

# ESTUDIO DEL SISTEMA ACTUAL DE PUESTA A TIERRA EN LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

Juan Fernando Idarraga Agudelo

Ingeniería Electromecánica

Santiago Gómez Arango

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

2017

## RESUMEN

---

Las líneas de transmisión de energía existentes en Empresas Públicas de Medellín presentan aperturas automáticas, las cuales son ordenadas por el relé de protección en el momento que detectan una falla en el sistema eléctrico, estas son de poca duración entre 100 y 300 milisegundos. Las cuales se vuelven críticas cuando se presentan más de 3 aperturas en el mes. Esta situación es indeseada puesto que afectan los índices de disponibilidad de las líneas; regulados por la **CREG** (Comisión de Regulación de Energía y Gas) por lo que disminuye los tiempos necesarios para su mantenimiento y en algunos casos cuando se sobrepasan estos tiempos estipulados, las empresas operadores de red deben compensar económicamente.


Para el análisis de estas fallas fueron suministrados datos recolectados en los últimos 3 años por el grupo de operación y control de Empresas Públicas de Medellín estos datos muestran las aperturas automáticas asociadas al no funcionamiento del sistema de puesta a tierra (SPT), el cual es compuesto por la malla (cable enterrado), los pararrayos y su conexión al sistema de apantallamiento, puesto que de acuerdo al análisis, las aperturas son ocasionadas por descargas atmosféricas, que teniendo un correcto funcionamiento del sistema a tierra este disipará la descarga, sin ocasionar la apertura de la línea.

En los lugares donde son más frecuentes las fallas realizamos inspecciones físicas del estado de los cables del SPT, los conectores y se verifica si tienen pararrayos. En estos puntos se toman los siguientes datos: resistividad del terreno, Medición de puesta a tierra de las torres de transmisión, medición de la tensión de toque y medición de la tensión de paso, con el fin de aclarar el estado real del SPT.

Los resultados de estos datos arrojaron el incumplimiento de las normas exigidas en el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) y por lo tanto se sugiere utilizar las disposiciones de SPT encontrados en la norma EPM RA6-2010.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

**Palabras clave:** Líneas de Transmisión, RETIE, Sistema de Puesta a Tierra, Resistividad del Terreno, Sistema de puesta a tierra, Tensión de paso, Tensión de contacto, Descarga eléctrica atmosférica, equipo de protección.

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

# RECONOCIMIENTOS

Primero que todo a mi Dios supremo, por haberme dado la vida, doy gracias a mi esposa por soportar tantos días y noches que no pude estar con ella, a Dios que nos dio la fortaleza para salir adelante en esta carrera por aprender cada día nuevas cosas que nos dan más claridad de la vida y de nuestro entorno laboral, a mi hija que me da fuerzas para cumplir cada meta, a toda mi familia que ha esperado con ansias este título. También expreso mis agradecimientos al grupo de trabajo de Empresas Públicas de Medellín, que trabajan en la sección Mantenimiento de Transmisión, ya que su acompañamiento, suministro de información y autorización para la realización de este proyecto de mejoramiento de los sistemas de puesta a tierra, fueron fundamental para su ejecución.

De igual manera expreso mis agradecimientos al asesor y docente de aula el señor Santiago Gómez Arango por su apoyo, en la asesoría de la elaboración de este informe, como requisito final de trabajo de grado.

# ACRÓNIMOS

---

SPT Sistemas de Puesta a Tierra

NEC National Electrical Code

CREG Comisión de Regulación de Energía y Gas

RETIE Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas

DEAT Descargas Eléctricas Atmosféricas

GPR Elevaciones de potencial a tierra

EPM Empresas Públicas de Medellín

ATP Electromagnetic Transients Program

BT Baja Tensión

MT Media Tensión

AT Alta Tensión

**RMS Raíz Media Cuadrática**

## TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN .....	11
1.1 Generalidades.....	11
1.2 Justificación .....	11
1.3 Objetivos.....	12
1.3.1 Objetivo General.....	12
1.3.2 Objetivos Específicos .....	12
1.4 División del trabajo de grado .....	12
2. MARCO TEÓRICO .....	14
2.1 Definiciones .....	16
2.1.1 Sistema de puesta a tierra – SPT (Earthing System – Grounding System)...	16
2.1.2 Sistema de protección externo contra rayos – SPE .....	16
2.1.3 Conductor de puesta a tierra para equipos (Equipment Grounding Conductor) .....	16
2.1.4 Tierra (Earth – Ground) .....	17
2.1.5 Conductor bajante (Down Conductor).....	17
2.1.6 Resistividad del terreno (r) (Resistivity) .....	17
2.1.7 Sobretensión (Voltage Surge).....	17
2.1.8 Tensión de contacto –Vc (Touch Voltage) .....	17

2.1.9 Tensión de paso –Vp (Step Voltage) .....	18
2.1.10 Equipotencializar .....	19
2.1.11 Cable de guarda .....	19
2.1.12 Relé .....	19
2.1.13 Electrodo puesta a tierra .....	19
2.1.14 Conectores de tierra .....	19
2.1.15 Tiempo máximo de despeje de la falla.....	19
2.2 Las características básicas de un sistema de conexión a tierra .....	19
2.3 Diseño de los sistemas de puesta a tierra .....	21
2.3.1 Método para medir resistividad del suelo.....	22
2.3.2 Corriente máxima .....	23
2.3.4 Medición de resistencia de puesta a tierra.....	23
2.3.5 Tensiones de contacto y paso .....	24
2.4 investigaciones en diseños .....	27
2.4.1 Análisis por software académico .....	27
2.4.2 Norma RA6-010 sistemas de puesta a tierra en baja tensión. ....	27
3. METODOLOGÍA .....	29
3.1 Funcionamiento de los SPT .....	29

3.2 Recopilación y análisis de información sobre las aperturas asociadas a descargas atmosféricas. ....	29
3.3 Mediciones .....	30
3.4 Propuesta de SPT a implementar .....	30
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	32
4.1 Configuración de los SPT en alta tensión .....	32
4.2 Sectorización de zonas críticas por medio de análisis de causas .....	34
4.2.1 Aperturas de las líneas por año. ....	34
4.2.2 Aperturas de las líneas de transmisión por corredor .....	35
4.2.3 Zonas críticas .....	36
4.3 Toma de datos en campo .....	39
4.3.1 Equipo de medición .....	39
4.3.2 Método de medición .....	40
4.4 Propuesta de nueva técnica para mejoras de los SPT .....	42
4.5 Toma de datos .....	45
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO .....	46
5.1 Conclusiones .....	46
5.2 Recomendaciones y trabajo futuro .....	47
REFERENCIAS .....	48



	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estructuras. (salazar, 2010)	14
Figura 2. Estructura tripolar de la nube. (slideshare, 2014)	16
Figura 3. Tensión de contacto. (ICONTEC, 2004)	18
Figura 4. Tensión de paso. (ICONTEC, 2004)	18
Figura 5. Disipación descarga atmosférica. (SIEMENS, 2015)	20
Figura 6. Métodos de medición Wenner. (EPM RA6-014, 2008)	22
Figura 7. Métodos caída de potencial (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA, 2013)	23
Figura 8. Tensión de paso y de contacto (JOHN, 2003)	24
Figura 9. Método de medición de tensiones de contacto y paso. (IGT, 1995)	26
Figura 10. Torre de Transmisión (Empresas Públicas de Medellín, 2016)	32
Figura 11. Aperturas de las líneas de transmisión por DEAT (EPM, 2015)	34
Figura 12. Teluometro (Empresas Públicas de Medellín, 2016)	40
Figura 13. Método de medición de caída de potencial. (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA, 2013)	40
Figura 14. Medición puesta a tierra torre 88 (Empresas Públicas de Medellín, 2016)	42
Figura 15. Configuración nueva compensación (Empresas Públicas de Medellín, 2016)	43
Figura 16. Instalación de compensación torre 88 (Empresas Públicas de Medellín, 2016)	44
Figura 17. Instalación electrodo torre 88 (Empresas Públicas de Medellín, 2016)	44

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tensión de contacto permisible en voltios	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 2. Configuraciones básicas de puesta a tierra en función de la resistividad del suelo.	28
Tabla 3. Causas de aperturas de las líneas de transmisión	30
Tabla 4. Valores máximos de Resistencia de los SPT	33
Tabla 5. Aperturas de las líneas de transmisión 220kV por corredor.	35
Tabla 6.Registro de aperturas de la línea Guadalupe IV - Occidente a 220.00voltios	<b>¡Error!</b>
<b>Marcador no definido.</b>	
Tabla 7. Registro de aperturas de la línea Guadalupe IV - Barbosa a 220.00 voltios	<b>¡Error!</b>
<b>Marcador no definido.</b>	
Tabla 8. Datos de mediciones en las torres 88 y 89 corredor 10 (EPM 2016)	41
Tabla 9. Toma de datos con la nueva configuración	45

# 1. INTRODUCCIÓN

---

## 1.1 Generalidades

Uno de los mayores problemas del corte de flujo eléctrico en las líneas de transmisión es la falla de sus sistemas de puesta a tierra en los momentos de descargas eléctricas. Los cuales fueron instalados con técnicas de hace 30 o 40 años (Tapia, 2012) y no han tenido modernizaciones significativas.

