de reflexión, los altos niveles de tensión, la prevención de tensiones de paso, la ionización del suelo, lo que busca minimizar las puestas a tierras cuando se encuentren inmersos en altas frecuencias.

Como dato adicional y de forma contradictoria, los autores de este texto en su ejercicio laboral, han realizado múltiples medidas de resistividad del terreno para los diseños de puesta a tierra en varias zonas del departamento antioqueño, observando variaciones en las medidas de este. Particularmente, en el suroeste de dicho departamento, zona de extracción minera se cuenta con niveles de resistividad altos, alrededor de los 700 y 2000 $\Omega \cdot m$, lo que implica robustos diseños y construcción de puesta a tierra. Por lo anterior se entiende que en Colombia no existe un terreno uniforme en comportamientos eléctricos, por lo que es indispensable un buen estudio del suelo cuando se quiere realizar diseños de puestas a tierras.

Hasta el momento, el desarrollo de este trabajo se ha enfocado en el incremento súbito de la impedancia de puesta a tierra en función de R cuando esta está inmersa en efectos transitorios de alta frecuencia, sin embargo, otros autores plantean que Z no solo tiene comportamiento resistivo, sino también capacitivo e inductivo ante las descargas atmosféricas.

Como ya se hizo mención a inicios de este trabajo, las DA generan la ionización del suelo, Sin embargo, se ha demostrado que esta ionización no es instantánea: la resistividad del suelo disminuye con una constante de tiempo de aproximadamente 2 μ s. Este valor es bastante grande en comparación con las constantes de tiempo asociadas con la mayoría de los trazos posteriores negativos. Además, si se produce la ionización del suelo, siempre tendrá como consecuencia una reducción del potencial de terreno. De manera que el ignorar este fenómeno siempre da resultados conservadores.

Por estas razones, se debe considerar además los componentes lineales de la impedancia. Aunque diferentes autores divergen en la determinación de los valores de longitud por unidad de R, L y C, las discrepancias obtenidas suelen ser pequeñas con respecto a las aproximaciones introducidas para las variaciones estacionales de la resistividad del suelo o la falta de homogeneidad del suelo.

Las expresiones clásicas de R, L, C para una barra vertical y horizontal están expresadas a continuación y están dadas por el siguiente circuito. (CIGRÉ, 2006)

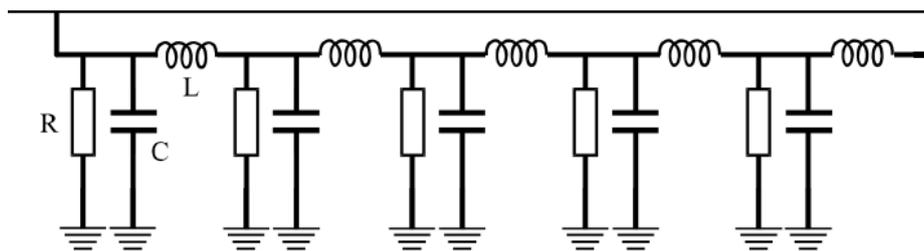


Ilustración 22. Modelo teórico de circuitos de un electrodo de tierra.

Fuente: Cigré.

Para electrodo vertical

$$R = \frac{\rho}{2\pi} A_1$$

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} A_1$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{A_1}$$

$$A_1 = \ln \frac{4l}{a} - 1, (l \gg a)$$

Para electrodo horizontal

$$R = \frac{\rho}{\pi} A_2$$

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} A_2$$

$$C = \frac{\pi\epsilon}{A_2}$$

$$A_2 = \ln \frac{2l}{\sqrt{a2d}} - 1, (l \gg a, d \ll l)$$

Donde

l es la longitud de la barra en m

a es el radio geométrico medio equivalente de la barra en m

ρ es la resistividad del suelo (se supone que es homogénea) en Ωm

$$\mu_0 = 4 \pi 10^{-7} H/m$$

ε es la permitividad del suelo (valor típico: $\epsilon = 10 \epsilon_0$ con $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} F/m$)

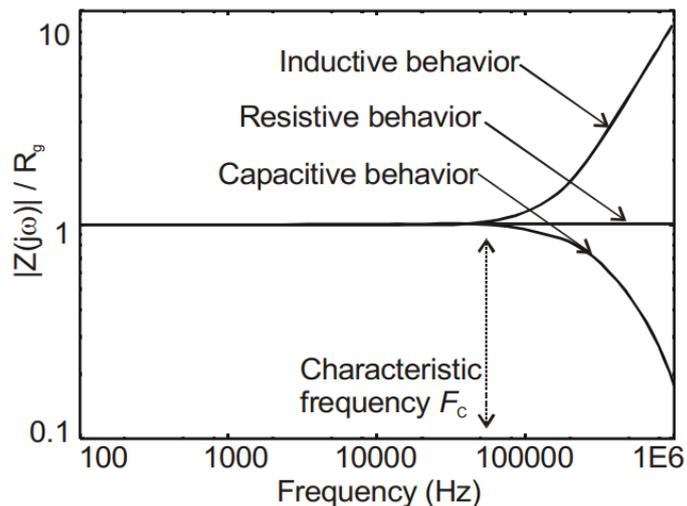
d la profundidad de enterramiento en m

La grafica a continuación muestra la dependencia de frecuencia típica de la impedancia a tierra. La figura muestra la relación del módulo de impedancia $|Z(j\omega)|$ y la resistencia de baja frecuencia a tierra R_g . Hablando en términos de circuitos, el comportamiento de conexión a tierra puede considerarse predominantemente capacitivo ($|Z(j\omega)|/R_g < 1$), resistivo ($|Z(j\omega)|/R_g = 1$) o inductivo ($|Z(j\omega)|/R_g > 1$).

Se pueden distinguir dos rangos de frecuencia: rango de baja frecuencia (BF), donde la impedancia es casi constante, es decir, independiente de la frecuencia, y rango de alta frecuencia (AF), donde la impedancia cambia con la frecuencia.

La frecuencia límite es una frecuencia característica F_c , que es más grande para las dimensiones más pequeñas del electrodo y más tierra resistiva y para el punto de descarga central.

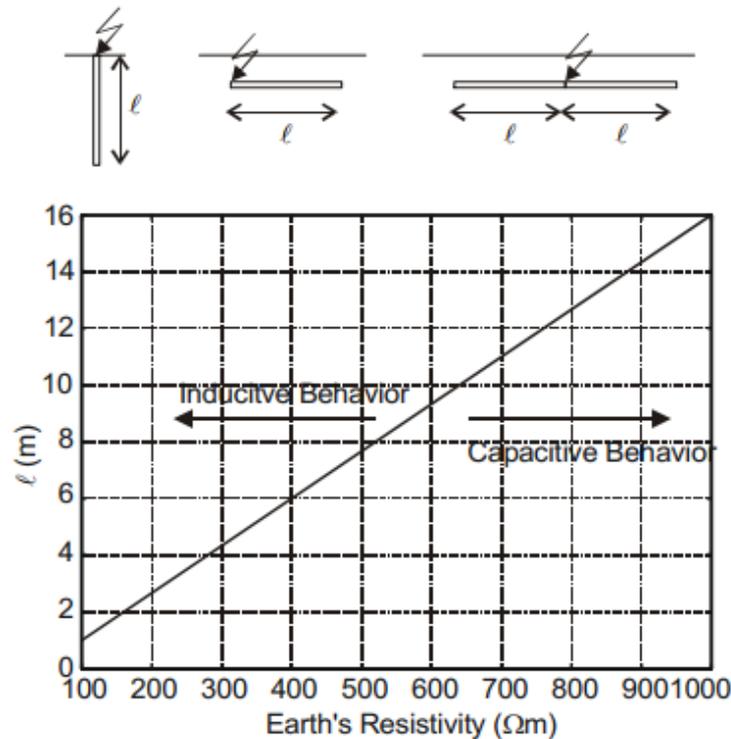
Gráfica 8. Frecuencia dependiente de la impedancia a tierra



