

**PROPUESTA DE PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LA  
RESISTIVIDAD DEL SUELO Y LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA EN  
LÍNEAS DE TRANSMISIÓN**

**JUDITH AMPARO RAMÍREZ ROA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA, FEBRERO DE 2008**

**PROPUESTA DE PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LA  
RESISTIVIDAD DEL SUELO Y LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA EN  
LÍNEAS DE TRANSMISIÓN**

**JUDITH AMPARO RAMÍREZ ROA**

**Trabajo de grado para optar al título de Ingeniera Electricista**

Director

**ING. RAFAEL ARISMENDI W. MPE**

Codirector:

**ING. JULIO CÉSAR CHACÓN V. MPE**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA, FEBRERO DE 2008**

## DEDICATORIA

*A Dios mi padre amoroso, misericordioso, poderoso, fiel, mi refugio, mi esperanza, mi fortaleza, en quien pongo toda mi confianza y voluntad; porque sé mi Señor que no es por mis conocimientos, por mi inteligencia, por mi sabiduría, o por mis fuerzas, sino gracias a ti mi amado que son prosperados todos mis caminos.*

*Y a la persona más maravillosa en mi vida, quien es manifestación del amor incondicional, mi madre.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Al MPE. Rafael Arismendi y al MPE. Julio Cesar Chacón, quienes decidieron apoyarme en el desarrollo de mi proyecto, por orientarme con paciencia y sabiduría, por su gran disposición y generosidad y por compartir conmigo su excelencia profesional y humana.

A mi padre y a mi madre, por su inmenso amor, por su apoyo así en los días malos y buenos, por proveerme de lo necesario, por su paciencia, por el gran esfuerzo que hacen por mí y mis hermanos. También agradezco a mis hermanitos, pues ellos y mi familia son el poderoso motivo de mis esfuerzos. A mis abuelitos, tíos, tías y primitos, por su gran ayuda y porque siempre me han dado mucho más de lo que he esperado; especialmente a mi tía Patty, quien ha sido una segunda madre para mí y junto con Silva y Carlos me han brindado un segundo hogar.

A Diego, por su amor benigno, por su espera, paciencia, constancia, por sus enseñanzas y llenar de hermosa música mi vida.

A Liz y Cecilia, por su valiosa amistad y sabios consejos.

## **CONTENIDO**

INTRODUCCIÓN	18
1. GENERALIDADES SOBRE LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA	20
1.1 OBJETIVOS Y FUNCIONES DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA	21
1.2 RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA	22
1.3 EL SUELO Y SUS CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS	24
1.3.1 Concepto De Resistividad	24
1.3.2 El Suelo y su Resistividad	24
1.3.3 Modelo Geoeléctrico de la Tierra	28
1.4 INFLUENCIA DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA EN EL COMPORTAMIENTO DE LAS LÍNEAS AÉREAS DE TRANSMISIÓN ANTE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	29
1.5 ETAPAS DEL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN	31
2. MÉTODOS PARA LA MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO	36
2.1 MÉTODOS DIRECTOS	36
2.2 MÉTODOS INDIRECTOS	37
2.2.1 Registro Eléctrico de Perforación	37
2.2.2 Método de Variación de la Profundidad	38
2.2.3 Método de Wenner	39
2.2.4 Método de Schlumberger	41
2.3 INTERPRETACIÓN DE LAS MEDIDAS OBTENIDAS	42

2.4	RECOMENDACIONES ADICIONALES PARA LA MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN	48
3.	MÉTODOS PARA LA MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA	51
3.1	MÉTODO DE LOS DOS PUNTOS	52
3.2	MÉTODO DE LOS TRES PUNTOS	53
3.3	MÉTODO DE LA CAÍDA DE POTENCIAL	54
3.3.1	Interpretación De Las Medidas Obtenidas	56
3.4	MÉTODO DE LA PENDIENTE	58
3.5	MÉTODO DE LA INTERSECCIÓN DE CURVAS	61
3.6	MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA DE TORRES DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN CONECTADAS A CABLES DE GUARDA	65
3.7	RECOMENDACIONES ADICIONALES PARA LA MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN	66
4.	ANÁLISIS COMPARATIVO Y SELECCIÓN DE LOS MÉTODOS ADECUADOS PARA LA MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO Y DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN AÉREAS	69
	SELECCIÓN DEL MÉTODO PARA LA MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN AÉREAS	69
4.1.1	Análisis Comparativo de los Métodos Para la Medida de la Resistividad del Suelo en Líneas de Transmisión Aéreas Resumen Análisis Comparativo de los Métodos Para la Medida de la Resistividad del Suelo.	69
4.1.2	Análisis Comparativo de los Modelos del Suelo	75
4.1.3	Conclusión	76

4.2 SELECCIÓN DEL MÉTODO PARA LA MEDIDA DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN AÉREAS	77
4.2.1 Análisis Comparativo de los Métodos Para la Medida de la Resistencia de Puesta a Tierra Resumen del análisis comparativo de los Métodos para la Medida de la Resistencia de Puesta a Tierra	77
4.2.2 Análisis Comparativo de las Posibles Soluciones a Implementar para la medición de la Resistencia de Puesta a Tierra en Torres Conectadas a Cables de Guarda	83
4.2.3 Conclusiones	84
5. PROCEDIMIENTO PARA LA MEDIDA DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA Y RESISTIVIDAD DEL SUELO EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN	85
5.1 PROCEDIMIENTO PARA LA MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN	86
5.1.1 Planeación Y Preparación	86
5.1.2 Medidas en Campo	89
5.1.3 Modelado del Suelo	96
5.1.4 Instructivo de Aplicación del Método de Sunde Para la Obtención De un Modelo de Dos Capas (Informativo)	98
5.2 PROCEDIMIENTO PARA LA MEDIDA DE LA RESITENCIA DE PUESTA A TIERRA EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN	103
5.2.1planeación Y Preparación	103
5.2.2 Etapa de Medidas en Campo	106
CONCLUSIONES	118
RECOMENDACIONES Y OBSERVACIONES	120
BIBLIOGRAFIA	121
ANEXOS	123

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sistema de Puesta a Tierra	20
Figura 2. Sistema de Puesta a Tierra en Líneas de Transmisión	21
Figura 3. Concepto de resistencia de puesta a tierra	23
Figura 4. Horizontes del suelo	25
Figura 5. Efecto de la humedad, temperatura y contenido de sales en la resistividad del suelo	26
Figura 6. Modelo geoelectrico de la tierra.	29
Figura 7. Mecanismo de flameo inverso	30
Figura 8. Ondas viajeras tras el impacto del rayo en la torre	31
Figura 9. Etapas del proceso de diseño y construcción de un SPT en líneas de transmisión	35
Figura 10. Determinación de la resistividad de una muestra de suelo	37
Figura 11. Registro eléctrico de perforación y curva típica de resistividad obtenida	38
Figura 12. Método de variación de la profundidad	38
Figura 13. Método de Wenner	40
Figura 14. Curva de resistividad aparente	41
Figura 15. Método de Schlumberger	42
Figura 16. Suelo casi uniforme	42
Figura 17. Modelo de dos capas	46
Figura 18. Método gráfico de Sunde	48
Figura 19. Principio de medida de resistencia de puesta a tierra	52

Figura 20. Método de los dos puntos	53
Figura 21. Método de los tres puntos	53
Figura 22. Método de la caída de potencial	55
Figura 23. Espaciamiento requerido del electrodo de potencial en un suelo de dos capas	57
Figura 24. Efecto del recorrido del electrodo de potencial y del acople entre electrodos de corriente y potencial en la medición de la resistencia de puesta a tierra	58
Figura 25. Método de la pendiente	59
Figura 26. Resistencia obtenida mediante la aplicación del método de la pendiente a diferentes distancias de prueba EC	60
Figura 27. Procedimiento de medida, Método de la intersección de curvas	61
Figura 28. Curvas de resistencia aparente versus distancia, para diferentes distancias de prueba EC	62
Figura 29. $\lambda$ : distancia entre el punto E y el centro eléctrico G de la puesta a tierra	62
Figura 30. Curvas de intersección	64
Figura 31. Método de medida selectivo para torres de líneas de transmisión conectadas a cables de guarda	66
Figura 32. Perfil de frecuencias del suelo	68
Figura 33. Selección de las rutas de medición.	88
Figura 34. Ubicación de los electrodos de medida.	89
Figura 35. Conexión de los cables a los electrodos	89
Figura 36. Conexión del equipo de medición.	90
Figura 37. Reubicación de los electrodos de medida.	91
Figura 38. Reconexión del equipo.	91

Figura 39. Procedimiento de medición siguiendo la ruta 2.	92
Figura 40. Formato diligenciado a partir de la guía para la medida de la resistividad del suelo	94
Figura 41. Figura guía paso # 1. Resistividad aparente vs Espaciamiento entre electrodos	97
Figura 42. Guía paso # 3	98
Figura 43. Guía paso # 4	99
Figura 44. Guía paso # 6	100
Figura 45. modelo de dos capas del suelo obtenido	101
Figura 46. Plano puesta a tierra de torre	105
Figura 47. Anotaciones en el formato de registro de medidas de la resistencia de puesta a tierra	105
Figura 48. Selección de la ruta de medición	106
Figura 49. Posición de los electrodos	106
Figura 50. Conexión de los cables	107
Figura 51. Conexión del equipo y ejecución de la medida de R1	108
Figura 52. Registro de los datos distancia EC y resistencia de prueba R1 en el formato	108
Figura 53. Medición de la resistencia de prueba R2	109
Figura 54. Medición de la resistencia de prueba R3	109
Figura 55. Medición de la resistencia $R_{4_1}$ a la distancia EP	111
Figura 56. Registro de la resistencia obtenida $R_{4_1}$ en el formato	111
Figura 57. Reubicación de electrodos	112
Figura 58. Medición de las resistencias de prueba R1, R2, y R3	112

Figura 59. Medición de la resistencia $R_{4_2}$	114
Figura 60. Registro de la resistencia $R_{4_2}$ en el formato	114
Figura 61. Diligenciamiento del dato Resistencia de puesta a tierra de la torre # 18	115
Figura 62. Medición de las resistencias R1, R2 y R3 a la distancia $EC = 4 \cdot D_{max}$	116
Figura 63. Medición de la resistencia $R_{4_3}$ .	117

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. ALGUNOS ARREGLOS DE ELECTRODOS COMÚNMENTE IMPLEMENTADOS COMO PUESTA A TIERRA EN TORRES DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN	123
ANEXO B. VALORES DE $P_T/C$ PARA DISTINTOS VALORES DE $\mu$	124
ANEXO C. FORMATO DE REGISTRO. MEDIDAS DE RESISTIVIDAD DEL SUELO	125
ANEXO D. FORMATO DE REGISTRO. MEDIDAS DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA	126

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Valores máximos de resistencia de puesta a tierra	23
Tabla 2. Valores orientativos de resistividad del suelo	28
Tabla 3. Análisis comparativo de los métodos para la medida de la resistividad del suelo de acuerdo a su incertidumbre estimada	70
Tabla 4. Análisis comparativo de los métodos para la medida de la resistividad del suelo de acuerdo a su facilidad de implementación.	71
Tabla 5. Análisis comparativo de los métodos para la medida de la resistividad del suelo de acuerdo a su conveniencia económica.	72
Tabla 6. Análisis comparativo de los métodos para la medida de la resistividad del suelo de acuerdo a su campo aplicación.	72
Tabla 7. Análisis comparativo de los métodos para la medida de la resistividad del suelo de acuerdo a fuentes bibliográficas.	73
Tabla 8. Análisis comparativo - Cuadro resumen	74
Tabla 9. Análisis comparativo de los modelos del suelo más usados en aplicaciones de sistemas de puesta a tierra.	76
Tabla 10. Análisis comparativo de los métodos para la medición de la resistencia de puesta a tierra según su incertidumbre estimada	78
Tabla 11. Análisis comparativo de los métodos para la medición de la resistencia de puesta a tierra según el posicionamiento de electrodos a gran distancia y facilidad de implementación	79
Tabla 12. Análisis comparativo de los métodos para la medición de la resistencia de puesta a tierra según su conveniencia económica	80
Tabla 13. Análisis comparativo de los métodos para la medición de la resistencia de puesta a tierra según su campo de aplicación	81
Tabla 14. Análisis comparativo de los métodos para la medición de la resistencia de puesta a tierra de acuerdo a la disponibilidad de fuentes bibliográficas	82
Tabla 15. Análisis comparativo de los métodos para la medida de la	83

resistencia de puesta a tierra - Cuadro resumen

Tabla 16. Análisis comparativo de las posibles soluciones a implementar para la medición de la resistencia de puesta a tierra en torres conectadas a cables de guarda	84
Tabla 17. Cálculo de la variable $X_i$	96
Tabla 18. Cálculo de los términos $(X_i - \bar{x})^2$ como ayuda para el cálculo de la desviación estándar	97

**TÍTULO:**

PROPUESTA DE PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO Y LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN\*.

**AUTORA:**

Judith Amparo Ramírez Roa\*\*.

**PALABRAS CLAVE:**

Puesta a tierra, líneas de transmisión, medida de la resistividad del suelo, medida de la resistencia de puesta a tierra.

**RESUMEN**

Se ha encontrado que las descargas atmosféricas son la causa principal de interrupciones no programadas en líneas de transmisión y de flameos inversos a través de la cadena de aisladores, provocando la reducción de la vida útil de estos últimos e incluso su destrucción. Este tipo de fallas relacionadas con la puesta a tierra de las torres de líneas de transmisión, ha enfatizado la necesidad de mejorar la calidad en su diseño, construcción y mantenimiento, y en los procesos de medición de la resistividad del suelo y de la resistencia de puesta a tierra.

El presente trabajo propone y desarrolla los procedimientos para la medida de la resistividad del suelo y de la resistencia de puesta a tierra en líneas de transmisión aéreas, a partir de la investigación y de la elección de los métodos más adecuados para desarrollar este tipo de mediciones. La aplicación de los procedimientos involucra el mejoramiento en la calidad de los procesos de diseño, construcción y mantenimiento de sistemas de puesta a tierra en líneas de transmisión, reduce los costos asociados a la no calidad y facilita la ejecución de este tipo de mediciones a las personas y empresas que requieran llevarlas a cabo.

---

\* Proyecto de grado.

\*\* Facultad de ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Dirigido por Rafael Arismendi Webber.

**TITLE:**

PROCEDURE PROPOSAL FOR THE MEASUREMENT OF THE SOIL RESISTIVITY AND THE GROUNDING RESISTENCE IN TRANSMISSION LINES\*.

**AUTHOR:**

Judith Amparo Ramírez Roa\*\*.

**KEYWORDS :**

Grounding, transmission lines, soil resistivity measurement, ground resistance measurement.

**ABSTRACT**

It's been found that lightning is the main cause of unscheduled interruptions in transmission lines and back flashovers across insulators, provoking reduction of their useful life and even destruction. This type of faults related structure grounding, has emphasized on the need to improve the quality of design, construction, and maintenance as well as the quality of soil resistivity and grounding resistance measurement processes.

The present work proposes and develops the procedure for measuring soil resistivity and grounding resistance in overhead transmission lines, from the investigation and selection of the most adequate methods to develop this kind of measurements. Application of the procedures involves the improvement of the quality of design, construction, and maintenance processes, reduces the cost associated to non-quality and facilitates people and enterprises the execution of this type of measurements.

---

\* Project of grade.

\*\* Faculty Engineering Physical mechanics, Engineering Electrical, Electronic and Telecommunications School. Directed by Rafael Arismendi Webber.

## INTRODUCCIÓN

El proceso de transmisión de energía es la transferencia de grandes bloques de energía eléctrica desde las centrales de generación hasta las áreas de consumo, donde subestaciones y sistemas de distribución proporcionan el servicio a las instalaciones de uso final. En Colombia, este proceso se realiza a través de líneas eléctricas aéreas de alta tensión de corriente alterna trifásica frecuencia nominal 60 Hz, las cuales según lo exigido por el Reglamento Técnico de Instalaciones – RETIE deben disponer de un Sistema de Puesta a Tierra.

El objeto del Sistema de Puesta a Tierra es garantizar la seguridad de las personas, la protección de las instalaciones y la compatibilidad electromagnética[14]. Adicionalmente, en el caso especial de las líneas de transmisión el sistema de puesta a tierra juega un papel de gran importancia, pues influye en el comportamiento adecuado de la línea ante descargas atmosféricas.

Se ha encontrado que las descargas atmosféricas son la causa principal de interrupciones no programadas en líneas de transmisión y de flameos inversos a través de la cadena de aisladores, provocando la reducción de la vida útil de estos últimos e incluso su destrucción. Este tipo de fallas relacionadas con la puesta a tierra de las torres de líneas de transmisión, ha enfatizado la necesidad de mejorar la calidad en su diseño, construcción y mantenimiento, y en los procesos de medición de la resistividad del suelo y de la resistencia de puesta a tierra.

La medida de la resistividad del suelo y de la resistencia de puesta a tierra, son procedimientos tediosos si se tiene en cuenta que deben realizarse en cada sitio de torre, en el primer caso antes del diseño del sistema de puesta a tierra de la torre, en el segundo caso al momento de terminada la construcción del sistema de puesta a tierra, y posteriormente para efectos de mantenimiento.

Aunque se dispone de diversos métodos aceptados internacionalmente, y el mercado ofrece gran cantidad de equipos para la medición de la resistividad del suelo y de la resistencia de puesta a tierra, se dispone de poca información acerca de su conveniencia y de la manera en que estos deberían de aplicarse teniendo en cuenta las características y necesidades de las líneas de transmisión.

A partir de las necesidades expuestas, el presente trabajo propone y desarrolla los procedimientos para la medida de la resistividad del suelo y de la resistencia de puesta a tierra en líneas de transmisión.

Estos procedimientos han sido desarrollados a partir de la investigación y de la elección de los métodos más adecuados para desarrollar este tipo de mediciones

en líneas de transmisión aéreas, y con la intención de mejorar la calidad en dichos procesos, reduciendo la incertidumbre asociada a la medición y los costos asociados al reproceso.

El documento que se expone a continuación tiene cinco capítulos. En el capítulo 1 se presentan conceptos básicos acerca del sistema de puesta a tierra y de la influencia de la resistencia de puesta a tierra en el comportamiento de las líneas de transmisión aéreas ante descargas atmosféricas. El capítulo 2, presenta de los métodos más utilizados para la medición de la resistividad del suelo y sus fundamentos generales, los modelos del suelo más usados en aplicaciones de sistemas de puesta a tierra, y las recomendaciones que deben atenderse para la medición de la resistividad del suelo en líneas de transmisión. En el capítulo 3, se exponen los métodos más usados para la medición de la resistencia de puesta a tierra, las posibles soluciones a implementar en el caso de realizar mediciones en torres conectadas a cables de guarda y las recomendaciones que deben atenderse para la medición de la resistencia de puesta a tierra en torres de líneas de transmisión. El capítulo 4 presenta el análisis comparativo de los métodos para la medición expuestos en los capítulos 2 y 3, y a partir de los resultados de estos análisis comparativos la selección de los métodos más adecuados para la medición en líneas de transmisión. El capítulo 5 presenta el producto final del presente trabajo: el procedimiento para la medida de la resistividad del suelo en líneas de transmisión y el procedimiento para la medida de la resistencia de puesta a tierra en líneas de transmisión.

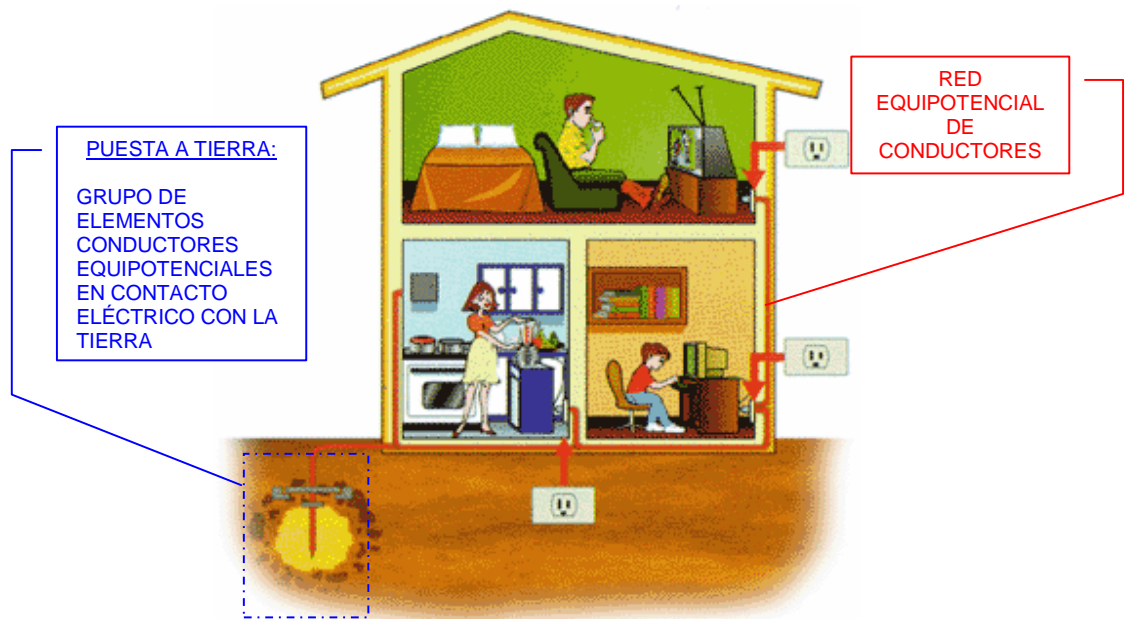
## 1. GENERALIDADES SOBRE LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA

Un sistema de puesta a tierra (SPT) es el conjunto de elementos conductores de un sistema eléctrico específico, sin interrupciones ni fusibles, que conectan los equipos con el terreno o con una masa metálica (Ver figura 1). Comprende la puesta a tierra y la red equipotencial de conductores que en condiciones normales de operación del sistema de potencia no conducen corriente [14].

La puesta a tierra es el grupo de elementos conductores equipotenciales, en contacto eléctrico con el suelo o 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.

La red equipotencial de conductores es la encargada de conectar los elementos que deban quedar puestos a tierra dentro de la instalación.

Figura 1. Sistema de Puesta a Tierra

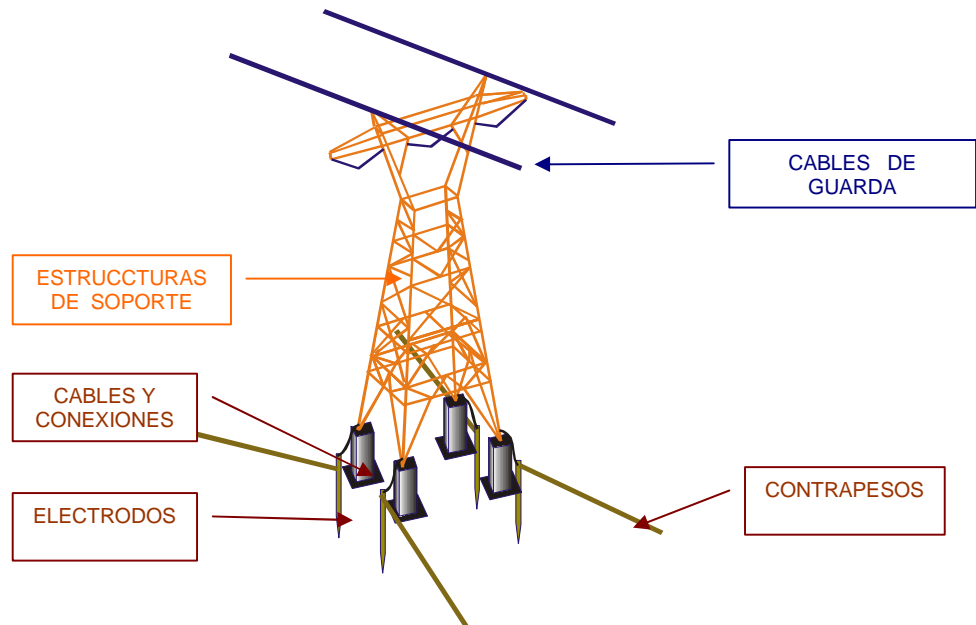


Fuente: Procobre Perú.

En el caso específico de líneas de transmisión de energía, el sistema de puesta a tierra está constituido por los cables de guarda, las estructuras de soporte y los cables, conexiones, electrodos y contrapesos que se encuentran enterrados conformando la puesta a tierra de la torre (Ver figura 2). A pesar de que las bases

tipo parrilla de la torre sirven como medio de conexión no se consideran como parte de la puesta a tierra [14].

Figura 2. Sistema de Puesta a Tierra en Líneas de Transmisión



Fuente: Autora.

### 1.1 OBJETIVOS Y FUNCIONES DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

Dentro de los objetivos de un sistema de puesta a tierra (SPT) se destacan: La seguridad de las personas, la protección de las instalaciones y la compatibilidad electromagnética.

Debe resaltarse que la seguridad de las personas es el objetivo primordial del sistema de puesta a tierra, y que es obligatorio disponer del mismo en todas las instalaciones eléctricas. Esto con el fin de garantizar que cualquier punto interior o exterior de la instalación eléctrica, normalmente accesible a personas que puedan transitar o permanecen allí, no estén sometidos a tensiones de paso, de contacto o transferidas, que superen los valores máximos de soportabilidad del ser humano cuando se presente una falla.

Así mismo, el sistema de puesta a tierra provee un medio para enviar la corriente eléctrica a tierra bajo condiciones normales o de falla, sin que se exceda ninguno de los límites operativos o de los equipos o que afecte la continuidad del servicio.

Un sistema de puesta a tierra debe cumplir con las siguientes funciones:

- Garantizar condiciones de seguridad a los seres vivos.
- Permitir a los equipos de protección despejar rápidamente las fallas.
- Servir de referencia al sistema eléctrico.
- Conducir y disipar las corrientes de falla con suficiente capacidad.
- Transmitir señales de RF en onda media

En líneas de transmisión el sistema de puesta a tierra tiene una importante función adicional, y es la de evitar que descargas atmosféricas provoquen flameos inversos a través de la cadena de aisladores.

## 1.2 RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

Al inyectarse una corriente ( $I_g$ ) a través de un sistema de puesta a tierra, este eleva su potencial y puede decirse que existirá un punto lejano denominado tierra remota o tierra lejana cuyo potencial es considerado por convención igual a cero.

La resistencia de puesta a tierra ( $R_{PT}$ ) es la relación entre la elevación de potencial de la puesta a tierra respecto a la tierra remota (Ground Potential Rise - GPR), y la corriente inyectada, concepto que se ilustra en la figura 3.

En general la resistencia de puesta a tierra está constituida por tres elementos:

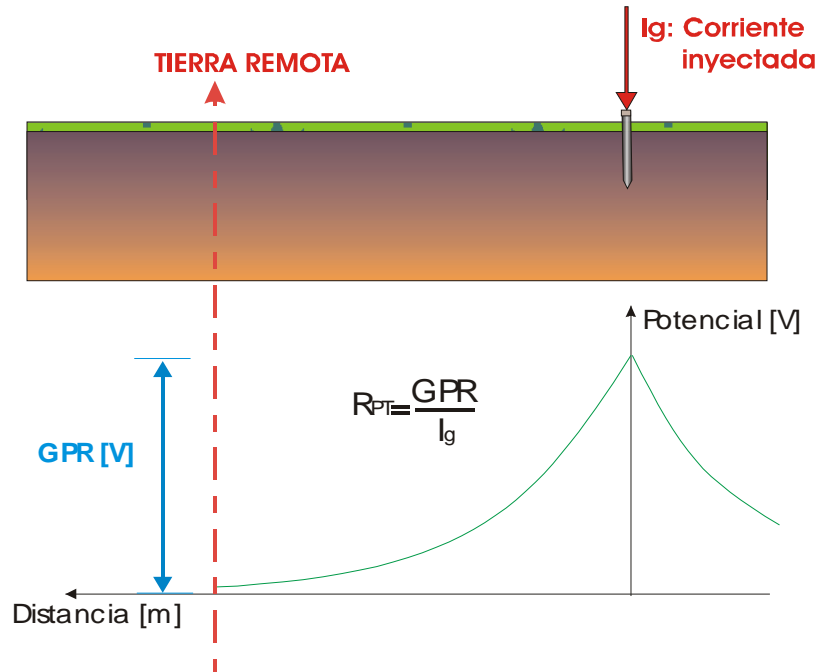
- La resistencia propia de los electrodos de la puesta a tierra.
- La resistencia de contacto entre la superficie del electrodo y el terreno.
- La resistencia del suelo en el que están enterrados los electrodos.

El aporte más significativo al valor de la resistencia de puesta a tierra es el correspondiente a la resistencia del terreno, y ya que la influencia de los primeros dos elementos es muy pequeña puede ser despreciada para efectos prácticos [9].

La resistencia que presenta el terreno es función de la resistividad del mismo y de las dimensiones y forma de los electrodos. La norma IEEE 142 (Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems), presenta en su capítulo 4 las fórmulas aproximadas para el cálculo de la resistencia de puesta a tierra de algunos de los arreglos de electrodos más comunes [12].

La resistencia de puesta a tierra como un criterio aislado no es garantía de seguridad para las personas, pero es un indicador que limita directamente la máxima elevación de potencial y controla las tensiones transferidas.

Figura 3. Concepto de resistencia de puesta a tierra



Fuente: Autora.

Para Colombia, el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas adopta los siguientes valores máximos de resistencia de puesta a tierra:

Tabla 1. Valores máximos de resistencia de puesta a tierra

APLICACIÓN	VALORES MÁXIMOS DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA [Ω]
Estructuras de líneas de transmisión.	20
Subestaciones de alta y extra alta tensión.	1
Subestaciones de media tensión.	10
Protección contra rayos.	10
Neutro de acometida de baja tensión.	25

Fuente: Reglamento Técnico de Instalaciones RETIE.

### 1.3 EL SUELO Y SUS CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS

**1.3.1 Concepto De Resistividad.** La resistividad eléctrica  $\rho$  [ $\Omega$ -m], es una magnitud característica que mide la capacidad de un material para oponerse al flujo de corriente eléctrica. Es la relación entre la diferencia de potencial en un material y la densidad de corriente que resulta en el mismo. Es la resistencia específica de una sustancia.

Numéricamente es la resistencia ofrecida por un cubo del material de 1 m X 1 m X 1m, medida entre dos caras opuestas, en otras palabras la resistividad nos dice cuanto se opone un metro cúbico del material al paso de corriente. Su unidad: Ohm-metro [ $\Omega$ -m]

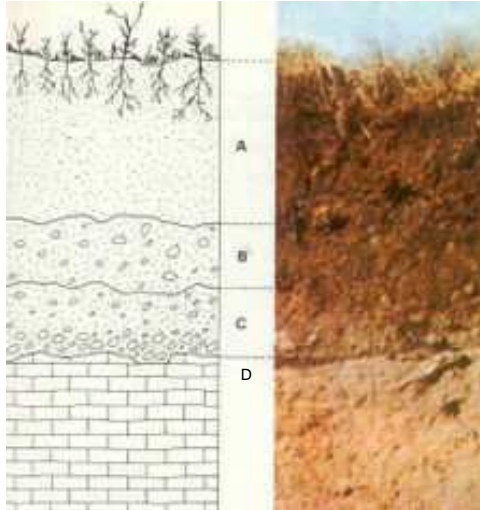
**1.3.2 El Suelo Y Su Resistividad.** El suelo es el sistema complejo que se forma en la superficie del terreno, inicialmente por la alteración física y química de las rocas y luego también por la influencia de los seres vivos, desarrollando una estructura en niveles superpuestos u horizontes, y una composición química y biológica definidas.

Cada uno de estos horizontes presenta diferentes características de composición, textura, adherencia, y al ordenamiento vertical de estos se le denomina perfil del suelo.

En suelos evolucionados se pueden distinguir cuatro horizontes como se expone en la figura 4:

- **Horizonte A.** Es el mas superficial y sobre el se acumulan hojas, restos de plantas muertas y de animales; su color es generalmente oscuro por la abundancia de materia orgánica descompuesta o humus. Se le denomina también zona de lavado pues el agua lluvia lo atraviesa disolviendo y arrastrando hacia abajo fragmentos de tamaño fino y compuestos solubles.
- **Horizonte B.** su color es mas claro y en el se depositan los materiales que proceden de A. Se denomina también zona de precipitación.
- **Horizonte C.** esta constituido por la parte mas alta del material rocoso, en el que la roca se encuentra fragmentada por la acción mecánica y química.
- **Horizonte D.** o roca madre que no ha sido alterada significativamente.