En las 2 últimas décadas se han realizado estudios correspondientes a los sistemas de puesta a tierra tanto en edificaciones como en las redes de distribución de las empresas de energía eléctrica. Con el análisis de estos métodos se busca utilizar técnicas que por sus características permitirán mejorar los SPT en las redes de transmisión.

## 1.2 Justificación

Este estudio busca mejorar la calidad del servicio en las redes de transmisión, reduciendo las operaciones de los equipos de control asociados a estas; de esta forma se busca aumentar su vida útil, la seguridad física de las personas, lo cual contribuirá con la disminución de cortes de energía en la población, logrando así dar cumplimiento a normatividad estipulada por El Ministerio De Minas Y Energía en el reglamento técnico de instalaciones eléctricas.

El estudio sobre los sistemas de puesta a tierra será una nueva herramienta para investigaciones posteriores, debido a que en el momento se cuenta con escasa información sobre la misma.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

### 1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General. Identificar los problemas en los sistemas de puesta a tierra de las torres, relacionadas a las fallas por descargas atmosféricas de las líneas de transmisión y determinar la técnica de diseño donde se logre cumplir con las exigencias de seguridad, confiabilidad y calidad del servicio exigidos por la regulación.

#### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Explicar cómo funcionan los sistemas de puesta a tierra ante una descarga atmosférica o falla eléctrica.
- Analizar las causas de aperturas de los últimos tres años la línea de transmisión Guadalupe IV-Occidente Guadalupe IV-Barbosa a 220 kV debido a descargas atmosféricas con el fin de sectorizar las zonas críticas.
- Realizar las mediciones de los sistemas de puesta a tierra de las torres de la línea de transmisión Guadalupe IV-Occidente Guadalupe IV-Barbosa a 220 kV.
- Determinar la técnica óptima de las existentes para el diseño del sistema de puesta a tierra con el fin de garantizar la seguridad de las personas y animales, confiabilidad y calidad del servicio exigidos por la regulación.

### 1.4 División del trabajo de grado

En el capítulo 1. Se realiza una introducción acerca del problema de investigación, se detalla el tema, el planteamiento del problema, la justificación y los objetivos que se pretenden alcanzar.

En el capítulo 2. Se especifica el marco teórico, donde encontraremos una reseña histórica, unos antecedentes investigativos, definiciones sobre el tema a tratar además de la información sobre nuevas técnicas utilizadas en las configuraciones de los SPT muy útiles para el desarrollo de la investigación.

En el capítulo 3. Se trata el marco metodológico donde se detallan aspectos como el enfoque de la investigación, tipo de investigación y el cómo se cumplirán cada uno de los objetivos planteados.

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

En el capítulo 4. Se realiza el análisis e interpretación de los datos históricos y los recolectados en el trabajo de campo. Se identifican posibles fallas en los SPT.

Se propone una técnica que dé cumplimiento a las normas establecidas y mejore la confiabilidad y la calidad del servicio.

En el capítulo 5. Se establecen las conclusiones y recomendaciones que dará lugar a la posterior realización del trabajo.

## 2. MARCO TEÓRICO

Las líneas de transmisión eléctricas están diseñadas para transportar energía desde las centrales de generación hasta las grandes ciudades y luego distribuirlas al consumidor final. Están compuestas por conductores de aluminio los cuales están soportados por medio de un aislamiento a una estructura metálica llamada torre.


Para proteger el sistema y a las personas de las descargas atmosféricas, estas torres poseen un SPT, el cual disipa la misma y la distribuye en la tierra.

El SPT está conformado generalmente por cable de guarda, torre, conectores y un sistema de apantallamiento o malla. En las líneas de transmisión de alta potencia, los sistemas de puesta a tierra consisten en mantener la parte metálica (torre) a una diferencia de tensión baja que permita resguardar al personal de cualquier falla eléctrica o descarga atmosférica. Este sistema debe garantizar una resistencia que dé cumplimiento a los valores que se encuentran en la tabla 15.4 del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE).



Figura 1. Estructuras. (salazar, 2010)

Realizando una inspección a los archivos de mantenimiento de EPM, no se encontró registro suficiente sobre el mantenimiento en los SPT de las líneas de transmisión de energía, siendo estos responsables de garantizar que, ante una falla, ya sea por descargas atmosféricas (rayo) o corto

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

circuitos, no se presenten tensiones peligrosas para la salud y la vida humana o animal, que afecten equipos electrónicos de control y relés de protección de cada línea de transmisión.

En el año 1913 el NEC (National Electrical Code) buscando la seguridad de las personas reglamentó que todos los circuitos con tensiones mayores a 150 voltios, implementaran un sistema de puesta a tierra dando el origen de ellos. Adicionalmente, se define que la palabra en inglés “grounding” se tradujo al español como “puesta a tierra” y la palabra “grounded”, como “puesto a tierra”. Esta distinción es importante, ya que de allí deriva la función que tiene cada una de ellas en un sistema eléctrico.

Dentro del sistema general de puesta a tierra existen otros subsistemas, como “puesta a tierra para la protección frente a descargas eléctricas atmosféricas”, “puesta a tierra para la seguridad eléctrica” o también llamada “Tierra del equipo” o “Tierra de seguridad”; “Tierra de alta frecuencia”, que no se rige por las mismas reglas de la tierra de baja frecuencia; “Puesta a tierra para la protección frente a las interferencias electromagnéticas” (EMI, por sus siglas en inglés), “frente a interferencias de radiofrecuencia” (RFI, por sus siglas en inglés) y “frente a descargas electrostáticas” (ESD, por sus siglas en inglés), y “Puesta a tierra para instrumentación y controles”. (Tapia, 2012)

En resumen, para todos los procesos eléctricos, comunicaciones, radio frecuencias, etc. es necesario contar con un buen sistema de puesta a tierra para garantizar la seguridad y el buen funcionamiento.

La Descarga Eléctrica Atmosférica es un fenómeno físico, el cual ocurre cuando hay transferencia de carga eléctrica, el más común es de una nube hacia la tierra, también puede suceder entre dos nubes o de la tierra hacia la nube, esta transferencia es conocida como Rayo, tiene una influencia directa sobre los seres vivos, equipos o sistemas eléctricos, electrónicos o de comunicaciones. (ICONTEC, 2004)

El experimento de la cometa con la cual se confirma que los rayos son descargas eléctricas, fue realizado en el año 1752 en Francia, por el científico Benjamin Franklin nacido en Boston en 1706, sus estudios fueron de gran trascendencia para los estudios eléctricos. (Blog. endesaeduca, 2013)

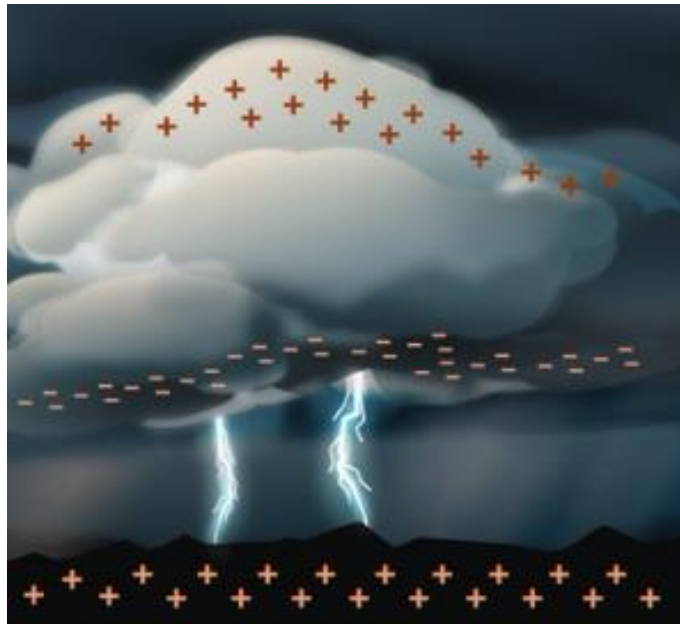


Figura 2. Estructura tripolar de la nube. (slideshare, 2014)

## 2.1 Definiciones

2.1.1 Sistema de puesta a tierra – SPT (Earthing System – Grounding System). Elementos con capacidad de conducir corriente eléctrica, sin interruptores ni fusibles y disiparla en el suelo o tierra.