Fuente: Crigé

De la gráfica anterior, se puede deducir que el comportamiento resistivo y capacitivo es ventajoso ya que la impedancia de AF es igual o menor que la resistencia de BF a tierra. Por lo general, el comportamiento capacitivo es típico de electrodos con dimensiones más pequeñas y en suelos altamente resistivos, y en otros casos el comportamiento del electrodo es en su mayoría inductivo. La figura a continuación muestra las regiones de comportamiento inductivo y capacitivo de las barras verticales y horizontales en función de la longitud, la resistividad del terreno y el punto de inyección de corriente.

Gráfica 9. Regiones de comportamiento inductivo y capacitivo de electrodos de puesta a tierra.



Fuente: Crigré

Es entonces que, para lograr minimizar la influencia del comportamiento inductivo, es más conveniente la utilización de electrodos pequeños. Sin embargo, en la práctica esto no siempre es posible, ya que, para dar satisfacción a los bajos niveles de resistencia de puesta a tierra en lo concerniente a bajas frecuencias, es necesario usar electrodos más largos.

Por otro lado, lo importante es el comportamiento dinámico de los electrodos de puesta a tierra sometidos a impulsos de corriente derivadas de las descargas atmosféricas. La importancia de esta radica en el comportamiento en alta frecuencia de estos, y dependerá contenido de frecuencia de los pulsos de la corriente del rayo, es decir, que el comportamiento de los electrodos de puesta a tierra en AF es más importante el comportamiento inductivo.

Por lo anteriormente expuesto, se debe pensar en nuevos conceptos de sistemas de puesta a tierra, lo que permita realizar diseños ajustados a las condiciones donde este será inmersa. Es por esto, en el capítulo a continuación se realiza un esbozo de buenas prácticas para el diseño de SPT contemplando los cambios súbitos de la frecuencia.

4.7. Pautas de diseño para sistemas de puestas a tierras considerando impulsos de alta frecuencia

Una vez analizados y referenciados los parámetros que impacta sobre los sistemas de puesta a tierra cuando esta se encuentra inmerso en impulsos transitorios de corriente en alta frecuencia a causa de las descargas atmosféricas, se pretende realizar un esbozo de buenas prácticas que lleven al diseñador de estos a converger un SPT idóneo para el terreno, la ubicación geográfica y demás criterios que infieren sobre estos diseños.

En el trabajo de recolección bibliográfica, pudo notarse que el principal factor que afecta las DA sobre los SPT, es la impedancia de puesta a tierra. Esta que, para efectos en altas frecuencias, es obviada de los diseños en esos sistemas de protección, pues como ya fue mencionado con antelación, dichos lineamientos solo comprenden frecuencias industriales.

Los múltiples investigadores citados en este trabajo monográfico, a través de simulaciones asistidas por una herramienta computacional coincidieron que a partir de frecuencias de 1 MHz la impedancia de los sistemas de puesta a tierra aumentaba considerablemente, influyendo directamente en el propósito u objetivo de este. Dicho incremento en la impedancia, genera que las corrientes elevadas provenientes de las descargas atmosféricas no sean drenadas con rapidez, formando grandes tensiones de paso, ionización del suelo cercano y picos de corrientes altos que ponen en riesgo principalmente a las personas y animales que se encuentran circundantes al foco de la descarga, de igual manera deja en riesgo la fiabilidad del sistema eléctrico al ocasionar posibles salidas de línea por medio de ondas reflejadas que dan origen al efecto de flameo inverso.

Para este capítulo se pretende desarrollar temáticas enfocadas al sistema de puesta a tierra en consideraciones de alta frecuencia, tales como el material para la construcción del SPT, el suelo, la modelación mediante software, tratamiento de tierra, mantenimiento y entre algunos otros factores que contribuyan al diseño ideal de un sistema de puesta a tierra inmerso en posibles impulsos transitorios de alta frecuencia.

4.7.1. Pasos principales para el diseño, construcción y verificación de un SPT

Debido a que mayoritariamente las descargas atmosféricas afectan a los sistemas de puesta a tierra de las torreas de líneas de transmisión, los criterios relacionados a continuación pertenecen a este tipo de sistemas de protección (Segelétrica Ltda, 2009).

4.5.1.1 Determinación de parámetros

- Determinar la resistencia de puesta a tierra objetivo.

El Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE en el numeral 15.4 del capítulo 15, sienta que un acorde diseño de puesta a tierra debe garantizar el control de las tensiones de paso, de contacto y transferidas. En razón a que la resistencia de puesta a tierra es un indicador que limita directamente la máxima elevación de potencial, pueden tomarse como referencia los valores máximos de la siguiente, la cual es adaptada de las normas técnicas IEC 60364-4-442, ANSI/IEEE 80, NTC 2050 y NTC 4552.

El cumplimiento de estos valores, no exonera al diseñador y constructor de garantizar que las tensiones de paso, contacto y transferidas aplicadas al ser humano en caso de una falla a tierra, no superen las máximas permitidas.

Tabla 4. Valores de referencia para resistencias de puestas a tierra.

APLICACIÓN	VALORES MÁXIMOS DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA
Estructuras y torrecillas metálicas de líneas o redes con cable de guarda	20 Ω
Subestaciones de alta y extra alta tensión.	1 Ω
Subestaciones de media tensión.	10 Ω
Protección contra rayos.	10 Ω
Punto neutro de acometida en baja tensión.	25 Ω
Redes para equipos electrónicos o sensibles	10 Ω

Fuente: RETIE

- Establecer las tensiones de seguridad permitidas.

Dentro de los requisitos generales del sistema de puesta a tierra, en marcados en el RETIE capítulo 15, numeral 15.1, establece que no se deben superar los valores dados en la Tabla a continuación que corresponden a la máxima tensión de contacto aplicada al ser humano (con una resistencia equivalente de 1000 Ω), la cual está dada en función del tiempo de despeje de la falla a tierra, de la resistividad del suelo y de la corriente de falla. Estos son los valores máximos de soportabilidad del ser humano a la circulación de corriente y consideran la resistencia o impedancia promedio netas del cuerpo humano entre mano y pie, sin que se presenten perforaciones en la piel y sin el efecto de las resistencias externas adicionalmente

involucradas entre la persona y la estructura puesta a tierra o entre la persona y la superficie del terreno natural.