Figura 4. Horizontes del suelo



Fuente: WIKIPEDIA

La resistividad del suelo o terreno varía ampliamente en el globo terrestre ya que en cada sitio cambian las condiciones de formación y las características del mismo.

Como producto de la estratificación del terreno en horizontes, la resistividad de este no es uniforme, sino que cada una de las capas tendrá un valor de resistividad. En la generalidad de los casos, las medidas mostrarán que la resistividad del terreno es una función de la profundidad.

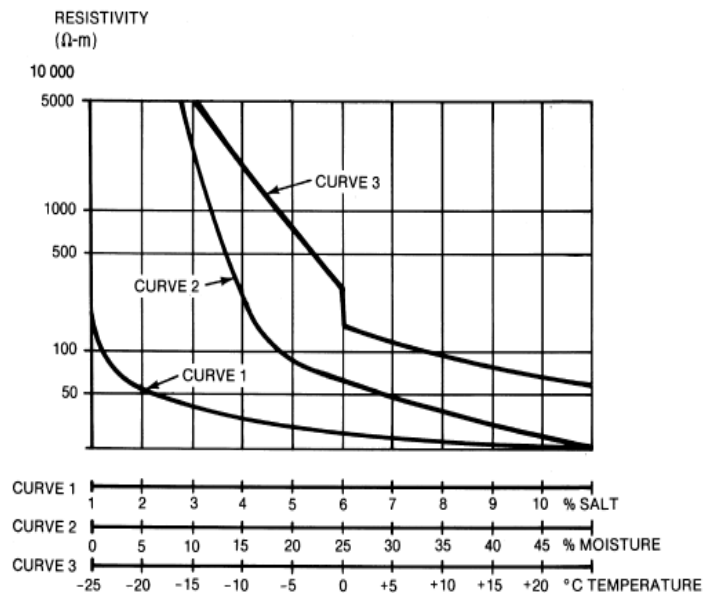
Adicionalmente la resistividad del terreno es afectada por factores como la humedad, la temperatura, la composición química, la granulometría y la compactación.

La resistividad en los suelos aumenta abruptamente cuando la humedad cae por debajo del 15% por cantidad de peso. Una vez que la humedad excede el 22%, la resistividad se ve muy poco afectada, tal como se ve en la curva 2 de la figura 5.

La resistividad del suelo también aumenta abruptamente cuando la temperatura cae por debajo del punto de congelación del agua, gracias a que el agua en el suelo empieza a congelarse, como se ve en la curva 3 de la figura 5.

Otro factor importante que afecta la resistividad del terreno es la cantidad de sales solubles, acidas o alcalinas presentes, ya que la conducción eléctrica en el suelo es esencialmente electrolítica. La curva 1 de la figura 5 muestra el efecto de la cantidad de sales presentes sobre la resistividad de un suelo con un contenido de humedad del 30%.

Figura 5. Efecto de la humedad, temperatura y contenido de sales en la resistividad del suelo.



Fuente: ANSI/IEEE Std 80 – 2000. Guide for Safety in AC Substation Grounding.

La granulometría es la técnica que permite determinar en forma cuantitativa la distribución de las partículas del suelo de acuerdo a su tamaño; la resistividad aumenta en la medida en que mayor es el tamaño de los granos que conforman el suelo. La compactación del suelo afecta el grado de resistividad, pues a mayor compactación del suelo su resistividad disminuye.

Existen otros factores que pueden modificar apreciablemente la resistividad del terreno, que por su naturaleza eléctrica, surgen posteriormente a la construcción del sistema de puesta a tierra.

Cuando el contacto entre un electrodo y el suelo es mediocre, en condiciones de circulación de corrientes de falla pueden establecerse gradientes de potencial muy elevados que superen el nivel de soportabilidad y provoquen la formación de arcos. Estos arcos incrementan el área efectiva del electrodo lo que se traduce en una aparente reducción de la resistividad del terreno. Por diseño debe evitarse el establecimiento de tales descargas porque deterioran rápidamente los electrodos.

La corriente que fluye de los electrodos hacia el suelo que los rodea puede afectar su resistividad. Esto se debe a que corrientes de elevada magnitud o duración pueden generar un calentamiento tal que causen evaporación rápida del agua, dejando al electrodo en contacto con una capa de suelo deshidratada y por lo tanto de alta resistividad.

A pesar de que se han publicado algunas tablas que indican rangos de valores de resistividad según el tipo de suelo, estas tienen un objeto puramente orientativo, ya que no es posible asignar un valor de resistividad único a un tipo dado de suelo. Sucede, que para una misma clase de terreno localizado en distintos lugares, la resistividad puede ser sensiblemente diferente. La única forma confiable de conocer este valor es mediante pruebas en sitio, ya que como se ha sustentado anteriormente esta es una magnitud que depende de las condiciones únicas que en este se presenten.

La tabla 2 presenta algunos valores orientativos, publicados en el libro “La Puesta a Tierra de Instalaciones Eléctricas y el R.A.T” [9].

Tabla 2. Valores orientativos de resistividad del suelo

TIPO DE SUELO	RESISTIVIDAD, $\rho$ [ $\Omega$ - m]
Terrenos pantanosos	De algunas unidades a 30
Limo	20 a 100
Humus	10 a 150
Turba húmeda	5 a 100
Arcilla plástica	50
Margas y arcillas compactas	100 a 200
Margas del jurásico	30 a 40
Arena arcillosa	50 a 500
Arena silíceas	200 a 3000
Suelo pedregoso cubierto de césped	300 a 500
Suelo pedregoso desnudo	1500 a 3000
Calizas blandas	100 a 300
Calizas compactas	1000 a 5000
Calizas agrietadas	500 a 1000
Pizarras	50 a 300
Rocas de mica y cuarzo	800

Granitos y gres procedentes de alteración	1500 a 10000
Granitos y gres muy alterados	100 a 600
Hormigón	2000 a 3000
Balasto o grava	3000 a 5000

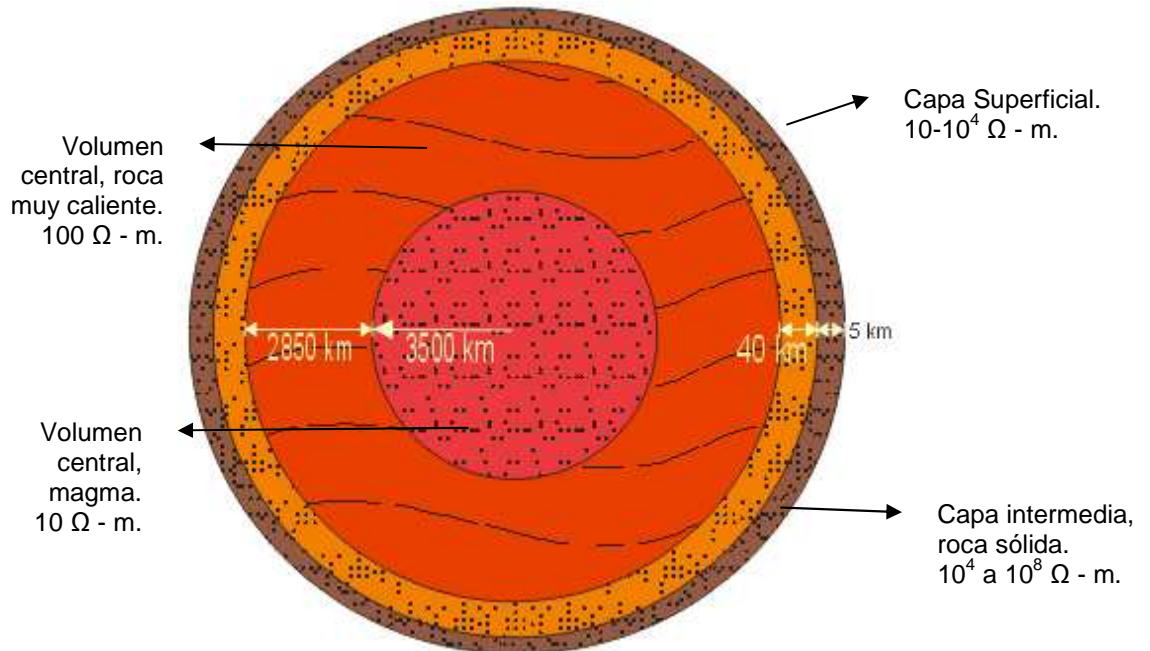
Fuente: La Puesta a Tierra de Instalaciones Eléctricas y el R.A.T.

**1.3.3 Modelo Geoeléctrico De La Tierra.** La tierra puede ser modelada como un volumen esférico central rodeado por otras dos capas superficiales[8], como se ilustra en la figura 6. Estas son:

1. La capa superficial o suelo: está constituida por niveles superpuestos u horizontes. La conductividad de esta capa es esencialmente de naturaleza electrolítica. Su resistividad promedio varía en el rango de 10 a 10 000  $\Omega$ -m. y su espesor es del orden de 2 a 5 km.
2. La capa intermedia: está caracterizada por un alto valor de resistividad (del orden de  $10^4$  a  $10^8$ ) como resultado de las altas presiones impuestas en la roca, y la ausencia de poros que puedan retener agua. Su espesor está en un rango de 10 a 40 km.
3. La capa inferior o volumen central: conformada por roca muy caliente o magma. Es altamente conductiva a pesar de la ausencia de agua.

Ya que los electrodos de puesta a tierra de mayores dimensiones son considerablemente pequeños en comparación con el espesor de la capa superficial y teniendo en cuenta que la respuesta de la puesta a tierra es influenciada mínimamente por la naturaleza del suelo a distancias mayores de 10 veces su máxima dimensión, se puede concluir que aproximadamente la décima parte de esta capa superficial juega un papel importante en el comportamiento del sistema de puesta a tierra. Es por esto que las medidas de resistividad apuntan hacia la investigación de las características y al modelado de esta porción más superficial del suelo.

Figura 6. Modelo geoelectrico de la tierra



Fuente: Transmission Line Grounding, EPRI.

#### 1.4 INFLUENCIA DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA EN EL COMPORTAMIENTO DE LAS LÍNEAS AÉREAS DE TRANSMISIÓN ANTE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Para la mayoría de las líneas aéreas de transmisión de energía, las descargas atmosféricas son la principal causa de interrupciones no programadas. En Colombia, de acuerdo con lo establecido por el código de redes y la UPME<sup>1</sup>, una línea de transmisión no debe superar un número de tres (3) salidas al año por cada 100 km.

Adicionalmente las descargas atmosféricas pueden causar flameos a través de la cadena de aisladores, y por tanto deterioro del mismo, reducción de su vida útil e incluso su destrucción, si la línea de transmisión no está diseñada para responder de la forma correcta.

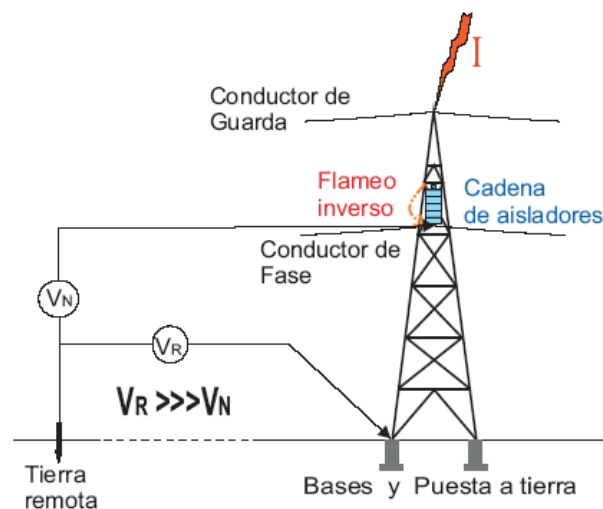
Estos flameos suceden a partir de tres mecanismos: la inducción electromagnética, el impacto directo y el flameo inverso. El tercer mecanismo es el preponderante en líneas de transmisión, y se define como la falla del

<sup>1</sup> UPME: Unidad de Planeación Minero Energética.

asilamiento gracias a un excesivo aumento del potencial de la torre cuando esta es alcanzada por un rayo.

La corriente descargada por el rayo viaja hacia tierra a través de la torre, haciendo que esta eleve su potencial con respecto a la tierra remota, muchas veces la tensión nominal de la línea. Si este valor hace que se exceda la soportabilidad dieléctrica del aislamiento, entonces el flameo inverso ocurre, mecanismo que se ilustra en la figura 7.

Figura 7. Mecanismo de flameo inverso



Fuente: Transmission Line Grounding, EPRI.

En el instante en que un rayo impacta una torre de la línea de transmisión, en el punto de impacto se originan ondas de corriente que viajan a lo largo de diferentes caminos a velocidades entre 0,2 y 0,9 la velocidad de la luz. Una parte de esta corriente generada viaja a lo largo del cable de guarda hacia las torres adyacentes, y una onda de corriente baja por la estructura hacia la puesta a tierra de la torre, produciendo como se explicó anteriormente que la torre incrementa su potencial.

A la llegada de esta onda de corriente a la puesta a tierra, esta es parcialmente reflejada y retorna al punto de impacto contribuyendo a disminuir la sobretensión resultante en la parte superior de la torre.

Según el modelo de ondas viajeras, el factor  $\beta$  según el cual es reflejada la onda de corriente es igual a:

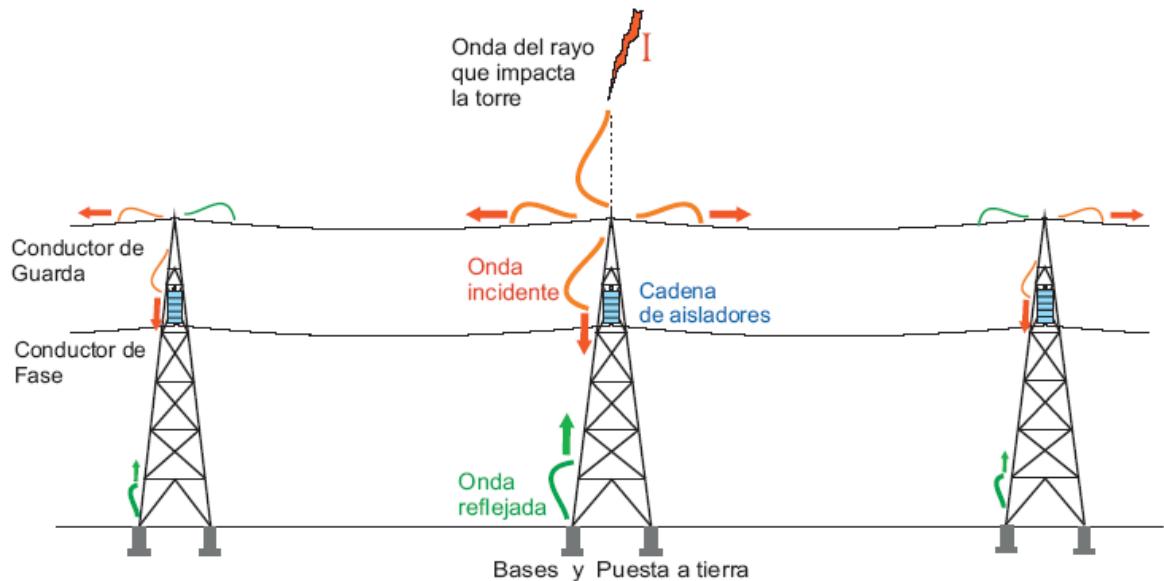
$$\beta = \frac{R_s - Z_s}{R_s + Z_s}$$

Donde

$R_s$  Es la resistencia de puesta a tierra de la torre

$Z_s$  Es la impedancia característica de la torre

Figura 8. Ondas viajeras tras el impacto del rayo en la torre



Fuente: Transmission Line Grounding, EPRI.

Se puede observar que en la medida en que el valor de la resistencia de puesta a tierra tienda a cero, el factor de reflexión tenderá a  $\beta = -1$ , y la onda reflejada podrá contribuir más eficazmente con la reducción de la sobretensión en la cima de la torre.

Ya que el comportamiento de la línea de transmisión ante descargas atmosféricas, depende en gran manera de la resistencia de puesta a tierra de cada una de sus torres, se debe prestar especial atención a su diseño y construcción; de manera que se asegure que su valor está en un rango lo suficientemente bajo, que trascienda en el buen desempeño de la línea.

## 1.5 ETAPAS DEL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

Con el propósito de que el sistema de puesta a tierra de las líneas de transmisión una vez construido cumpla con sus objetivos y funciones y a su vez con las

exigencias normativas, es necesario el desarrollo de ciertas etapas que hacen parte del proceso de diseño y construcción de la misma. El detalle de cada una de estas etapas no se encuentra dentro de los alcances del desarrollo del presente proyecto, sin embargo, a continuación se presentan estas etapas de manera general.

- **Etapas De Documentación.** En esta etapa se realiza la investigación de los documentos pertinentes con el fin de ubicar las coordenadas del sitio de torre, a partir de los trazados de la línea que ya han sido realizados en las tempranas fases de diseño de la misma.
- **Investigación De Las Características Del Suelo.** Consiste en la investigación mediante medida de la resistividad del suelo en los sitios de torre, pues esta característica define la dificultad o facilidad que posee el suelo para disipar corrientes de falla.

Esta etapa tiene por objetivo último desarrollar un modelo que se aproxime con un buen grado de exactitud a las condiciones reales del suelo.

- **Cálculo De La Corriente De Falla.** Para el posterior cálculo de las máximas tensiones de paso y contacto presentes en la instalación y máximas permitidas, se requiere del conocimiento de la corriente máxima de falla y del tiempo máximo de despeje de la falla a tierra.

La magnitud de la corriente de falla se obtiene, a partir del estudio de los diferentes tipos de falla a tierra que pueden presentarse en la línea, tomando el valor más desfavorable. El tiempo máximo de despeje de la falla se obtiene a partir del estudio del sistema de protecciones.

- **Diseño Preliminar.** A partir de los modelos obtenidos de resistividad del suelo, se selecciona un arreglo de electrodos de tal manera que se garantice que valor de resistencia de puesta a tierra no supera el máximo permitido. Generalmente se parte de un arreglo sencillo de 4 electrodos tipo varilla, cada uno conectado a cada pie de la torre. A medida que la resistividad del suelo aumenta, es necesario adicionar contrapesos con el propósito de obtener un valor teórico de resistencia de puesta a tierra adecuado. En el anexo 1 se muestran algunos arreglos que comúnmente se implementan en líneas de transmisión.

En esta etapa también se debe determinar el material de los electrodos a usar, a partir del grado de corrosión del terreno. Adicionalmente se evalúa si el sistema de puesta a tierra tal como diseñado satisface las condiciones de seguridad relativas a las tensiones de paso y contacto.

- **Investigación Y Mitigación De Tensiones Transferidas.** Se debe contemplar la posibilidad de que en caso de falla a tierra, potenciales sean transferidos al exterior debido a tuberías, mallas, conductores de neutro, blindaje de cables, circuitos de señalización [14]. En esta etapa se realiza un estudio de la presencia de las mismas, y de las formas de mitigación.
- **Ejecución De La Obra.** La construcción de la cimentación torre y de la puesta a tierra se realizan paralelamente. Comprende actividades de excavación, instalación de electrodos, conexión, relleno y compactación del terreno.

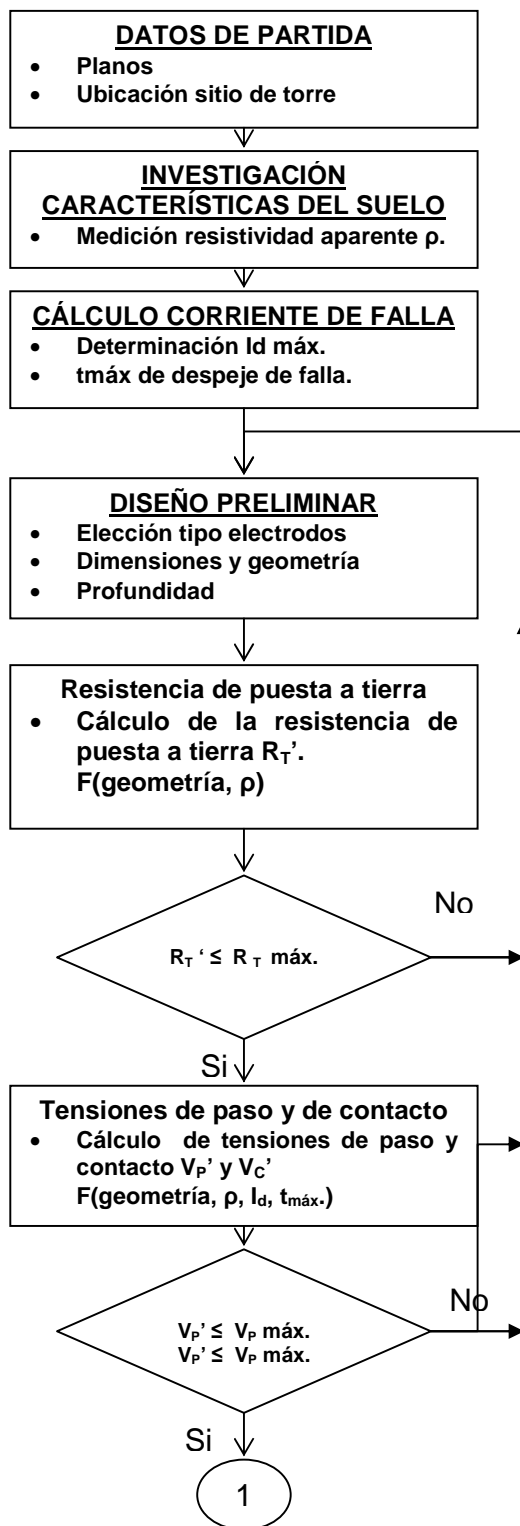
Esta etapa se realiza siguiendo las indicaciones, documentos de diseño, y atendiendo a las recomendaciones de los fabricantes, en búsqueda de obtener un valor de resistencia de puesta a tierra que no exceda el límite permitido. Los empalmes y uniones según lo estipulado por el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas deben realizarse con medios de unión apropiados, mediante soldadura exotérmica o conector certificado para tal uso.

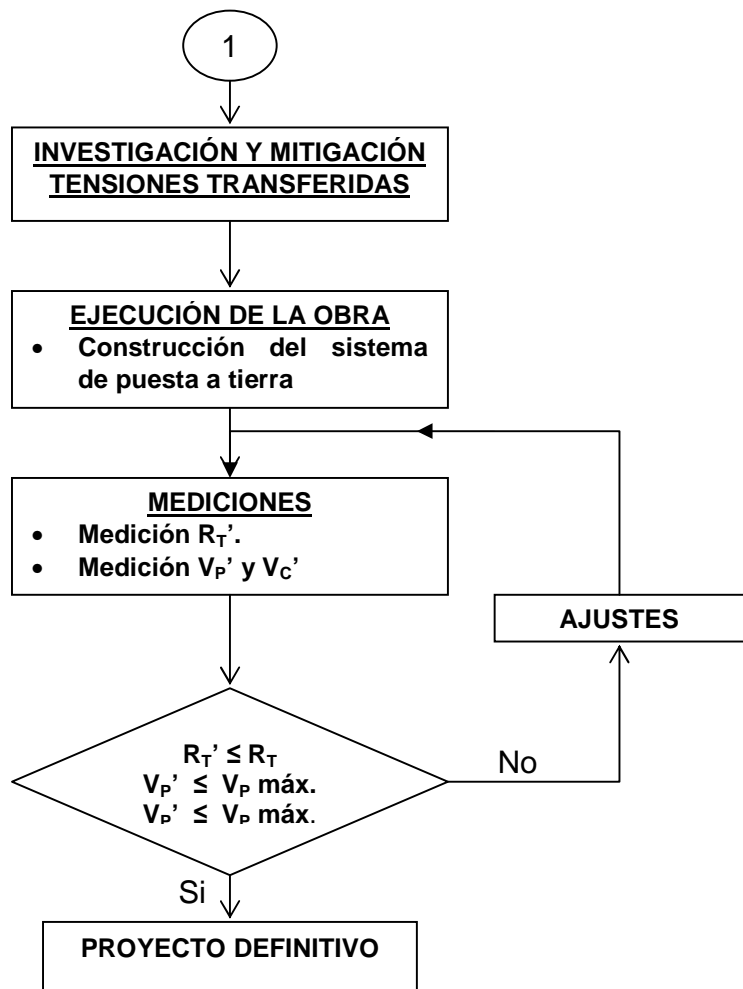
Al rellenar las excavaciones realizadas es importante lograr que los electrodos y demás partes conductoras de la puesta a tierra, tengan en buen contacto con la tierra que los recibe, por lo que se recomienda compactar el terreno.

- **Mediciones Finales.** Con el fin de validar el sistema de puesta a tierra construido y de verificar que este se encuentra dentro de valores que garanticen el buen funcionamiento de la línea y la seguridad de las personas y los seres vivos, se deben realizar dos tipos de medidas: la medida de la resistencia de puesta a tierra de la torre y la comprobación de las tensiones de paso y contacto. Usualmente estas medidas se realizan al terminar de construir el primer montante de la torre. Si la resistencia de puesta a tierra no está dentro de los límites máximos establecidos, se debe proceder al ajuste del sistema mediante la adición de nuevos electrodos y contrapesos. Con el fin de comprobar su estado, la resistencia de puesta a tierra de las torres es objeto de medida en la etapa de mantenimiento de la línea de transmisión.

La secuencia de las etapas del proceso de diseño y construcción del sistema de puesta a tierra de la línea de transmisión se ilustra con mayor claridad en el diagrama de bloques de la figura 9, que se presenta a continuación:

Figura 9. Etapas del proceso de diseño y construcción de un SPT en líneas de transmisión





Fuente: Autora.

## **2. MÉTODOS PARA LA MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO**

El conocimiento de la resistividad del terreno es de fundamental importancia en el diseño de sistemas de puesta a tierra, pues esta característica define la dificultad o facilidad que posee el suelo para disipar corrientes de falla.

Una vez conocido el valor de resistividad del terreno, este es usado para el diseño del sistema de puesta a tierra, calcular su resistencia de puesta a tierra, calcular tensiones de paso y de toque, seleccionar el material del mismo, diseñar sistemas de protección catódica, estudios geológicos, entre otros.

Existen diversos métodos para determinar la resistividad del suelo. Estos pueden clasificarse en dos grandes grupos: los métodos directos y los indirectos.

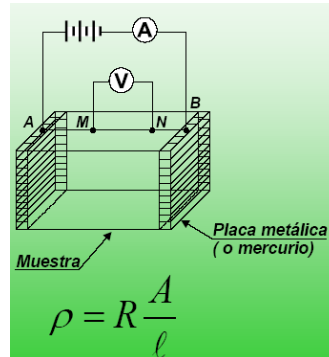
### **2.1 MÉTODOS DIRECTOS**

Los métodos directos se basan en la extracción de muestras del suelo a diferentes profundidades, las cuales son posteriormente examinadas en laboratorios especializados. Este método es certero siempre y cuando las muestras no sean alteradas en el proceso de extracción. En la figura 10 se muestra un esquema general de la aplicación de un método directo.

Es difícil obtener información confiable de la resistividad del suelo a partir de la aplicación de métodos directos. No es fácil lograr que las muestras no sean alteradas y dupliquen las condiciones del suelo original en cuanto a su contenido de humedad y compactación.

Este método requiere de una cantidad representativa de muestras, por lo cual es un método tedioso y costoso. Normalmente este tipo de estudios geológicos se realizan como una etapa anterior a la construcción de obras civiles.

Figura 10. Determinación de la resistividad de una muestra de suelo



Fuente: [www.telergia.com](http://www.telergia.com)

## 2.2 MÉTODOS INDIRECTOS

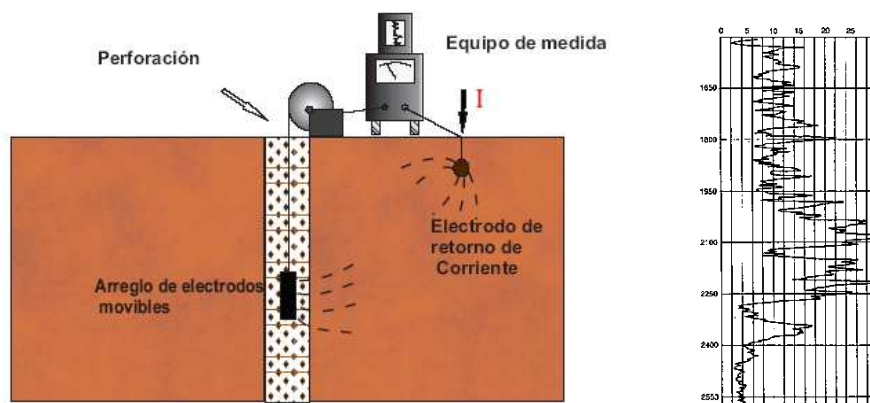
Los métodos indirectos miden la respuesta en términos de resistencia que presenta el suelo ante una excitación impuesta. Esta resistencia es función de la resistividad y conocida esta relación puede establecerse entonces la resistividad aparente del suelo.

El concepto de resistividad aparente del suelo surge gracias a que como se ha expuesto anteriormente, la resistividad del suelo es una función de la profundidad. La resistividad aparente debe ser interpretada como la resistividad promedio de las capas de suelo que se encuentran comprendidas entre la superficie y la profundidad de investigación.

A continuación se presentan los métodos más utilizados en la actualidad para la investigación de la resistividad aparente del terreno en instalaciones eléctricas.

**2.2.1 Registro Eléctrico De Perforación.** En este método un número de pequeños electrodos son introducidos dentro de un hueco perforado en el suelo. Estos electrodos inyectan corrientes en el suelo o miden el potencial causado por la circulación de corriente eléctrica a través de los otros electrodos. La figura 11 muestra un esquema simplificado del método de medida.

Figura 11. Registro eléctrico de perforación y curva típica de resistividad obtenida

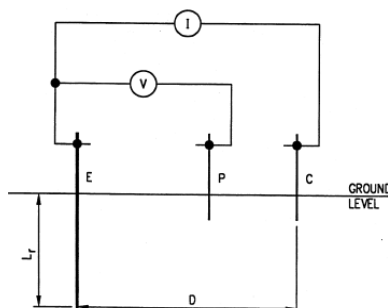


Fuente: Autora.

El registro eléctrico de perforación no es convencionalmente utilizado para aplicaciones de instalaciones eléctricas, esto se debe a que este sólo investiga las características de un pequeño volumen de suelo dentro de la vecindad de los electrodos. Pero ya que proporciona una idea de la estructura del suelo en la longitud de la perforación y que este método es muy utilizado para la búsqueda de petróleo, puede servir de apoyo al ingeniero electricista si se dispone de los resultados de este tipo de medición.

**2.2.2 Método De Variación De La Profundidad.** Se basa en el método de la caída de potencial para la medida de la resistencia de puesta a tierra. En este método se dispone de una jabalina llamada también electrodo de prueba (E), la cuál se encuentra a una cierta profundidad de enterramiento  $L_r$ . Los otros dos electrodos conocidos como electrodos de referencia de potencial (P) y de corriente (C), son picas de menor tamaño enterradas a poca profundidad en línea recta como se ve en la figura 12.

Figura 12. Método de variación de la profundidad



Fuente: ANSI/IEEE Std 80 – 2000. Guide for Safety in AC Substation Grounding.

Con este arreglo, se aplica el método de la caída de potencial tal y como se explica en el tercer capítulo para hallar la resistencia  $R$  de puesta a tierra del electrodo de prueba. La resistividad aparente del suelo  $\rho_a$ , a una profundidad de investigación  $L_r$  esta dada por [10]:

$$\rho_a = \frac{2 * \pi * L_r * R}{\ln\left(\frac{8 * L_r}{d}\right) - 1} \quad [\Omega\text{-m}] \quad (1)$$

Donde:

$L_r$  es la longitud enterrada de la jabalina en metros.

$d$  es el diámetro de la jabalina en metros.