2.1.2 Sistema de protección externo contra rayos – SPE. Conjunto de elementos como cables, conectores, bajantes, electrodos, herrajes etc. Su función es ejercer un control seguro sobre las descargas atmosféricas y conducir las a tierra.

2.1.3 Conductor de puesta a tierra para equipos (Equipment Grounding Conductor). Conductor usado para conectar elementos metálicos de servicio de puesta a tierra con el electrodo de puesta a tierra.



	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

2.1.4 Tierra (Earth – Ground). En los sistemas eléctricos la palabra tierra se asocia con el suelo, terreno, carcasas, chasis, tubería, estructuras etc. En los aviones, barcos y vehículos de denomina masa.

2.1.5 Conductor bajante (Down Conductor). Cable conectado eléctricamente entre los terminales de captación y la puesta a tierra de protección contra rayos. Su función es conducir las corrientes de rayo a tierra.

2.1.6 Resistividad del terreno ( $r$ ) (Resistivity). Es la oposición (resistencia) que presenta 1 metro cubico de terreno al paso de corriente se da en Ohmios metro ( $\Omega \cdot m$ )

2.1.7 Sobretensión (Voltage Surge). Valor de tensión mayor al permitido entre 2 puntos de un circuito eléctrico en condiciones normales.

NOTA: En el contexto de la presente norma, se considera como la sobretensión producida por el rayo, definida como una onda transitoria de tensión que se propaga a lo largo de una línea o circuito y se caracteriza por un rápido incremento seguido por un decrecimiento lento de la tensión, del orden de microsegundos. (ICONTEC, 1998)

2.1.8 Tensión de contacto  $-V_c$  (Touch Voltage). Es la tensión que se produce entre la tierra y una estructura metálica en el momento de una falla o descarga eléctrica, se mide la diferencia entre estos dos puntos la distancia no puede superar 1 metro. (Véase la Figura 3). (ICONTEC, 1998)



Figura 3. Tensión de contacto. (ICONTEC, 2004)

2.1.9 Tensión de paso – $V_p$  (Step Voltage). Es la diferencia de tensión entre dos puntos sobre un terreno a una distancia promedio de un paso. (Véase la Figura 4).

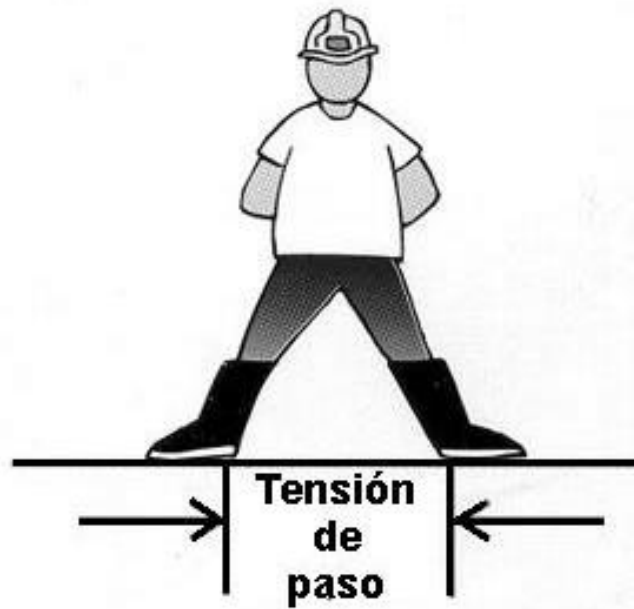



Figura 4. Tensión de paso. (ICONTEC, 2004)

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

2.1.10 Equipotencializar. Es la acción de llevar a la mínima diferencia de potencial partes conductoras y/o conductores activos con el sistema de puesta tierra por medio de conductores eléctricos y/o dispositivos de protección contra sobre tensiones transitorias y así propender por la seguridad. (ICONTEC, 2004)

2.1.11 Cable de guarda. Conductor ubicado en la parte superior de las estructuras de distribución y transmisión de energía, el cual debe estar tendido en paralelo sobre los conductores energizados. (SECTOR ELECTRICIDAD, S/F)

2.1.12 Relé. Equipo eléctrico o electrónico con capacidad de responder en milisegundos a las fallas que presenta el sistema. (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2016)

2.1.13 Electrodo puesta a tierra. Objeto para establecer una conexión directa a tierra (NEMA, s.f.)

2.1.14 Conectores de tierra. Dispositivo metálico usado para conectar los conductores y electrodos de aterramiento, los cuales cumplen con características mecánicas y eléctricas adecuadas. (EPM, 2002)

2.1.15 Tiempo máximo de despeje de la falla. El tiempo que transcurre desde que el relé de protección detecta la falla hasta que el equipo de protección realiza la apertura, aproximadamente 100ms.

## **2.2 Las características básicas de un sistema de conexión a tierra**

Suministrar al sistema una baja resistencia de dispersión de la corriente, con el fin de:

- Evitar daños por sobretensiones que se presenten por descargas atmosféricas o maniobras.
- Garantizar un camino a tierra de corrientes de falla.
- Tener los neutros comunes aterrizados (En transformadores y torres).

- La protección del personal, asegurando el mismo potencial entre partes metálicas de los sistemas y tierra.
- Tener la capacidad de disipar rápidamente las corrientes de falla.

Las características de los elementos de un sistema de conexión a tierra deben contar con un diseño de red de tierras adecuado. Además las propiedades de la resistencia mecánica deben ser acorde a las necesidades, y teniendo en cuenta que los suelos poseen una composición química variada debe poseer una resistencia a la corrosión donde asegure un buen comportamiento. (salazar, 2010)

Cumplir con el valor de resistencia no garantiza que el sistema esté cumpliendo con las tensiones transferidas, de contacto y paso. Estas deben ser verificadas para que no sobrepasen las medidas de soportabilidad y garanticen la seguridad de los seres vivos. (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA, 2013)

La ejecución correcta de estas funciones brinda importantes beneficios al evitar pérdidas de vidas, daños materiales, económicos e interferencias con otras instalaciones y garantizando la calidad del servicio.



Figura 5. Disipación descarga atmosférica. (SIEMENS, 2015)

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

### 2.3 Diseño de los sistemas de puesta a tierra

Teniendo en cuenta que el ser humano tiene la capacidad de soportar unos valores máximos de tensiones de contacto según Tabla 1, por tal motivo, en el momento de diseñar un sistema de puesta a tierra se deben realizar procedimientos matemáticos reconocidos en la ingeniería, en los cuales se evidencie que no se sobrepasa los límites de soportabilidad del cuerpo humano, donde se ha tomado el cuerpo igual a una resistencia de  $1000\Omega$ . Adicionalmente, se sugiere realizar el siguiente procedimiento para su diseño en líneas: (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA, 2013)

- Realizar un estudio de resistividad del terreno adecuado.
- Tener en cuenta la corriente máxima de falla entregada por el operador de red.
- Para efectos de simulación de debe establecer el tiempo máximo de despeje.
- Investigar los límites de carga a presente y a futuro.
- Realizar cálculos preliminares acerca de las tensiones de paso, contacto y resistencia de puesta a tierra del montaje.
- Evaluar los cálculos preliminares con respecto a la soportabilidad del ser humano.
- Realizar un estudio acerca de las posibles tensiones transferidas al exterior y sus formas de mitigación.
- Realizar ajustes al diseño asegurando que cumpla con los requerimientos establecidos.
- Presentar diseño con ajustes realizados.

2.3.1 Método para medir resistividad del suelo. El método más empleado es el de Wenner, debido a que presenta resultados precisos y confiables. El método consiste en enterrar 4 varillas (estacas) a cierta profundidad y a una distancia determinada como lo muestra la Figura 6. Posteriormente, se inyecta corriente “I” en los extremos y un potencial “V” en los electrodos del medio, con estas dos variables podemos tener una resistencia y aplicando la formula se calcula una resistividad del suelo. (EPM, 2008)

$$\rho = 2\pi aR \tag{2.1}$$

Donde:

$\rho$ : resistividad del terreno ( $\Omega \cdot m$ ).

a: radio del electrodo (m).

R: valor de resistencia leído por el equipo ( $\Omega$ ).