Tabla 5. Máxima tensión admisible por el ser humano

Tiempo de despeje de la falla	Máxima tensión de contacto admisible (rms c.a.) según IEC para 95% de la población. (Público en general)	Máxima tensión de contacto admisible (rms c.a.) según IEEE para personas de 50 kg (Ocupacional)
Mayor a dos segundos	50 voltios	82 voltios
Un segundo	55 voltios	116 voltios
700 milisegundos	70 voltios	138 voltios
500 milisegundos	80 voltios	164 voltios
400 milisegundos	130 voltios	183 voltios
300 milisegundos	200 voltios	211 voltios
200 milisegundos	270 voltios	259 voltios
150 milisegundos	300 voltios	299 voltios
100 milisegundos	320 voltios	366 voltios
50 milisegundos	345 voltios	518 voltios

Fuente: RETIE

El anexo general, también establece que el diseñador de sistemas de puesta a tierra para centrales de generación, líneas de transmisión de alta y extra alta tensión o subestaciones, debe comprobar mediante el empleo de un procedimiento de cálculo, reconocido por la práctica de la ingeniería actual, que los valores máximos de las tensiones de paso y de contacto a que puedan estar sometidos los seres humanos, no superen los umbrales de soportabilidad.

En instalaciones de uso final con subestación tipo poste, el diseño de la puesta a tierra puede simplificarse, pero deben tenerse en cuenta los parámetros de resistividad del terreno, corrientes de falla que se puedan presentar y los tipos de cargas a instalar. En todo caso se deben controlar las tensiones de paso y contacto.

Particularmente en el departamento de Antioquia, el Operador de Red, estable unas configuraciones de sistemas de puestas a tierras, según la resistividad del terreno. Es importante mencionar que aun construyendo el SPT con la tipificación más robusta expuesta en la tabla 1 de dicha norma, no se logra obtener el valor mínimo de resistencia de puesta a tierra permitida por el RETIE de 20Ω . Esta norma también es clara en establecer que las configuraciones deberán emplearse en orden ascendente de acuerdo al valor de resistividad (R) obtenido de las medidas del suelo. En ningún caso debe emplearse una configuración más

allá del valor máximo de resistividad establecido en dicha tabla, por cuanto, no se garantizarán las tensiones de toque y paso permisibles para el ser humano. La tabla objeto se relaciona en el anexo 3 (EPM, 2011)

- Definir la temperatura máxima del ambiente.

- Calcular la corriente máxima de falla a tierra.

Esta debe ser emitida por el Operador de Red en media y alta tensión.

- Definir el máximo tiempo de despeje de la falla, esto para efectos de simulación.

- Revisión de planos de la instalación.

- Determinar el área disponible para construir puestas a tierra.

- Cálculo de la resistividad del terreno.

Unos de los criterios más importantes para el diseño y el dimensionamiento de los sistemas de puesta a tierra es el valor de la resistividad del terreno, por ello las mediciones realizadas para tal fin, deberán ser muy objetivas. Se vende tener en cuenta el tipo de terreno a evaluar, ya que de este dependerá el método correcto para tan medición. La selección del método correcto se encuentra plasmada en la sección métodos de medición de resistividad del terreno del este documento.

Particularmente mediante la implementación del método Wenner, es importante realizar medidas de resistividad en los ejes X y Y, con espaciamientos de 1, 2, 4, 6 para cada uno de los ejes; creando perfiles que permitan calcular de manera correcta la resistividad. Los diseñadores deben tener presente en eliminar o no tener presente al momento del cálculo, los valores medidos que se salgan del margen en el que se ha notado la medida. Esto para no crear errores en el valor más cercano a la resistividad relativa.

Tabla 6. Perfil de resistividad

PERFIL DE RESISTIVIDAD DEL TERRENO				
Eje X	Espaciamiento			
	1 (Ωm)	2 (Ωm)	4 (Ωm)	6 (Ωm)
Eje Y	Espaciamiento			
	1 (Ωm)	2 (Ωm)	4 (Ωm)	6 (Ωm)
Resistividad relativa (Ωm)				

Fuente: autores

Por otra parte, para implementación del método de 2 capas cuando el terreno no es homogéneo, se debe contar con herramientas informáticas y softwares especializados en este tipo de metodologías, para garantizar el valor más asertivo e idóneo para la correcta modelación del sistema de proyección.

Cabe precisar que las mediciones, tomas de muestras deben realizarse en el terreno donde se construirá el sistema de puesta a tierra, esto debido a las variaciones que pueden presentar el sitio. E no realizar dichas mediciones en el lugar exacto puede inducir a errores drásticos en la modelación.

- Seleccionar parámetros de rayos.

Se hace referencia en los parámetros del rayo para cada sitio en particular, donde se detalle la densidad de descargas a tierra, Nivel Cerámico, Corriente absoluta promedio y Corriente máxima, y luego realizar mediciones de resistividad aparente para modelar el suelo en dos o tres capas.

4.5.1.2. Diseño

- Recopilar las normas y programas necesarios.

En el desarrollo de esta gestión tecnológica, se puede concluir que los diseños de puesta a tierra previendo los riesgos y los comportamientos que puedan tomar los componentes de estos, no están estandarizados, como suele suceder con los diseños de SPT para frecuencias industriales. Sin embargo, todos los estudios de estos se realizaron mediante modelaciones implementando herramientas computacionales, las cuales permiten realizar estudios con amplios rangos de frecuencia y tensiones, al igual que la visualización del comportamiento de múltiples variables; llevando esto a importantes descubrimientos de estos fenómenos

eléctricos. El uso de dichas herramientas permite reducir de manera considerable el error en los cálculos, por lo que es indispensable contar con softwares que garantice un modelado correcto del sistema de puesta a tierra para impulsos transitorios. Programas de modelación para sistemas de puestas a tierra ante impulsos de alta frecuencia, se encuentran descritos en el desarrollo de este texto, algunas de estas herramientas son de uso gratuito y académico.

Aparte de una eficaz herramienta computacional, es importante contar con una buena base documental para el diseño de puestas a tierras y más cuando se realizan consideraciones de alta frecuencia originada por las descargas atmosféricas. Es preciso mencionar tal como se manifestó a inicios de este trabajo, aún no se tienen estandarizaciones para los diseños de puestas a tierras para consideraciones de efectos originados por las descargas eléctricas naturales, sin embargo, para esbozos preliminares se pueden considerar las normativas internacionales, nacionales, manuales y publicaciones para los diseños y construcción de sistemas SPT, entre las cuales están IEEE80, IEEE81, RETIE, TIERRAS soporte de la seguridad eléctrica, entre otros.

En referencia a sistemas de protección inmersos en altas frecuencias, se deben considerar para los diseños aportes de estudiosos en este campo; para la realización de este trabajo los autores se fundamentaron en textos como Teorías de puestas a tierras, fundamentos e ingeniería de las puestas a tierras en respuesta ante fallas eléctricas y rayos, como también publicaciones sustraídas de base de datos estandarizadas. Cabe resaltar, que los diseños, las simulaciones y las implicaciones que se requieran para la construcción de un SPT, siempre dependerá de las condiciones en las cuales esta estará inmersa.

- Definir geometría de la puesta a tierra.

De manera similar que el ítem anterior, al no tenerse normatizado la forma constructiva del SPT, no es posible definir una geometría del sistema de protección. Dichas variaciones dependerán de la ubicación de construcción, la condición de los parámetros eléctricos del suelo, el nivel isocerámico de la zona donde sea realizado el sistema de puesta a tierra, el correcto modelamiento, entre otros.

- Elegir el tipo de electrodo y su cantidad.