$R$  es la resistencia de puesta a tierra de la jabalina.

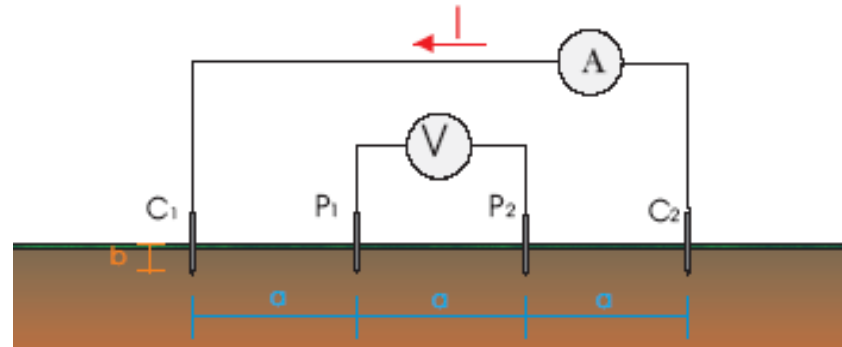
A continuación se procede a aumentar la profundidad de enterramiento de la jabalina y se repite el procedimiento anterior. Se deben tomar muestras suficientes con el fin de graficar la resistividad aparente en función de la profundidad de enterramiento.

Ya que este método da información del suelo en la vecindad del electrodo de prueba, si se desea investigar una gran extensión de terreno es recomendable aplicar el método de los cuatro electrodos, ya que enterrar jabalinas de gran longitud no es práctico.

**2.2.3 Método De Wenner.** El método de Wenner es un caso particular del método de los cuatro electrodos, y es el método más usado para determinar la resistividad del suelo en aplicaciones de ingeniería eléctrica. Su simplicidad y exactitud han sido factores clave en su popularidad.

El arreglo para la medida consiste en cuatro electrodos pequeños o picas enterradas en línea recta a una profundidad  $b$  y equiespaciadas a una distancia  $a$  como muestra la figura 13. Una corriente de prueba  $I$  es inyectada en el suelo a través de los electrodos más externos y la diferencia de potencial  $V$  es medida entre los electrodos internos. La relación  $V/I$  arroja un valor de resistencia  $R$  en ohms.

Figura 13. Método de Wenner



Fuente: Autora.

La resistividad aparente  $\rho_a$  del suelo a una profundidad  $a$  está dada por:

$$\rho_a = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad [\Omega\text{-m}] \quad (2)$$

Donde:

$a$  es la distancia entre electrodos en metros.

$b$  es la profundidad de enterramiento de los electrodos en metros.

$R$  es la relación  $V/I$  en ohms.

Como las picas usualmente se entierran a una profundidad despreciable respecto de las distancias de separación<sup>2</sup>, se puede calcular la resistividad aparente de forma aproximada como sigue:

$$\rho = \rho_a = 2\pi a R \quad [\Omega\text{-m}] \quad (3)$$

Donde:

$a$  es la distancia entre electrodos en metros.

$R$  es la relación  $V/I$  en ohms.

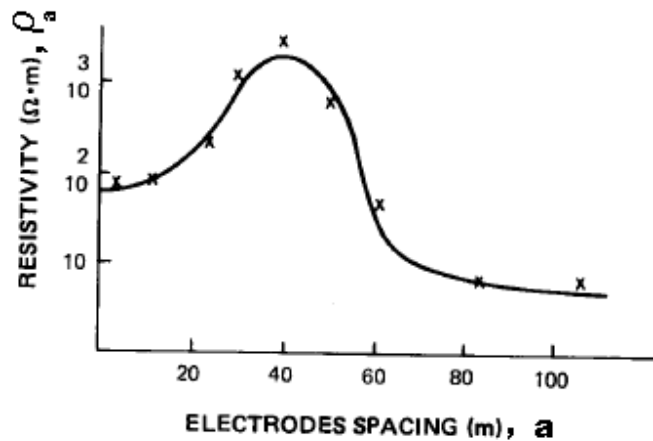
Puesto que el suelo es rara vez homogéneo esta resistividad obtenida denominada resistividad aparente, debe ser interpretada físicamente como el valor promedio de las resistividades de las capas del suelo comprendidas entre la superficie del suelo y la profundidad de investigación  $h$ .

<sup>2</sup> Se considera despreciable una profundidad de enterramiento  $b$  menor al 10% de la distancia de separación  $a$  entre electrodos.

En este método la profundidad de investigación **h**, es la profundidad a la cual la densidad de corriente se ha reducido a la mitad de su valor en la superficie; se considera que es del orden de magnitud de la distancia **a** que separa dos picas adyacentes (**h** está comprendida entre **a** y  $0,75 \cdot a$ ).

Una serie de lecturas a distintas separaciones entre electrodos y en diferentes direcciones se deben tomar (se recomienda tomar medidas a lo largo de dos ejes perpendiculares), con el fin de obtener una muestra representativa que permita interpretar los datos mediante manejo estadístico o gráficamente realizando la curva de resistividad aparente  $\rho_a$  en función de la profundidad de investigación **a**, como se ilustra en la figura 14.

Figura 14. Curva de resistividad aparente



Fuente: ANSI/IEEE Std 81 – 1983. Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System.

**2.2.4 Método De Schlumberger.** Este arreglo es una modificación del método Wenner en el cual, los electrodos de potencial son puestos más cerca de los correspondientes electrodos de corriente tal y como se muestra en la figura 15; esto incrementa la magnitud de la diferencia de potencial medida por el equipo.

En este caso la resistividad aparente a una profundidad de investigación **d** (igual al espaciamiento entre los electrodos de potencial), puede ser calculada como sigue[4]:

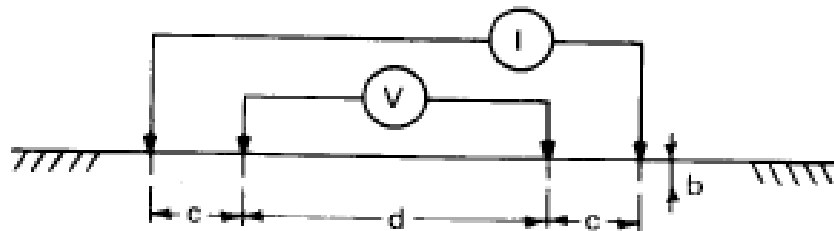
$$\rho = \pi c (c + d) \frac{R}{d} \quad [\Omega \cdot m] \quad (4)$$

Donde:

**c** es la distancia que separa electrodos de corriente y potencial en metros.

**d** es la distancia entre los electrodos de potencial en metros.

Figura 15. Método de Schlumberger



Fuente: ANSI/IEEE Std 81 – 1983. Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System.

El arreglo Schlumberger-Palmer, puede ser usado exitosamente en los casos en los que se requiera un gran espaciamento entre electrodos de corriente, teniendo en cuenta que el método de Wenner tiene una limitación, ya que la diferencia de potencial entre los electrodos internos decrece rápidamente cuando el espaciamento entre estos aumenta a valores relativamente grandes, y a menudo los equipos de medida disponibles son inadecuados para medir valores bajos de tensión [10].

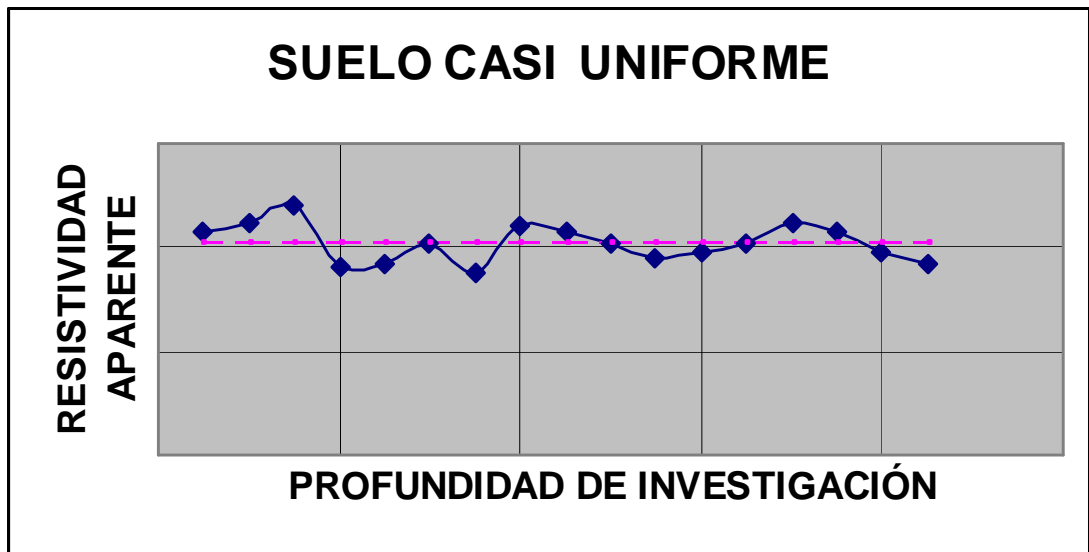
### 2.3 INTERPRETACIÓN DE LAS MEDIDAS OBTENIDAS

El objetivo final de la medida de la resistividad del suelo, es obtener un modelo que sea una buena aproximación de las condiciones del mismo. Los modelos más usados en aplicaciones de sistemas de puesta a tierra son el modelo de resistividad uniforme y el modelo de dos capas.

- **Modelo de resistividad uniforme.** También llamado modelo homogéneo este caso el suelo es considerado como homogéneo con un valor de resistividad constante con la variación de la profundidad.

Este modelo es recomendable cuando hay una variación moderada de la resistividad aparente alrededor de un valor promedio, situación que se ilustra en la figura 16.

Figura 16. Suelo casi uniforme



Fuente: "Transmission Line Grounding". Electric Power Research Institute.

El valor de la resistividad del modelo, puede ser obtenido a partir del promedio aritmético de los datos [11]:

$$\rho_{1(AV 1)} = \frac{\rho_{a1} + \rho_{a2} + \rho_{a3} + \dots + \rho_{an}}{n} \quad [\Omega\text{-m}] \quad (5)$$

Donde

$$\rho_{a1} + \rho_{a2} + \rho_{a3} + \dots + \rho_{an}$$

Son los datos obtenidos de resistividad aparente a diferentes profundidades de investigación.

$$n$$

Número total de medidas.

Aunque en la generalidad de los casos el suelo es no uniforme, lo cual se refleja en una curva de resistividad aparente que presenta grandes variaciones en función de la profundidad de investigación, es posible modelarlo como si este fuese uniforme.

Esta decisión se basa en el interés de simplificar los cálculos de diseño del sistema de puesta a tierra, teniendo en cuenta que en la mayoría de las

publicaciones y normas las ecuaciones han sido desarrolladas para el modelo de resistividad uniforme, y que el modelo de dos capas implica cálculos más complejos y por tanto el uso de programas de computador.

También debe tenerse en cuenta que en algunos casos, la variación de la resistividad del suelo puede exhibir máximos y mínimos de manera que el modelo equivalente de dos capas no producirá un beneficio en cuanto a la exactitud.

La norma IEEE 80 en su anexo E muestra los detalles de la investigación de un suelo no uniforme que concluye en la ecuación (6) para su aproximación al modelo de resistividad uniforme.

$$\rho_{2(AV 2)} = \frac{\rho_{a(max)} + \rho_{a(min)}}{2} \quad [\Omega\text{-m}] \quad (6)$$

Donde

$\rho_{a(max)}$  Es el valor máximo medido de resistividad aparente en  $\Omega$  - m.

$\rho_{a(min)}$  Es el valor mínimo medido de resistividad aparente en  $\Omega$  - m.

Una manera más adecuada de aproximar un suelo no uniforme al modelo de suelo homogéneo, es aplicar a las medidas de la resistividad aparente tomadas en campo la técnica estadística llamada transformación de BOX-COX, que permite calcular un valor de resistividad con probabilidad del 70% de no ser superada [15]. Esto perfecciona considerablemente el modelo, teniendo en cuenta que al trabajar con promedios existe una probabilidad del 50% de superar este valor<sup>3</sup>.

Esta transformación es especialmente útil cuando las medidas de resistividad aparente obtenidas en campo son dispersas, la cual permite inducir normalidad.

Consiste en transformar cada dato de resistividad  $\rho_i$  en otra variable  $X_i$ , como sigue:

$$X_i = Ln(\rho_i) \quad (7)$$

Donde,

---

<sup>3</sup> ENTREVISTA con Carlos A. Cárdenas, Grupo de Investigación Manejo Eficiente Energía Eléctrica GIMEL, Universidad de Antioquia. Medellín, 15 de enero de 2008.

$\rho_i$  cada una de las medidas de resistividad aparente del terreno obtenidos en campo.

Se halla el promedio  $x$  y la desviación estándar  $S$  del nuevo grupo de datos a partir de las siguientes ecuaciones:

$$x = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} X_i}{n}$$

(8)

Donde,

$X_i$  logaritmo natural de cada una de las medidas de resistividad aparente del terreno obtenidos en campo.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (X_i - x)^2}{n}}$$

(9)

Donde,

$X_i$  logaritmo natural de cada una de las medidas de resistividad aparente del terreno obtenidos en campo.

$x$  promedio o media del grupo de datos  $X_i$

La resistividad con probabilidad del 70% de no ser superada se calcula mediante la siguiente formula<sup>4</sup>:

$$\rho_{70\%} = e^{S*0,524411+x} \quad (10)$$

Donde:

Se halla el promedio y la desviación estándar  $S$  del nuevo grupo de datos a partir de las siguientes ecuaciones

$x$  promedio o media del grupo de datos  $X_i$

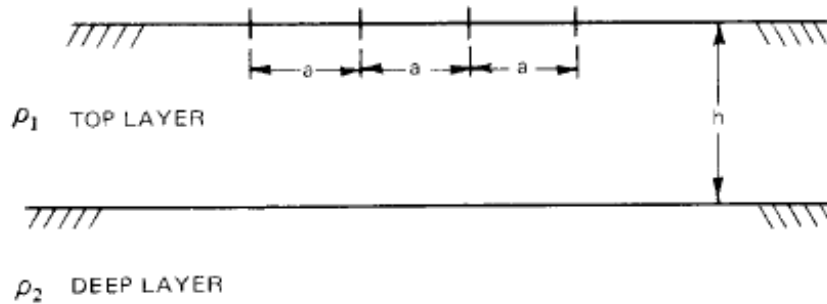
$S$  desviación estándar del grupo de datos  $X_i$

Un ejemplo de aplicación de esta metodología puede consultarse en el capítulo 5 del presente trabajo, en la sección 5.1 "Procedimiento para la medida de la resistividad del suelo en líneas de transmisión".

<sup>4</sup> De la distribución normal se toma el valor de Z para una probabilidad del 70%, Z=0.524411.

- **Modelo de dos capas horizontales.** Consiste en modelar el suelo mediante una capa superior de profundidad finita  $h$  y resistividad  $\rho_1$ , sobre otra de profundidad infinita y de resistividad  $\rho_2$ .

Figura 17. Modelo de dos capas



Fuente: ANSI/IEEE Std 80 – 2000. Guide for Safety in AC Substation Grounding

El cambio abrupto de resistividad en los límites de las capas puede ser descrito mediante el factor de reflexión  $K$ :

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2} \quad (11)$$

Donde

$\rho_1$  Es la resistividad de la capa superior en  $\Omega$  - m.

$\rho_2$  Es la resistividad de la capa inferior en  $\Omega$  - m.

La resistividad aparente del suelo, medida usando el método de Wenner y en términos de los parámetros del modelo de dos capas, es determinada mediante la siguiente ecuación:

$$\rho(a) = \rho_1 \left[ 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(2n \frac{h}{a}\right)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + \left(2n \frac{h}{a}\right)^2}} \right] [\Omega\text{-m}] \quad (12)$$

Donde:

$\rho_1$  Es la resistividad de la capa superior en Ohm- metro.

$h$  Es la profundidad de la capa superior en metros.

$K$  Es el factor de reflexión.

$a$  Es el espaciamiento entre electrodos en metros.

Aunque un modelo del suelo más exacto puede llevarse a cabo, raramente es justificable o técnicamente factible. En la práctica se ha encontrado que el modelo de dos capas es una buena aproximación a la estructura real del suelo para aplicaciones de sistemas de puesta a tierra, aun cuando las medidas indiquen la existencia de una estructura más compleja [8].

Existen diferentes métodos que permiten determinar las resistividades equivalentes de las capas superior e inferior, y la profundidad de la capa superior del modelo de dos capas. Estos métodos pueden ser empíricos o analíticos.

Los métodos empíricos son basados en la experiencia adquirida a través de numerosas medidas y ejercicios de interpretación. Esencialmente estos métodos observan la forma de la curva de resistividad aparente y a partir de ciertas de sus propiedades deducen los valores de resistividad y la profundidad de la capa superior. Dentro de estos métodos encontramos: la regla de Guish-Rooney, la regla de Lancaster-Jones. La inexactitud es inherente a los métodos empíricos, por lo que se recomienda su uso como una primera aproximación, para luego servirse de los métodos analíticos.

Existen también numerosos métodos analíticos que pueden ser utilizados. El método gráfico de Sunde es comunmente empleado, y su teoría se desarrolla con base en el método de medida de Wenner. Los parámetros  $\rho_1$  y  $\rho_2$  son obtenidos a partir de la inspección de la curva de resistividad aparente, y a partir de la aplicación del método gráfico, se obtiene el parámetro  $h$  como sigue:

1. Se grafica la curva de resistividad aparente  $\rho_a$  [ $\Omega$ -m] vs. El espaciamiento  $a$  [m] entre electrodos.
2. Por inspección de la curva anterior se estiman los valores de  $\rho_1$  y  $\rho_2$ .  $\rho_1$  es un valor de resistividad aparente que corresponde a pequeños espaciamientos y  $\rho_2$  es un valor de resistividad aparente que corresponde a grandes espaciamientos.
3. Se calcula la relación  $\rho_1 / \rho_2$  y se selecciona una curva de la grafica de Sunde (Ver figura 18), o se interpola y dibuja una nueva curva en la gráfica.
4. Se localiza el punto central dentro de la región inclinada de la curva y se selecciona un valor del eje  $y$  que corresponderá a un valor de  $\rho_2 / \rho_1$ .
5. Se lee el valor correspondiente de  $a/h$  en el eje  $x$ .

6. Se calcula el valor de  $\rho_a$  a partir de la relación obtenida en el paso 4 y el valor asumido de  $\rho_1$  en el paso 2.

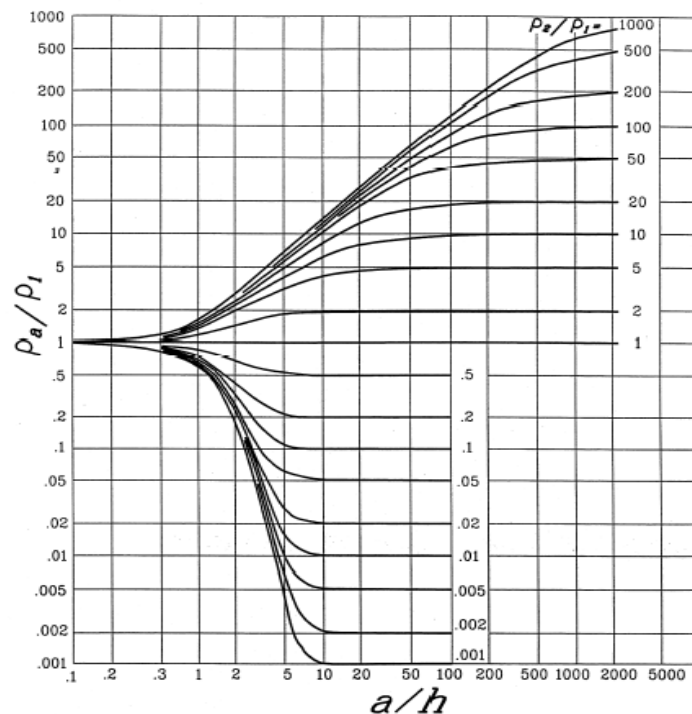
7. En la gráfica de resistividad aparente (paso 1), se obtiene el espaciamiento que corresponde al valor de  $\rho_a$ .

8. Se calcula la profundidad  $h$ , a partir del espaciamiento  $a$  y la relación dada en el paso 5.

Este método está sujeto a que el calculista elija por inspección visual los valores de  $\rho_1$  y  $\rho_2$ , por lo que es posible obtener diferentes estructuras de dos capas para un mismo grupo de mediciones. La búsqueda de la estructura más adecuada a los resultados experimentales puede hacerse gráficamente o por cálculos mediante ordenador, quedando determinada la estructura del terreno con una precisión que depende, únicamente de la manera en que los resultados de las mediciones se superpongan con las curvas teóricas.

Un ejemplo de aplicación del método gráfico de Sunde, puede consultarse en el capítulo 5 del presente trabajo, en la sección 5.1.4 “Instructivo de aplicación del método de Sunde para la obtención de un modelo de dos capas”.

Figura 18. Método gráfico de Sunde



Fuente: ANSI/IEEE Std 80 – 2000. Guide for Safety in AC Substation Grounding

## 2.4 RECOMENDACIONES ADICIONALES PARA LA MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

La medida de la resistencia de puesta a tierra, es susceptible a la introducción de errores durante el proceso de medición. Algunas recomendaciones que deben tenerse en cuenta son:

\*Revisar toda la documentación y planos definitivos relativos a la puesta a tierra bajo estudio y a servicios instalados en el área, para determinar la presencia de contrapesos, tuberías, cables, ductos o cualquier otro tipo de objetos metálicos que puedan afectar la medida.

\*Los sistemas de puesta a tierra de torres de líneas de transmisión, generalmente ocupan una extensión considerable del suelo. Una de las fallas más comunes en la medida de la resistividad con el método de Wenner o Schlumberger, es tomar medidas sin el suficiente espaciamiento entre electrodos.

Es recomendable que como mínimo el distanciamiento total de los electrodos ( $3*a$  en el método de Wenner y  $d+2*c$  en el método de Schlumberger), cubra las dimensiones de la puesta a tierra. Así mismo se recomienda que el máximo distanciamiento total sea tres veces la máxima dimensión de la puesta a tierra [8].

Las medidas de resistividad del terreno se llevan a cabo antes del diseño y la construcción del sistema de puesta a tierra en la mayoría de los casos. Es por esto que antes de ejecutar las medidas es recomendable hacer una estimación del tamaño del sistema de puesta a tierra, basándose por ejemplo en otros similares ya construidos.

En el caso de líneas de transmisión la máxima dimensión del sistema de puesta a tierra, es generalmente menor a 15 m, pero puede aumentarse cuando se instalan contrapesos. En los casos más desfavorables, estos no superan los 40 m de longitud (investigaciones han mostrado que longitudes mayores no aportan un mejoramiento en el comportamiento del sistema de puesta a tierra ante descargas atmosféricas [2]).

Tomar medidas a separaciones de 5, 10, 15 y 20 metros entre electrodos será más que conveniente para la mayoría de los sitios de torre. En el caso de que las medidas iniciales arrojen resultados que indiquen resistividades mayores a 2000  $\Omega$ -m, pueden realizarse medidas adicionales a 25 y 30 metros de separación.

\*Los electrodos de medida deben estar en buen contacto con el suelo. Si se observan bajas corrientes de prueba, con el fin de mejorar el contacto de los electrodos con el suelo, se recomienda profundizarlos y humedecerlos.

\*En caso de realizar mediciones en áreas donde se encuentren objetos metálicos enterrados, se debe tener en cuenta que estos serán fuentes de puntos de discontinuidad en la curva de resistividad aparente. Se recomienda realizar mediciones ortogonales a estos para minimizar su influencia en la medida.

\*A partir de la interpretación de los datos, se deben identificar puntos de discontinuidad para no tenerlos en cuenta en el desarrollo del modelo del suelo.

\*Se recomienda el uso de varillas de acero como electrodos auxiliares para la medida, pues sus características mecánicas son indicadas para soportar su enterramiento en suelos duros.

\*Las recomendaciones en cuanto al equipo de medida son las mismas que para el caso de medida de la resistencia de puesta a tierra (Ver sección 3.7 numerales 5, 6, 7, 8 y 9).

### **3. MÉTODOS PARA LA MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA**

La impedancia de puesta a tierra de las torres de líneas de transmisión es medida en términos de su resistencia pues, a pesar de que contiene componentes capacitivas e inductivas, estas son despreciables con respecto a su componente resistiva [10].

La medida de la resistencia de puesta a tierra en torres de línea de transmisión, es llevada a cabo en dos etapas del proyecto: al finalizar la construcción del sistema de puesta a tierra durante la etapa de construcción de la línea, y posteriormente en la etapa mantenimiento de la misma.

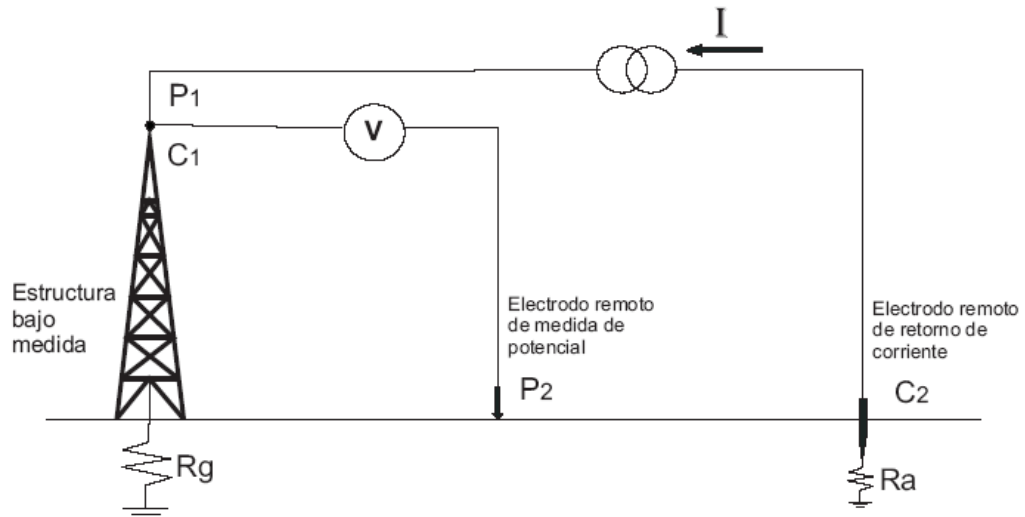
El objetivo fundamental de la medida de la resistencia de puesta a tierra, es verificar que su valor se encuentre dentro de los límites de diseño y determinar si se requiere el ajuste de la puesta a tierra para cumplir con estos límites.

A partir del conocimiento del valor real de la resistencia de puesta a tierra de las torres de la línea, es posible determinar mediante simulación su conveniencia en pro del buen desempeño de la línea ante descargas atmosféricas. También le permite al diseñador juzgar sobre el grado de aproximación alcanzado respecto a la realidad, con las expresiones teóricas utilizadas en el diseño de la puesta a tierra de las torres.

En general, los métodos de medida de la resistencia de puesta a tierra tratan de determinar la elevación de potencial de la puesta a tierra con respecto a la tierra remota, cuando se inyecta en ella una corriente de prueba. Esta inyección de corriente se realiza por medio del circuito formado por la puesta tierra en estudio, una fuente de corriente y un electrodo de retorno de corriente que es localizado a distancia tal y como se muestra en la figura 19.

La principal dificultad en la medida de la resistencia de puesta a tierra, es la conveniente localización del electrodo de retorno de corriente, pues este debe estar lo suficientemente alejado como para asegurar que no hay presente ningún tipo de acople resistivo con la puesta a tierra en estudio. Los métodos utilizados para la medida de la resistencia de puesta a tierra se describen a continuación.

Figura 19. Principio de medida de resistencia de puesta a tierra



Fuente: "Transmission Line Grounding". Electric Power Research Institute.

### 3.1 MÉTODO DE LOS DOS PUNTOS

En este método se mide la resistencia total conformada por la suma de las resistencias de la puesta a tierra del electrodo bajo medida más la de un electrodo auxiliar. Se asume que la resistencia de puesta a tierra del electrodo auxiliar es despreciable con respecto a la resistencia de la puesta a tierra bajo medida.

El método de los dos puntos está limitado a la medida de la resistencia en sistemas de puesta a tierra residenciales [8], conformados usualmente por una varilla enterrada. En esta clase de instalaciones el valor máximo permitido de resistencia de puesta a tierra alcanza  $25 \Omega$  y en algunos casos se cuenta con sistemas de suministro de agua que utilizan tuberías metálicas las cuales son usadas como electrodo auxiliar, se asume que la resistencia del sistema de suministro de agua es de alrededor de  $1 \Omega$  (Ver figura 20).

Adicionalmente, para que el método no arroje resultados erróneos debe asegurarse que no hay presente ningún tipo de acople resistivo entre el electrodo auxiliar y la puesta a tierra en estudio [5], esto se logra mediante un alejamiento prudente entre estos<sup>5</sup>.

<sup>5</sup> El alejamiento requerido para la medida de la resistencia de puesta a tierra de torres de líneas de transmisión aéreas se discute con más detalle en la sección 3.3.

Figura 20. Método de los dos puntos



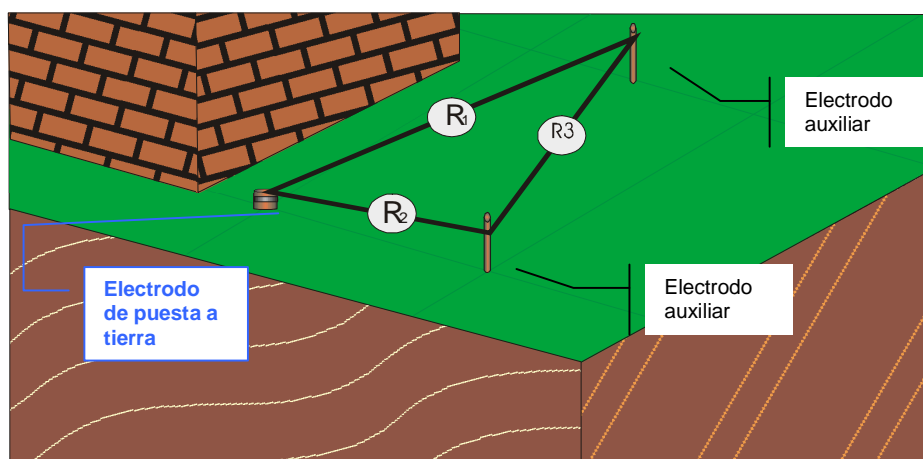
Fuente: "Electrical grounding techniques", LEM Instruments.

Este método está sujeto a grandes márgenes de error, pues es posible que la resistencia de puesta a tierra del electrodo bajo medida sea baja o del mismo orden de la del electrodo auxiliar.

### 3.2 MÉTODO DE LOS TRES PUNTOS

En este método se usan dos electrodos de prueba con resistencias  $R_Y$  y  $R_Z$ , que se arreglan conformando un triángulo con el electrodo de puesta a tierra en estudio, como se muestra en la figura 21.

Figura 21. Método de los tres puntos



Fuente: Autora.

La resistencia entre cada par de electrodos es medida y la resistencia de puesta a tierra  $R_x$  se calcula:

$$R_x = \frac{R_1 + R_2 - R_3}{2} \quad (13)$$

Esta técnica es muy limitada, pues su uso se restringe a pequeñas puestas a tierra en locaciones que permitan localizar los electrodos de prueba a suficiente distancia, de manera que cada uno se encuentre fuera de la zona de influencia del otro. Adicionalmente, si los electrodos auxiliares son de resistencia mayor a la del electrodo de puesta a tierra, el resultado final obtenido será erróneo [10].