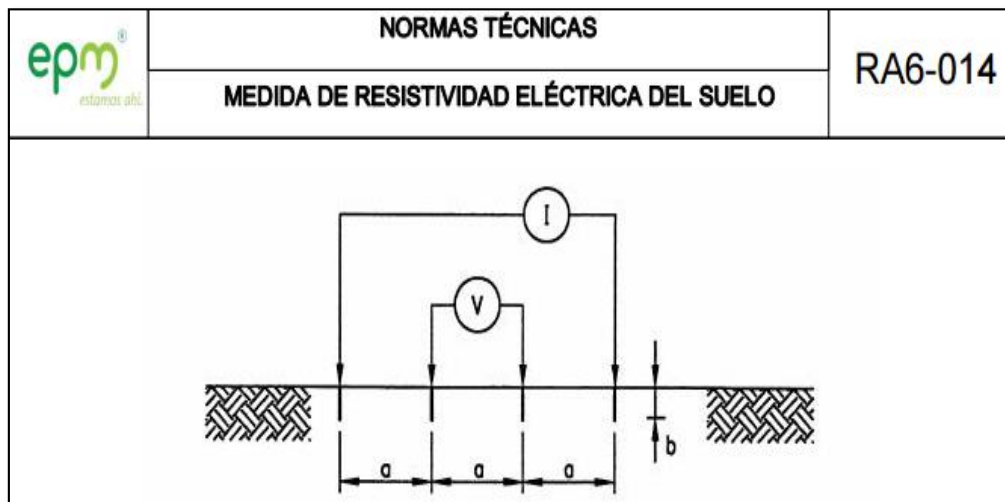


Figura 6. Métodos de medición Wenner. (EPM, 2008)

2.3.2 Corriente máxima. El valor máximo de diseño de la corriente de falla a tierra que fluye a través de la malla de la subestación hasta la tierra circundante está dado por:

$$I_G = I_F * D_f * S_f * C_p \quad (2.2)$$

Donde:

$I_F = 3I_0$  Corriente simétrica de falla a tierra en A.

$D_f$  : Factor de decremento para tener en cuenta la componente DC.

$S_f$ : Factor de división de corriente.

$C_p$ : Factor de crecimiento futuro de la subestación, considera el incremento futuro de la corriente de falla. (JOSE RAMIREZ, 2010)

$I_0$ : Valor RMS de secuencia cero de la corriente simétrica de falla en A.

2.3.4 Medición de resistencia de puesta a tierra. La caída de potencial se aplica como método para realizar estas mediciones, las cuales se deben incluir en las programaciones de mantenimiento para poder tener un registro que nos indique el estado en que se encuentra. Siempre se debe medir antes de energizar el sistema y verificar su cumplimiento de la norma. Su configuración se muestra en la Figura 7.

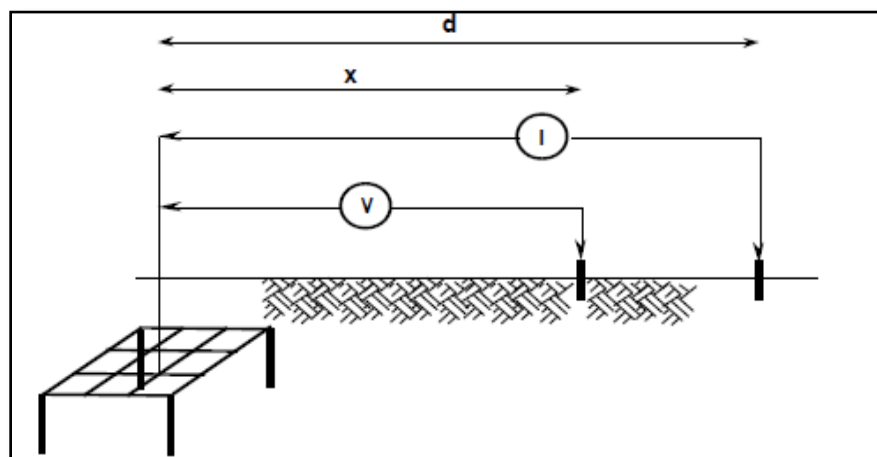


Figura 7. Métodos caída de potencial (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA, 2013)

En donde:

- **d** distancia entre la estructura a medir y el electrodo de corriente, se calcula midiendo la diagonal del sistema de puesta a tierra a medir y multiplicándola por 6.5, para lograr una precisión del 95% (según IEEE 81).
- **x** corresponde a la distancia del electrodo de tensión el cual se ubica al 62% de la longitud del electrodo de corriente, la resistencia se calcula con  $V/I$ . Sin embargo, para las líneas de transmisión donde se encuentra cable de guarda que conecta todas las torres se debe utilizar un telurómetro de alta frecuencia (25kHz) para desacoplar las SPT de las demás torres. (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA, 2013)

2.3.5 Tensiones de contacto y paso. Estas tensiones deben cumplir con las normas establecidas en la IEEE-81.2 u otra norma reconocida que aplique para los sistemas eléctricos. Por ejemplo, para las estructuras que se encuentren a 20m de viviendas, escuelas o alto flujo peatonal es necesario llevar un estricto control que garantice el cumplimiento de los límites admitidos según la Tabla 2. (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA, 2013).

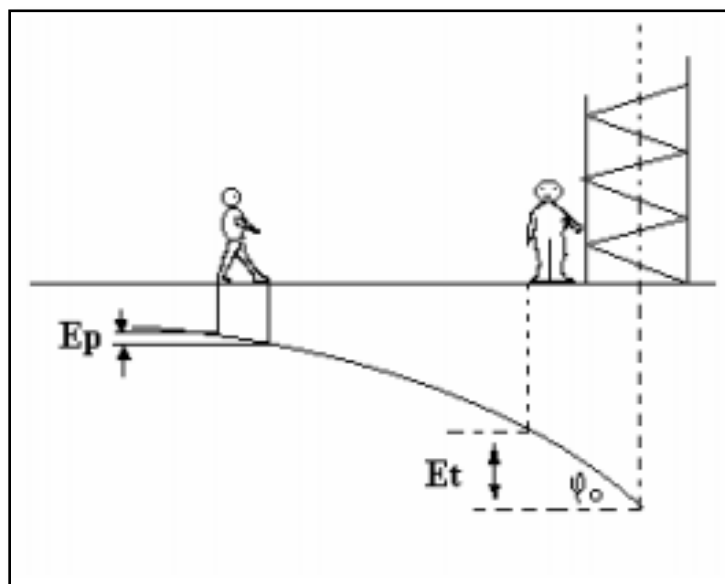


Figura 8. Tensión de paso y de contacto (JOHN, 2003)



	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

2.3.5.1 Tensión *de contacto*. Es la diferencia de potencial entre un punto en la superficie del terreno y cualquier otro punto que se pueda ser tocado simultáneamente por una persona; su valor permisible está dado por:

$$E_t = \frac{165 + 0.25\rho_s}{\sqrt{t}} \quad (2.3)$$

Donde:

$E_t$  : Tensión de contacto Permisible en voltios.

$\rho_s$  : Resistividad de la superficie del terreno en ( $\Omega \cdot m$ ).

$t$  : Duración máxima de falla en segundos. (John, 2003)

Tabla 1. Tensión de contacto permisible en voltios

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: (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA, 2013)

2.3.5.2 Tensión *de paso*. Es la diferencia de potencial entre dos puntos de un terreno que pueden ser tocadas simultáneamente por una persona; su valor permisible está dado por:

$$E_p = \frac{165 + \rho_s}{\sqrt{t}} \quad (2.4)$$

En donde:

$E_p$ : Tensión de paso permisible en voltios. (JOHN, 2003)

Para medir las tensiones de paso, se colocan 2 pesas de 25 kg a una distancia de 1 metro una de otra, con una resistencia entre ellas. Esta medición se realiza en diferentes puntos cercanos al SPT y se inyecta corriente cambiando de polaridad. Para medir la de contacto se inyecta corriente entre la estructura a medir y las pesas. (IGT, 1995)

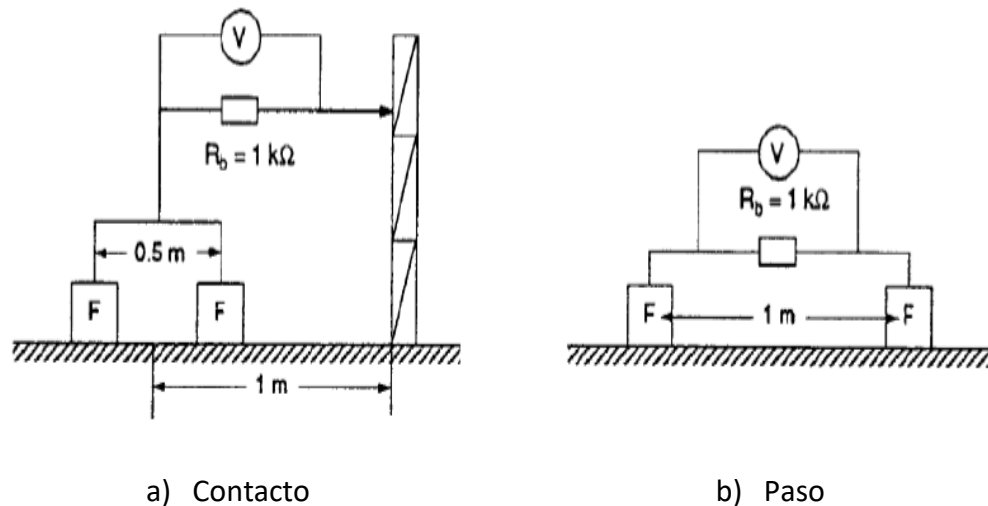



Figura 9. Método de medición de tensiones de contacto y paso. (IGT, 1995)