En el desarrollo del marco teórico, se logra demostrar que la mejor forma de contrarrestar los efectos negativos que introduce una descarga atmosférica en un sistema de puesta a tierra,

a causa del aumento súbito de la frecuencia, es mediante la implementación de electrodos verticales. Al mismo tiempo, algunos autores se requieren que la forma más efectiva para desaguar estas corrientes es mediante contrapesos o electrodos horizontales, de igual modo todos concluyen que el mejor diseño es la implementación de ambos tipos de electrodos.

La literatura enmarcada en este trabajo, resalta que, por cuestiones de costos en la construcción del sistema de puesta a tierra, es mayoritariamente práctico la predominación de electrodos horizontales, puesto que realizar enterramientos de electrodos verticales de 12 m tal como lo sugiere la norma IEEE80, se tiene impactos de coste elevados debido a los trabajos civiles que llevaría realizar dicho empotramiento de este. En vista de esto, en un SPT que se enfoque en disminuir la impedancia de puesta a tierra, tal como sucede en los SPT de las torres de transmisión, se implementan contrapesos teniendo en cuenta que para este se tiene longitudes efectivas que están entre los 60 m y 80 m.

Es por esto que, corroborando dicho anteriormente y basados en los estudios experimentales y de simulación consultados, se puede concluir que la mayor parte de la corriente del rayo es arrastrada o drenada por las partes extendidas del sistema de puesta a tierra, excepto en los primeros momentos de la carrera cuando la mayor parte de la corriente se descarga en el punto de descarga del sistema de puesta a tierra. Además de ellos, establece que el uso de múltiples arreglos de varilla de tierra mejora la eficiencia del impulso. Los electrodos horizontales son ligeramente menos efectivos inmersos en alta frecuencia en comparación con los electrodos verticales verticales, pero tienen una mejor eficiencia de impulso. Esto permite mencionar nuevamente que la mejor forma de contrarrestar el incremento súbito de la impedancia de puesta a tierra originadas por las altas frecuencias es mediante arreglamientos de electrodos horizontales y verticales.

- Definir profundidad de enterramiento del electrodo según el terreno.

La profundidad de enterramiento de los electrodos, bien sea horizontal o vertical, lo estable de la norma y se basa de acuerdo al criterio anterior. Para el caso de los contrapesos, y sustentados en la recopilación bibliográfica, estos son enterrados en zanjas de 0,75 m.

- Definir longitud de contrapesos y calcular calibre

La definición o selección de la longitud del contrapeso, como ya se observó, dependerá de un correcto modelamiento, lo cual permita obtener la longitud efectiva del mismo y así evitar el desperdicio de material y costos innecesarios. Indirectamente se infiere en la selección pertinente del calibre del conductor.

- Calcular resistencia de puesta a tierra.

La resistencia de puesta a tierra está directamente relacionada con la composición natural del suelo, es decir las características físicas y químicas, en otras palabras, que el suelo será de resistencia baja cuando sea altamente húmedo, con composición arcillosa y con un alto contenido de minerales conductores. Por el lado opuesto, presentará un alta resistencia de puesta a tierra cuando el suelo sea de composición seca y altamente rocosa, lo que se logra inferir que la resistencia de puesta a tierra puede variar con la época del año.

En relación con las líneas de línea de transmisión, en las practica estas cuerdas no tiene un valor constante de resistencia de puesta a tierra, sino que presenta una serie de valores según la localización de las distintas torres, por lo que, se deben realizar meticulosamente estas mediciones para cada torre (Ortíz, 2005).

4.7.2. Tipo de material

En la actualidad es muy común ver en especificaciones técnicas de diseño de líneas de transmisión errores en la selección de los materiales a ser utilizados para los sistemas de puesta a tierra ya que no toman en cuenta el tipo de suelo y el material de las bases de las torres. Dicho error puede causar la aceleración de problemas como la corrosión, con lo cual al estar en contante degradado y no cumplir con los valores de resistencia de puesta a tierra definidos durante el diseño de la línea, va a causar el aumento de la probabilidad de que ocurran fenómenos de descargas retroactivas provocando el aumento de salidas forzadas ocasionadas por DA, hasta el punto que de generar poca fiabilidad del sistema y desmejorando la calidad de servicio. Sin embargo, es importante precisar, que el comportamiento eléctrico del sistema no está supeditado a la erosión del material.

Como también otro factor que se debe considerar en la selección de material aparte de la corrosión, es la alta probabilidad de hurto que el material predispuesto tenga. Este flagelo es lo que conlleva analizar la implementación de diversas configuraciones y distintos tipos de materiales para la construcción de un SPT.

El Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – Retie, realiza algunas recomendaciones para los materiales utilizados en la construcción de los sistemas de puestas a tierras, dichas características se relacionan a continuación (Ministerio de Minas y Energía-MinMinas, 2013).

4.7.2.1 Electrodo

- La puesta a tierra debe estar construida por uno o varios de los siguientes tipos de electrodos: varillas, tubos, placas, flejes o cables.
- Se pueden usar electrodos galvanizados y, si se encuentran recubiertos en cobre.
- Los fabricantes de electrodos deben garantizar la resistencia a la corrosión del electrodo mínimo 15 años a partir de la fecha de instalación.
- En caso de usarse electrodos tipo varilla o tubo, la longitud de estos deberá ser mínimo de 2,4 m de longitud.

4.7.2.2. Conductores de puesta a tierra

- Cobre: estos conductores además de su alta conductividad, tiene una gran ventaja de ser resistentes a la corrosión bajo tierra.
- Acero cobrizado: usado para varillas enterradas y de manera ocasional para mallas.
- Aluminio: este es de uso menos frecuente, puede ser una solución propicia para S/E encapsuladas dado a la construcción de esta en aleaciones de mismo material, pero posee ciertas restricciones debidas a su fácil corroer para algunos suelos. Este tipo de material puede ofrecer un buen desempeño técnico comercial, siempre y cuando se use de la más alta pureza de sus aleaciones.
- Acero: se usa generalmente galvanizado para evitar la corrosión y se emplea en electrodos y conductores.

4.7.2.3. Uniones

Los SPT que inmersos en sus construcciones empleen uniones pernadas, de compresión manual o hidráulica y soldadura exotérmica, deben tener las siguientes consideraciones.

Además de ellos ser seleccionado y cumplir con los mismos requerimientos de los conductores del mismo sistema.

- Uniones pernadas, no son recomendables para instalaciones enterradas. Se corroen de forma rápida.
- Uniones a compresión, son de preferible utilización ante terrenos demasiado húmedo. Se recomienda compresión hidráulica. Estos como valor agregado, generan rapidez en la construcción de mallas robustas.
- Las conexiones que se realizan bajo en nivel del suelo, deberán ser con soldadura exotérmica.

5. Metodología

5.1. Tipo de estudio

El trabajo para obtener el título de ingeniero electricista de la I.U. Pascual Bravo, se desarrolló bajo modalidad investigativa de forma monográfica, en el cual se concertó con el asesor técnico y metodológico las fechas, horarios y reuniones en las que se planeó la metodología para el desarrollo de este.