### 3.3 MÉTODO DE LA CAÍDA DE POTENCIAL

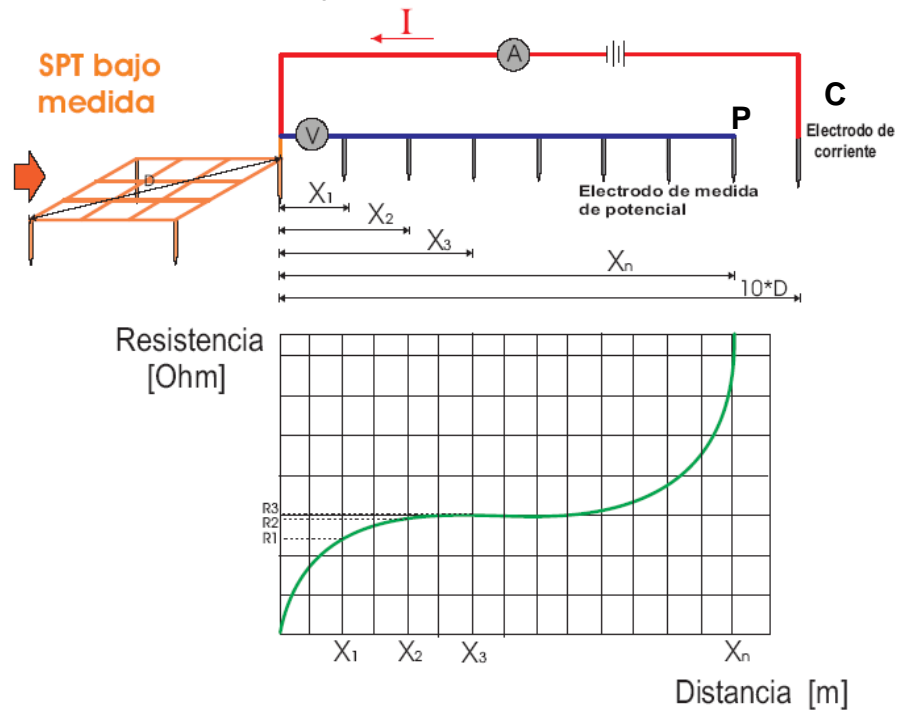
Este método requiere de dos electrodos auxiliares, uno de corriente **C** ubicado a distancia del sistema de puesta a tierra en estudio que permite el paso de corriente, y otro de potencial **P** que permite medir la diferencia de tensión a una distancia de prueba  $X$ . En este método los electrodos auxiliares habitualmente se disponen en línea recta tal y como se muestra en la figura 22.

Conocidos el valor de tensión y el valor de corriente se podrá calcular mediante la ley de Ohm el valor de resistencia. En el método de caída de potencial se busca construir una curva de resistencia aparente  $R$  en función del espacio de prueba  $X$ ; por esto el electrodo de potencial **P** debe moverse en pasos desde la puesta a tierra en estudio hasta el electrodo de retorno de corriente **C**, en cada paso se obtiene un punto de la curva.

Es viable extender el electrodo de potencial formando un ángulo con el electrodo de corriente, generalmente de  $90^\circ$ . Esta práctica es recomendable cuando se van a medir resistencias de puesta a tierra muy bajas (como subestaciones de alta tensión), con el fin de minimizar la resistencia mutua que puede presentarse entre electrodos.

En lo posible, durante la medida de la resistencia de puesta a tierra de las torres de líneas de transmisión, el electrodo de retorno de corriente debe ubicarse en dirección ortogonal a la línea con el fin de minimizar tensiones inducidas tanto en los electrodos como en el equipo de medida.

Figura 22. Método de la caída de potencial



Fuente: Autora.

Se acepta que el valor de la resistencia de puesta a tierra es aquel que toma la curva al nivelarse [10], regla que debe aplicarse cuidadosamente ya que en muchos casos la curva obtenida a partir de la aplicación del método no presenta claramente esta zona de nivelación.

Para obtener esta porción plana de la curva es necesario que el electrodo de corriente se encuentre fuera de la zona de influencia de la puesta a tierra a medir [10]. Esta zona de influencia es considerada como la distancia más allá de la cual es despreciable la elevación de potencial causada por la corriente inyectada en la puesta a tierra.

En otras palabras, el electrodo de corriente debe ubicarse a una distancia lo suficientemente alejada del sistema de puesta a tierra en estudio, fuera de su zona de influencia, de manera que se evite cualquier acople entre los electrodos.

El método de la caída de potencial es el más extensamente usado para la medida de la resistencia de puesta a tierra, no solo de torres de líneas de transmisión sino de todo tipo de instalaciones. Es un método muy exacto, siempre y cuando sea aplicado de manera que se obtenga una porción plana en la curva Resistencia aparente vs. Distancia de prueba.

**3.3.1 Interpretación De Las Medidas Obtenidas.** El método de la caída de potencial, tiene limitaciones que deben ser comprendidas con el fin de llevar a cabo una medida de la resistencia de puesta a tierra de las torres de líneas de transmisión con la mayor exactitud posible.

La primera limitación ocurre cuando el tamaño de la puesta a tierra aumenta, incrementándose la zona de influencia de manera que se hace más difícil establecer si el electrodo de corriente se encuentra realmente fuera de ella.

La norma IEEE 81 [10] afirma que en el caso de torres de transmisión que no se encuentren conectadas al cable de guarda y cuya puesta a tierra no contenga contrapesos, una distancia del orden de los 50 m puede considerarse fuera de la zona de influencia. El Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas RETIE en su artículo 15 sobre puestas a tierra, indica que la distancia de ubicación del electrodo auxiliar de corriente debe ser 6,5 veces la mayor dimensión de la puesta a tierra a medir, para lograr una precisión del 95%.

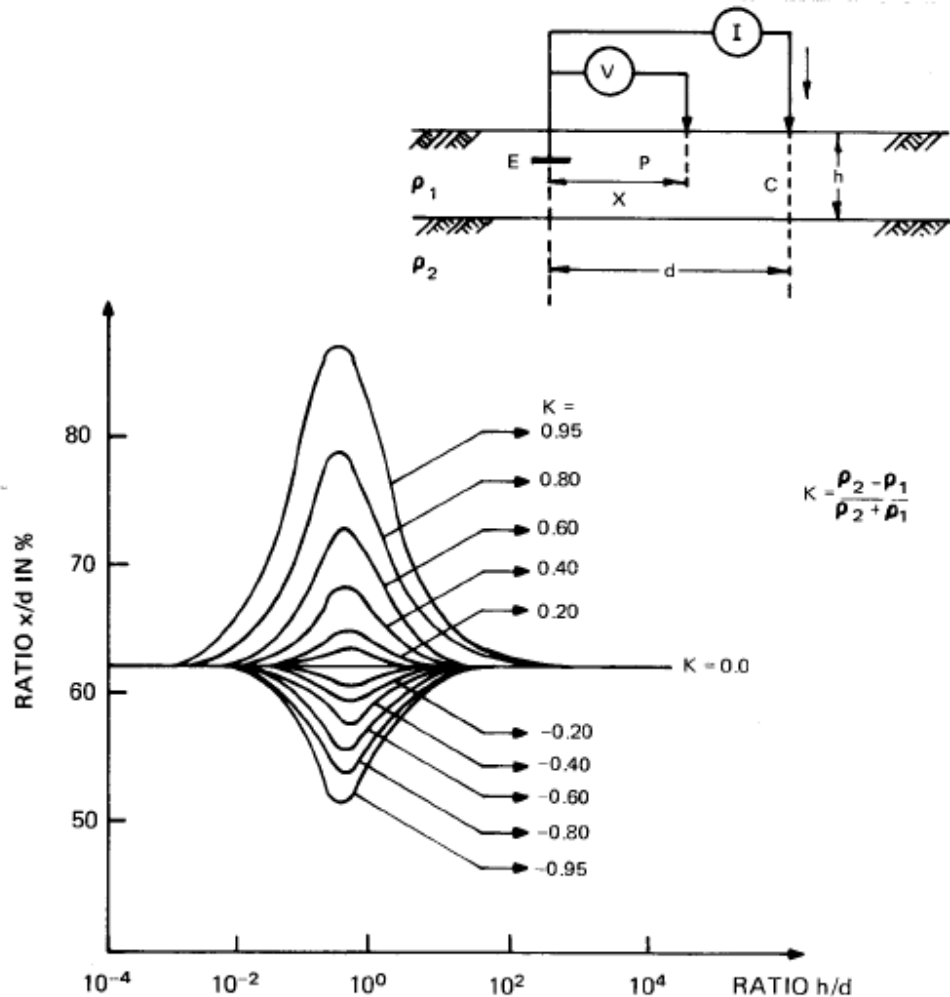
El EPRI, en su publicación Transmission Line Grounding [8], es más conservador al afirmar que para pequeños sistemas de puesta a tierra, localizar el electrodo de corriente a una distancia de al menos 10 veces la mayor dimensión de la puesta a tierra, normalmente asegurará que este se encuentre fuera de la zona de influencia.

Una manera de determinar si el electrodo de corriente es lo suficientemente lejano, es relocalizarlo a una distancia 10% más lejana y observar si la medida cambia. Si la medida observada aumenta, entonces el electrodo de corriente debe alejarse aún más.

Otro factor que afecta la medida es la estructura del suelo, ya que de ella depende la correcta localización del electrodo de potencial que permite determinar el valor verdadero de resistencia de puesta a tierra, cuando este sigue el trayecto en el mismo sentido del electrodo de corriente [8]. El correcto espaciamiento del electrodo de potencial, se ilustra en la figura 23.

Como se indica en esta figura la distancia requerida del electrodo de potencial cuando el suelo es uniforme, es tal que la relación  $X/d=0,618$ . Esta difundida regla (también denominada la regla del 62%), debe aplicarse con precaución teniendo en cuenta que, solo es válida si el suelo es uniforme y existe un gran espaciamiento entre electrodos de manera que se pueda asumir que estos son semiesféricos.

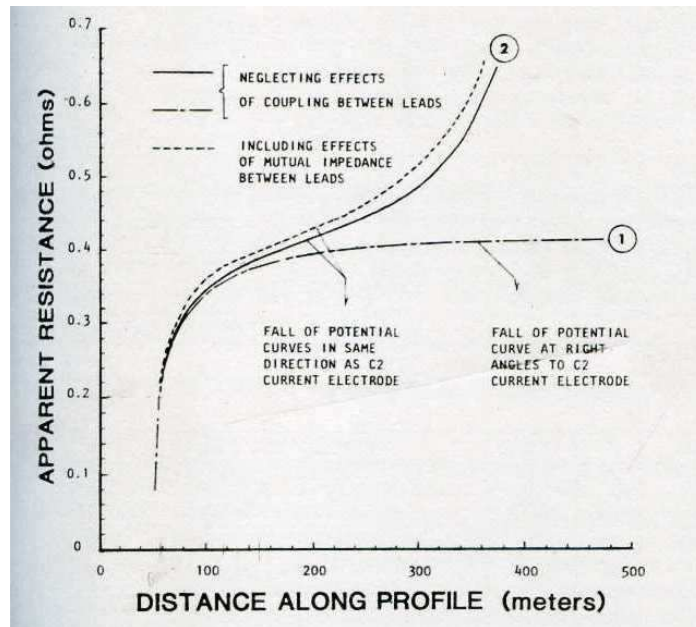
Figura 23. Espaciamiento requerido del electrodo de potencial en un suelo de dos capas



Fuente: ANSI/IEEE Std 81 – 1983. Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System.

Cuando resistencias de muy bajo valor van a ser medidas, si el electrodo de potencial es localizado a lo largo de la misma dirección del electrodo de corriente, el acople inductivo entre los electrodos de corriente y potencial pueden introducir un error considerable en la medida. Este acople, hace que la curva obtenida se incremente con la distancia, disimulando cualquier nivelación que debería ocurrir cuando el electrodo de potencial deja la zona de influencia del sistema de puesta a tierra bajo estudio. La figura 24 ilustra el efecto del recorrido del electrodo de potencial y del acople mutuo entre los electrodos de corriente y potencial.

Figura 24. Efecto del recorrido del electrodo de potencial y del acople entre electrodos de corriente y potencial en la medición de la resistencia de puesta a tierra



Fuente: Transmission Line Grounding. EPRI.

En general si el recorrido del electrodo de potencial toma una dirección diferente a la del electrodo de corriente, se obtendrá una buena curva que presentará la zona de nivelación, si se asegura que el electrodo de corriente ha sido ubicado fuera de la zona de influencia de la puesta a tierra bajo medida. De cualquier manera, las medidas de resistencia de puesta a tierra en torres de líneas de transmisión no son afectadas significativamente por este fenómeno [8].

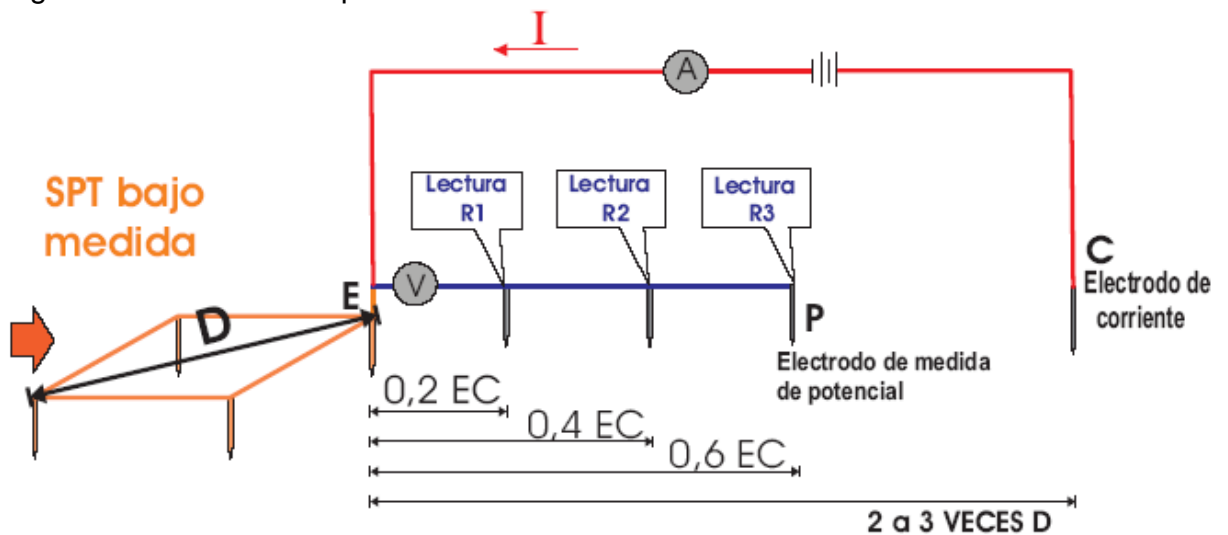
El método de caída de potencial puede usarse en sistemas de puesta a tierra constituidos por electrodos de gran tamaño, pero esto implica ubicar el electrodo de corriente a grandes distancias de manera que quede fuera de la zona de influencia, lo que para fines de medida resulta poco práctico.

### 3.4 MÉTODO DE LA PENDIENTE

En este método, también llamado método de la pendiente de Tagg, la forma de conexión del equipo es como en el método de caída de potencial. El electrodo de corriente debe ubicarse a una distancia **EC** desde el sistema de puesta a tierra bajo medida, esta se sugiere de dos 2 a 3 veces la dimensión máxima del sistema de puesta a tierra.

Se toman lecturas con el electrodo de potencial siguiendo la misma dirección del electrodo de corriente, a distancias **EP** iguales a  $0,2 \cdot EC$ ,  $0,4 \cdot EC$  y  $0,6 \cdot EC$ , tal y como se muestra en la figura 25. Estas lecturas corresponderán a  $R_1$ ,  $R_2$  y  $R_3$  respectivamente.

Figura 25. Método de la pendiente



Fuente: Autora.

A partir de los valores anteriores se calcula el coeficiente de la pendiente  $\mu$  como sigue:

$$\mu = \frac{R_3 - R_2}{R_2 - R_1} \quad (14)$$

Donde,

$R_1$  Es la resistencia medida a una distancia EP igual a  $0,2 \cdot EC$ .

$R_2$  Es la resistencia medida a una distancia EP igual a  $0,4 \cdot EC$ .

$R_3$  Es la resistencia medida a una distancia EP igual a  $0,6 \cdot EC$ .

$\mu$  es una medida del cambio de la pendiente de la curva de resistencia del electrodo de puesta a tierra bajo estudio.

Al valor calculado de  $\mu$  corresponde un valor  $P_T/C$  indicado en las tablas publicadas por el Dr. Tagg [5] (Ver anexo 1).  $P_T$  es la distancia a la cual debe ser ubicado el electrodo de potencial para medir la resistencia de puesta a tierra real. Puesto que C ya es conocido, se calcula la distancia a la cual debe ser reubicado el electrodo de potencial así:

$$EP = P_T = \frac{P_T}{C} * EC \quad (15)$$

Donde,

**$P_T/C$**  Es el valor leído de las tablas del anexo 1, correspondiente al  $\mu$  calculado.

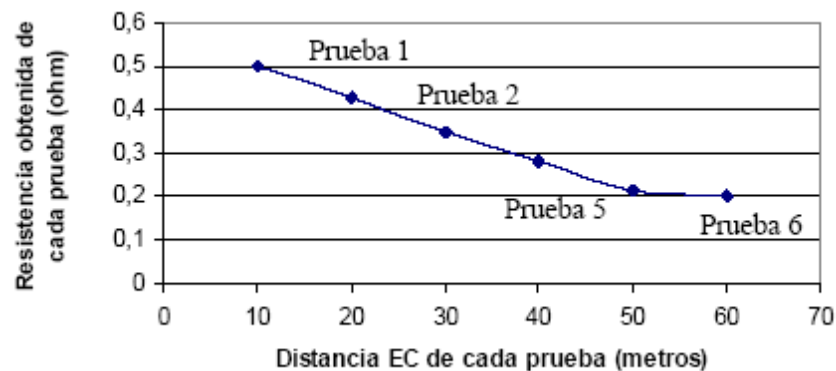
**EC** Es la distancia del electrodo de corriente.

Finalmente, se dispone el electrodo de potencial a la distancia EP hallada, y se toma la medida. Esta se considera como el valor real de resistencia de la puesta a tierra bajo prueba.

Posteriores mediciones se pueden realizar aumentando la distancia EC, esto con el fin de comparar los resultados obtenidos y alcanzar una mayor certidumbre de los mismos a partir de su análisis.

La gráfica de la figura 26 muestra la resistencia de puesta a tierra obtenida a partir de la aplicación del método de la pendiente a diferentes distancias de prueba EC. En la figura se puede apreciar como la resistencia decrece a medida de que la distancia EC aumenta, hasta que en las pruebas 5 y 6 su variación es mínima [1].

Figura 26. Resistencia obtenida mediante la aplicación del método de la pendiente a diferentes distancias de prueba EC.



Fuente: "Técnicas Modernas Para la Medición de Sistemas de Puesta a Tierra en Zonas Urbanas". Ing. Ignacio Agulleiro.

En este método, si la resistencia verdadera decrece apreciablemente cuando EC aumenta, entonces es necesario aumentar EC aun más, hasta encontrar un punto en el que la variación sea mínima [3].

El hecho de obtener un valor de  $\mu$  mayor a los dados en el anexo 1, es indicador de que la distancia EC debe aumentarse.

El método de la pendiente es más preciso que el método de la caída de potencial, es muy fácil de usar y ha probado dar resultados satisfactorios, tanto en casos teóricos como prácticos, cuando el terreno no es homogéneo y en sistemas de electrodos que cubren gran área. Por lo anterior, es apropiado para la medida de la resistencia de puesta a tierra de torres de líneas de transmisión aéreas, especialmente si estas son de gran extensión (con contrapesos incorporados).

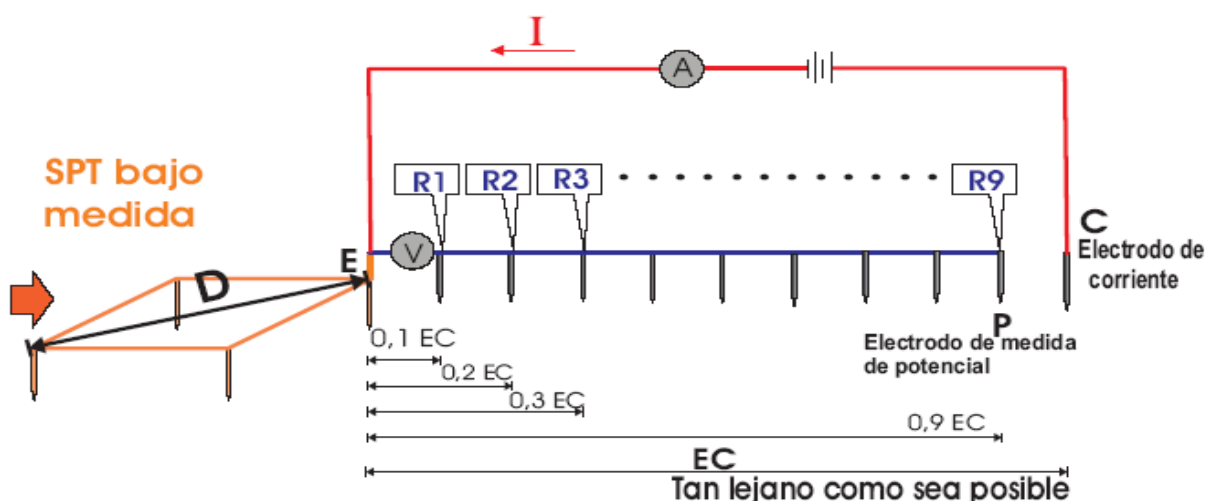
Tiene adicionalmente otra bondad con respecto al método de caída de potencial, y es que no es necesario alejar el electrodo a grandes distancias, lo que facilita su aplicación.

### 3.5 MÉTODO DE LA INTERSECCIÓN DE CURVAS

En este método se elige de forma arbitraria un punto E que pertenece a la puesta a tierra bajo medida. Se disponen en línea recta el electrodo de medida de potencial P y de retorno de corriente C, procurando que este último sea ubicado tan lejano como sea posible, tal como se expone en la figura 27.

Ubicando a diferentes distancias EP el electrodo de potencial (10%, 20%, 30%...90% la distancia EC), se toman medidas de resistencia (R1, R2, R3...R9) y se puede obtener una curva EC1 de resistencia aparente versus distancia, tal y como en el método de caída de potencial.

Figura 27. Procedimiento de medida, Método de la intersección de curvas

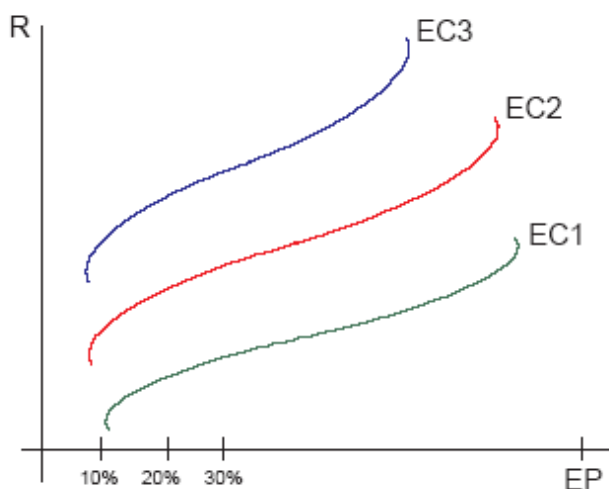


Fuente: Autora.

Luego se repite el proceso manteniendo el punto de contacto E, pero cambiando la distancia EC del electrodo de corriente, de modo que se obtengan otras dos curvas EC2 y EC3 (Ver figura 28).

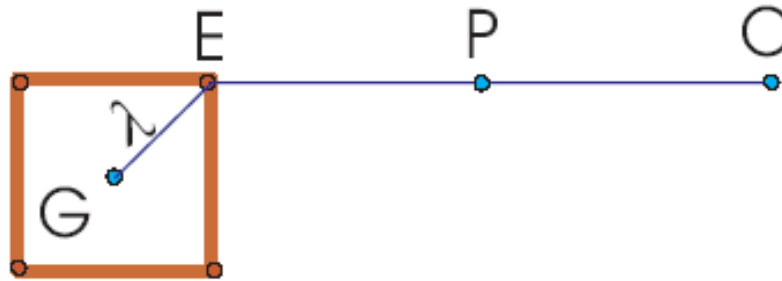
Según lo publicado por el Dr. G.F. Tagg, en PROC. IEE, vol. II, nº 12 de Diciembre de 1964, la verdadera resistencia de puesta a tierra se obtiene cuando el electrodo de medida de potencial P esta situado a una distancia del centro eléctrico del sistema de puesta a tierra bajo medida, igual al 61,8% de la distancia desde el centro eléctrico al electrodo de corriente C. La teoría del Dr. Tagg introduce un nuevo concepto:  $\lambda$  que es la distancia entre el punto E y el centro eléctrico de la puesta a tierra, G (Ver figura 29).

Figura 28. Curvas de resistencia aparente versus distancia, para diferentes distancias de prueba EC



Fuente: "Medidas y Vigilancia de las Instalaciones de Puesta a Tierra". Publicación Técnica Schneider Electric.

Figura 29.  $\lambda$ : distancia entre el punto E y el centro eléctrico G de la puesta a tierra



Fuente: Medidas y Vigilancia de las Instalaciones de Puesta a Tierra” Publicación Técnica Schneider Electric.

Se plantea entonces la siguiente ecuación:

$$\lambda + EP = 0,618 * (\lambda + EC) \quad (16)$$

Y expresando  $\lambda$  en función de las distancias EC y EP se obtiene:

$$\lambda = \frac{0,618 * EC - EP}{0,382} \quad (17)$$

$$\lambda = 1,617 * EC - 2,617 * EP \quad (18)$$

Para cada una de las curvas de resistencia aparente EC1, EC2 y EC3, se obtiene una nueva curva de resistencia aparente versus  $\lambda$ , cada una de estas denominada curva de intersección.

El valor verdadero de resistencia de puesta a tierra será el punto de intersección de las tres curvas o el centro del área comprendida entre ellas, tal y como se ilustra en la figura 30.

El hecho de que las curvas no presenten un punto único de intersección, sino que formen una pequeña área comprendida entre ellas, resulta en un pequeño porcentaje de incertidumbre inherente al método, pero aceptable [3].

Para conocer la distancia exacta a la cual debe ser medida la resistencia verdadera de puesta a tierra, basta con remplazar el valor de  $\lambda$  hallado en la ecuación (18) y despejar EP. Esto facilitará posteriores mediciones de la

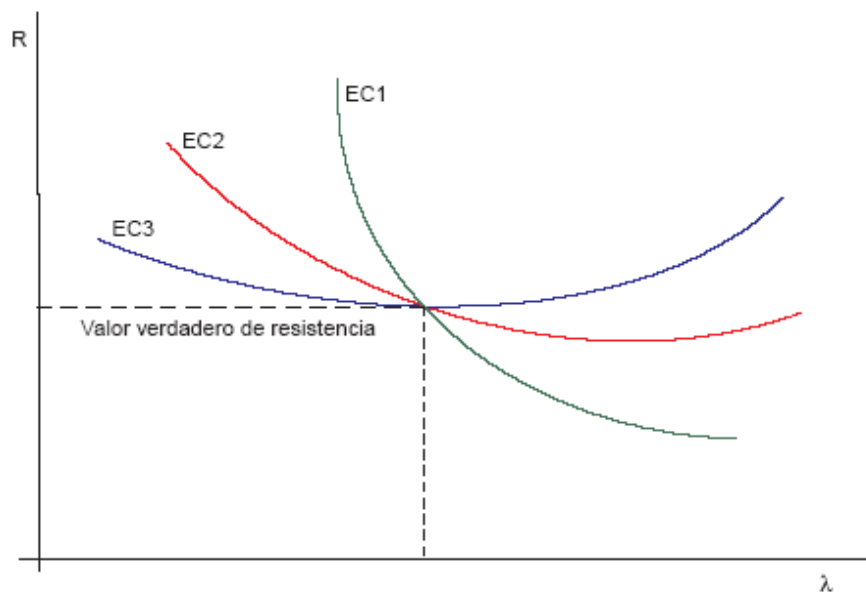
resistencia de puesta a tierra, pues no será necesario realizar todo el procedimiento.

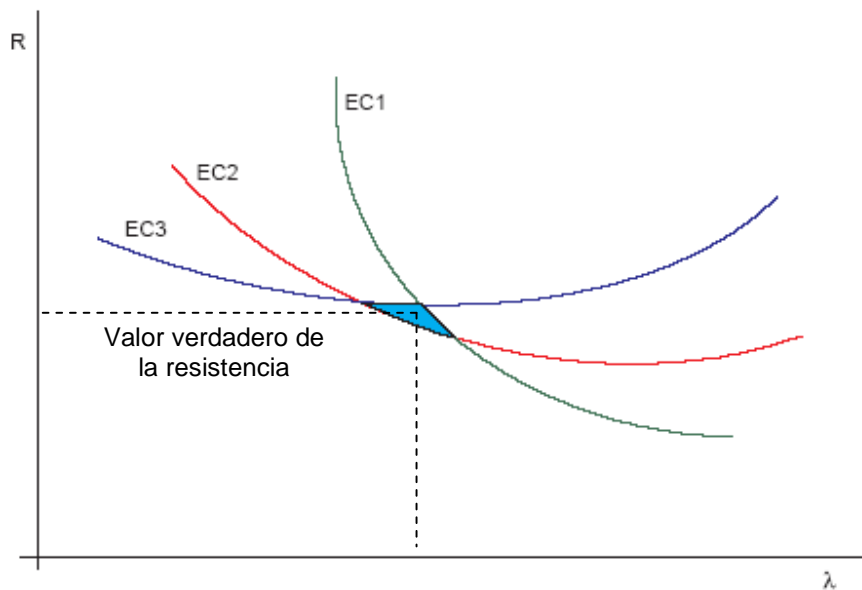
Este método puede arrojar valores negativos de  $\lambda$ , pero el valor de resistencia obtenido será igualmente válido.

En este método la distancia máxima EC a la cual se ubica el electrodo de retorno de corriente C, no debe ser demasiado grande, si lo es, la curva resultante es muy plana, y el punto de intersección se vuelve indefinido. Es decir, en este método al contrario del método de la caída de potencial, es deseable que el electrodo de retorno de corriente C se ubique dentro de la zona de influencia de la puesta a tierra a medir.

Esto último se convierte en una ventaja del método de las curvas de intersección sobre el método de la caída de potencial, por lo cual su uso es frecuente en sistemas de puesta a tierra de gran dimensión, en los cuales el uso del método de la caída de potencial se hace poco práctico.

Figura 30. Curvas de intersección





Fuente: Medidas y Vigilancia de las Instalaciones de Puesta a Tierra” Publicación Técnica Schneider Electric.

### 3.6 MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA DE TORRES DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN CONECTADAS A CABLES DE GUARDA

El hecho de que la torre de la línea de transmisión bajo estudio se encuentre conectada al cable de guarda, complica considerablemente la medida de su resistencia de puesta a tierra. En este caso el cable de guarda interconecta la torre bajo medida con un gran número de torres adyacentes, así es que su resistencia de puesta a tierra es prácticamente imposible de determinar si se usa instrumentación convencional.

La solución más obvia es desconectar y aislar el cable de guarda de la torre durante el proceso de medición, pero esto resulta ser un trabajo tedioso y una tarea que implica poner en riesgo al trabajador.

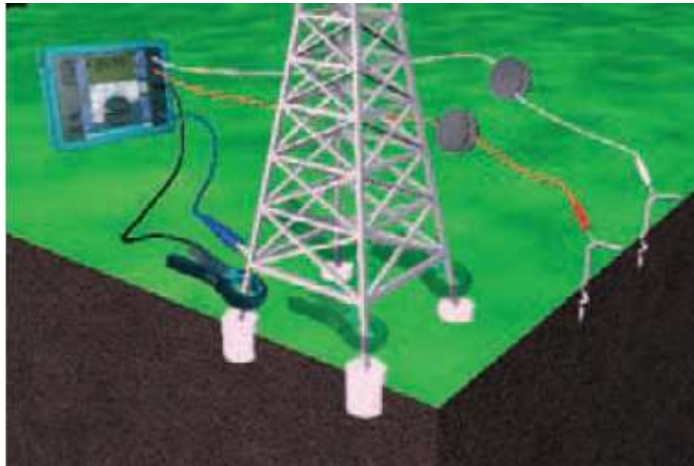
Se puede determinar la resistencia de puesta a tierra de una torre específica conectada al cable de guarda, aprovechando la característica impedancia versus frecuencia de la puesta a tierra.