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

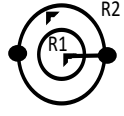
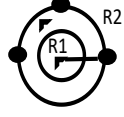
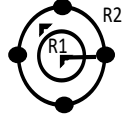
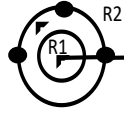
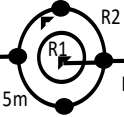
## 2.4 investigaciones en diseños

2.4.1 Análisis por software académico. Para el diseño de los sistemas de puesta a tierra, se han establecido algunas recomendaciones basadas en el análisis electromagnético híbrido que trabaja en conjunto con el método de momentos, los cuales exponen los resultados de la impedancia y la tensión transitoria para configuraciones tales como: triangulo, estrella de tres puntas, contrapesos y mallas.

Los resultados arrojados permiten definir la aplicación y características de configuraciones, las cuales guían y benefician al diseñador, sin generar otros gastos. Algunas especificaciones para tener en cuenta la caracterización adecuada son por ejemplo la longitud efectiva de los contrapesos, la localización de las varillas, lugar de conexión de los bajantes a las mallas y a las diferencias de potencias entre los puntos de una misma puesta a tierra, entre otros. (Montaña, 2011)

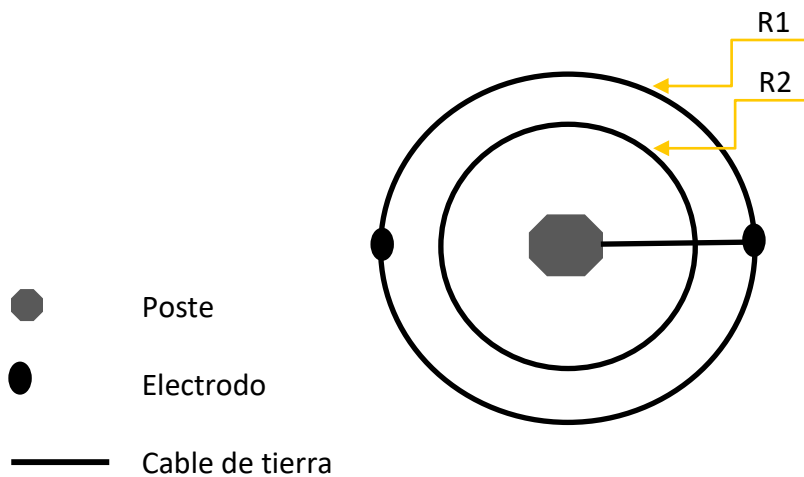
2.4.2 Norma RA6-010 sistemas de puesta a tierra en baja tensión. Estudio que permite controlar de una forma eficaz las tensiones de paso y de toque, las cuales estaban afectando la seguridad de las personas. Este estudio está soportado sobre la plataforma del programa ATP, el cual presenta buena confiabilidad por su precisión en los datos arrojados en las simulaciones comparados con los tomados en campo. Se caracteriza por incluir diferentes situaciones eléctricas, terrenos, longitud del circuito, resistencia de puesta a tierra y nivel de corto circuito. Las diferentes configuraciones se muestran en la Tabla 2. (EPM, 2011)

Tabla 2. Configuraciones básicas de puesta a tierra en función de la resistividad del suelo.

Nº	configuracion	Rta	Resistividad (ohmios-metro)									
			100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
1		$0.13 * \rho$	13	26								
2		$0.12 * \rho$	12	24	36							
3		$0.112 * \rho$	11	22	34	45	56	67				
4		$0.096 * \rho$	10	19	29	38	48	58	67			
5		$0.084 * \rho$	8	17	25	34	42	50	59	67	76	

Fuente: (EPM, 2011)

Configuración del SPT en postes de baja tensión.



R1: 90 cm desde la base del poste  
 R2: 1.5 metros desde la base del poste

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

## 3. METODOLOGÍA

---

Se realiza un estudio descriptivo apoyado en las bases de datos, entrevista e información recolectadas en campo acerca de la línea de transmisión Guadalupe IV - Occidente a 220 kV. Adicionalmente, se describe como se manifiestan las variables estudiadas, se efectúa un análisis que permita emitir observaciones y resultados basados en ella.

### 3.1 Funcionamiento de los SPT

La finalidad de estos sistemas tanto en baja como en alta tensión es la seguridad de las personas y la confiabilidad del sistema eléctrico ante cualquier tipo de falla. A continuación, se describe su funcionamiento ante una descarga atmosférica: Cuando un rayo impacta sobre el cable de guarda este debe conducir la corriente eléctrica hacia la torre y por medio de la bajante hacia el electrodo para ser disipada en la tierra.

Cuando el montaje del SPT está terminado se mide la resistencia de puesta a tierra de la torre la cual no puede superar el valor establecido en la Tabla 4.

Esta información permite identificar falencias en el momento del análisis y toma de datos físicos en el sistema.

### 3.2 Recopilación y análisis de información sobre las aperturas asociadas a descargas atmosféricas.

Según la información analizada se identifica que la mayor causa de las aperturas de las líneas de transmisión está asociadas a descargas atmosféricas. Adicionalmente, con la información recopilada de los relés de protección de las líneas, se identifican las torres de energía con reincidencia en fallas. Esta información permite sectorizar las zonas críticas para realizar un estudio detallado posterior (ver Tabla 3).


	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

Tabla 3. Causas de aperturas de las líneas de transmisión

Causa de la apertura	2012	2013	2014	Total General	Porcentaje
Tormenta recierre	342	410	358	1110	67.9%
Apertura automática	99	57	117	273	16.7%
Causa desconocida	80	37	45	162	9.9%
Acercamiento	17	11	8	36	2.2%
Árbol	4	8	17	29	1.8%
Cable reventado	2	1	5	8	0.5%
Pararrayos fallado	2	3	2	7	0.4%
Aislador fallado		1	2	3	0.2%
Puente reventado	1	1	1	3	0.2%
Interruptor	1		1	2	0.1%
Apoyo derribado		1		1	0.1%
Total general	548	530	556	1634	100.0%


Fuente: (CENTRO DE CONTROL EPM, 2015)

### 3.3 Mediciones

Se detecta que la línea Guadalupe IV – Occidente presenta fallas repetitivas, teniendo en cuenta su longitud de 61 Km y su nivel de tensión (220kV). Por lo anterior, se procede a tomar mediciones en campo, que permitan verificar el estado de los SPT en las torres 88 y 89 de esta línea que presentaron mayores índices de aperturas. Las mediciones se realizan con el telurómetro de marca Megabras TM-25m.

### 3.4 Propuesta de SPT a implementar

Con la información obtenida y en busca de dar cumplimiento a los objetivos, se propone implementar la norma RA6 010 - sistemas de puesta a tierra en baja tensión. Aunque es definida para BT permite homologación para los SPT de alta tensión según IEEE 80.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

El primer paso para la aplicación de esta norma es medir la resistividad del suelo, aplicando la norma (EPM, 2008) y seleccionar de la Tabla 2 la configuración correspondiente al valor de resistencia de puesta a tierra que se necesita. Para nuevos proyectos y simulaciones deberá aplicarse la configuración 1 en todo el rango de resistividades y cambiar según datos reales.