5.2. Método

Para dar cumplimiento a los objetivos planteados, inicialmente se realizó una exhaustiva búsqueda bibliográfica concerniente a las temáticas enfocadas al trabajo en desarrollo. Este rastreo se orientó hacia temas como las descargas atmosféricas, de igual forma en la densidad de ésta en el territorio colombiano, incidencia del rayo en las líneas de transmisión, efectos causados por las descargas atmosféricas a los sistemas de puesta a tierra, comportamiento de los elementos del sistema de puesta a tierra bajo impulsos cortos y altas frecuencias; entre algunas otras temáticas que contribuyeron a la formulación, sustento de este trabajo.

De igual manera, una vez se logró recolectar información, se discutió y socializaron los temas que fueron aporte y llevaron al cumplimiento del objetivo general del trabajo; dicho análisis contó con el criterio técnico del asesor.

Por otra parte, dentro de las fuentes primarias y secundarias, se enfocaron y analizaron los fenómenos que causa la incidencia del rayo en los sistemas de puesta a tierra; lo cual permitió esbozar de manera preliminar un manual de buenas prácticas para el diseño de los sistemas de puesta a tierra que se encuentran bajo impulsos de alta frecuencia ocasionados por las descargas atmosféricas.

5.3. Instrumentos de recolección de información

5.3.1. Fuentes primarias. Para la realización del trabajo propuesto, se dio a la consulta en bases de datos que ofrece la I.U. Pascual Bravo y las de acceso libre, de igual manera se realizaron consultas en las normativas nacionales e internacionales que rigen el

tema de eje central del trabajo, así mismo los libros teóricos de ingeniería eléctrica fueron de gran aporte.

Algunas de las investigaciones y estudios realizadas por los entes gubernamentales son argumentos fundamentales para la ejecución del trabajo propuesto.

5.3.2. Fuentes secundarias. Las fuentes secundarias a las que se acudió fueron publicaciones y algunas investigaciones y trabajos de grado que permitieron interpretar, sopesar y analizar a profundidad la información obtenida de las fuentes primarias.

6. Conclusiones

Inicialmente se puede decir que los diseños de puesta a tierra que plantean normas como la IEEE son a 60 Hz y solo se tienen en cuenta el efecto resistivo de la impedancia, por lo tanto, estos diseños no prevén el aumento de la impedancia ante una descarga atmosférica, lo cual puede ocasionar daños de los equipos o tensiones de paso y de contacto elevados.

Además de ello, de la investigación monográfica se puede concluir, que la variación de la impedancia no es significativa en baja frecuencia entre 10 Hz y 100 kHz con conjuraciones de contrapeso, malla cuadrada y varilla vertical, mientras que para altas frecuencias la impedancia de puesta a tierra varía considerablemente, especialmente cuando tienen un comportamiento inductivo.

Por lo que visto desde los circuitos RLC, La influencia o crecimiento de valores de $Z(j\omega)$ en la respuesta transitoria depende del contenido de frecuencia del impulso de la corriente excitación del rayo.

En una de las investigaciones referenciadas, se encontró que en los contrapesos y en la malla para valores mayores de 100 kHz la magnitud de la impedancia aumenta más de 2 veces el valor de la impedancia cuando se está a 60 Hz, como también, en un electro vertical a un valor mayor de 100 kHz la magnitud de la impedancia disminuye. Esto quiere decir que para algunas condiciones del terreno es mucho mejor la implementación de electrodos verticales para la reducción de la impedancia en ciertas frecuencias elevadas.

De tal forma se logra inferir gracias a los resultados, que no siempre un diseño compuesto por contrapesos en las torres, es el ideal para soportar los fenómenos generados por las descargas atmosféricas, mientras que con electrodos verticales sí se logra disminuir la impedancia cuando se está inmerso en altas frecuencias en la gran mayoría de los casos. Pero debido a la complejidad de usos por la extensa profundidad a la cual debe ser enterrado, es poco viable el uso.

Sin embargo, los contrapesos, antenas o electrodos horizontales son los elementos de mayor uso común en terrenos de alta resistividad para disminuir la impedancia de la puesta a

tierra y a su vez son muy efectivos en todas las frecuencias, permitiendo reducciones de hasta el 90 % en los primeros 15m de conductor.

Es importante también mencionar que más allá la adición o extensión de este, no se traduce en una reducción significativa de la impedancia, sobre todo ante los efectos transitorios, en donde el contrapeso ve incrementado su efecto inductivo debido al aumento de la longitud. Por lo que es importante conservar la longitud efectiva del electrodo, que está entre los 60 m y 80 m.

Por ello es significativo realizar un correcto diseño de sistemas de puesta a tierra y modelar mediante herramientas computacionales diferentes tipos de configuraciones, es decir usando electrodos verticales y horizontales. Lo que permite a la impedancia de puesta a tierra, de acuerdo a las investigaciones tomar valores constantes ante impulsos transitorios de alta frecuencia y en condiciones de suelos altamente resistivos.

Por otra parte, al igual que la impedancia, la resistencia de puesta a tierra y la permisividad presentan cambios importantes debido a las conmutaciones repentinas y transitorias de alta frecuencia originada por las descargas atmosféricas.

Para finalizar, se reconoce que la frecuencia no es un parámetro que se pueda variar al momento de diseñar un SPT para mejorar su desempeño, ya que es una característica propia de las descargas atmosféricas, sin embargo, es importante conocer su comportamiento para determinar así los valores de impedancia transitoria, que adquiere el sistema de puesta a tierra en el transcurso de la DA. De esa manera diseñar puestas a tierras idóneos de acuerdo a las condiciones del terreno y nivel isoceráunico donde esta vaya a estar inmersa; contribuyendo a tener sistemas eléctricos fiables, salvaguardando la integridad de las personas, protección de los equipos eléctricos conectados a este y reduciendo gastos en su etapa constructiva.

7. Recomendaciones

Para trabajos futuros, se sugiere realizar modelaciones con suelos aún más resistivos, para conocer la tendencia que puede tener el valor de la impedancia a altas frecuencias, puesto que en el desarrollo de esta gestión tecnológica solo se hallaron resultados con resistividades de 1 k Ω m.

Se recomienda realizar modelaciones propias con la implementación de herramientas computacionales de libre acceso.

Se propone realizar investigaciones acerca del comportamiento de la impedancia que se genera en las uniones de los SPT, puesto que como se observó en el desarrollo de la investigación, en las juntas de las torres se genera una impedancia, esto no se analizó propiamente en la puesta a tierra.

Se confía en la Institución Universitaria Pascual Bravo, continuará incentivando a la comunidad apasionarse por la investigación y continuar contribuyendo en tan importante tema de los sistemas de puestas a tierras inmersos en altas frecuencias.