La puesta a tierra de una torre de transmisión, exhibe una impedancia casi constante a lo largo de un amplio rango de frecuencia. Por otra parte la impedancia del cable de guarda que interconecta las torres adyacentes de naturaleza inductiva, exhibe un incremento con la frecuencia, haciendo que esta se eleve a valores muy significativos con respecto al paralelo de resistencias de puesta a tierra de las torres. A altas frecuencias, de 20 kHz o más, el efecto de

las torres adyacentes es prácticamente insignificante [8]. Existe en el mercado al menos un equipo que aprovecha este comportamiento para realizar la medida de la resistencia de puesta a tierra de la torre<sup>6</sup>.

Recientemente se ha desarrollado una nueva opción y es la de medida selectiva. Esta se vale del uso de un transformador de corriente en forma de pinza con diámetro en capacidad de rodear la pata de la torre. De esta manera se puede determinar la resistencia de puesta a tierra por pata. En la figura 31 se ilustra la aplicación de esta metodología (requiere se que lleve a cabo una medida por pata). Como en el caso anterior existe al menos un fabricante que ofrece este tipo de equipos en el mercado<sup>7</sup>.

Figura 31. Método de medida selectivo para torres de líneas de transmisión conectadas a cables de guarda



Fuente: Electrical Grounding Techniques. LEM instruments.

### **3.7 RECOMENDACIONES ADICIONALES PARA LA MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN**

La medida de la resistencia de puesta a tierra, es susceptible a la introducción de errores durante el proceso de medición. Algunas fuentes de error muy comunes que deben tenerse en cuenta son:

<sup>6</sup> Un ejemplo es el TM 25 K de Megabras.

<sup>7</sup> El telurómetro SATURN GEO X de LEM Instruments, empresa adquirida recientemente por FLUKE.

\*La inadecuada separación entre la puesta a tierra bajo medida y los electrodos auxiliares de corriente.

\*Localización de los electrodos auxiliares de corriente o potencial en las cercanías de estructuras metálicas enterradas (tuberías, contrapesos, cables, ductos).

\*Excesiva resistencia del electrodo auxiliar de corriente.

\*Operación del equipo de medida a nivel inadecuado de resolución.

\*Acople inductivo entre electrodos auxiliares de potencial y de corriente.

\*Presencia de corrientes parásitas de origen diverso (continuas, alternas y transitorias, generadas principalmente por circuitos de energía eléctrica, telecomunicaciones y fenómenos atmosféricos)

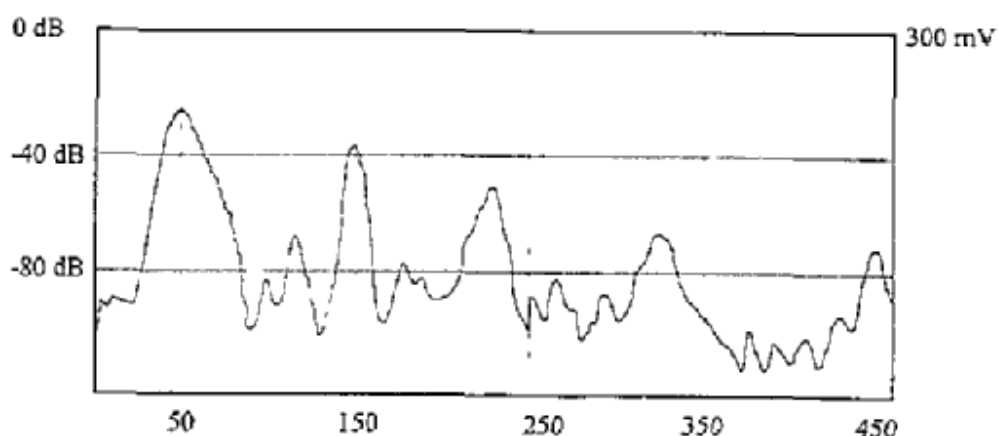
\*Equipo de medida sin calibración y ajuste adecuado.

Con el fin de minimizar el error introducido por las fuentes anteriores se recomienda:

- 1) Conocer los requerimientos del método de medida a utilizar de manera que los electrodos auxiliares de corriente sean ubicados y separados adecuadamente de la puesta a tierra en estudio.
- 2) Revisar toda la documentación y planos definitivos relativos a la puesta a tierra bajo estudio y a servicios instalados en el área, para determinar la presencia de contrapesos, tuberías, cables, ductos o cualquier otro tipo de objetos metálicos que puedan afectar la medida.
- 3) La resistencia del electrodo auxiliar de corriente limita la corriente de prueba. Si esta corriente se hace muy baja, es necesario asegurarse del buen contacto entre el electrodo de corriente y el suelo; si esta medida no es suficiente, deben enterrarse electrodos adicionales con el fin de obtener una resistencia baja.
- 4) Se recomienda el uso de varillas de acero como electrodos auxiliares para la medida, pues sus características mecánicas son indicadas para soportar su enterramiento en suelos duros.
- 5) El instrumento de medida debe contar con una resolución conveniente, de manera que pueda distinguir pequeñas variaciones en la medida, teniendo en cuenta que se pueden presentar valores pequeños de resistencia de puesta a tierra.

- 6) Se recomienda que el equipo haga uso de corriente directa, la cual debe ser invertida periódicamente para que no se desarrollen fuerzas contra-electromotrices en los electrodos que puedan afectar la medida.
- 7) El equipo debe disponer de un sistema de filtros sofisticado para rechazar ruidos y asegurarse de que solo la corriente generada por el mismo instrumento influya en la medición. La frecuencia del equipo debe tener una probabilidad baja de ser encontrada en el suelo, las frecuencias 70, 80, 90 y 110 Hz son de uso común. Las frecuencias más comúnmente encontradas en el suelo son la industrial y su tercer armónico (60 y 180 Hz). En la figura 32 se muestra una típica distribución de frecuencias en el suelo, obtenida en una zona industrial [16].
- 8) El equipo debe estar en capacidad de realizar medidas en suelos de alta resistividad.

Figura 32. Perfil de frecuencias del suelo



Fuente: "Aterramentos eléctricos". Silverio Visacro Filho, Belo Horizonte 1998.

- 9) El uso del equipo en condiciones ambientales difíciles, puede afectar la exactitud del equipo de medida; por lo anterior es recomendable la calibración periódica del equipo de medida. Adicionalmente se deben tener en cuenta las indicaciones en el manual del equipo en cuanto a su correcto ajuste.
- 10) Si la medición va a llevarse a cabo en torres conectadas al cable de guarda se recomienda el uso de equipo de medida de alta frecuencia (20 kHz o más).

## 4. NÁLISIS COMPARATIVO Y SELECCIÓN DE LOS MÉTODOS ADECUADOS PARA LA MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO Y DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN AÉREAS

### 4.1 SELECCIÓN DEL MÉTODO PARA LA MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN AÉREAS

**4.1.1 Análisis Comparativo De Los Métodos Para La Medida De La Resistividad Del Suelo En Líneas De Transmisión Aéreas.** Con el propósito de desarrollar un procedimiento adecuado para la medida de la resistividad del suelo en líneas de transmisión aéreas, es necesario seleccionar el método más conveniente para tal fin.

En la presente sección, se realiza el análisis comparativo de cada uno de los métodos descritos en el capítulo 3, el cual consiste en la definición de la característica a valorar, y en la posterior calificación de cada uno de los métodos a la luz de dicho criterio.

La calificación otorgada a cada uno de los métodos es el resultado de las conclusiones obtenidas por la autora del presente trabajo a partir de la investigación y el estudio de las características de cada uno de ellos.

A continuación se presenta el cuerpo del análisis comparativo.

- **Incertidumbre.** Es imposible conocer con certeza absoluta el valor verdadero de la resistividad aparente del suelo. La incertidumbre expresa la duda sobre la veracidad del resultado, que en este caso es debida al método aplicado para la medición de la resistividad del suelo.

Los métodos de medida expuestos en el capítulo 3, son calificados de acuerdo a su incertidumbre estimada como sigue:

- \*Excelente: muy baja.
- \*Bueno: baja.
- \*Regular: regular.
- \*Insuficiente: alta.

En la tabla que se presenta a continuación se expone la valoración otorgada a cada uno de los métodos.

Tabla 3. Análisis comparativo de los métodos para la medida de la resistividad del suelo de acuerdo a su incertidumbre estimada.

<b>MÉTODOS DIRECTOS</b>	Es muy difícil obtener muestras que sean representativas de las condiciones del suelo en su estado original, en cuanto a compactación y contenido de humedad. <b>Calificación: Insuficiente.</b>
<b>REGISTRO ELÉCTRICO DE PERFORACIÓN</b>	Investiga las características de un pequeño volumen de suelo dentro de la vecindad de los electrodos. <b>Calificación: Bueno.</b>
<b>MÉTODO DE VARIACIÓN DE LA PROFUNDIDAD</b>	Investiga las características del suelo dentro de la vecindad del electrodo de prueba. <b>Calificación: Bueno.</b>
<b>MÉTODO DE WENNER</b>	Es muy exacto. <b>Calificación: Excelente.</b>
<b>MÉTODO DE SCHLUMBERGER</b>	Es muy exacto. <b>Calificación: Excelente.</b>

Fuente:

- **Facilidad De Implementación.** Los sitios de torre de líneas de transmisión aéreas generalmente están ubicados en zonas rurales, algunas de las cuales son de difícil acceso. Adicionalmente, el tipo de suelo varía de un sitio de torre a otro, generando mayor dificultad cuando este es de tipo rocoso.

Por lo anterior es importante seleccionar un método de medición que se aplique sin mayor dificultad en cualquier tipo de terreno, y que pueda realizarse con un equipo de fácil transporte.

Tabla 4. Análisis comparativo de los métodos para la medida de la resistividad del suelo de acuerdo a su facilidad de implementación.

<b>MÉTODOS DIRECTOS</b>	Requiere de un número de excavaciones para obtener una cantidad de muestras representativa, por lo que es un método tedioso <b>Calificación: Insuficiente.</b>
<b>REGISTRO ELÉCTRICO DE PERFORACIÓN</b>	Debe perforarse un hueco en el suelo, de manera que los electrodos móviles puedan ser introducidos. <b>Calificación: Insuficiente.</b>
<b>MÉTODO DE VARIACIÓN DE LA PROFUNDIDAD</b>	Enterrar jabalinas de longitud considerable en terreno rocoso no es práctico. También implica el transporte de la misma. <b>Calificación: Insuficiente.</b>
<b>MÉTODO DE WENNER</b>	Gran simplicidad. No requiere enterrar los electrodos profundamente. <b>Calificación: Excelente.</b>
<b>MÉTODO DE SCHLUMBERGER</b>	Gran simplicidad. No requiere enterrar los electrodos profundamente. <b>Calificación: Excelente.</b>

Fuente:

- **Conveniencia Económica.** En líneas de transmisión es deseable implementar un método de medición de la resistividad del suelo cuyo costo asociado sea lo más bajo posible. Dentro de la conveniencia económica debe considerarse en tiempo requerido para realizar la medida en cada sitio de torre.

Tabla 5. Análisis comparativo de los métodos para la medida de la resistividad del suelo de acuerdo a su conveniencia económica.

<b>MÉTODOS DIRECTOS</b>	El proceso de extracción de muestras y su posterior estudio en laboratorio lo hace un método costoso y prolongado. <b>Calificación: Insuficiente.</b>
<b>REGISTRO ELÉCTRICO DE PERFORACIÓN</b>	La perforación que debe llevarse a cabo en el sitio de torre implica mayor tiempo. Es costoso y requiere equipo especializado. <b>Calificación: Insuficiente.</b>
<b>MÉTODO DE VARIACIÓN DE LA PROFUNDIDAD</b>	Su implementación es económica. <b>Calificación: Excelente.</b>
<b>MÉTODO DE WENNER</b>	Su implementación es económica. <b>Calificación: Excelente.</b>
<b>MÉTODO DE SCHLUMBERGER</b>	Su implementación es económica. <b>Calificación: Excelente.</b>

Fuente:

- **Campo De Aplicación.** Es conveniente que método seleccionado sea aplicado ampliamente para la medición de la resistividad del suelo para efectos del diseño, construcción y mantenimiento de instalaciones eléctricas.

Tabla 6. Análisis comparativo de los métodos para la medida de la resistividad del suelo de acuerdo a su campo aplicación.

<b>MÉTODOS DIRECTOS</b>	Generalmente este tipo de estudios se realizan como una etapa anterior a la construcción de obras civiles. <b>Calificación: Insuficiente.</b>
<b>REGISTRO ELÉCTRICO DE PERFORACIÓN</b>	No es convencionalmente utilizado para aplicaciones en instalaciones eléctricas. Ampliamente usado para la búsqueda de petróleo. <b>Calificación: Insuficiente.</b>
<b>MÉTODO DE VARIACIÓN DE LA PROFUNDIDAD</b>	Utilizado para aplicaciones en instalaciones eléctricas, aunque no es muy común. <b>Calificación: Regular.</b>
<b>MÉTODO DE WENNER</b>	Es el más utilizado para determinar la resistividad del suelo para fines de instalaciones eléctricas. <b>Calificación: Excelente.</b>
<b>MÉTODO DE SCHLUMBERGER</b>	Es utilizado para determinar la resistividad del suelo para fines de instalaciones eléctricas de gran extensión, aunque no es tan popular como el método de Wenner. <b>Calificación: Bueno.</b>

Fuente:

- **Fuentes Bibliográficas.** Este aspecto define la disponibilidad de normas, estándares internacionales y otras fuentes bibliográficas<sup>8</sup> que permitan obtener información suficiente y útil, a quien desee aplicar el método.

Tabla 7. Análisis comparativo de los métodos para la medida de la resistividad del suelo de acuerdo a fuentes bibliográficas.

<b>MÉTODOS DIRECTOS</b>	Muy poca. <b>Calificación: Insuficiente.</b>
<b>REGISTRO ELÉCTRICO DE PERFORACIÓN</b>	Muy poca. <b>Calificación: Insuficiente.</b>
<b>MÉTODO DE VARIACIÓN DE LA PROFUNDIDAD</b>	Se puede obtener suficiente información en las normas IEEE 80 e IEEE 81. <b>Calificación: Bueno.</b>
<b>MÉTODO DE WENNER</b>	Se puede obtener suficiente información en las normas IEEE 80 e IEEE 81. Muchas fuentes adicionales. <b>Calificación: Excelente.</b>
<b>MÉTODO DE SCHLUMBERGER</b>	Se puede obtener alguna información en las normas IEEE 80 e IEEE 81. No se encuentra muchas fuentes adicionales al respecto. <b>Calificación: Regular.</b>

Fuente:

<sup>8</sup> Internet, publicaciones, manuales de equipos.

## RESUMEN ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS PARA LA MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO

Tabla 8. Análisis comparativo - Cuadro resumen

<b>MÉTODO</b>	<b>MÉTODOS DIRECTOS</b>	<b>REGISTRO ELÉCTRICO DE PERFORACIÓN</b>	<b>MÉTODO DE VARIACIÓN DE LA PROFUNDIDAD</b>	<b>MÉTODO DE WENNER</b>	<b>MÉTODO DE SCHLUMBERGER</b>
<b>CARACTERÍSTICA</b>					
<b>A. INCERTIDUMBRE</b>	Insuficiente	Bueno	Bueno	Excelente	Excelente
<b>B. FACILIDAD DE IMPLEMENTACIÓN</b>	Insuficiente	Insuficiente	Insuficiente	Excelente	Excelente
<b>C. CONVENIENCIA ECONÓMICA</b>	Insuficiente	Insuficiente	Excelente	Excelente	Excelente
<b>D. CAMPO DE APLICACIÓN</b>	Insuficiente	Insuficiente	Regular	Excelente	Bueno
<b>E. FUENTES BIBLIOGRÁFICAS</b>	Insuficiente	Insuficiente	Bueno	Excelente	Regular

Fuente: Autora.

**4.1.2 Análisis Comparativo De Los Modelos Del Suelo.** El objetivo final de la medida de la resistividad del suelo en el sitio de torre, es obtener un modelo que sea una buena aproximación de las condiciones del mismo. Este modelo será el punto de partida para el diseño del sistema de puesta a tierra de la torre. En búsqueda de desarrollar un procedimiento adecuado para la medida de la resistividad del suelo en líneas de transmisión aéreas, es necesario seleccionar el modelo más conveniente para este tipo de instalación.

Los modelos más usados en aplicaciones de sistemas de puesta a tierra son el modelo de resistividad uniforme y el modelo de dos capas.

El análisis comparativo de estos modelos, consiste en la calificación de cada uno de ellos, de acuerdo a sus ventajas y desventajas teniendo en cuenta las particularidades de líneas de transmisión. La calificación otorgada a cada modelo es el resultado de las conclusiones obtenidas por la autora del presente trabajo a partir de la investigación y el estudio de las características de cada uno de ellos.

A continuación se presenta el cuerpo del análisis comparativo:

Tabla 9. Análisis comparativo de los modelos del suelo más usados en aplicaciones de sistemas de puesta a tierra

<b>MODELO DE RESISTIVIDAD UNIFORME O DEL SUELO HOMOGÉNEO</b>		
<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>	<b>CALIFICACIÓN</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simplifica los cálculos de diseño.</li> <li>• La mayoría de las normas y publicaciones ha desarrollado ecuaciones para el diseño de puesta a tierra en suelos uniformes.</li> <li>• No requiere de programas de computador para su desarrollo.</li> <li>• Si se realiza un manejo estadístico de los datos con la transformada de Box-Cox, se logra un mayor grado de</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No se alcanza el mismo grado de exactitud que con el modelo de dos capas.</li> </ul>	<p>MUY BUENO</p>

exactitud y se puede trabajar con datos dispersos.		
<b>MODELO DE DOS CAPAS</b>		
<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>	<b>CALIFICACIÓN</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se alcanza un modelo más exacto de las condiciones del suelo.</li> <li>• Permite el desarrollo del diseño con un mayor grado de refinamiento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para el desarrollo de un modelo apropiado requiere de programas de computador.</li> <li>• No representa utilidad si no se cuenta con un software de diseño de sistemas de puesta a tierra que se beneficie del modelo de dos capas.</li> </ul>	BUENO

Fuente: Autora.

**4.1.3 Conclusión.** El cuadro resumen del análisis comparativo (Ver tabla 8) evidencia que el método de Wenner es el más recomendable para su uso en la medida de la resistividad del suelo en líneas de transmisión.

El método de Wenner es el método más exacto y de fácil aplicación. Su implementación es muy económica, requiere de equipo que puede adquirirse fácilmente en el mercado a precios competitivos y su simplicidad hace que sea el método que demanda menor tiempo en su aplicación. Es el método más popular y dispone de mayor cantidad de fuentes bibliográficas.

Por lo tanto, el método de Wenner es seleccionado para su implementación en el procedimiento para la medida de la resistividad del suelo en líneas de transmisión aéreas.

Teniendo en cuenta que para el diseño de sistemas de puesta a tierra en líneas de transmisión, no se requiere de un sumo grado de refinamiento, en el procedimiento se desarrollará un modelo del suelo homogéneo.

De manera informativa, y para su aplicación sólo en los casos en los que las medidas de resistividad aparente obtenidas no presentan grandes fluctuaciones entre máximos y mínimos, se desarrolló un instructivo de aplicación del método de Sunde para la elaboración de un modelo de dos capas.

## 4.2 SELECCIÓN DEL MÉTODO PARA LA MEDIDA DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN AÉREAS

**4.2.1 Análisis Comparativo De Los Métodos Para La Medida De La Resistencia De Puesta A Tierra.** Con el propósito de desarrollar un procedimiento adecuado para la medida de la resistencia de puesta a tierra en líneas de transmisión aéreas, es necesario seleccionar el método más conveniente para tal fin.

En la presente sección, se realiza el análisis comparativo de cada uno de los métodos descritos en el capítulo 3, el cual consiste en la definición de la característica a valorar, y en la posterior calificación de cada uno de los métodos a la luz de dicho criterio.

La calificación otorgada a cada uno de los métodos es el resultado de las conclusiones obtenidas por la autora del presente trabajo a partir de la investigación y el estudio de las características de cada uno de ellos.

A continuación se presenta el cuerpo del análisis comparativo.

- **Incertidumbre.** Es imposible conocer con certeza absoluta el valor verdadero de la resistencia de puesta a tierra de la torre. La incertidumbre expresa la duda sobre la veracidad del resultado, que en este caso es debida al método aplicado para la medición de la resistividad del suelo.

Los métodos de medida expuestos en el capítulo 3, son calificados de acuerdo a su incertidumbre estimada como sigue:

Tabla 10. Análisis comparativo de los métodos para la medición de la resistencia de puesta a tierra según su incertidumbre estimada.

<b>MÉTODO DE LOS DOS PUNTOS</b>	Este método está sujeto a grandes márgenes de error. <b>Calificación: Insuficiente.</b>
<b>MÉTODO DE LOS TRES PUNTOS</b>	Si los electrodos auxiliares son de resistencia mayor a la del electrodo de puesta a tierra bajo prueba, el resultado será erróneo. <b>Calificación: Insuficiente.</b>
<b>MÉTODO DE LA CAÍDA DE POTENCIAL</b>	Tiene un alto grado de exactitud, siempre y cuando se logre obtener una porción plana en la curva de resistencia aparente.

	<b>Calificación: Excelente.</b>
<b>MÉTODO DE LA PENDIENTE</b>	Es más preciso que el método de la caída de potencial, ha probado dar resultados satisfactorios, tanto en casos teóricos como prácticos, cuando el terreno no es homogéneo y en sistemas de electrodos que cubren gran área. <b>Calificación: Excelente.</b>
<b>MÉTODO DE LA INTERSECCIÓN DE CURVAS</b>	Presenta un pequeño porcentaje de incertidumbre <b>Calificación: Excelente</b>

Fuente: Autora

- **Posicionamiento De Electrodo A Gran Distancia Y Facilidad De Implementación.** Los métodos para la medida de la resistencia de puesta a tierra, suponen un alejamiento necesario entre el electrodo bajo prueba y los electrodos auxiliares de medida.

La presencia de electrodos de considerable dimensión como contrapesos en la puesta a tierra de las torres de líneas de transmisión, implica colocar los electrodos auxiliares de medida a distancias considerables. Este alejamiento en muchos casos resulta muy poco práctico, e incluso inconveniente.

Las características del terreno son un factor importante a tener en cuenta. En zonas selváticas o con presencia de maleza, un mayor alejamiento implica además un mayor trabajo de limpieza en la zona para poder llevar a cabo la medida de la resistencia de puesta a tierra de la torre. Obstáculos naturales como abismos o ríos, no sólo dificultan el trabajo, sino que adicionalmente pueden poner en peligro la vida de las personas encargadas de realizar la medida.

Adicionalmente los sitios de torre de líneas de transmisión aéreas generalmente están ubicados en zonas rurales, algunas de las cuales son de difícil acceso.

Por lo anterior es deseable un método de medida en el que se minimicen las distancias de alejamiento de los electrodos auxiliares, que se aplique sin mayor dificultad en cualquier tipo de terreno, y pueda realizarse con un equipo de fácil transporte.

Tabla 11. Análisis comparativo de los métodos para la medición de la resistencia de puesta a tierra según el posicionamiento de electrodos a gran distancia y facilidad de implementación.

<b>MÉTODO DE LOS DOS PUNTOS</b>	Debe asegurarse que no hay presente ningún tipo de acople resistivo entre el electrodo auxiliar y la puesta a tierra en estudio. Se aplican los mismos alejamientos del método de la caída de potencial. <b>Calificación: Regular.</b>
<b>MÉTODO DE LOS TRES PUNTOS</b>	Deben localizarse 2 electrodos de prueba a suficiente distancia de manera que cada uno se encuentre fuera de la zona de influencia del otro. Se aplican los mismos alejamientos del método de la caída de potencial. Demanda mayor cantidad de equipo. <b>Calificación: Insuficiente.</b>
<b>MÉTODO DE LA CAÍDA DE POTENCIAL</b>	Se requiere localizar el electrodo de corriente a una distancia de al menos 10 veces la mayor dimensión de la puesta a tierra. Es de fácil aplicación y puede llevarse a cabo con equipos de fácil transporte. <b>Calificación: Regular.</b>
<b>MÉTODO DE LA PENDIENTE</b>	Se sugiere ubicar el electrodo de corriente a una distancia de 2 a 3 veces la dimensión máxima del sistema de puesta a tierra. Es de fácil aplicación y puede llevarse a cabo con equipos de fácil transporte. <b>Calificación: Excelente.</b>
<b>MÉTODO DE LA INTERSECCIÓN DE CURVAS</b>	La distancia máxima EC a la cual se ubica el electrodo de retorno de corriente C, no debe ser demasiado grande. Es de fácil aplicación y puede llevarse a cabo con equipos de fácil transporte. <b>Calificación: Excelente.</b>

Fuente:Autora

- **Conveniencia Económica (Costos Y Tiempo).** En Líneas De Transmisión Es Deseable Implementar Un método de medición de la resistencia de puesta a tierra de las torres cuyo costo asociado sea lo más bajo posible. Dentro de la conveniencia económica debe considerarse el tiempo requerido para realizar la medida en cada sitio de torre.

Tabla 12. Análisis comparativo de los métodos para la medición de la resistencia de puesta a tierra según su conveniencia económica.

<b>MÉTODO DE LOS DOS PUNTOS</b>	Ya que requiere grandes alejamientos, implica un mayor tiempo de trabajo en limpieza del terreno para ejecutar la medida. <b>Calificación: Regular.</b>
<b>MÉTODO DE LOS TRES PUNTOS</b>	Demanda gran cantidad de tiempo y trabajo en limpieza del terreno y la ubicación de electrodos a grandes distancias. <b>Calificación: Regular.</b>
<b>MÉTODO DE LA CAÍDA DE POTENCIAL</b>	Su implementación requiere tiempo y trabajo en la preparación del terreno, y la ubicación de electrodos a grandes distancias. Precisa un número considerable de medidas que permitan construir la curva de resistencia aparente en función del espacio de prueba. <b>Calificación: Regular.</b>
<b>MÉTODO DE LA PENDIENTE</b>	Su implementación es económica, pues involucra un menor número de medidas para obtener resultados, no requiere ubicar los electrodos auxiliares a grandes distancias. <b>Calificación: Excelente.</b>
<b>MÉTODO DE LA INTERSECCIÓN DE CURVAS</b>	Su implementación es económica, pues no necesita alejar considerablemente el electrodo auxiliar de corriente, lo que implica un menor trabajo y tiempo de medida. Precisa un número considerable de medidas que permitan construir la curva de resistencia aparente en función del espacio de prueba. <b>Calificación: Bueno.</b>

Fuente: Autora

- **Campo De Aplicación.** Es conveniente que el método seleccionado sea indicado y ampliamente utilizado para la medición de la resistencia de puesta a tierra de torres de líneas de transmisión o de sistemas de puesta a tierra de características semejantes.

Tabla 13. Análisis comparativo de los métodos para la medición de la resistencia de puesta a tierra según su campo de aplicación

<b>MÉTODO DE LOS DOS PUNTOS</b>	Limitado a la medida de la resistencia en sistemas de puesta a tierra residenciales. <b>Calificación: Insuficiente.</b>
<b>MÉTODO DE LOS TRES PUNTOS</b>	Su uso se restringe a pequeñas puestas a tierra en locaciones que permitan localizar los electrodos de prueba a suficiente distancia. <b>Calificación: Insuficiente.</b>
<b>MÉTODO DE LA CAÍDA DE POTENCIAL</b>	Es el más extensamente usado para la medida de la resistencia de puesta a tierra en torres de líneas de transmisión. <b>Calificación: Excelente.</b>
<b>MÉTODO DE LA PENDIENTE</b>	Es apropiado para la medida de la resistencia de puesta a tierra de torres de líneas de transmisión aéreas. <b>Calificación: Excelente.</b>
<b>MÉTODO DE LA INTERSECCIÓN DE CURVAS</b>	Su uso es frecuente en sistemas de puesta a tierra de gran dimensión. <b>Calificación: Excelente.</b>

Fuente: Autora

- **Fuentes Bibliográficas.** Este aspecto define la disponibilidad de normas, estándares internacionales y otras fuentes bibliográficas<sup>9</sup> que permitan obtener información suficiente y útil, a quien desee aplicar el método.

Tabla 14. Análisis comparativo de los métodos para la medición de la resistencia de puesta a tierra de acuerdo a la disponibilidad de fuentes bibliográficas

<b>MÉTODO DE LOS DOS PUNTOS</b>	Muy poca. <b>Calificación: Insuficiente.</b>
<b>MÉTODO DE LOS TRES PUNTOS</b>	Muy poca. <b>Calificación: Insuficiente.</b>
<b>MÉTODO DE LA CAÍDA DE POTENCIAL</b>	Se puede obtener suficiente información en en las normas IEEE 80 e IEEE 81. Se referencia en publicaciones

<sup>9</sup> Internet, publicaciones, manuales de equipos.

	internacionales[8], manuales de equipos[3], entre otros. <b>Calificación: Excelente</b>
<b>MÉTODO DE LA PENDIENTE</b>	Se referencia en publicaciones internacionales <sup>10</sup> y algunos manuales de equipos. <b>Calificación: Bueno.</b>
<b>MÉTODO DE LA INTERSECCIÓN DE CURVAS</b>	Se referencia en publicaciones internacionales <sup>11</sup> y algunos manuales de equipos. <b>Calificación: Bueno.</b>

Fuente:Autora

---

<sup>10</sup> “Mediciones de la resistencia de sistemas grandes de electrodos de tierra por el método de la pendiente”. Dr. G. Tagg; IEE Proceedings, Vol 117, noviembre de 1970.

<sup>11</sup> “Medición de resistencia de un sistema de electrodos de tierra que cubre un área grande”. Dr. G. Tagg; IEE Proceedings, Vol. 116, marzo de 1969.

## RESUMEN DEL ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS PARA LA MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

Tabla 15. Análisis comparativo de los métodos para la medida de la resistencia de puesta a tierra - Cuadro resumen

<b>MÉTODO</b>	<b>MÉTODO DE LOS DOS PUNTOS</b>	<b>MÉTODO DE LOS TRES PUNTOS</b>	<b>MÉTODO DE LA CAÍDA DE POTENCIAL</b>	<b>MÉTODO DE LA PENDIENTE</b>	<b>MÉTODO DE LA INTERSECCIÓN DE CURVAS</b>
<b>A. INCERTIDUMBRE</b>	Insuficiente	Insuficiente	Excelente	Excelente	Excelente
<b>B. POSICIONAMIENTO DE ELECTRODOS A GRAN DISTANCIA Y FACILIDAD DE IMPLEMENTACIÓN</b>	Regular	Insuficiente	Regular	Excelente	Excelente
<b>C. CONVENIENCIA ECONÓMICA</b>	Regular	Regular	Regular	Excelente	Bueno
<b>D. CAMPO DE APLICACIÓN</b>	Insuficiente	Insuficiente	Excelente	Excelente	Excelente
<b>E. FUENTES BIBLIOGRÁFICAS</b>	Insuficiente	Insuficiente	Excelente	Bueno	Bueno

Fuente: Autora.

**4.2.2 Análisis Comparativo De Las Posibles Soluciones A Implementar Para La Medición De La Resistencia De Puesta A Tierra En Torres Conectadas A Cables De Guarda.** Las posibles soluciones a implementar para la medición de la resistencia de puesta a tierra de torres de líneas de transmisión cuando estas se encuentran conectadas a cables de guarda son:

\*Desconectar el cable de guarda y hacer uso de equipo de medida convencional.

\*Usar equipo de medida de alta frecuencia (20 kHz o más)

\*Usar un equipo que permita una medición selectiva.

El análisis comparativo de las posibles soluciones a implementar, consiste en la cualificación de cada una de estas de acuerdo a sus ventajas y desventajas, tal como se expone a continuación:

Tabla 16. Análisis comparativo de las posibles soluciones a implementar para la medición de la resistencia de puesta a tierra en torres conectadas a cables de guarda.