Se plantean beneficios en las líneas de transmisión, realizando una comparación entre los apoyos de baja tensión y las torres de transmisión argumentando que su funcionamiento es similar; esto permite tener una diferencia de potencial mínima entre SPT y la estructura, aumentando así la seguridad de las personas.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Configuración de los SPT en alta tensión

Los SPT para la protección de las descargas atmosféricas en las líneas de transmisión se instalan de la siguiente forma:

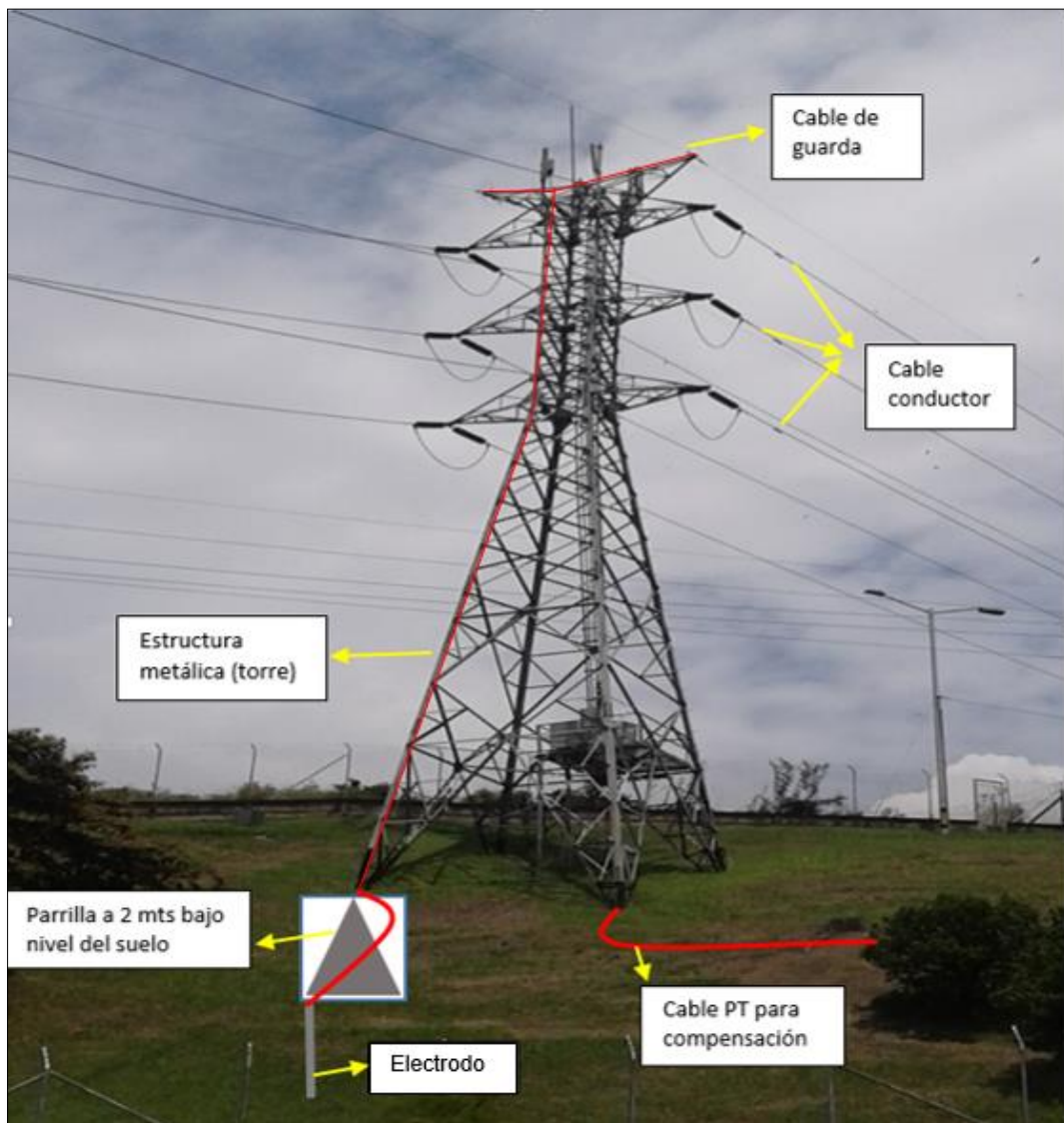


Figura 10. Torre de Transmisión (Empresas Públicas de Medellín, 2016)



	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

Al momento de la construcción de la torre de transmisión, se realizan 4 excavaciones de aproximadamente 2mx2mx2m (Profundidad, Ancho, Largo) en cada una de las patas de las torres donde posteriormente se conecta un electrodo de 1.2 metros de longitud.

Adicionalmente, todas las torres están interconectadas a lo largo de la línea con un cable de 3/8" de acero galvanizado llamado cable de guarda. La función del guarda es proteger los cables conductores de las descargas atmosféricas, sin embargo, se debe desacoplar eléctricamente (Desconectar o utilizar telurómetro de alta frecuencia) para realizar las mediciones de resistencia de SPT las cuales deben cumplir con los valores de la Tabla 4.

Tabla 4. Valores máximos de Resistencia de los SPT

<b>Aplicación</b>	<b>Valores máximos de resistencia de puesta a tierra</b>
Estructuras y torrecillas metálicas de líneas o redes con cable de guarda	20 $\Omega$
Subestaciones de alta y extra alta tensión	1 $\Omega$
Subestaciones de media tensión	10 $\Omega$
Protección contra rayos	10 $\Omega$
Punto neutro de acometida de baja tensión	25 $\Omega$
Redes para equipos electrónicos o sensibles	10 $\Omega$

Fuente: (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA, 2013)

Si la medida no cumple con la norma, se instalan cables de compensación (preferiblemente cobre) de 10 metros de longitud conectados a la estructura de la torre y enterrados aproximadamente 50 cm, su configuración es longitudinal. (Ver Figura 10)

## 4.2 Sectorización de zonas críticas por medio de análisis de causas


### 4.2.1 Aperturas de las líneas por año.

Apoyados en las bases de datos y en los informes suministrados por el área Centro de Control y Operaciones de EPM se establecieron los sectores críticos de la línea evaluada. (Ver Figura 11)



Figura 10. Aperturas de las líneas de transmisión por DEAT (CENTRO DE CONTROL EPM, 2015)

Se identifica el porcentaje de las aperturas por DEAT en cada año y se tiene datos similares en los 3 años. Sin embargo, las aperturas de las líneas de 220.000 V son categorizadas como críticas para el sistema y tienen una mayor restricción por parte de los entes reguladores.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

4.2.2 Aperturas de las líneas de transmisión por corredor. El corredor es una agrupación de varias líneas de transmisión por la misma servidumbre, que permite clasificar la prioridad del servicio por kilómetro (3 salidas anuales por cada 100 kilómetros).

Por políticas empresariales, para seleccionar los corredores a intervenir, se comparan los que presenten un porcentaje mayor al 10% en aperturas y de los clasificados, el que tenga menor distancia en kilómetros. Por tal motivo para el análisis realizado entre los años 2012 y 2014 el corredor objeto de análisis fue el número 10.

Tabla 5. Aperturas de las líneas de transmisión 220kV por corredor.

Número de corredor	2012	2013	2014	Total general	Porcentaje	Kilometraje
Corredor 3	9	27	17	53	23%	93
Corredor 1	14	13	13	40	18%	75
Corredor 7	12	7	8	27	12%	73
<b>Corredor 10</b>	<b>13</b>	<b>4</b>	<b>8</b>	<b>25</b>	<b>11%</b>	69
Corredor 8	13	8	2	23	10%	103
Corredor 2	7	4	11	22	10%	91
Corredor 5	4	4	3	11	5%	23
Corredor 15	2	5	3	10	4%	143
Corredor 12	3		4	7	3%	17
Corredor 9	3	2	1	6	3%	8
Corredor 13	-	-	1	1	0%	12
Corredor 14	1	-	-	1	0%	6
<b>Total general</b>	<b>81</b>	<b>74</b>	<b>71</b>	<b>226</b>	<b>100%</b>	

Fuente: (CENTRO DE CONTROL EPM, 2015)

De lo anterior se evidencia que el corredor 10 presenta un porcentaje alto de apertura comparado con menos kilómetros de línea activa.

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

#### 4.2.3 Zonas críticas.

Para localizar las zonas donde más aperturas se presentan por descargas atmosféricas, se solicitan los datos de estos eventos de las líneas de transmisión Guadalupe IV-Occidente y Guadalupe IV-Barbosa pertenecientes al corredor 10, donde con la ubicación (en kilómetros) de la falla y teniendo en cuenta el mismo periodo de tiempo del 2012 al 2014. En la Tabla 6 se registran las aperturas de la línea Guadalupe IV – Occidente y en la Tabla 7 se registran las aperturas de la línea Guadalupe IV – Barbosa.