8. Referencias bibliográficas

- Areny, R. P. (2006). *Instrumentos electrónicos básicos*. Barcelona: Marcombo.
- Barriente, P. A., Córdoba, J. C., & López, H. (2005). ESTUDIO DE LA LONGITUD EFECTIVA Y LOS EFECTOS DE LA IONIZACIÓN EN LA MODELACIÓN DE LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA. Medellín.
- Cardona Torres, G., & Acuña Herrera, R. (2000). *Medición de Resistividades de Suelo frente a variaciones de Frecuencia*. Medellín.
- CIGRÉ. (2006). PROTECTION OF MV AND LV NETWORKS AGAINST LIGHTNING. PART 1: COMMON TOPICS. *Working Group C4.4.02*, 30-40.
- El Colombiano. (02 de Junio de 2016). Medellín, una de las ciudades donde caen más rayos en el mundo.
- El Tiempo. (Abril de 2015). ¿En qué lugares de la Tierra caen más rayos?
- El Tiempo. (02 de Agosto de 2017). *La 'maldición' de Cáceres, el pueblo donde más rayos caen en Colombia*.
- Empresas Públicas de Medellín - EPM. (Mayo de 2008). Medida de resistividad eléctrica del suelo. *Normas Técnicas - RA6-014*, 6. Recuperado el 02 de junio de 2018
- Empresas Publicas de Medellín. (2011). *PUESTA A TIERRA DE REDES DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA - RA6-010*. Medellín.
- EPM. (2011). Puestas a tierras en redes de distribución eléctrica. En *Norma RA6-010* (págs. 8-14). Medellín .
- FIDEICOMISO CREG, Keraunos SAS. (09 de Septiembre de 2014). Identificación y Análisis de los niveles de calidad del servicio alcanzables en las redes distribución de energía eléctrica del SIN. 256.
- German M, J. V. (2007). *Fundamentos e ingeniería de las puestas a tierra respuestas ante fallas eléctricas y rayos*. Medellín: Universidad de Antioquia.
- Hans R. , S., & J.K. , A. (1992). ESTIMATION OF TWO LAYER SOIL PARAMETERS USING FINITE WENNER RESISTIVITY EXPRESSIONS. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 4. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Prof_Hans_Seedher/publication/3271915_Estimation_of_Two_Layer_Soil_Parameters_Using_Finite_Wenner_Resistivity_Expressions/links/55e3fe0308aeb1a7cc9e19f/Estimation-of-Two-Layer-Soil-Parameters-Using-Finite-Wenner-Resis
- Hernández, D., & Castaño, V. (2007). *COMPARACIÓN DE METODOLOGÍAS PARA EL MODELADO DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA EN ALTA FRECUENCIA*. Medellín.

- IEEE Power and Energy Society . (2012). IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System. *IEEE Standards Association*, 8-13.
- IEEE Standard. (1997). IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines 1243-1997.
- IEEE STANDARDS ASSOCIATIONS. (2013). *IEEE Guide for Safety in AC Substation IEEE80 2013*. New York.
- Jinliang, H., & Zeng, R. (2006). Lightning Impulse Performances of Grounding Devices Covered With Low - Resistivity Materials. *IEEE*, 1-9.
- Ministerio de Minas y Energía- MinMinas. (2013). Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas. En MinMinas, *Anexo General del RETIE* (págs. 63-72). Bogotá. Obtenido de <https://www.minminas.gov.co/retie>
- Montaña, J., Salazar, J., Rondón, D., & Vargas, M. (1999). Análisis comparativo del comportamiento de electrodos de puesta a tierra en baja y alta frecuencia. *Mundo eléctrico*, 68. Obtenido de www.elmuncoelectrico.com
- Moreno Ospina, G., Valencia Velásquez, J., Cárdenas Agudelo, C., & Villa Acevedo, W. (2007). *Fundamentos e ingeniería de las puestas a tierra. Respuestas ante fallas eléctricas y rayos*. Medellín: Universidad de Antioquia.
- Mousa. (1994). The soil ionization gradient associated with discharge of high currents into concentrated electrodes. *IEEE Transactions on Power Delivery*.
- Murcia, J. M. (2012). *Modelación de transitorios electromagnéticos en torres de transmisión a partir de la respuesta en frecuencia*. Medellín.
- National Geographic España. (2017). Los lugares del mundo donde caen más rayos. *National Geographic*.
- Norma Técnica Colombiana NTC 4552. (12 de Diciembre de 2004). Protección contra rayos. Principios generales. Bogotá, Colombia: ICONTEC.
- Olivera, M. (2001). *Modelo Electromagnético para Descontaminação de Ondas de*. Brasil.
- Ortiz, J. (2005). Puestas a Tierras de Líneas de Trasnmisión. *GAMMA Boletín Técnico*. Nº15 , 8.
- Pérez López, J. (2016). *MODELAMIENTO Y ESTANDARIZACIÓN DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA PARA LÍNEAS DE TRANSMISIÓN A 110 KV*. Medellín. Recuperado el Nov de 2017
- Rondon, D., Vargas, M., Herrera, J., Montaña, J., Torres, H., Camargo, M., . . . Delgadillo, A. (2005). Influence of Grounding System Modeling on Transient Analysis of Transmission Lines dueto Direct Lightning Strike. *Research Program on Acquisition and Analysis of Signals*. Obtenido de <http://www.paas.unal.edu.co>

- Roy B., C. J., & Joseph A., L. (2007). *DESIGNING FOR A LOW RESISTANCE EARTH INTERFACE*. USA. Schneiderelectric. (26 de 07 de 2010). *Schneiderelectric.es*. (Schneiderelectric, Ed.) Recuperado el 09 de Sept de 2017, de Documentos:
http://www.schneiderelectric.es/html/limitadoresdesobretensiones/docs/guia_proteccion_capitulos/capitulo_03.pdf
- Schroeder, M., Correia de Barros, M., Lima, A., Afonso, M., & Moura , R. (2017). Evaluation of the impact of different frequency dependent soil models on lightning overvoltages. *Electric Power Systems Research*, 1-10.
- Segelétrica Ltda. (2009). Puestas a Tierra para torres de líneas de transmisión . Bogotá.
- Segelectrica Ltda. (2010). Suelo artificail para mejoramiento de puestas a tierra. *Favigel*, 4-3.
- Universidad Nacional de Colombia sede Manizales. (1993). *MEDIDAS DE RESISTIVIDAD DE TERRENOS E IMPEDANCIAS DE PUESTAS A TIERRA*. Manizales.
- Visacro, F. (1992). *Modeling of earthing systems for lightning protection applications*,. Berlin-Germany.