<b>SOLUCIÓN</b>	<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>	<b>CALIFICACIÓN</b>
<b>DESCONECTAR EL CABLE DE GUARDA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Puede utilizar un equipo de medida convencional.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es un trabajo tedioso.</li> <li>• Implica poner en riesgo al trabajador.</li> </ul>	INSUFICIENTE
<b>EQUIPO DE MEDICIÓN SELECTIVA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Puede aplicarse en torres con cable de guarda conectado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere que se realicen medidas en cada pata de la torre.</li> <li>• Por ser un equipo especializado, su costo es mayor que la de un equipo convencional.</li> </ul>	BUENO
<b>EQUIPO DE MEDIDA DE ALTA FRECUENCIA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Puede aplicarse en torres con cable de guarda conectado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Por ser un equipo especializado, su costo es mayor que la de un equipo convencional.</li> </ul>	MUY BUENO

Fuente: Autora

**4.2.3 Conclusiones.** Tal y como se ilustra en el cuadro resumen del análisis comparativo de los métodos para la medida de la resistencia de puesta a tierra, el método de la pendiente cuenta con características que lo hacen el más indicado para la medida de la resistencia de puesta a tierra en torres de líneas de transmisión aéreas.

Es más preciso que el método de la caída de potencial, ha probado dar resultados satisfactorios cuando el terreno es no homogéneo, y en sistemas de puesta a tierra con electrodos que cubren gran área. No requiere un gran alejamiento entre la puesta a tierra bajo medida y el electrodo de corriente C, es de fácil implementación y es económico. Es apropiado para la medida de la resistencia de puesta a tierra en torres de líneas de transmisión aéreas y cuenta con suficientes fuentes bibliográficas para consulta. Aunque el método de la intersección de curvas también es conveniente, precisa de un número considerable de medidas lo que implica un mayor costo en su aplicación.

Por lo tanto, el método de la pendiente es seleccionado para su implementación en el procedimiento para la medida de la resistencia de puesta a tierra en líneas de transmisión aéreas.

Hacer uso de equipo de medición de alta frecuencia, es la solución que representa mayor ventaja en casos en los que la torre se encuentra conecta a cables de guarda, pues no pone en riesgo la vida del trabajador y requiere menor cantidad de trabajo en su implementación.

El procedimiento será desarrollado para la medida de la resistencia de puesta a tierra de torres conectadas a cables de guarda, haciendo uso de equipo de medida de alta frecuencia (20 kHz o más).

Este procedimiento también será aplicable, para la medición de la resistencia de puesta a tierra en torres sin conexión a cables de guarda, en cuyo caso podrá utilizarse instrumentación convencional.

## **5. PROCEDIMIENTO PARA LA MEDIDA DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA Y RESISTIVIDAD DEL SUELO EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN**

Establecer procedimientos para la medida de la resistividad del suelo y de la resistencia de puesta a tierra en líneas de transmisión, ciertamente implica el mejoramiento en la calidad de dichos procesos.

Se mejora la calidad en la medición, ya que en el desarrollo de los procedimientos y en la elección de los métodos de medición se han tenido en cuenta las características únicas de las líneas de transmisión de energía.

Así mismo la aplicación de los pasos y recomendaciones de un procedimiento adecuado, reduce la incertidumbre inherente a la medición.

La utilización de un procedimiento adecuado pretende llevar a cabo una correcta medición, de forma eficiente y eficaz, de manera que su implementación sea exitosa en el primer intento; reduciendo los costos asociados al reproceso (repetición de medidas).

A continuación se presentan los procedimientos propuestos.

### **5.1 PROCEDIMIENTO PARA LA MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN**

El procedimiento propuesto emplea el método de Wenner para la medida de la resistividad del suelo en campo, y desarrolla finalmente un modelo de resistividad uniforme aplicando la técnica estadística llamada transformación de Box-Cox, que permite calcular un valor de resistividad con probabilidad del 70% de no ser superada.

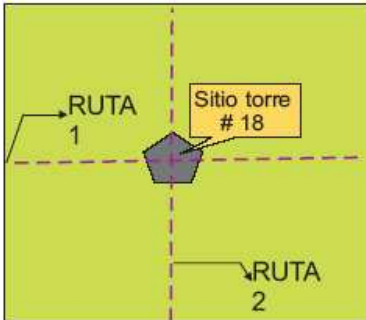
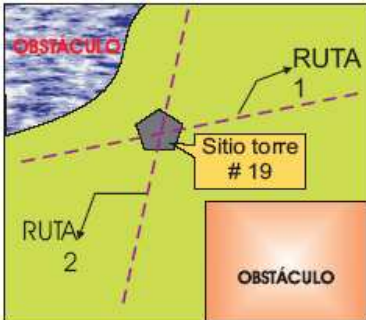
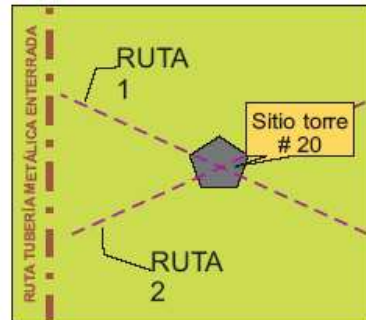
Este procedimiento consta de tres etapas. La primera etapa de planeación y preparación, la segunda etapa de medidas en campo y una tercera etapa de modelado del suelo. Cada etapa, está a su vez constituida por los pasos recomendados a seguir.

**5.1.1 Planeación Y Preparación.** Una buena planeación y preparación, es esencial para la ejecución exitosa de la medida en campo. Se sugiere que se deben seguir siguientes pasos:

<b>PROCEDIMIENTO PARA LA MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO</b>	
<b>ETAPA DE PLANEACIÓN</b>	
<b>PASO # 1</b>	Programar los sitios de torre que serán visitados para realizar la medida.
<b>PASO # 2</b>	Investigar la presencia en la zona de servicios bajo tierra (tuberías, cables, contrapesos, ductos, etc) que puedan afectar la medida de la resistividad del suelo, y revisar los planos definitivos disponibles.
<b>PASO # 3</b>	<p>Verificar que el equipo de medición es adecuado para la medida de la resistividad del suelo en líneas de transmisión. Apoyarse en la siguiente lista guía:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Método de medición aplicable: Método de Wenner.</li> <li>✓ Resolución: Debe ser lo suficientemente baja, de manera que pueda distinguir pequeñas variaciones en la medida. Se sugiere del orden de 1 mΩ.</li> <li>✓ Corriente de medición invertida periódicamente y a frecuencia diferente de 60 Hz o sus armónicas.</li> <li>✓ Rechazo de ruidos por medio de filtros.</li> <li>✓ Capacidad de realizar mediciones en suelos de alta resistividad.</li> </ul>
<b>PASO # 4</b>	Verificar que la última calibración del equipo se encuentre vigente.
<b>PASO # 5</b>	Leer el manual del equipo; prestar especial atención a las indicaciones del fabricante con respecto al uso adecuado del mismo, la lectura de datos, señales de alarma que indiquen un funcionamiento anormal. Llevar el manual a las medidas en campo para su consulta, especialmente si no se encuentra familiarizado con el equipo.
<b>PASO # 6</b>	Preparar los cables para la medida. Se requieren 4 cables para la medida, y uno adicional de repuesto. Esto es una medida de prevención, en caso de que alguno de los cable se dañe en campo, usted podrá realizar la medida. Estos cables deben tener la longitud necesaria como para permitir una separación máxima entre electrodos de 30 m. Deben contar con los medios para conectarse sólidamente tanto al equipo como a las varillas (puntas de test, mordazas de cocodrilo, por ejemplo).

<b>PROCEDIMIENTO PARA LA MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO</b>	
<b>ETAPA DE PLANEACIÓN</b>	
<b>PASO # 7</b>	Verificar el estado de los cables de medida, revisar que su chaqueta protectora se encuentre en buen estado y examine su continuidad.
<b>PASO # 8</b>	Preparar los electrodos de medida. Se recomiendan varillas o picas de acero de al menos 30 cm de longitud, que puedan soportar golpes para su enterramiento en suelos duros. Se requieren 4 varillas para la medida, y una adicional de repuesto como medida de prevención.
<b>PASO # 9</b>	Preparar un martillo, este le ayudará a clavar las varillas en el terreno.
<b>PASO # 10</b>	Cargar las baterías del equipo. Si es posible llevar un juego de baterías adicional y su cargador.
<b>PASO # 11</b>	Si el equipo no realiza la lectura de la resistividad del suelo directamente, preparar una calculadora.
<b>PASO # 12</b>	Alistar tantos formatos de registro de medidas como sean necesarios. (Ver formato para la medida de la resistividad del suelo en Anexo 3).
<b>PASO # 13</b>	Empacar otros útiles que considere necesarios (lápiz, borrador, reglas, por ejemplo)
<b>PASO # 14</b>	Si lo considera de utilidad, elaborar una lista de chequeo, esta le ayudará a asegurarse de haber preparado las herramientas necesarias para ejecución de la medida en campo.

### 5.1.2 Medidas en Campo

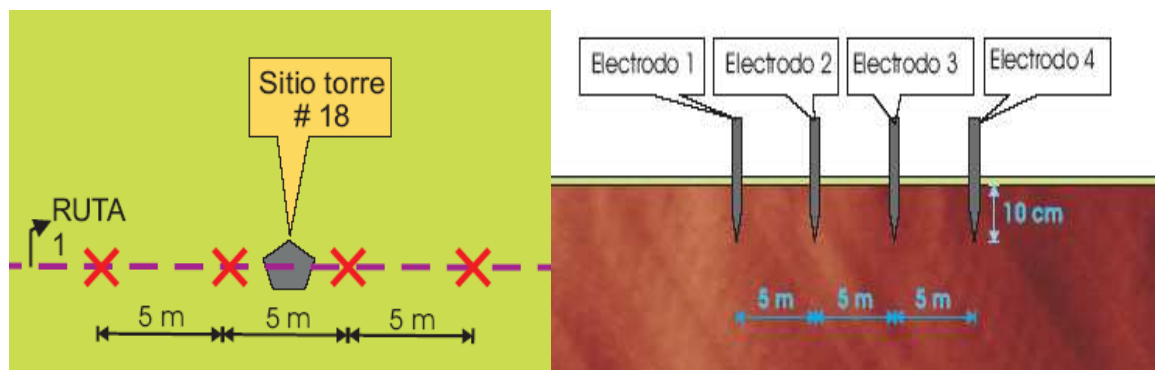
<b>PROCEDIMIENTO PARA LA MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO</b>		
<b>ETAPA DE MEDIDAS EN CAMPO</b>		
<b>PASO # 1</b>		
Al llegar al sitio de torre, en el formato medida de resistividad del suelo diligenciar los datos correspondientes a línea, equipo utilizado, vigencia calibración, responsable medida en campo, fecha y número del sitio de torre.		
<b>PASO # 2</b>		
Observar el suelo. Hacer una apreciación de su tipo y estado de acuerdo a las siguientes indicaciones:		
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Tipo de suelo: Terreno pantanoso, humus, arcilla, arena, suelo pedregoso, roca. Este dato es resultado de la apreciación del encargado de la medida y no corresponde con un estudio geológico formal. Es útil como una guía del tipo de suelo encontrado.</li> <li>✓ Estado del suelo: Húmedo o seco.</li> </ul>		
Diligenciar estos datos en formato de medida de resistividad del suelo.		
<b>PASO # 3</b>		
Ubicarse en el sitio de torre. Revisar los planos del sitio y seleccionar dos rutas (líneas rectas) que pasen por el sitio de torre, a lo largo de las cuales se realizarán las medidas.		
Se recomienda que estas sean perpendiculares entre sí. En casos de que obstáculos existentes no permitan que estas rutas sean perpendiculares, procurar el mayor ángulo posible entre estas. Si en el sitio se encuentran tuberías metálicas enterradas, no tomar rutas paralelas a estas.		
Figura 33. Selección de las rutas de medición.		
		
SELECCIÓN DE RUTAS SIN OBSTÁCULOS	SELECCIÓN DE RUTAS CON OBSTÁCULOS PRESENTES	SELECCIÓN DE RUTAS EN PRESENCIA DE TUBERÍAS METÁLICAS

**PROCEDIMIENTO PARA LA MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO  
ETAPA DE MEDIDAS EN CAMPO**

**PASO # 4**

A lo largo de la ruta 1, enterrar los 4 electrodos de medida a una separación inicial de 5 m. Asegurarse de que estos queden haciendo un contacto efectivo con el suelo, se recomienda enterrar la varilla en el suelo al menos 10 cm.

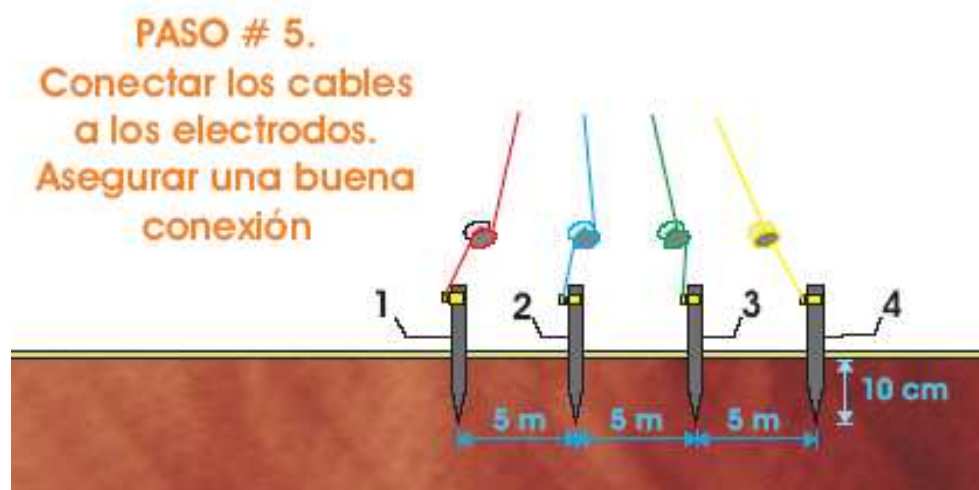
Figura 34. Ubicación de los electrodos de medida.



**PASO # 5**

Proceder a conectar los cables a los electrodos. Verificar que esta conexión sea adecuada, una mala conexión puede impedir que la corriente de prueba circule correctamente.

Figura 35. Conexión de los cables a los electrodos



**PROCEDIMIENTO PARA LA MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO**  
**ETAPA DE MEDIDAS EN CAMPO**

**PASO # 6**

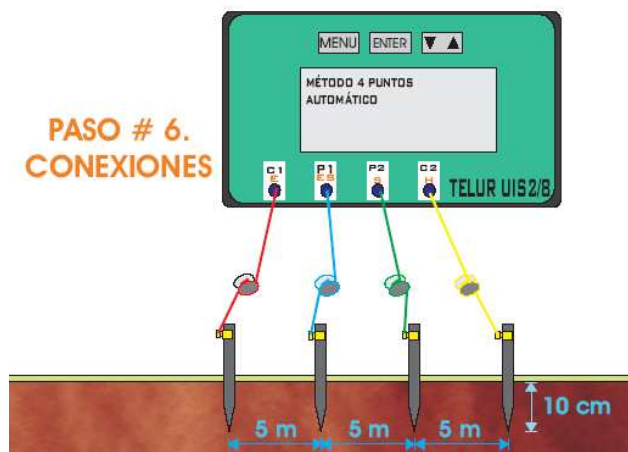
El equipo de medida debe tener cuatro terminales identificadas así:

- ✓ Terminales C1 y C2 (o E y H), las cuales hacen parte del circuito de inyección de corriente.
- ✓ Terminales P1 y P2 (o ES y S), hacen parte del circuito para la medida de potencial.

Conectar los cables al equipo siguiendo las siguientes instrucciones:

- ✓ Cable del electrodo 1 al terminal C1 (E) del equipo.
- ✓ Cable del electrodo 2 al terminal P1 (ES) del equipo.
- ✓ Cable del electrodo 3 al terminal P2 (S) del equipo.
- ✓ Cable del electrodo 4 al terminal C2 (H) del equipo.

Figura 36. Conexión del equipo de medición.



**PASO # 7**

Accionar el equipo de medida y ejecute la medida. Tenga en cuenta que algunos equipos no dan el resultado de resistividad directamente (en  $\Omega\cdot m$ ), sino arrojan la resistencia medida (en  $\Omega$ ).

Si su equipo no arroja el resultado de resistividad directamente, proceder a realizar el cálculo de esta a partir de la siguiente ecuación:

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R \quad [\Omega\cdot m]$$

Donde:

$\pi$  es la constante pi. Para efectos del cálculo tome su valor aproximado de 3,1416.

a es la distancia de separación entre dos electrodos consecutivos.

R es la resistencia medida por el equipo.

Registrar en el formato de medida, la separación entre electrodos y la resistividad obtenida.

**PROCEDIMIENTO PARA LA MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO  
ETAPA DE MEDIDAS EN CAMPO**

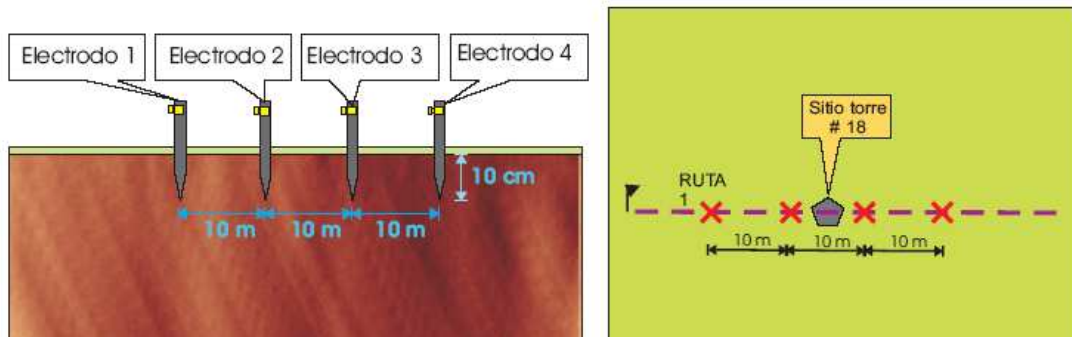
**PASO # 8**

Desconectar los cables de los electrodos y desenterrarlos. No desconectar los cables del equipo.

**PASO # 9**

Enterrar los electrodos a lo largo de la ruta, pero ahora a un distanciamiento de 10 m. Revisar que estos tengan un buen contacto con el suelo. Se recomienda enterrar la varilla al menos 10 cm.

Figura 37. Reubicación de los electrodos de medida

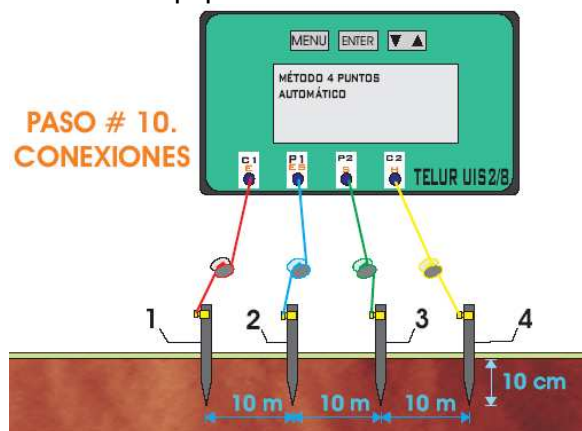


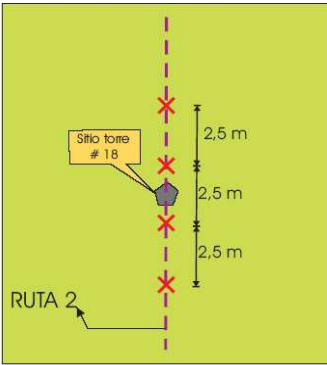
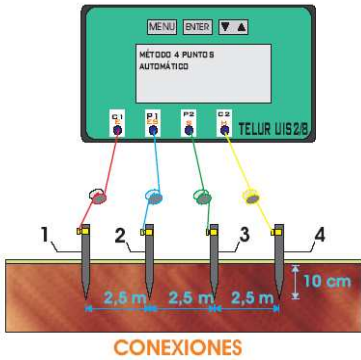
**PASO # 10**

Conectar el equipo a los electrodos siguiendo las siguientes instrucciones:

- ✓ Cable del terminal C1 (E) del equipo al electrodo 1.
- ✓ Cable del terminal P1 (ES) del equipo al electrodo 2.
- ✓ Cable del terminal P2 (S) del equipo al electrodo 3.
- ✓ Cable del terminal C2 (H) del equipo al electrodo 4.

Figura 38. Reconexión del equipo



<b>PROCEDIMIENTO PARA LA MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO</b>
<b>ETAPA DE MEDIDAS EN CAMPO</b>
<p><b>PASO # 11</b></p> <p>Accionar el equipo de medida y ejecutar la medición. Si su equipo no arroja el resultado de resistividad directamente, proceda a realizar el cálculo de esta a partir de la ecuación referida en el paso 7. Registrar en el formato de medida, la separación entre electrodos y la resistividad obtenida.</p>
<p><b>PASO # 12</b></p> <p>Repetir los pasos del 8 al 11, pero ahora con distancias de separación entre electrodos de 15 m y 20 m.</p>
<p><b>PASO # 13</b></p> <p>Si las medidas que ha realizado hasta ahora arrojan resistividades mayores a 2000 [<math>\Omega</math>-m], es probable que se requiera instalar contrapesos de longitud considerable.</p> <p>En este caso realizar medidas adicionales. Siga los pasos 8 al 11, pero ahora con distancias de separación entre electrodos de 25 m y 30 m.</p>
<p><b>PASO # 14</b></p> <p>Ejecutar nuevamente el procedimiento, siguiendo la ruta 2.</p> <p>Repetir los pasos del 4 al 13, pero ahora tomando las siguientes distancias:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 2,5 m entre electrodos para la primera medida.</li> <li>✓ 7,5 m entre electrodos para la segunda medida.</li> <li>✓ 12,5 m entre electrodos para la tercera medida.</li> <li>✓ 17,5 m entre electrodos para la cuarta medida.</li> <li>✓ 22,5 m entre electrodos para la quinta medida. (Necesaria si las medidas anteriores han resultado en valores mayores a 2000 <math>\Omega</math>-m)</li> <li>✓ 27,5 m entre electrodos para la quinta medida. (Necesaria si las medidas anteriores han resultado en valores mayores a 2000 <math>\Omega</math>-m)</li> </ul> <p>Figura 39. Procedimiento de medición siguiendo la ruta 2.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">   </div>

<b>PROCEDIMIENTO PARA LA MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO</b>
<b>ETAPA DE MEDIDAS EN CAMPO</b>

<b><i>PASO # 15</i></b>
-------------------------

Realice las anotaciones que considere pertinentes en el campo de observaciones. Puede consignar en este campo información pertinente a la dirección de las rutas escogidas, los cálculos realizados, etc.
---

Como guía adicional se anexa un formato diligenciado, con los datos correspondientes a un sitio de torre.
---



**5.1.3 Modelado del Suelo.** En esta etapa a partir de las medidas obtenidas en campo, se obtiene un modelo de resistividad uniforme del suelo.

➤ **Modelo De Resistividad Uniforme.**

<b>PROCEDIMIENTO PARA LA MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO</b>		
<b>ETAPA DE MODELAMIENTO DEL SUELO</b>		
<b>MODELO DE RESISTIVIDAD UNIFORME</b>		
<b>PASO # 1</b>		
Revisar los datos obtenidos en campo y calcular la variable $X_i$ como el logaritmo natural de cada una de las medidas. Aplicar la siguiente ecuación:		
$X_i = \ln(\rho_{ai})$		
<ul style="list-style-type: none"> <li>Ejemplo: a partir de los datos de la torre # 18.</li> </ul>		
Tabla 17. Cálculo de la variable $X_i$ .		
SEPARACIÓN ENTRE ELECTRODOS [m]	RESISTIVIDAD [ $\Omega$ -m]	$X_i = \ln(\rho_{ai})$
2,5	84,5	4,44
5	87,7	4,47
7,5	93,2	4,53
10	99,5	4,60
12,5	104,2	4,65
15	106,9	4,67
17,5	113,4	4,73
20	116,8	4,76
<b>PASO # 2</b>		
Calcular el promedio $x$ de los datos $X_i$ por medio de la siguiente ecuación:		
$x = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$		
<ul style="list-style-type: none"> <li>Ejemplo:</li> </ul>		
$x = \frac{4,44 + 4,47 + 4,53 + 4,6 + 4,65 + 4,67 + 4,73 + 4,76}{8} = 4,61$		

**PROCEDIMIENTO PARA LA MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO**  
**ETAPA DE MODELAMIENTO DEL SUELO**  
**MODELO DE RESISTIVIDAD UNIFORME**

**PASO # 3**

Calcular la desviación estándar **S** de los datos:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - x)^2}{n}}$$

- Ejemplo:

Tabla 18. Cálculo de los términos  $(X_i - x)^2$  como ayuda para el cálculo de la desviación estándar

SEPARACIÓN ENTRE ELECTRODOS [m]	RESISTIVIDAD [ $\Omega$ -m]	$X_i = \ln(\rho_{ai})$	$(X_i - x)^2$
2,5	84,5	4,44	0,0300
5	87,7	4,47	0,0185
7,5	93,2	4,53	0,0057
10	99,5	4,60	0,0001
12,5	104,2	4,65	0,0013
15	106,9	4,67	0,0038
17,5	113,4	4,73	0,0146
20	116,8	4,76	0,0226

$$S = \sqrt{\frac{0,03 + 0,0185 + 0,0057 + 0,0001 + 0,0013 + 0,0038 + 0,0146 + 0,0226}{8}} = 0.1099$$

**PASO # 4**

Hallar la resistividad del modelo. Esta será la resistividad con probabilidad del 70% de no ser superada.

$$\rho = e^{(0,524411 * S + x)} \quad [\Omega\text{-m}]$$

- Ejemplo:

$$\rho = e^{(0,524411 * 0,1099 + 4,61)} = 106,11 \quad \Omega\text{-m}$$

### 5.1.4 Instructivo de Aplicación del Método de Sunde Para la Obtención de un Modelo de Dos Capas (Informativo).

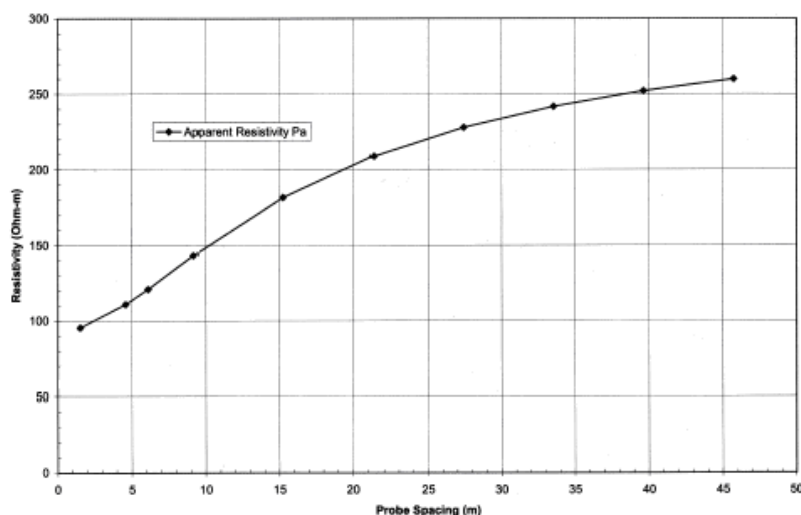
#### GUÍA DE APLICACIÓN DEL MÉTODO DE SUNDE - INFORMATIVO MODELO DE DOS CAPAS

##### PASO # 1

A partir de los datos obtenidos en campo, graficar la curva de resistividad aparente  $\rho_a$  [ $\Omega$ -m] versus el espaciamiento  $a$  entre electrodos [m].

- Ejemplo:

Figura 41. Figura guía paso # 1. Resistividad aparente vs. Espaciamiento entre electrodos



Fuente: ANSI/IEEE Std 80 – 2000. Guide for Safety in AC Substation Grounding.

##### PASO # 2

Por inspección de la curva anterior estimar los valores de  $\rho_1$  y  $\rho_2$  siguiendo las siguientes instrucciones:

- $\rho_1$  es un valor de resistividad aparente que corresponde a pequeños espaciamientos.
- $\rho_2$  es un valor de resistividad aparente que corresponde grandes espaciamientos

- Ejemplo:

Por inspección visual se estiman los siguientes valores:  
 $\rho_1=100 \Omega$ -m y  $\rho_2= 300 \Omega$ -m.

**GUÍA DE APLICACIÓN DEL MÉTODO DE SUNDE - INFORMATIVO**  
**MODELO DE DOS CAPAS**

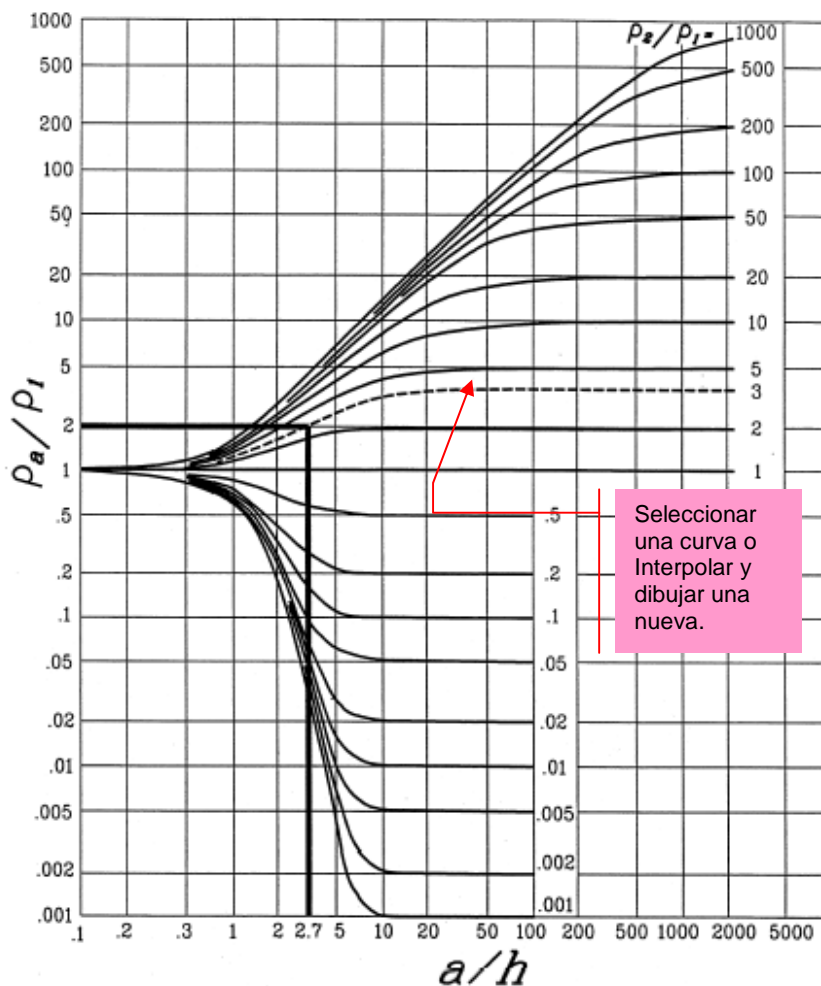
**PASO # 3**

Calcular la relación  $\rho_1 / \rho_2$  y seleccionar una curva de la grafica de Sunde. O interpolar y dibujar una nueva curva en la gráfica.

- Ejemplo:

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{300}{100} = 3$$

Figura 42. Guía paso # 3.



Fuente: ANSI/IEEE Std 80 – 2000. Guide for Safety in AC Substation Grounding.