Tabla 6. Registro de aperturas de la línea Guadalupe IV - Occidente a 220.00voltios

REGISTRO DE APERTURAS DE LA LINEA GUADALUPE IV-OCCIDENTE 220kV					
Año 2012					
Item	Apertura	Mes	Cierre	Distancia donde ocurrió la falla (Km)	Causa de la apertura
1	05/08/12 16:59	5	05/08/12 16:59	48.2	TORMENTA
2	05/28/12 12:44	5	05/28/12 12:44	51.6	TORMENTA
3	06/07/12 10:13	6	06/07/12 10:17	37.5	TORMENTA
4	06/30/12 19:29	6	06/30/12 19:29	20	TORMENTA
5	07/05/12 21:02	7	07/05/12 21:02	18.1	TORMENTA
6	07/08/12 12:43	7	07/08/12 12:49	40	TORMENTA
7	07/08/12 13:06	7	07/08/12 13:06	45	TORMENTA
8	08/03/12 17:28	8	08/03/12 17:28	15	TORMENTA
9	08/28/12 12:46	8	08/28/12 12:51	43	TORMENTA
10	09/20/12 22:21	9	09/20/12 22:21	22.3	TORMENTA
11	09/28/12 17:07	9	09/28/12 17:07	3.3	TORMENTA
Año 2014					
Item	Apertura	Mes	Cierre	Distancia donde ocurrió la falla (Km)	Causa de la apertura
1	04/27/14 21:21	4	04/27/14 21:21	21	TORMENTA
2	05/14/14 19:20	5	05/14/14 19:20	35	TORMENTA
3	05/28/14 17:52	5	05/28/14 17:52	20,5	TORMENTA
4	07/02/14 17:50	7	07/02/14 17:50	66	TORMENTA

Fuente: (CENTRO DE CONTROL EPM, 2015)

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

Esta línea en el año 2013 no presentó aperturas, para un total de 15 aperturas en los años 2012 y 2014 de las cuales 7 de ellas se encuentran ubicadas entre los kilómetros del 18 al 23 (Gómez Plata) y del kilómetro 35 al 40 (Don Matías).

Tabla 7. Registro de aperturas de la línea Guadalupe IV - Barbosa a 220.00 voltios

REGISTRO DE APERTURAS DE LA LINEA GUADALUPE IV-BARBOSA 220kV					
Año 2012					
Item	Apertura	Mes	Cierre	Distancia donde ocurrió la falla (Km)	Causa de la apertura
1	06/14/12 17:29	6	06/14/12 17:29	36,6	TORMENTA
2	07/15/12 21:02	7	07/15/12 21:02	18,1	TORMENTA
3	08/03/12 17:28	8	08/03/12 17:28	11,2	TORMENTA
4	09/20/12 22:21	9	09/20/12 22:230	21	TORMENTA
5	10/24/12 00:54	10	10/24/12 02:24	8	TORMENTA
6	11/15/12 10:46	11	11/15/12 10:55	39	TORMENTA
Año 2013					
Item	Apertura	Mes	Cierre	Distancia donde ocurrió la falla (Km)	Causa de la apertura
1	08/10/13 18:23	8	08/10/13 18:23	25	TORMENTA
Año 2014					
Item	Apertura	Mes	Cierre	Distancia donde ocurrió la falla (Km)	Causa de la apertura
1	04/27/14 21:21	4	04/27/14 21:21	28	TORMENTA
2	05/14/14 19:20	5	05/14/14 19:20	35	TORMENTA
3	05/28/14 17:52	5	05/28/14 17:52	20,7	TORMENTA

Fuente: (CENTRO DE CONTROL EPM, 2015)

Esta línea presentó un total de 10 aperturas entre el periodo del 2012 al 2014 de las cuales 5 se encuentran ubicadas entre los kilómetros del 18 al 23 (Gómez Plata) y del kilómetro 35 al 40 (Don Matías) al igual que la línea Guadalupe – Occidente.


En total son 25 aperturas en tres años.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

- En el año 2012 la línea Guadalupe IV-Occidente tuvo 11 aperturas y la Guadalupe IV-Barbosa 6 aperturas.
- En el año 2013 la línea Guadalupe IV-Occidente no tuvo aperturas y la línea Guadalupe IV-Barbosa 1 apertura.
- En el año 2014 la línea Guadalupe IV-Occidente tuvo 4 aperturas y la línea Guadalupe IV-Barbosa 3 aperturas.

De acuerdo a las aperturas durante los años 2012, 2013 y 2014 se determinó que las zonas críticas se encuentran entre los kilómetros 18 al 23 y del kilómetro 35 al 40.

- **Km 18 al 23:** Comprendido entre las torres No. 39 a la No. 50. En este tramo, se encontraron 50 novedades por daños en el aislamiento (ubicadas en la vereda la Mina del municipio de Gómez Plata).
- **Km 35 al 40:** Comprendido entre las torres No. 78 a la No. 89. En este tramo, se encontraron 27 novedades por daños en el aislamiento. Estas novedades por lo general son aisladores flameados, quemados o quebrados y se asocian a zonas con alto índice de descargas atmosféricas. (ubicadas en la vereda la montera del municipio de Don Matías).

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

### 4.3 Toma de datos en campo

Con los análisis de los registros se determinan las torres 88 y 89 ubicadas en la vereda Montañitas del municipio de Don Matías Antioquía como puntos con ocurrencia de fallas.

Posteriormente se realizan las siguientes tareas:

1. Se procede con una revisión física del SPT dando prioridad al estado de los cables y conectores.
2. Se realizan las mediciones de las variables estipuladas en el RETIE:

Los datos a recolectar son:

- Medición de la puesta a tierra de las torres.
- Medición de la resistividad del terreno.
- Medición de la tensión de paso (Calculada).
- Medición de la tensión de toque (Calculada).

Como resultado de la revisión física se presentan los siguientes comentarios:

- ✓ No se encuentran anomalías en el sistema de puesta a tierra
- ✓ Los conectores se encuentran en buen estado
- ✓ El cable de guarda se encuentra equipotencializado
- ✓ Se detecta que estas torres tienen cable de compensación lineal

#### 4.3.1 Equipo de medición.

Para la medición del sistema de puesta a tierra de las torres del corredor No. 8 se utilizó el telurómetro de marca Megabras TM-25m de alta frecuencia (Figura 11), diseñado especialmente para la medición de puesta a tierra de torres de transmisión de energía sin necesidad de desconectar el cable de guarda ya que minimiza el efecto de las torres adyacentes conectadas.



Figura 112. Telurómetro (Empresas Públicas de Medellín, 2016)

#### 4.3.2 Método de medición.

El método de medición de puesta a tierra utilizado fue el de caída de potencial recomendado por el (Ministerio de Minas y Energía, 2013). El montaje para la medición de puesta a tierra consiste en la ubicación del electrodo de corriente D1 a 100 metros y el electrodo de potencial D2 al 61,8% de la distancia D1, es decir a 61,8 metros, como se recomienda en el Artículo “15.5.2 del RETIE.

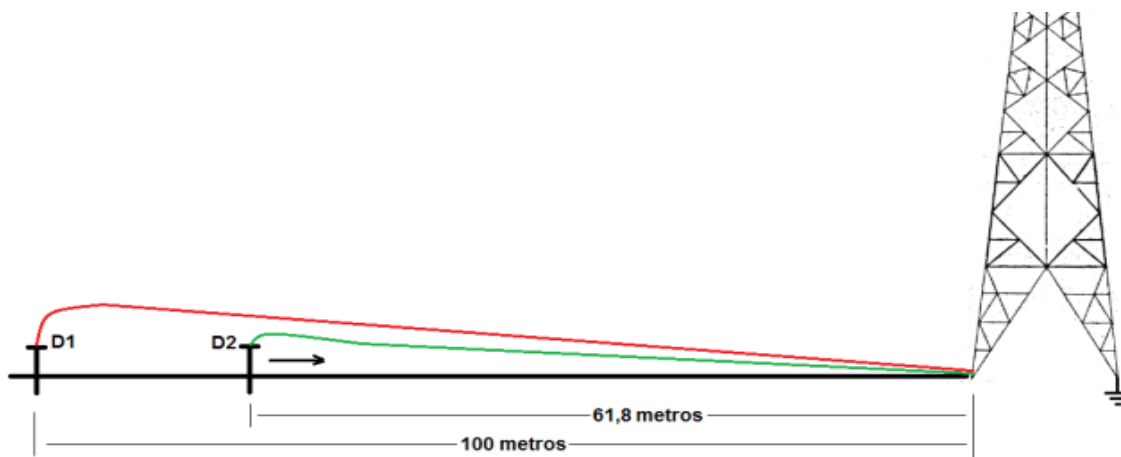



Figura 123. Método de medición de caída de potencial. (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA, 2013)



	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

Se mide la resistividad del suelo aplicando el metodo de Wenner (Ver Figura 6), alrededor de la torre 88 la resistencia es de **5.82 ohmios** y para la torre 89 es de **6.22 ohmios**, aplicamos la ecuacion (2.1) y obtenemos:

$$\begin{array}{ll}
 \text{Torre 88} & \rho = 2 * \pi * 1m * 5.82\Omega \\
 & \rho = 36.5 \Omega * m \\
 \text{Torre 89} & \rho = 2 * \pi * 1m * 6.22\Omega \\
 & \rho = 39 \Omega * m
 \end{array}$$

la tensión de contacto Permissible con tiempo de despeje de 100 ms es de 320 voltios.  
(Ver Tabla 1)

Para hallar la tensión de paso Permissible aplicamos la formula (2.4)

$$\begin{array}{ll}
 \text{Torre 88} & E_p = \frac{165 + 36.5}{\sqrt{0.1}} \\
 & E_p = 637 \text{ voltios} \\
 \text{Torre 89} & E_p = \frac{165 + 39}{\sqrt{0.1}} \\
 & E_p = 645 \text{ voltios}
 \end{array}$$

En la Tabla 8 observamos los datos tomados en campo siguiendo los parámetros definidos y con las instrucciones de recolección de datos como se muestra en las Figuras 9-13.