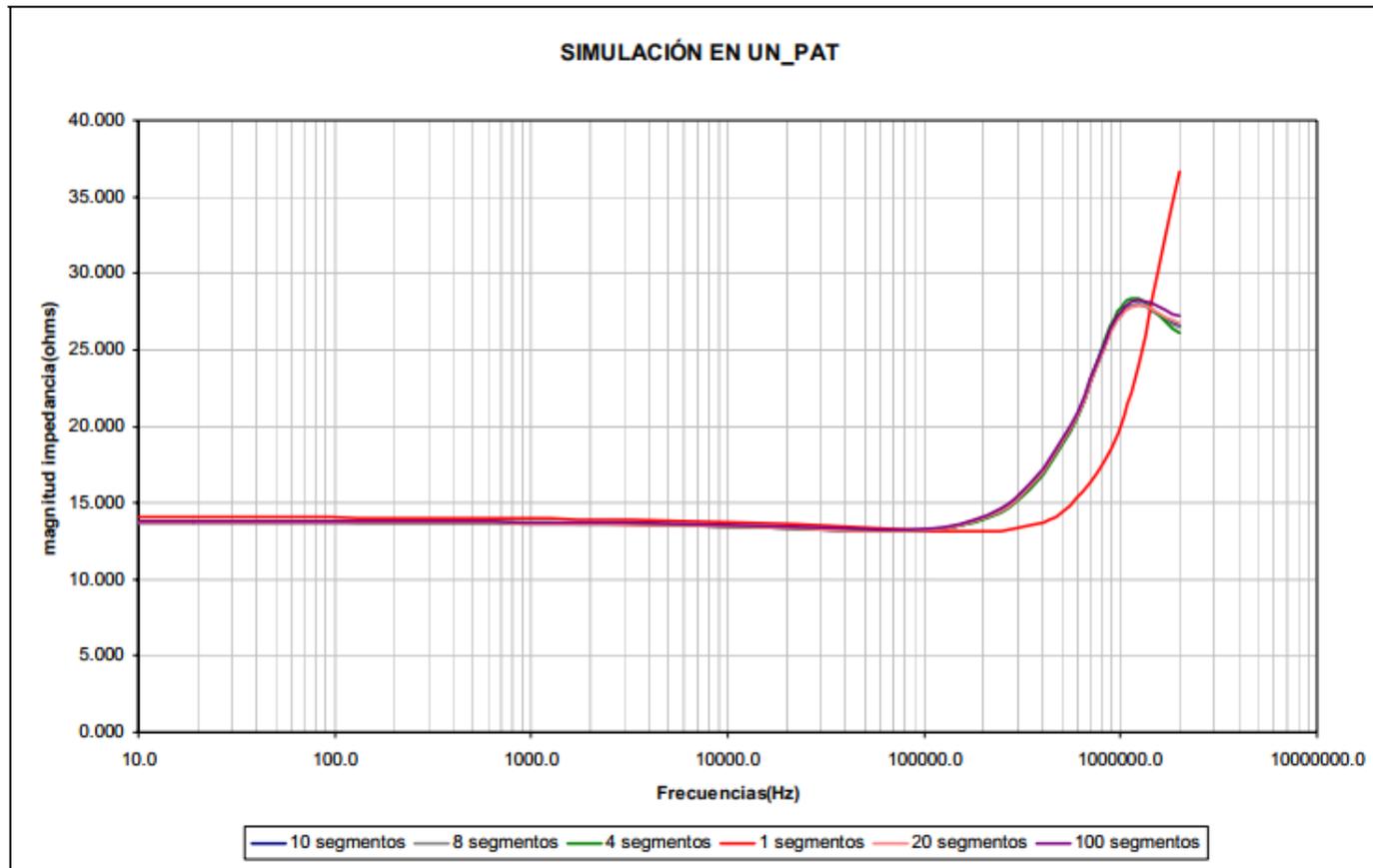
9. Anexos

Anexo 1.

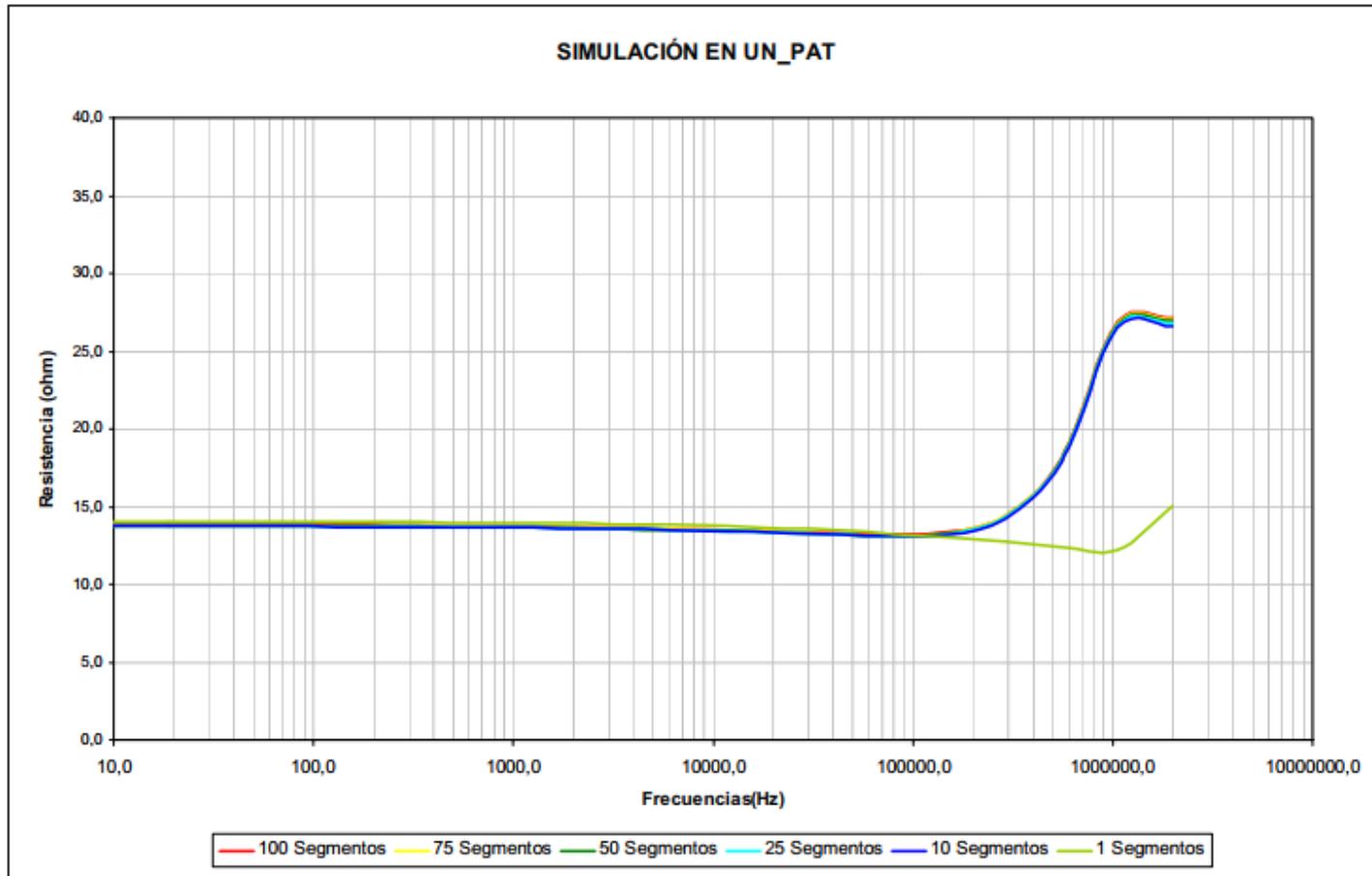
	100 segmentos	75 segmentos	50 segmentos	25 segmentos	10 segmentos	1 segmento
Frecuencias (Hz)	Impedancia (ohm)					
10,0	13.8337-9.71898E-003i	13.7982-9.72006E-003i	13.764-9.72096E-003i	13.7352-9.72172E-003i	13.7355-9.72234E-003i	14.0493-9.77903E-003i
19,0	13.8299-1.32509E-002i	13.7944-1.32524E-002i	13.7602-1.32539E-002i	13.7315-1.32554E-002i	13.7317-1.32566E-002i	14.0455-1.33643E-002i
36,1	13.8247-1.79875E-002i	13.7892-1.79902E-002i	13.755-1.79931E-002i	13.7262-1.7996E-002i	13.7265-1.79983E-002i	14.0403-1.82029E-002i
68,7	13.8175-2.42849E-002i	13.782-2.42901E-002i	13.7478-2.42955E-002i	13.719-2.43009E-002i	13.7193-2.43054E-002i	14.0331-2.46948E-002i
130,6	13.8076-3.24801E-002i	13.7721-3.24902E-002i	13.7379-3.25004E-002i	13.7091-3.25106E-002i	13.7094-3.25191E-002i	14.0231-3.32593E-002i
248,3	13.7939-4.28807E-002i	13.7584-4.28999E-002i	13.7242-4.29192E-002i	13.6954-4.29387E-002i	13.6957-4.29548E-002i	14.0095-4.43621E-002i
472,1	13.775-5.55145E-002i	13.7395-5.55511E-002i	13.7053-5.55878E-002i	13.6766-5.56249E-002i	13.6768-5.56554E-002i	13.9906-5.83309E-002i
897,5	13.7491-6.96973E-002i	13.7136-6.97668E-002i	13.6794-6.98366E-002i	13.6507-6.9907E-002i	13.6509-6.9965E-002i	13.9647-7.50506E-002i
1706,1	13.7136-8.31393E-002i	13.6781-8.32714E-002i	13.6439-8.34042E-002i	13.6151-8.3538E-002i	13.6154-8.36481E-002i	13.9291-9.33134E-002i
3243,5	13.6649-9.01505E-002i	13.6294-9.04015E-002i	13.5952-9.06539E-002i	13.5665-9.09082E-002i	13.5667-9.11172E-002i	13.8802-0.109484i
6166,2	13.5991-7.81555E-002i	13.5636-7.86327E-002i	13.5294-7.91125E-002i	13.5006-7.95955E-002i	13.5008-7.99915E-002i	13.8136-0.114878i
11722,0	13.5117-2.11171E-002i	13.4762-2.20243E-002i	13.442-2.29361E-002i	13.4132-2.38534E-002i	13.4134-2.46019E-002i	13.7234-9.07881E-002i
22285,0	13.4013+0.132662i	13.3657+0.130937i	13.3315+0.129204i	13.3027+0.127464i	13.3027+0.126058i	13.6032+8.39241E-004i
42366,0	13.2788+0.482047i	13.2432+0.478769i	13.2089+0.475478i	13.1799+0.472187i	13.1792+0.469587i	13.4465+0.23442i
80542,0	13.1995+1.20784i	13.1637+1.20161i	13.129+1.19538i	13.0993+1.1892i	13.0966+1.18462i	13.249+0.751497i
153120,0	13.3611+2.61389i	13.3243+2.60209i	13.2884+2.59034i	13.2564+2.57903i	13.2466+2.57224i	13.0084+1.81724i
291090,0	14.3989+5.0929i	14.3586+5.07081i	14.3184+5.0492i	14.2787+5.03006i	14.2472+5.02739i	12.7155+3.93549i
553380,0	18.1646+8.4329i	18.1113+8.39415i	18.0563+8.35817i	17.9945+8.33513i	17.9142+8.38227i	12.3443+8.14091i
1047128,5	26.8394+7.29254i	26.7489+7.2476i	26.6584+7.21259i	26.5711+7.22061i	26.5487+7.43293i	12.2106+16.7421i
2000000	27.1846-0.265117i	27.0757-0.288835i	26.964-0.302618i	26.8339-0.279782i	26.6137-0.16475i	15.0907+33.4406i