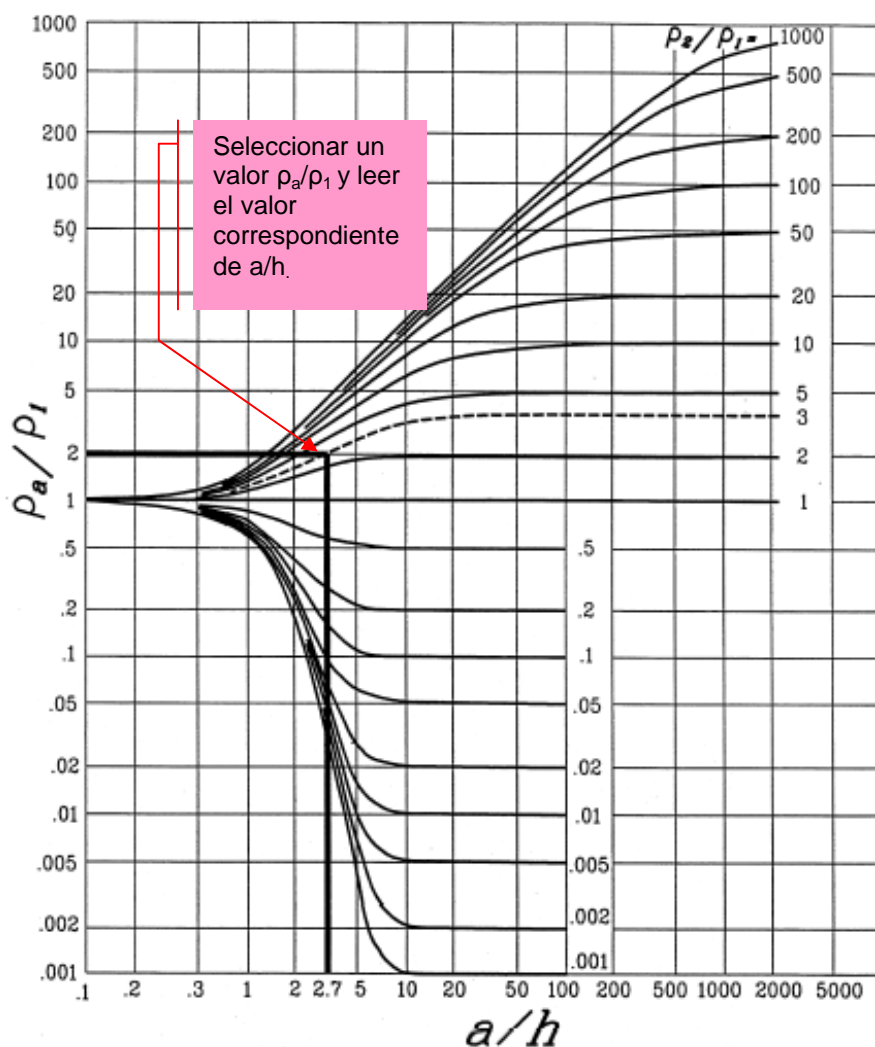
**GUÍA DE APLICACIÓN DEL MÉTODO DE SUNDE - INFORMATIVO**  
**MODELO DE DOS CAPAS**

**PASO # 4**

Ubicarse en el punto medio dentro de la región inclinada de la curva y seleccionar un valor correspondiente de  $\rho_a/\rho_1$  del eje y. Leer el correspondiente valor de  $a/h$  en el eje x.

- Ejemplo:  
Se selecciona  $\rho_a/\rho_1=2$ . Entonces  $a/h = 2,7$ .

Figura 43. Guía paso # 4



Fuente: ANSI/IEEE Std 80 – 2000. Guide for Safety in AC Substation Grounding.

**GUÍA DE APLICACIÓN DEL MÉTODO DE SUNDE - INFORMATIVO**  
**MODELO DE DOS CAPAS**

**PASO # 5**

Calcular el valor de  $\rho_a$  a partir de la relación obtenida en el paso 4 y el valor asumido de  $\rho_1$  en el paso 2.

$$\rho_a = \left( \frac{\rho_a}{\rho_1} \right) * \rho_1 \text{ } [\Omega\text{-m}]$$

- Ejemplo:

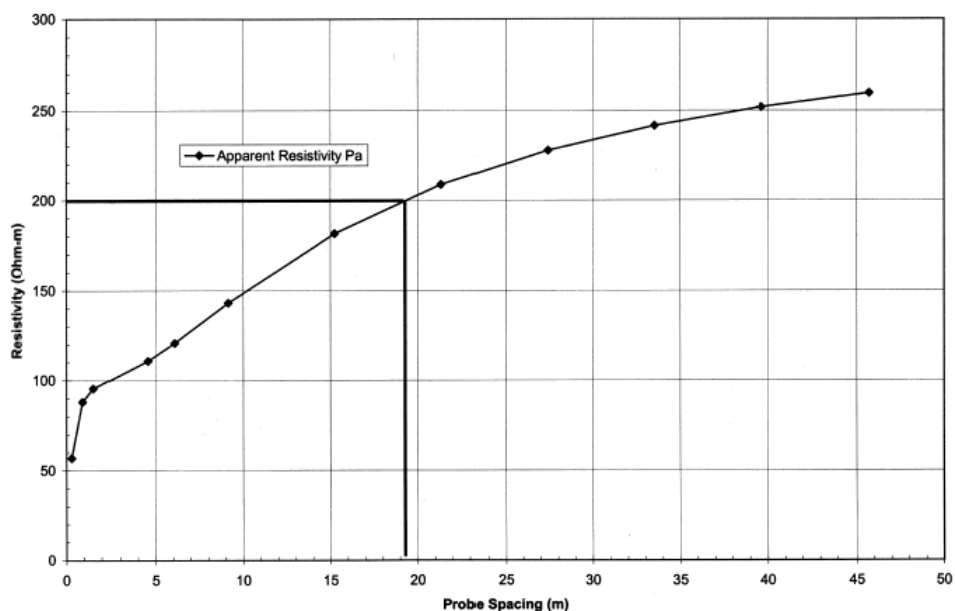
$$\rho_a = \left( \frac{\rho_a}{\rho_1} \right) * \rho_1 = (2) * 100 = 200 \text{ } \Omega\text{-m}$$

**PASO # 6**

En la gráfica de resistividad aparente (paso 1), obtener el espaciamiento **a** que corresponde al valor de  $\rho_a$ .

- Ejemplo:  
Al valor de  $\rho_a=200 \text{ } \Omega\text{-m}$  corresponde un espaciamiento  $a=19 \text{ m}$ .

Figura 44. Guía paso # 6.



Fuente: ANSI/IEEE Std 80 – 2000. Guide for Safety in AC Substation Grounding.

**GUÍA DE APLICACIÓN DEL MÉTODO DE SUNDE - INFORMATIVO**  
**MODELO DE DOS CAPAS**

**PASO # 7**

Calcular la profundidad **h**, a partir del espaciamiento **a** obtenido en el paso 6 y la relación **a/h** obtenida en el paso 5.

$$h = \frac{a}{a/h} \text{ [m]}$$

- Ejemplo:

$$h = \frac{a}{a/h} = \frac{19}{2,7} = 7.0 \text{ m}$$

**PASO # 8**

El modelo de dos capas queda definido por los tres parámetros:

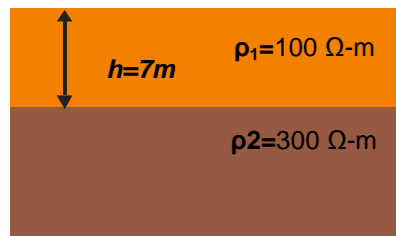
**$\rho_1$**  es la resistividad de la capa superior en Ohm-metro (Obtenido en paso 2).

**h** es la profundidad de la capa superior (Obtenida en paso 7).

**$\rho_2$**  es la resistividad de la capa inferior en Ohm-metro (Obtenido en paso 2).

- Ejemplo:

Figura 45. modelo de dos capas del suelo obtenido.



## **5.2 PROCEDIMIENTO PARA LA MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN**

El presente procedimiento desarrolla el método de la pendiente para medida de la resistencia de puesta a tierra en torres de líneas de transmisión.

Es aplicable para la medición en torres conectadas a cables de guarda haciendo uso de equipo de alta frecuencia (20 kHz o más), y para la medición en torres sin conexión a cables de guarda, en cuyo caso podrá utilizarse instrumentación convencional.

Consta de dos etapas: la primera etapa de planeación y preparación, la segunda etapa de medición en campo.

Para la medición de la resistencia de puesta a tierra de torres en líneas de transmisión se propone seguir siguiente procedimiento.

**5.2.1 Planeación Y Preparación.** Una buena planeación y preparación, es esencial para la ejecución exitosa de la medida en campo. Se sugiere que se deben seguir los siguientes pasos:

<b>PROCEDIMIENTO PARA LA MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA</b>
<b>ETAPA DE PLANEACIÓN Y PREPARACIÓN</b>
<b>PASO # 1</b>
Programar los sitios de torre que serán visitados para realizar la medida.
<b>PASO # 2</b>
Preparar los planos definitivos de la puesta a tierra de las torres a medir. Revisar e identificar la máxima dimensión de cada una de ellas.
<b>PASO # 3</b>
Investigar la presencia en la zona de servicios bajo tierra (tuberías, cables, contrapesos, ductos, etc) que puedan afectar la medida de la resistencia de puesta a tierra; revisar los planos definitivos disponibles.
<b>PASO # 4</b>
Verificar que el equipo de medición es adecuado para la medida de la resistencia de puesta a tierra en torres de líneas de transmisión.
Apoyarse en la siguiente lista guía:
✓ Método de medición aplicable: Método de la pendiente.

<b>PROCEDIMIENTO PARA LA MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA</b>	
<b>ETAPA DE PLANEACIÓN Y PREPARACIÓN</b>	
<b>PASO # 4</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Resolución: Debe ser lo suficientemente baja, de manera que pueda distinguir pequeñas variaciones en la medida. Se sugiere del orden de 1 mΩ.</li> <li>✓ Corriente de medición invertida periódicamente y a frecuencia diferente de 60 Hz o sus armónicas.</li> <li>✓ Alta frecuencia de medición (20 kHz o más), si se van a realizar medidas en torres conectadas a cables de guarda.</li> <li>✓ Rechazo de ruidos por medio de filtros.</li> <li>✓ Capacidad de realizar mediciones en suelos de alta resistividad.</li> </ul>	
<b>PASO # 5</b>	
Verificar que la última calibración del equipo se encuentra vigente.	
<b>PASO # 6</b>	
Leer el manual del equipo, prestar especial atención a las indicaciones del fabricante con respecto al uso adecuado del mismo, la lectura de datos, señales de alarma que indiquen un funcionamiento anormal. Llevar el manual a las medidas en campo para su consulta, especialmente si no se encuentra familiarizado con el equipo	
<b>PASO # 7</b>	
Preparar los cables para la medida. Se requieren 3 cables para la medida, y uno adicional de repuesto. El cable de repuesto debe ser de longitud igual o mayor al cable de medida de mayor longitud. Esto es una medida de prevención, en caso de que alguno de los cable se dañe en campo, usted podrá realizar la medida.	
La longitud de los cables debe permitir como mínimo las siguientes separaciones:	
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Una separación de hasta 3 veces la máxima dimensión de la puesta a tierra (4*Dmax) entre la puesta a tierra a medir y el electrodo de corriente.</li> <li>✓ Una separación de 1,8 veces la máxima dimensión de la puesta a tierra (1,8* Dmax), entre la puesta a tierra y el electrodo de potencial.</li> </ul>	
Los cables deben contar con los medios para conectarse sólidamente tanto al equipo como a las varillas (puntas de test y mordazas de cocodrilo, por ejemplo).	
<b>PASO # 8</b>	
Verificar el estado de los cables de medida, revisar que su chaqueta protectora se encuentre en buen estado y examinar su continuidad.	

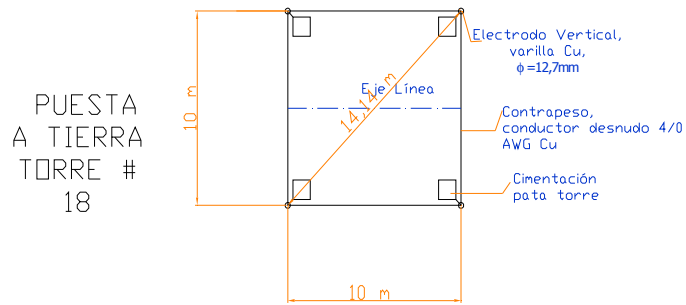
<b>PROCEDIMIENTO PARA LA MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA</b>	
<b>ETAPA DE PLANEACIÓN Y PREPARACIÓN</b>	
<b>PASO # 9</b>	Preparar los electrodos de medida. Se recomiendan varillas o picas de acero de al menos 30 cm de longitud, que puedan soportar golpes para su enterramiento en suelos duros. Se requieren 4 varillas para la medida, y una adicional de repuesto como medida de prevención.
<b>PASO # 10</b>	Preparar un martillo, este le ayudará a clavar las varillas en el terreno
<b>PASO # 11</b>	Cargar las baterías del equipo. Si es posible llevar un juego de baterías adicional y su cargador.
<b>PASO # 12</b>	Preparar una calculadora, la necesitará para realizar cálculos en campo.
<b>PASO # 13</b>	Preparar tantos formatos de registro de medidas como sean necesarios. (Ver formato para la medida de la resistencia de puesta a tierra en el anexo 4).
<b>PASO # 14</b>	Empacar otros útiles que considere necesarios (lápiz, borrador, reglas, por ejemplo)
<b>PASO # 15</b>	Si lo considera de utilidad, elaborar una lista de chequeo, esta le ayudará a asegurarse de haber preparado las herramientas necesarias para ejecución de la medida en campo.

**5.2.2 Etapa de Medidas en Campo.** Para la ejecución de las medidas en campo, seguir los siguientes pasos:

<b>PROCEDIMIENTO PARA LA MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA</b>	
<b>ETAPA DE MEDIDAS EN CAMPO</b>	
<b>PASO # 1</b>	Al llegar al sitio de torre, diligenciar los campos correspondientes a línea, fecha, equipo utilizado, frecuencia de medida, vigencia de calibración, cable de guarda instalado, responsable de medida en campo y número de torre.
<b>PASO # 2</b>	Revisar los planos definitivos de la puesta a tierra de la torre, y comprobar su máxima dimensión. Llenar el campo correspondiente a la máxima dimensión de la puesta a tierra ( <b>Dmax [m]</b> ) en el formato de registro de las medidas.

- Ejemplo:

Figura 46. Plano puesta a tierra de torre.



Se determina  $D_{max} = 14,14$  m y se diligencia en el formato como se muestra a continuación.

Figura 47. Anotaciones en el formato de registro de medidas de la resistencia de puesta a tierra.

MEDIDA DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA										
LÍNEA: BARRANCA-GUATIGUARÁ						FECHA (DD/MM/AA): 12/01/2008				
EQUIPO UTILIZADO: TELUR-UIS 2/8						FRECUENCIA DE MEDIDA (Hz): 25 kHz				
VIGENCIA CALIBRACIÓN (DD/MM/AA):						CABLE DE GUARDA INSTALADO: SI <input checked="" type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/>				
RESPONSABLE MEDIDA EN CAMPO: Judith Ramírez										
TORRE #:	Dmax [m]	EC [m]	RESISTENCIAS DE PRUEBA			$\mu$	EP [m]	RESISTENCIA OBTENIDA [ $\Omega$ ]	RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA [ $\Omega$ ]	OBSERVACIONES
			R1 [ $\Omega$ ]	R2 [ $\Omega$ ]	R3 [ $\Omega$ ]					
18	14,14									

## PROCEDIMIENTO PARA LA MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

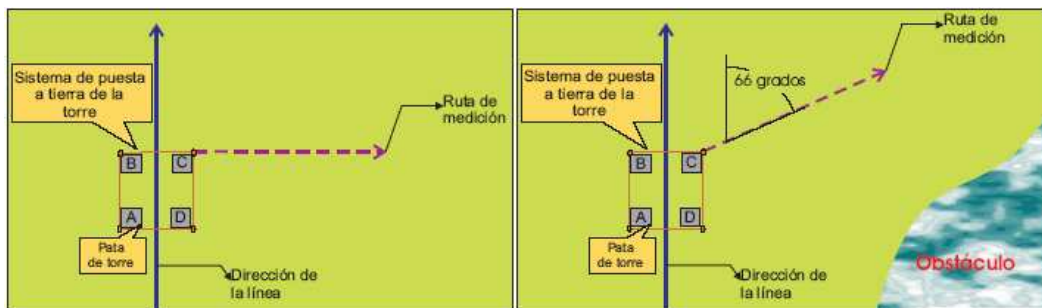
### ETAPA DE MEDIDAS EN CAMPO

#### PASO # 3

Ubicarse en cualquiera de las patas de la torre, y a partir de ella elija una ruta a lo largo de la cuál se realizará la medición. Esta ruta debe permitirle alejarse una distancia de hasta 3 veces la máxima dimensión de la puesta a tierra.

En lo posible esta ruta debe ser perpendicular a los conductores de la línea de transmisión. Si los obstáculos no permiten que la ruta sea perpendicular a estos, procurar el máximo ángulo posible. Si en el sitio se encuentran tuberías metálicas, la dirección de la ruta no debe ser paralela a estas.

Figura 48. Selección de la ruta de medición.

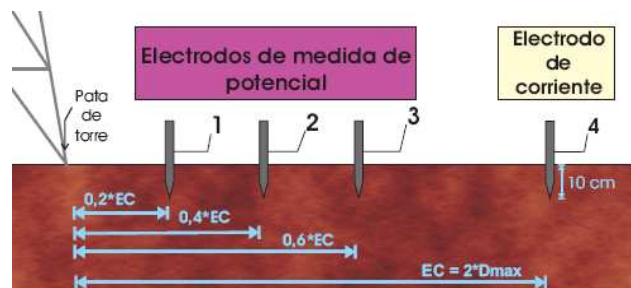


#### PASO # 4

Siguiendo la ruta elegida, enterrar los 4 electrodos a las siguientes distancias a partir de la pata de la torre:

- ✓ Electrodo 4 de corriente a distancia  $EC=2*D_{max}$ .
- ✓ Electrodo 1 de medida de potencial a  $0,2*EC = 0,4*D_{max}$ .
- ✓ Electrodo 2 de medida de potencial a  $0,4*EC = 0,8*D_{max}$ .
- ✓ Electrodo 3 de medida de potencial a  $0,6*EC = 1,2*D_{max}$ .

Figura 49. Posición de los electrodos



Se recomienda enterrar la varilla al menos 10 cm. Asegurar que todos los electrodos quedan haciendo contacto efectivo con el suelo.

## PROCEDIMIENTO PARA LA MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

### ETAPA DE MEDIDAS EN CAMPO

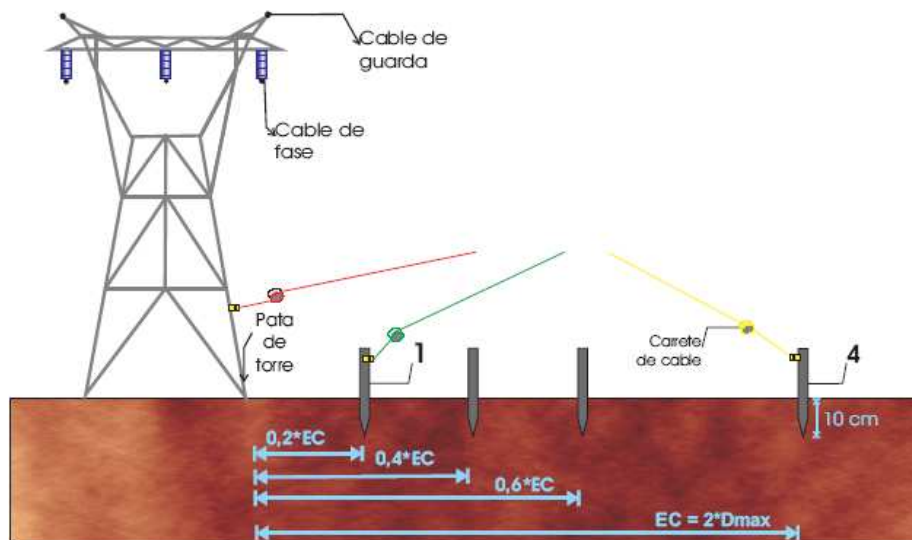
#### PASO # 5

Conectar los cables siguiendo las siguientes instrucciones:

- ✓ Conectar el primer cable a la torre, puede hacerlo en el bajante principal de la pata.
- ✓ Conectar el segundo cable al electrodo 1, de medida de potencial.
- ✓ Conectar el tercer cable al electrodo 4, de corriente.

Verificar que el contacto sea adecuado, una incorrecta conexión puede afectar la sensibilidad del equipo o impedir la medida.

Figura 50. Conexión de los cables.



#### PASO # 6

Preparar el equipo de medida. Este puede tener tres o cuatro terminales identificadas así:

- ✓ Terminales C1 y C2 (o E y H), las cuales hacen parte del circuito de inyección de corriente.
- ✓ Terminales P1 y P2 (o ES y S), hacen parte del circuito para la medida de potencial.

Si el equipo lo requiere, puentear los terminales P1 y C1. Tenga en cuenta que algunos equipos hacen esta conexión automáticamente al seleccionar un tipo de medida de tres terminales, consultar en el manual de su equipo.

## PROCEDIMIENTO PARA LA MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

### ETAPA DE MEDIDAS EN CAMPO

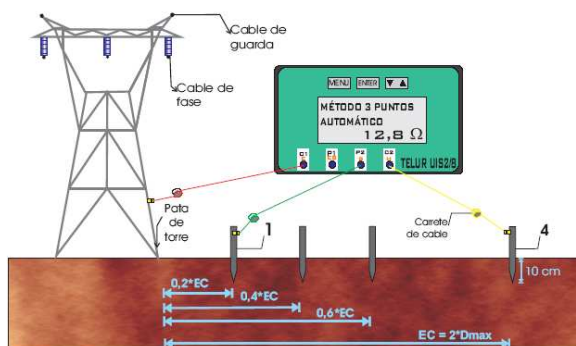
#### PASO # 7

Conectar el equipo de medición.

- ✓ El cable que va a la pata de la torre, conéctelo al terminal C1 (E) del equipo.
- ✓ El cable que va al electrodo 1, conéctelo al terminal P2 (S) del equipo.
- ✓ El cable que va al electrodo 4, conéctelo al terminal C2 (H) del equipo.

Ejecutar la medida. Esta será la resistencia de prueba **R1**.

Figura 51. Conexión del equipo y ejecución de la medida de R1



#### PASO # 8

En el formato de registro de las medidas, diligenciar los datos correspondientes a la separación del electrodo de corriente (campo **EC [m]**), y a la resistencia de prueba R1 obtenida (campo **R1 [Ω]**)

- Ejemplo:

Figura 52. Registro de los datos distancia EC y resistencia de prueba R1 en el formato

MEDIDA DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA										
LÍNEA: BARRANCA-GUATIGUARÁ					FECHA (DD/MM/AA): 12/01/2008					
EQUIPO UTILIZADO: TELUR-UIS 2/8					FRECUENCIA DE MEDIDA (Hz): 25 kHz					
VIGENCIA CALIBRACIÓN (DD/MM/AA):					CABLE DE GUARDA INSTALADO: SI <input checked="" type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/>					
RESPONSABLE MEDIDA EN CAMPO: Judith Ramírez										
TORRE #:	Dmax [m]	EC [m]	RESISTENCIAS DE PRUEBA			μ	EP [m]	RESISTENCIA OBTENIDA [Ω]	RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA [Ω]	OBSERVACIONES
			R1 [Ω]	R2 [Ω]	R3 [Ω]					
18	14,14	28,28	12,8							



## PROCEDIMIENTO PARA LA MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

### ETAPA DE MEDIDAS EN CAMPO

#### PASO # 11

Calcular el coeficiente de pendiente  $\mu$  a partir de la siguiente ecuación:

$$\mu = \frac{(R3 - R2)}{(R2 - R1)}$$

Consignar el dato en el formato de registro (campo  $\mu$ ).

- Ejemplo:
  - R1=12,8  $\Omega$
  - R2=14,12  $\Omega$
  - R3=14,9  $\Omega$

Entonces, 
$$\mu = \frac{(14,9 - 14,12)}{(14,12 - 12,18)} = 0,591$$

#### PASO # 12

Buscar el valor de  $P_T/C$  correspondiente al valor de  $\mu$  dado en las tablas del anexo 2. (Valores de  $P_T/C$  para distintos valores de  $\mu$ ). Calcular la distancia **EP** a la cual debe ser reubicado el electrodo 3 de medida de potencial, mediante la siguiente ecuación:

$$EP = \frac{P_T}{C} * EC \text{ [m]}$$

Anotar la distancia **EP** en su campo correspondiente en el formato de registro de medidas (**EP [m]**).

- Ejemplo:
  - A  $\mu=0,591$  corresponde un valor de  $P_T/C=0,615$

Entonces, 
$$EP = \frac{P_T}{C} * EC = 0,615 * 28,28 = 17,39 \text{ m.}$$

**NOTA:** si el  $\mu$  calculado es mayor a los dados en las tablas del anexo 2, entonces la distancia **EC** debe aumentarse. En este caso puede retomar el procedimiento a partir del paso 15.

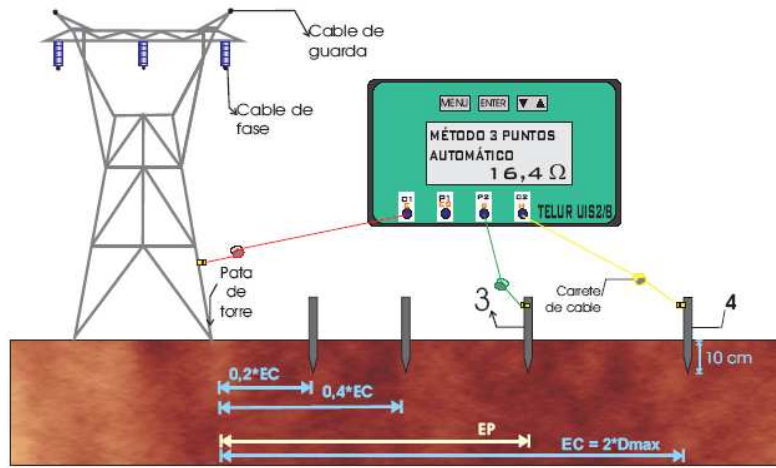
## PROCEDIMIENTO PARA LA MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

### ETAPA DE MEDIDAS EN CAMPO

#### PASO # 13

Reubicar el electrodo 3 de medida de potencial a la distancia **EP** y realizar la medida, esta será la resistencia **R<sub>41</sub>**.

Figura 55. Medición de la resistencia R<sub>41</sub> a la distancia EP.



#### PASO # 14

Consignar el dato obtenido **R<sub>41</sub>** en el formato de registro (campo **RESISTENCIA OBTENIDA A LA DISTANCIA EP – R4 [Ω]**).

- Ejemplo:

Figura 56. Registro de la resistencia obtenida R<sub>41</sub> en el formato

MEDIDA DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA										
LÍNEA: BARRANCA-GUATIGUARÁ					FECHA (DD/MM/AA): 12/01/2008					
EQUIPO UTILIZADO: TELUR-UIS 2/8					FRECUENCIA DE MEDIDA (Hz): 25 kHz					
VIGENCIA CALIBRACIÓN (DD/MM/AA):					CABLE DE GUARDA INSTALADO: SI <input checked="" type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/>					
RESPONSABLE MEDIDA EN CAMPO: Judith Ramírez										
TORRE #:	Dmax [m]	EC [m]	RESISTENCIAS DE PRUEBA			μ	EP [m]	RESISTENCIA OBTENIDA A LA DISTANCIA EP - R4 [Ω]	RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA [Ω]	OBSERVACIONES
			R1 [Ω]	R2 [Ω]	R3 [Ω]					
18	14,14	28,28	12,8	14,12	14,9	0,591	17,39	15,8		

## PROCEDIMIENTO PARA LA MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

### ETAPA DE MEDIDAS EN CAMPO

#### PASO # 15

Desconectar los cables de los electrodos y desenterrarlos. No desconectar los cables del equipo, ni de la torre.

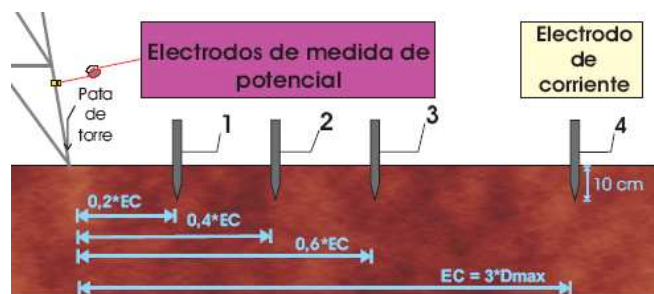
#### PASO # 16

Siguiendo la ruta elegida, reubicar los 4 electrodos, pero ahora enterrándolos a las siguientes distancias a partir de la pata de la torre:

- ✓ Electrodo 4 de corriente a distancia  $EC=3*D_{max}$ .
- ✓ Electrodo 1 de medida de potencial al  $0,2* EC= 0,6*D_{max}$ .
- ✓ Electrodo 2 de medida de potencial al  $0,4* EC= 1,2*D_{max}$ .
- ✓ Electrodo 3 de medida de potencial al  $0,6* EC= 1,8*D_{max}$ .

Revisar que estos tengan un buen contacto con el suelo. Se recomienda enterrar la varilla al menos 10 cm

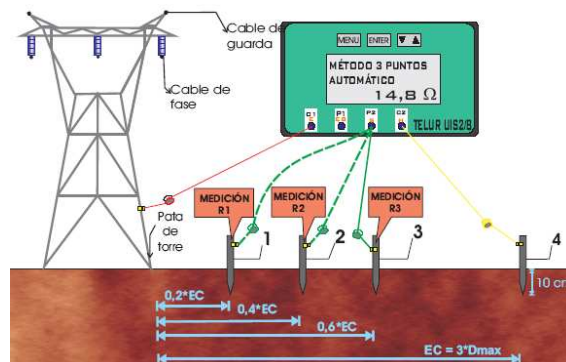
Figura 57. Reubicación de electrodos



#### PASO # 17

Conectar el equipo de medición a los electrodos. Ejecutar la medida de las resistencias de prueba R1, R2 y R3, repitiendo el procedimiento descrito en los pasos 7, 8, 9 y 10.

Figura 58. Medición de las resistencias de prueba R1, R2, y R3.



**PROCEDIMIENTO PARA LA MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA**

**ETAPA DE MEDIDAS EN CAMPO**

**PASO # 18**

Calcular nuevamente el coeficiente de pendiente  $\mu$ , a partir de las resistencias de prueba R1, R2, y R3 obtenidas para la distancia  $EC=3*D_{max}$ . Aplicar la siguiente ecuación:

$$\mu = \frac{(R3 - R2)}{(R2 - R1)}$$

Consignar el dato obtenido en el formato de registro (campo  $\mu$ ).

- Ejemplo:
  - R1=13,2  $\Omega$
  - R2=13,95  $\Omega$
  - R3=14,8  $\Omega$

Entonces, 
$$\mu = \frac{(14,8 - 13,95)}{(13,95 - 13,2)} = 1,133$$

**PASO # 19**

Buscar el valor de  $P_T/C$  correspondiente al valor de  $\mu$  dado en las tablas del anexo 2. (Valores de  $P_T/C$  para distintos valores de  $\mu$ ). Calcular la distancia  $EP$  a la cual debe ser reubicado el electrodo 3 de medida de potencial, mediante la siguiente ecuación:

$$EP = \frac{P_T}{C} * EC \text{ [m]}$$

Anotar la distancia EP en su campo correspondiente en el formato de registro de medidas (**EP [m]**).

- Ejemplo:
  - A  $\mu=1,133$  corresponde un valor de  $P_T/C=0,511$
  - $EC = 3*D_{max} = 42,42 \text{ m}$ .

Entonces, 
$$EP = \frac{P_T}{C} * EC = 0,511 * 42,42 = 21,63 \text{ m}.$$

**NOTA:** Si el  $\mu$  calculado es mayor a los dados en las tablas del anexo 2, entonces la distancia  $EC$  debe aumentarse. En este caso puede retomar el procedimiento en el paso # 22.