Tabla 8. Datos de mediciones en las torres 88 y 89 corredor 10 (EPM 2016)

Semana #	Línea No.	Número de la estructura	Resistencia (Ω)	Resistencia permisible	Tensión de Paso (voltios)	Tensión de Paso permisible	Tensión de Contacto (voltios)	Tensión de Contacto permisible
10	7 y 8	88	28.7	20	648	637	346	320
10	7 y 8	89	23.03	20	665	645	331	320

Fuente: (EPM, 2016)

Se observa en la tabla 8 que las tres variables no cumplen con la norma, los valores medidos en las dos torres estan por encima de los máximos permisibles, se hace necesario analizar otras técnicas que contribuyan al mejoramiento de los parámetros establecidos.




Figura 134. Medición puesta a tierra torre 88 (Empresas Públicas de Medellín, 2016)

#### 4.4 Propuesta de nueva técnica para mejoras de los SPT

Se propone realizar una prueba en las torres 88 y 89 cambiando a la configuración del SPT actuales (compensación lineal) por los vistos en (EPM, 2011) que son conductores periféricos alrededor de la torre.

La compensación del sistema de puesta a tierra (malla ubicada a 50 cm de la base) de la torre de transmisión consiste en cubrir el perímetro de la base, con la finalidad de bajar la resistencia de puesta a tierra y adicionalmente controlar las tensiones de toque y de paso de la torre.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

En la Figura 15 se muestra la configuración.



Figura 15. Configuración nueva compensación (Empresas Públicas de Medellín, 2016)

El cable es enterrado a una profundidad de 50 a 60 cm y las jabalinas o electrodos son enterrados en su totalidad y tienen una longitud de 2.40 m. Se conecta el cable a la torre y a la jabalina con conectores certificados RETIE, con el fin de garantizar un buen contacto entre la torre y el SPT. Finalmente, se debe realizar una buena compactación de la tierra después de enterrar el cable, pues una mala compactación genera una mala disipación de la corriente por los espacios de aire que quedan dentro de la tierra.

En la Figuras 16 – 17 se puede observar el procedimiento realizado.






Figura 16. Instalación de compensación torre 88 (Empresas Públicas de Medellín, 2016)



Figura 17. Instalación electrodo torre 88 (Empresas Públicas de Medellín, 2016)

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

#### 4.5 Toma de datos

Después de realizar el montaje de la nueva configuración se procede a los 30 días siguientes a la toma de datos y ver su comportamiento (Ver Tabla 9).

Tabla 9. Toma de datos con la nueva configuración.

Semana #	Línea No.	Número de la estructura	Resistencia ( $\Omega$ )	Resistencia permisible	Tensión de Paso (voltios)	Tensión de Paso permisible	Tensión de Contacto (voltios)	Tensión de Contacto permisible
10	7 y 8	88	19	20	639	637	253	320
10	7 y 8	89	15.9	20	654	645	241	320

Fuente: (EPM, 2016)

Posterior a la prueba se detectan cambios positivos en la resistencia de puesta a tierra de la torre, cumpliendo los valores permitidos de resistencia en la Tabla 4, la tensión de contacto también se ubicó por debajo de 320 voltios, valor permitido en la Tabla 1.

Por otro lado, la tensión de paso presentó mejora, sin embargo, no alcanza a estar por debajo del máximo voltaje permitido según ecuación (2.3). Para este caso se sugiere una prueba con doble anillo de compensación como lo muestra la norma (EPM, 2011).

Debido a los avances proporcionados por el presente estudio, en el año 2017 se pretende continuar ejecutando dichas configuraciones en aproximadamente 30 torres con un índice alto de discontinuidad del servicio por condiciones atmosféricas.

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

## 5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

---

### 5.1 Conclusiones

- El análisis de la información suministrada por el Centro de Control de EPM fue fundamental para identificar y sectorizar los puntos con más fallas presentadas por descargas atmosféricas.
- La toma de datos en los puntos críticos permitió ver que la resistencia de puesta a tierra de la torre, la tensión de paso y de contacto, están por encima de lo permitido en la reglamentación colombiana y no existen registros de medidas anteriores.
- Se identifican falencias en los sistemas de SPT de las torres de transmisión de EPM por medio del análisis de información y la toma de datos en campo.
- Se recomienda implementar las configuraciones estudiadas en la norma RA6-010 para optimizar el desempeño de las líneas de transmisión.
- La metodología utilizada en la prueba mejora la medida de resistividad de la torre y controla las tensiones de paso y contacto estipuladas en las normas de los SPT.
- El resultado de utilizar la configuración de compensación propuesta (EPM, 2011), permite evidenciar que los SPT en baja tensión se pueden homologar en las torres de transmisión.
- Las características del terreno son fundamentales para el diseño del SPT, por tal motivo, un mal estudio del terreno puede ser causante de fallas en las líneas de transmisión.
- Se recomienda utilizar equipos de medida de resistividad del terreno y SPT de alta frecuencia.
- Las fallas en las líneas también se pueden presentar por: falta de mantenimiento, equivocaciones en los rediseños del SPT y elementos de mala calidad.

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

## 5.2 Recomendaciones y trabajo futuro

- Realizar mantenimientos con más frecuencia a los sistemas de puesta a tierra, tomar los datos que nos indiquen su estado actual y llevar una hoja de vida de cada uno de ellos con frecuencias de actualización aproximadamente cada año.
- Realizar comparaciones con otros puntos críticos ya identificados, cambiando la configuración de la compensación de línea recta a rodear el perímetro de la torre y verificar el comportamiento en este sistema.
- Se debe dar cumplimiento al RETIE debido a que su aplicación está en pro de la seguridad de todos los seres vivos.
- Para mejorar la tensión de paso se propone realizar el montaje de doble anillo de compensación al perímetro de la torre aproximadamente a 1 metro.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

## REFERENCIAS

---

Blog. endesaeduca. (octubre de 2013). <http://blog.endesaeduca.com>.

CENTRO DE CONTROL EPM. (2015). *Aperturas Lineas de Transmision*.

EPM. (mayo de 2002). *Norma RA7-018*.

EPM. (MAYO de 2008). *NORMAS TECNICAS RA6-014*.

EPM. (Junio de 2011). *NORMA RA6-010*.

ICONTEC. (1998). *Norma Técnica NTC 2050 - Scribd*.

ICONTEC. (2004). *NTC 4552 - DesTec*. Recuperado el 26 de mayo de 2013

IGT. (1995).

JOHN, H. (OCTUBRE de 2003). *Dialnet-  
CALCULO DELA MALLA DE PUESTA A TIERRA DE UNA SUBESTACION-  
4846270.pdf*.

JOSE RAMIREZ, E. C. (2010). *eduardoantonio cano plata.2010.pdf*.

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA. (2013). *REGLAMENTO TÉCNICO DE  
INSTALACIONES ELÉCTRICAS (RETIE)*. BOGOTA.

Montaña, J. (octubre de 2011). *Base de Datos SciELO*.

NEMA. (s.f.). *Electrodos de puesta a tierra*.

salazar, j. r. (SEPTIEMBRE de 2010). *SISTEMAS DE LINEAS DE TRANSMISION*.

*SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES*. (2016). Obtenido de [www.selinc.com](http://www.selinc.com)

*SECTOR ELECTRICIDAD*. (S/F).



 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

SIEMENS. (2015). *YOU TOBE*. Obtenido de Pararrayos - line arrester.

slideshare. (2014).

Tapia, A. (Marzo de 2012). *Constructor Electrico*.

FIRMA ESTUDIANTES 

---

FIRMA ASESOR 

---

FECHA ENTREGA: 10 enero 2017

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD \_\_\_\_\_

RECHAZADO\_\_      ACEPTADO \_\_\_\_      ACEPTADO CON MODIFICACIONES \_\_\_\_\_

ACTA NO. \_\_\_\_\_

FECHA ENTREGA: \_\_\_\_\_

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD \_\_\_\_\_

ACTA NO. \_\_\_\_\_

FECHA ENTREGA: \_\_\_\_\_