Tabla 1

Gráficamente se obtiene



Perfil de la magnitud de la impedancia para diferentes segmentaciones del contrapeso



Perfil de la parte real de la impedancia para diferentes segmentaciones del contrapeso

Anexo 2.

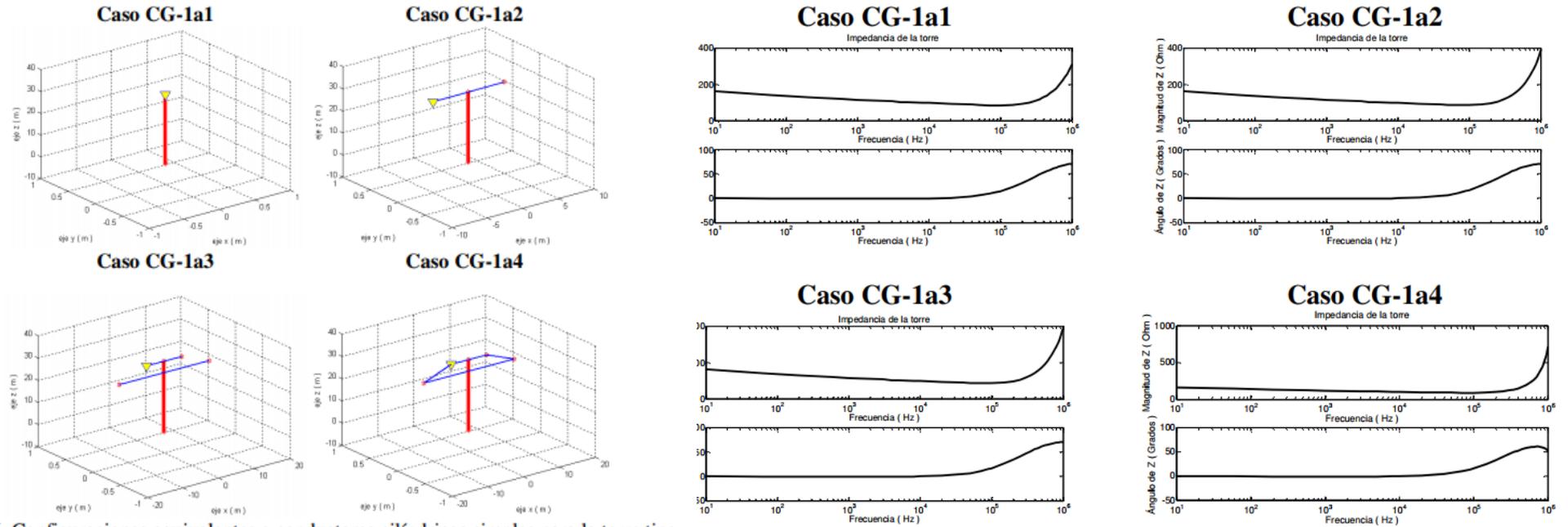


Fig. 16. Configuraciones equivalentes a conductores cilíndricos simples para la torre tipo Caregato.

Éstas se caracterizan por estar conformadas por un conductor cilíndrico vertical que cumple la función de ser el cuerpo de la estructura. Más adelante se le agregan conductores cilíndricos en disposición perpendicular a éste que representan los brazos de la torre. Por último estos brazos se cierran en cada lado de la estructura por medio de conductores cilíndricos en disposición transversal que sirve para dar una forma de ventana característica de la torre tipo CG.

Anexo 3

Configuración de SPT de acuerdo a la resistividad del terreno para subestaciones tipo poste.

No	Configuración	Rpt	Resistividad (Ohmio-metro)															
			100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1400	1500	1800	2000	
1		0.13*p	13	26														
2		0.12*p	12	24	36													
3		0.112*p	11	22	34	45	56	67										
4		0.096*p	10	19	29	38	48	58	67									
5		0.084*p	8	17	25	34	42	50	59	67	76							
6		0.076*p	8	15	23	30	38	46	53	61	68	76	84					
7		0.07*p	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	98				
8		0.08*p	8	16	24	32	40	48	56	64								
9		0.063*p	6	13	19	25	32	38	44	50	57	63						
10		0.0537*p	5	11	16	21	27	32	38	43	48	54	59	75				
11		0.047*p	5	9	14	19	24	28	33	38	42	47	52	66	71	75	94	