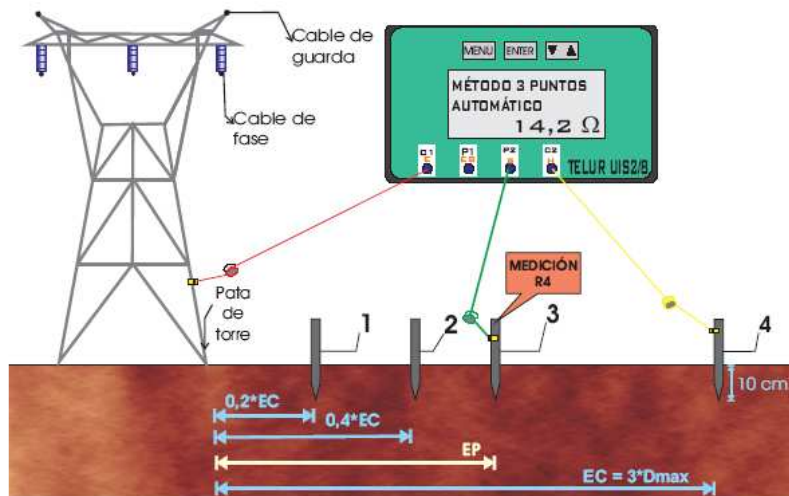
**PROCEDIMIENTO PARA LA MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA**

**ETAPA DE MEDIDAS EN CAMPO**

**PASO # 20**

Reubicar el electrodo 3 de medida de potencial a la distancia EP y realizar la medida de la resistencia  $R_{4_2}$ . Consignar el resultado obtenido en el formato de registros.

Figura 59. Medición de la resistencia  $R_{4_2}$



- Ejemplo:

Figura 60. Registro de la resistencia  $R_{4_2}$  en el formato.

<b>MEDIDA DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA</b>										
<b>LÍNEA:</b> BARRANCA-GUATIGUARÁ						<b>FECHA (DD/MM/AA):</b> 12/01/2008				
<b>EQUIPO UTILIZADO:</b> TELUR-UIS 2/8						<b>FRECUENCIA DE MEDIDA (Hz):</b> 25 kHz				
<b>VIGENCIA CALIBRACIÓN (DD/MM/AA):</b>						<b>CABLE DE GUARDA INSTALADO:</b> SI <input checked="" type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/>				
<b>RESPONSABLE MEDIDA EN CAMPO:</b> Judith Ramírez										
TORRE #:	Dmax [m]	EC [m]	RESISTENCIAS DE PRUEBA			$\mu$	EP [m]	RESISTENCIA OBTENIDA A LA DISTANCIA EP - R4 [Ω]	RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA [Ω]	OBSERVACIONES
			R1 [Ω]	R2 [Ω]	R3 [Ω]					
18	14,14	28,28	12,8	14,12	14,9	0,591	17,39	16,4		
		42,42	13,2	13,95	14,8	1,133	21,63	14,2		

**PROCEDIMIENTO PARA LA MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA**

**ETAPA DE MEDIDAS EN CAMPO**

**PASO # 21**

Si no fue posible obtener una resistencia  $R_{4_1}$ , continuar con el paso #22.

Calcular la desviación entre las resistencias  $R_{4_1}$  y  $R_{4_2}$  obtenidas a las distancias  $EC_1=2*D_{max}$  y  $EC_2=3*D_{max}$ .

$$DESVIACIÓN DATOS \% = \frac{R_{4_1} - R_{4_2}}{R_{4_1}} * 100$$

Si la desviación de los datos no excede el 15%, la resistencia  $R_{4_2}$  obtenida a la distancia  $EC_2=3*D_{max}$ , se considera como el valor verdadero de la resistencia de puesta a tierra de la torre. Si este es el caso, diligenciar el dato en el campo **RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA [Ω]** y dar por terminado el procedimiento de medición.

Si la desviación supera el 15%, entonces proceda con el paso # 22.

- Ejemplo:
  - $R_{4_1} = 16,4 \Omega$  para  $EC_1=2*D_{max}$ .
  - $R_{4_2} = 14,2 \Omega$  para  $EC_2=3*D_{max}$ .

$$DESVIACIÓN DATOS \% = \frac{16,4 - 14,2}{16,4} * 100 = 13,4\%$$

Entonces, la resistencia de puesta a tierra de la torre es igual a  $14,2 \Omega$ .

Figura 61. Diligenciamiento del dato Resistencia de puesta a tierra de la torre # 18.

MEDIDA DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA										
LÍNEA: BARRANCA-GUATIGUARÁ					FECHA (DD/MM/AA): 12/01/2008					
EQUIPO UTILIZADO: TELUR-UIS 2/8					FRECUENCIA DE MEDIDA (Hz): 25 kHz					
VIGENCIA CALIBRACIÓN (DD/MM/AA):					CABLE DE GUARDA INSTALADO: SI <input checked="" type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/>					
RESPONSABLE MEDIDA EN CAMPO: Judith Ramírez										
TORRE #:	Dmax [m]	EC [m]	RESISTENCIAS DE PRUEBA			μ	EP [m]	RESISTENCIA OBTENIDA A LA DISTANCIA EP - R4 [Ω]	RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA [Ω]	OBSERVACIONES
			R1 [Ω]	R2 [Ω]	R3 [Ω]					
18	14,14	28,28	12,8	14,12	14,9	0,591	17,39	16,4	14,2	
		42,42	13,2	13,95	14,8	1,133	21,63	14,2		

## PROCEDIMIENTO PARA LA MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

### ETAPA DE MEDIDAS EN CAMPO

#### PASO # 21

NOTA. La incertidumbre del método de la pendiente disminuye, en la medida en que la variación obtenida entre los datos de resistencia  $R_4$  obtenidos a las distancias  $EC_1=2*D_{max}$  y  $EC_2=3*D_{max}$  sea mínima.

Teniendo en cuenta que la resistencia de puesta a tierra de torres de transmisión es del orden de  $20 \Omega$ , una variación menor al 15% ( $3 \Omega$ ) es considerada aceptable. Este porcentaje de desviación es sugerido, y puede ser fijado por el usuario del presente procedimiento de acuerdo a sus necesidades.

#### PASO # 22

Desconectar los cables de los electrodos y desenterrarlos. No desconectar los cables del equipo, ni de la torre.

#### PASO # 23

Siguiendo la ruta elegida, reubicar los 4 electrodos, pero ahora enterrándolos a las siguientes distancias a partir de la pata de la torre:

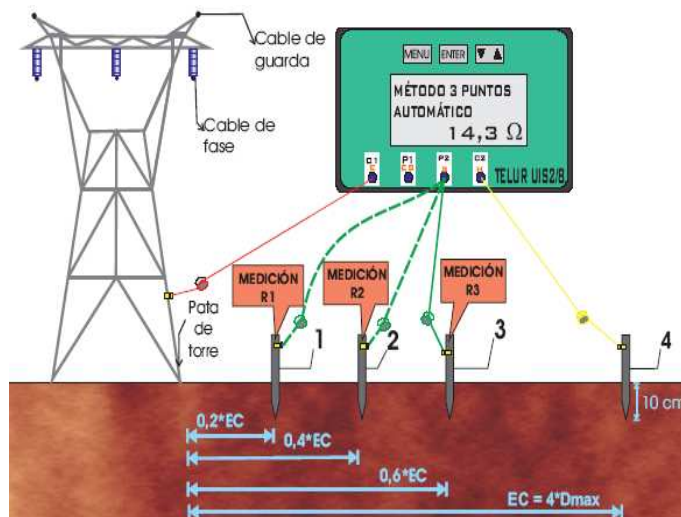
- ✓ Electrodo 4 de corriente a distancia  $EC=4*D_{max}$ .
- ✓ Electrodo 1 de medida de potencial al  $0,2* EC= 0,8*D_{max}$ .
- ✓ Electrodo 2 de medida de potencial al  $0,4* EC= 1,6*D_{max}$ .
- ✓ Electrodo 3 de medida de potencial al  $0,6* EC= 2,4*D_{max}$ .

Revisar que estos tengan un buen contacto con el suelo. Se recomienda enterrar la varilla al menos 10 cm.

#### PASO # 24

Repetir el procedimiento desde los pasos 17 hasta el 20, para hallar una nueva resistencia  $R_{43}$ .

Figura 62. Medición de las resistencias  $R_1$ ,  $R_2$  y  $R_3$  a la distancia  $EC = 4*D_{max}$ .

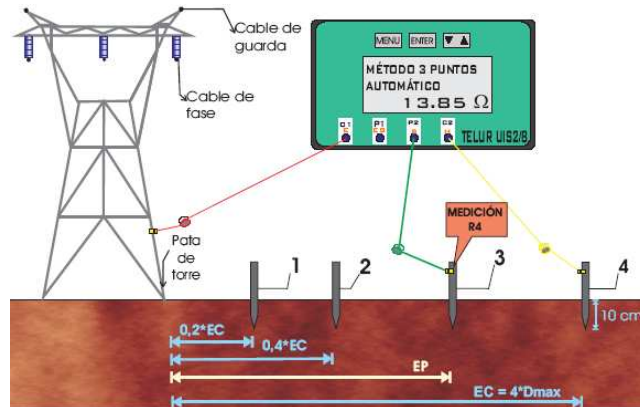


## PROCEDIMIENTO PARA LA MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

### ETAPA DE MEDIDAS EN CAMPO

#### PASO # 24

Figura 63. Medición de la resistencia  $R_{4_3}$ .



#### PASO # 25

Si no fue posible obtener una resistencia  $R_{4_2}$ , entonces proseguir con el paso #26.

Calcular la desviación entre las resistencias  $R_{4_2}$  y  $R_{4_3}$  obtenidas a las distancias  $EC_2=3*D_{max}$  y  $EC_3=4*D_{max}$ .

$$DESVIACIÓN DATOS \% = \frac{R_{4_2} - R_{4_3}}{R_{4_2}} * 100$$

Si la desviación de los datos no excede el 15%, la resistencia  $R_{4_3}$  obtenida a la distancia  $EC_2=3*D_{max}$ , se considera como el valor verdadero de la resistencia de puesta a tierra de la torre. Si este es el caso, diligenciar el dato en el campo **RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA [Ω]** y dar por terminado el procedimiento de medición.

#### PASO # 26

La medición de la resistencia de puesta a tierra, es un proceso que requiere de experimentación hasta alcanzar un grado de exactitud aceptable.

En casos fortuitos, en los que se supere la desviación máxima del 15%, o no hubiese sido posible encontrar un valor  $R_{4_2}$ , debe iterarse el procedimiento, aumentando la distancia EC del electrodo de corriente, y reubicando nuevamente los electrodos de potencial al 20%, 40% y 60% de esta distancia, hasta alcanzar el porcentaje de desviación requerido.

## CONCLUSIONES

- ❖ La correcta medición de la resistividad del suelo en el sitio de torre y el desarrollo de un modelo adecuado del suelo que se aproxime con buen grado de exactitud a las condiciones reales del mismo es de fundamental importancia, pues permitirá realizar el diseño de un sistema de puesta a tierra apropiado, que una vez construido respete los requerimientos exigidos, y cumpla con sus objetivos en cuanto a la seguridad de las personas, la protección de la línea de transmisión y la compatibilidad electromagnética.
- ❖ El método de Wenner es el más recomendable para su uso en la medida de la resistividad del suelo en líneas de transmisión. Es el método más exacto y de fácil aplicación. Su implementación es muy económica, requiere de equipo que puede adquirirse fácilmente en el mercado a precios competitivos y su simplicidad hace que sea el método que demanda menor tiempo en su aplicación. Es el método más popular y dispone de mayor cantidad de fuentes bibliográficas. Por lo tanto, ha sido implementado en el procedimiento para la medida de la resistividad del suelo en líneas de transmisión aéreas.
- ❖ Para el diseño de sistemas de puesta a tierra en líneas de transmisión no se requiere de un sumo grado de refinamiento, por lo que es preferible el desarrollo de un modelo del suelo homogéneo.
- ❖ La correcta medida de la resistencia de puesta a tierra es de vital importancia, pues permite verificar que esta se encuentra dentro de los requerimientos exigidos, lo que se reflejará en el buen funcionamiento de la línea, y la seguridad de las personas y los seres vivos. También permitirá la detección de tramos problemáticos de la línea, apoyando las decisiones en pro de su mejoramiento.
- ❖ El método de la pendiente cuenta con características que lo hacen el más indicado para la medida de la resistencia de puesta a tierra en torres de líneas de transmisión aéreas. Es más preciso que el método de la caída de potencial, ha probado dar resultados satisfactorios cuando el terreno es no homogéneo, y en sistemas de puesta a tierra con electrodos que cubren gran área. No requiere un gran alejamiento entre la puesta a tierra bajo medida y el electrodo de corriente **C**, es de fácil implementación y es económico. Es apropiado para la medida de la resistencia de puesta a tierra en torres de líneas de transmisión aéreas y cuenta con suficientes fuentes

bibliográficas para consulta. Por lo tanto, ha sido implementado en el procedimiento para la medida de la resistencia de puesta a tierra en líneas de transmisión aéreas.

- ❖ Al medir la resistencia de puesta a tierra en torres conectadas a cables de guarda, se requiere del uso de un equipo que permita determinar la resistencia de la torre específica bajo medida, anulando el efecto de las torres adyacentes conectadas en paralelo.
- ❖ Establecer procedimientos para la medida de la resistividad del suelo y de la resistencia de puesta a tierra en líneas de transmisión, ciertamente implica el mejoramiento en la calidad de dichos procesos y la reducción de la incertidumbre inherente a la medición. Al seguir los pasos de los procedimientos propuestos, se materializará una medida adecuada de la resistividad del suelo y de la resistencia de puesta a tierra, de forma eficiente y eficaz, de manera que su implementación sea exitosa en el primer intento; reduciendo los costos asociados al reproceso (repetición de medidas).
- ❖ La aplicación de los procedimientos para la medición de la resistividad del terreno y de la resistencia de puesta a tierra, involucra el mejoramiento en el sistema de puesta a tierra de las líneas de transmisión. Con la aplicación del procedimiento para la medida de la resistividad del terreno, al obtenerse un modelo más adecuado del suelo, se perfecciona el proceso de diseño del sistema de puesta a tierra de la línea de transmisión. Así mismo, con la aplicación del procedimiento para la medida de la resistencia de puesta a tierra se asegurará con un menor porcentaje de error, que este parámetro no supera los límites máximos establecidos normativamente y que garantizan el buen comportamiento de la línea ante descargas atmosféricas.
- ❖ Los procedimientos para la medida de la resistividad del suelo y de la resistencia de puesta a tierra en líneas de transmisión, al exponer el paso a paso de los procesos de medición, haciendo uso de un lenguaje sencillo, de gráficas ilustrativas, y de algunas operaciones matemáticas básicas, facilitan considerablemente la ejecución de este tipo de procesos al personal y a las empresas que requieran llevarlas a cabo.
- ❖ El desarrollo del presente proyecto me ha permitido progresar en mis conocimientos, permitiéndome investigar y profundizar sobre el estado del arte de los sistemas de puesta a tierra y su influencia en el comportamiento de las líneas de transmisión ante descargas atmosféricas. También ha enriquecido y fortalecido mi formación profesional y personal, enseñándome que todo proyecto se lleva a buen fin, a partir del esfuerzo, el amor por el trabajo, la persistencia, la fe, la excelencia y el trabajo en equipo.

## RECOMENDACIONES Y OBSERVACIONES

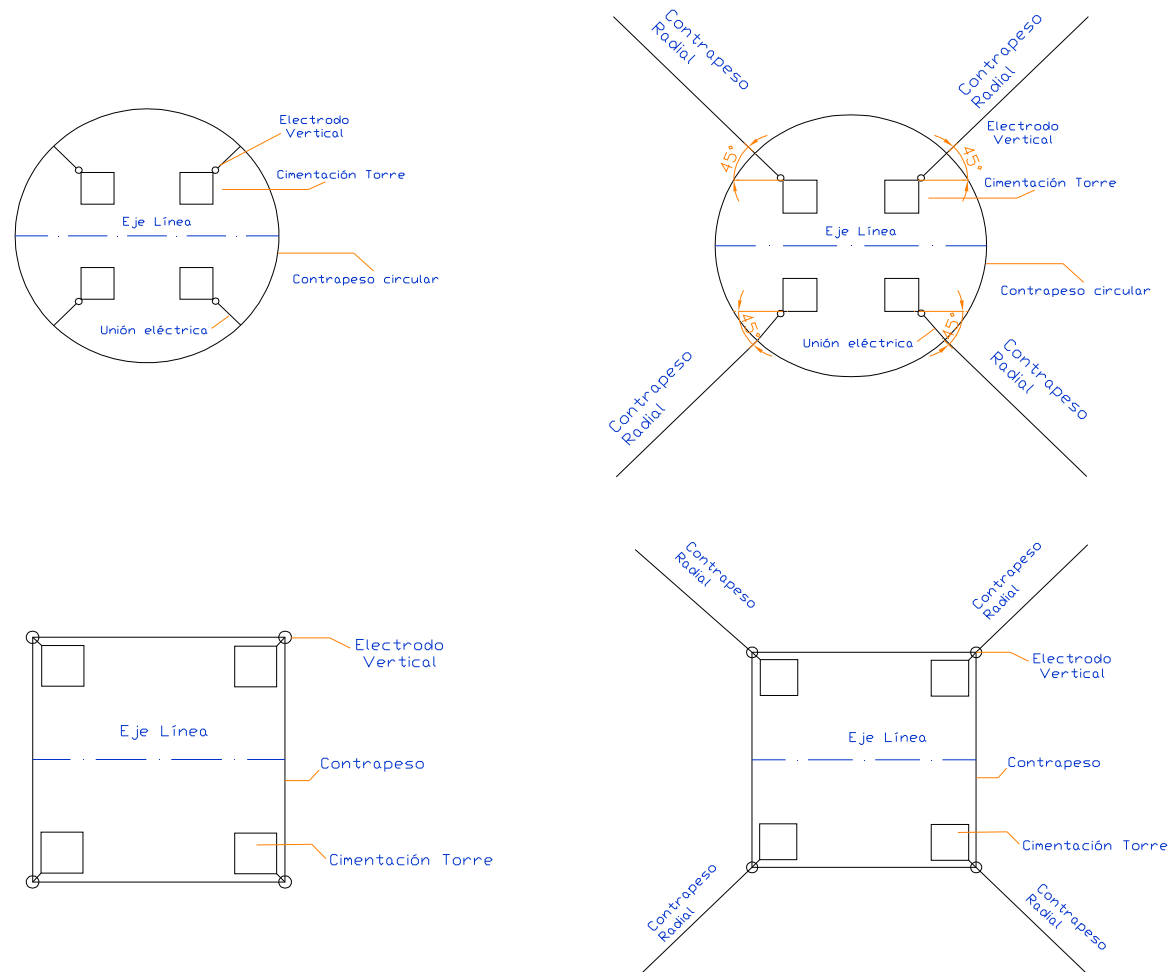
- ❖ En los casos en los que la torre se encuentra conectada al cable de guarda, se recomienda el uso de equipo de medición de alta frecuencia.
- ❖ Se recomienda que en la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, se observe la posibilidad de desarrollar una segunda etapa de este proyecto, que corrobore experimentalmente lo que se propone en el presente trabajo. Para el desarrollo de esta segunda etapa se sugiere establecer un convenio con empresas del sector propietarias de líneas de transmisión, que pongan a disposición de los investigadores el equipo de medición adecuado, permisos para trabajar en las líneas de transmisión de su propiedad y la ayuda y asesoría de expertos en el tema.
- ❖ Se anima a la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones y especialmente a sus alumnos a continuar investigando sobre sistemas de puesta a tierra, sugiriéndose las siguientes temáticas:
  - Desarrollo de equipos de medición de sistemas de puesta a tierra, como por ejemplo para la medida de la resistencia de puesta a tierra en líneas de transmisión.
  - Desarrollo de software para el diseño de sistemas de puesta a tierra a partir de modelos del suelo homogéneo y de dos capas.
  - Soluciones para el mejoramiento del comportamiento de líneas de transmisión ante descargas atmosféricas cuando la resistencia de puesta a tierra no puede ser mejorada.
  - Desarrollo de software para el diseño de sistemas de protección contra rayos.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] AGULLEIRO, Ignacio. Técnicas Modernas Para la Medición de Sistemas de Puesta a Tierra en Zonas Urbanas [en línea]. <<http://prof.usb.ve/mmlozano/DOCS/MMPAT.pdf>>.
- [2] ALMEIDA, M., CORREIA M. Critical length of long horizontal ground electrodes. En: International Conference on Grounding and Earthing (3<sup>rd</sup>: 2002: Rio de Janeiro).
- [3] AVO INTERNATIONAL. Medición de la Resistencia de Tierra. 2001.
- [4] BLANDON, Juan. Sistemas de Puesta a Tierra.
- [5] CENTRO DE FORMACIÓN SCHNEIDER. Publicación Técnica No 009 Medidas y Vigilancia de las Instalaciones de Puesta a Tierra. Barcelona: Biblioteca técnica Schneider Electric, 2001.
- [6] DAWALIBI, F., and MUKHEDKAR, D. Ground Electrode Resistance Measurement in Non-Uniform Soils. IEEE Transactions, Jan 1974, Vol. PAS—93, no 1, pp 109-116.
- [7] ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. Guide for Application of Transmission Line Surge Arresters 42 – 230 KV. Palo Alto: EPRI,1997.
- [8] ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. Transmission Line Grounding. Palo Alto: EPRI,1982.
- [9] GARCIA, Rogelio. La puesta a tierra de instalaciones eléctricas y el R.A.T. Barcelona: Marcombo, 1991. 158 p.
- [10] IEEE Standard No 81. Recommended Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System. ANSI/IEEE Std 81,1983.
- [11] IEEE Standard No 80. Recommended Guide for Safety in AC Substation Grounding. ANSI/IEEE Std 80, 2000.
- [12] IEEE Standard 142. Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems. IEEE Std 142, 1991.

- [13] LEM INSTRUMENTS. Electrical Grounding Techniques [en línea]. <[http://www.powertech-rentals.com.au/LEM\\_earth\\_ground\\_testing\\_technique.pdf](http://www.powertech-rentals.com.au/LEM_earth_ground_testing_technique.pdf)>
- [14] MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Reglamento Técnico de Instalaciones – RETIE. Bogotá D. C.:MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2007.
- [15] MORENO, G., VALENCIA, A., CÁRDENAS, A., VILLA, W. Fundamentos e Ingeniería de las puestas a tierra: respuesta ante fallas eléctricas y rayos. Medellín: Editorial Universidad de Antioquia, 2007.
- [16] VISACRO, Silverio. Aterramentos elétricos: Conceitos básicos, técnicas de medição e instrumentação, filosofias de aterramento. Belo Horizonte: Alphagraphics, 1998. 106 p.

**ANEXO A. ALGUNOS ARREGLOS DE ELECTRODOS COMUNMENTE IMPLEMENTADOS COMO PUESTA A TIERRA EN TORRES DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN.**



## ANEXO B. VALORES DE P<sub>T/C</sub> PARA DISTINTOS VALORES DE $\mu$

$\mu$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.40	0.6432	6431	6429	6428	6426	6425	6423	6422	6420	6419
0.41	0.6418	6416	6415	6413	6412	6410	6408	6408	6406	6405
0.42	0.6403	6402	6400	6399	6397	6396	6395	6393	6392	6390
0.43	0.6389	6387	6386	6384	6383	6382	6380	6379	6377	6376
0.44	0.6374	6373	6372	6370	6369	6367	6366	6364	6363	6361
0.45	0.6360	6359	6357	6356	6354	6353	6351	6350	6348	6347
0.46	0.6346	6344	6343	6341	6340	6338	6337	6336	6334	6333
0.47	0.6331	6330	6328	6327	6325	6324	6323	6321	6320	6318
0.48	0.6317	6315	6314	6312	6311	6310	6308	6307	6305	6304
0.49	0.6302	6301	6300	6298	6297	6295	6294	6292	6291	6289
0.50	0.6288	6286	6285	6283	6282	6280	6279	6277	6276	6274
0.51	0.6273	6271	6270	6268	6267	6265	6264	6262	6261	6259
0.52	0.6258	6256	6255	6253	6252	6250	6248	6247	6245	6244
0.53	0.6242	6241	6239	6238	6236	6235	6233	6232	6230	6229
0.54	0.6227	6226	6224	6223	6221	6220	6218	6217	6215	6214
0.55	0.6212	6210	6209	6207	6206	6204	6203	6201	6200	6198
0.56	0.6197	6195	6194	6192	6191	6189	6188	6186	6185	6183
0.57	0.6182	6180	6179	6177	6176	6174	6172	6171	6169	6168
0.58	0.6168	6165	6163	6162	6160	6159	6157	6156	6154	6153
0.59	0.6151	6150	6148	6147	6145	6144	6142	6141	6139	6138
0.60	0.6136	6134	6133	6131	6130	6128	6126	6125	6123	6121
0.61	0.6120	6118	6117	6115	6113	6112	6110	6108	6107	6105
0.62	0.6104	6102	6100	6099	6097	6096	6094	6092	6091	6089
0.63	0.6087	6086	6084	6083	6081	6079	6078	6076	6074	6073
0.64	0.6071	6070	6068	6066	6065	6063	6061	6060	6058	6057
0.65	0.6055	6053	6052	6050	6049	6047	6045	6044	6042	6040
0.66	0.6039	6037	6036	6034	6032	6031	6029	6027	6026	6024
0.67	0.6023	6021	6019	6018	6016	6015	6013	6011	6010	6008
0.68	0.6006	6005	6003	6002	6000	5998	5997	5995	5993	5992
0.69	0.5990	5989	5987	5985	5984	5982	5980	5979	5977	5976
0.70	0.5974	5973	5971	5969	5967	5965	5964	5962	5960	5959
0.71	0.5957	5955	5953	5952	5950	5948	5947	5945	5943	5942
0.72	0.5940	5938	5936	5935	5933	5931	5930	5928	5926	5924
0.73	0.5923	5921	5920	5918	5916	5914	5912	5911	5909	5907
0.74	0.5906	5904	5902	5900	5899	5897	5895	5894	5892	5890
0.75	0.5889	5887	5885	5883	5882	5880	5878	5877	5875	5873
0.76	0.5871	5870	5868	5866	5865	5863	5861	5859	5858	5856
0.77	0.5854	5853	5851	5849	5847	5846	5844	5842	5841	5839
0.78	0.5837	5835	5834	5832	5830	5829	5827	5825	5824	5822
0.79	0.5820	5818	5817	5815	5813	5812	5810	5808	5806	5805
0.80	0.5803	5801	5799	5797	5796	5794	5792	5790	5788	5786
0.81	0.5785	5783	5781	5779	5777	5775	5773	5772	5770	5768
0.82	0.5768	5764	5762	5760	5759	5757	5755	5753	5751	5749
0.83	0.5748	5746	5744	5742	5740	5738	5736	5735	5733	5731
0.84	0.5729	5727	5725	5723	5722	5720	5718	5716	5714	5712
0.85	0.5711	5709	5707	5705	5703	5701	5699	5698	5696	5694
0.86	0.5692	5690	5688	5686	5685	5683	5681	5679	5677	5675
0.87	0.5674	5672	5670	5668	5666	5664	5662	5661	5659	5657
0.88	0.5655	5653	5651	5650	5648	5646	5644	5642	5640	5638
0.89	0.5637	5635	5633	5631	5629	5627	5625	5624	5622	5620
0.90	0.5618	5616	5614	5612	5610	5608	5606	5604	5602	5600
0.91	0.5598	5596	5594	5592	5590	5588	5586	5584	5582	5580
0.92	0.5578	5576	5574	5572	5570	5568	5566	5563	5561	5559
0.93	0.5557	5555	5553	5551	5549	5547	5545	5543	5541	5539
0.94	0.5537	5535	5533	5531	5529	5527	5525	5523	5521	5519
0.95	0.5517	5515	5513	5511	5509	5507	5505	5503	5501	5499
0.96	0.5497	5495	5493	5491	5489	5487	5485	5483	5481	5479
0.97	0.5477	5475	5473	5471	5469	5467	5464	5462	5460	5458
0.98	0.5456	5454	5452	5450	5448	5446	5444	5442	5440	5438
0.99	0.5436	5434	5432	5430	5428	5426	5424	5422	5420	5418

$\mu$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.00	0.5416	5414	5412	5410	5408	5407	5405	5403	5400	5398
1.01	0.5394	5391	5389	5387	5385	5383	5380	5378	5376	5374
1.02	0.5371	5369	5367	5365	5362	5360	5358	5356	5354	5351
1.03	0.5349	5347	5345	5344	5342	5340	5338	5336	5333	5329
1.04	0.5327	5325	5322	5320	5318	5316	5313	5311	5309	5307
1.05	0.5305	5302	5300	5298	5296	5293	5291	5289	5287	5284
1.06	0.5282	5280	5278	5276	5273	5271	5269	5267	5264	5262
1.07	0.5260	5258	5255	5253	5251	5249	5247	5244	5242	5240
1.08	0.5238	5235	5233	5231	5229	5229	5224	5222	5219	5217
1.09	0.5215	5213	5211	5209	5206	5204	5202	5200	5197	5195
1.10	0.5193	5190	5188	5185	5183	5180	5178	5175	5173	5170
1.11	0.5168	5165	5163	5160	5158	5155	5153	5150	5148	5145
1.12	0.5143	5140	5137	5135	5132	5130	5127	5125	5122	5120
1.13	0.5118	5115	5113	5110	5108	5105	5103	5100	5098	5095
1.14	0.5093	5090	5088	5085	5083	5080	5078	5075	5073	5070
1.15	0.5068	5065	5062	5060	5057	5055	5052	5050	5047	5045
1.16	0.5042	5040	5037	5035	5032	5030	5027	5025	5022	5020
1.17	0.5017	5015	5012	5010	5007	5005	5002	5000	4997	4995
1.18	0.4992	4990	4987	4985	4982	4980	4977	4975	4972	4970
1.19	0.4967	4965	4962	4960	4957	4955	4952	4950	4947	4945
1.20	0.4942	4939	4936	4933	4930	4928	4925	4922	4919	4916
1.21	0.4913	4910	4907	4904	4901	4899	4896	4893	4890	4887
1.22	0.4884	4881	4878	4875	4872	4870	4867	4864	4861	4858
1.23	0.4855	4852	4849	4846	4843	4841	4838	4835	4832	4829
1.24	0.4826	4823	4820	4817	4814	4812	4809	4806	4803	4800
1.25	0.4797	4794	4791	4788	4785	4782	4779	4777	4774	4771
1.26	0.4768	4765	4762	4759	4756	4754	4751	4748	4745	4742
1.27	0.4739	4736	4733	4730	4727	4725	4722	4719	4716	4713
1.28	0.4710	4707	4704	4701	4698	4696	4693	4690	4687	4684
1.29	0.4681	4678	4675	4672	4669	4667	4664	4661	4658	4655
1.30	0.4652	4649	4645	4642	4638	4635	4631	4628	4625	4621
1.31	0.4618	4614	4611	4607	4604	4601	4597	4594	4590	4586
1.32	0.4583	4580	4577	4573	4570	4566	4563	4559	4556	4553
1.33	0.4549	4546	4542	4539	4535	4532	4529	4525	4522	4518
1.34	0.4515	4511	4508	4505	4501	4498	4494	4491	4487	4484
1.35	0.4481	4477	4474	4470	4467	4463	4460	4457	4453	4450
1.36	0.4446	4443	4439	4436	4432	4429	4426	4422	4419	4415
1.37	0.4412	4408	4405	4402	4398	4395	4391	4388	4384	4381
1.38	0.4378	4374	4371	4367	4364	4360	4357	4354	4350	4347
1.39	0.4343	4340	4336	4333	4330	4326	4323	4319	4316	4312
1.40	0.4309	4305	4301	4296	4292	4288	4284	4280	4275	4271
1.41	0.4267	4263	4258	4254	4250	4246	4242	4237	4233	4229
1.42	0.4225	4221	4216	4212	4208	4204	4200	4195	4191	4187
1.43	0.4183	4178	4174	4170	4166	4162	4157	4153	4149	4145
1.44	0.4141	4136	4132	4128	4124	4120	4115	4111	4107	4103
1.45	0.4099	4094	4090	4086	4082	4077	4073	4069	4065	4061
1.46	0.4056	4052	4048	4044	4040	4035	4031	4027	4023	4018
1.47	0.4014	4010	4005	4001	3997	3993	3989	3985	3980	3976
1.48	0.3972	3968	3964	3959	3955	3951	3947	3943	3938	3934
1.49	0.3930	3926	3921	3917	3913	3909	3905	3900	3896	3892
1.50	0.3888	3883	3878	3874	3869	3864	3859	3854	3850	3845
1.51	0.3846	3835	3830	3825	3820	3816	3811	3806	3801	3796
1.52	0.3791	3788	3781	3776	3771	3766	3760	3755	3750	3745
1.53	0.3740	3735	3730	3724	3719	3714	3709	370		



