



POSGRADOS

MAESTRÍA EN _____

ELECTRICIDAD

RPC-SO-22-No.325-2018

OPCIÓN DE
TITULACIÓN:

PROYECTOS DE DESARROLLO

TEMA:

DISEÑO Y EVALUACIÓN DE CONFIGURACIONES DE
PUESTA A TIERRA EN DIFERENTES TIPOS DE SUELO
EMPLEANDO MATERIALES DE BAJA RESISTIVIDAD

AUTOR:

CRISTIAN GEOVANY CORONEL NARANJO

FREDDY MAURICIO SINCHI SINCHI

DIRECTOR:

EDGAR ANTONIO BARRAGÁN ESCANDÓN

CUENCA- ECUADOR
2021

Autores:



Cristian Geovany Coronel Naranjo

Ingeniero Electrónico.

Candidato a Magíster en Electricidad, Mención Sistemas Eléctricos de Potencia.

Universidad Politécnica Salesiana, Sede Cuenca

cristian@est.ups.edu.ec



Freddy Mauricio Sinchi Sinchi

Ingeniero Eléctrico.

Máster Universitario en Dirección y Administración de Empresas.

Candidato a Magíster en Electricidad, Mención Sistemas Eléctricos de Potencia.

Universidad Politécnica Salesiana, Sede Cuenca

fsinchi@est.ups.edu.ec

Director:



Edgar Antonio Barragán Escandón

Ingeniero Eléctrico.

Máster Universitario en Energías Renovables.

Magister en Sistemas Eléctricos de Potencia.

Doctor en Energías Renovables.

ebarragan@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

©2021 Universidad Politécnica Salesiana.

CUENCA – ECUADOR – SUDAMÉRICA

CRISTIAN GEOVANY CORONEL NARANJO

FREDDY MAURICIO SINCHI SINCHI

DISEÑO Y EVALUACIÓN DE CONFIGURACIONES DE PUESTA A TIERRA EN DIFERENTES TIPOS DE SUELO EMPLEANDO MATERIALES DE BAJA RESISTIVIDAD

Agradecimientos

Infinitas gracias a Dios Todopoderoso, que me brinda discernimiento, sabiduría, fortaleza y salud. Me acompaña y me protege siempre.

Expreso mi agradecimiento a Ing. Antonio Barragán PhD por su amistad, motivación y apoyo. Gracias por aceptarme para realizar esta tesis bajo su dirección.

Mi más sincero reconocimiento y agradecimiento al Grupo de Investigación en Energías (GIE) por el apoyo financiero; al coordinador del grupo Ing. Flavio Quizhpi por su amistad, apoyo y valiosas discusiones; y a los miembros de laboratorio, Alberto y Ramón.

Gracias a la Universidad Politécnica Salesiana por su excelencia académica, y a muchos de sus profesores e integrantes por brindarme su amistad.

Gracias a mis compañeros de aula por su amistad, en especial a mi compañero tesista Cristian, por su dedicación y apoyo para tener éxito en este trabajo.

Gracias a mi madre Yolanda, y a todos mis seres queridos por su apoyo incondicional.

A mi padre (+) que siempre está presente en mi mente y en mi corazón.

Freddy

Agradecimientos

Esta obra se ha realizado gracias a la bendición de Dios, que me ha dado discernimiento, sabiduría, fortaleza y salud.

Este trabajo ha sido gracias al apoyo y orientación del Ing. Antonio Barragán pHD. Gracias por su amistad, por su contribución, dirección y revisión de la tesis.

Mi más sincero reconocimiento y agradecimiento al Grupo de Investigación en Energías (GIE) por el apoyo financiero; al coordinador del grupo Ing. Flavio Quizhpi por su amistad, apoyo y valiosas discusiones; y a los miembros de laboratorio, Alberto y Ramón.

Agradezco a mis padres Wilson y Graciela, mis hermanas Verónica y Jéssica, mis abuelitos Rafael y Zoila, así como a mis queridos tíos Rafael y Hector, que desde pequeño, me han brindado su apoyo incondicional para seguir avanzando y logrando mis metas, gracias por estar ahí conmigo en los buenos y malos momentos.

Gracias a mi compañero tesista Freddy por su dedicación y apoyo para realizar tan arduo trabajo.

Gracias a la Universidad Politécnica Salesiana por su excelencia académica.

Cristian

Índice general

Capítulos	Página
Índice de Contenidos	7
Índice de Figuras	9
Índice de Tablas	11
Resumen	12
Abstract	13
1. Introducción	14
1.1. Descripción general del problema	14
1.2. Objetivos	15
1.2.1. Objetivo general	15
1.2.2. Objetivos específicos	15
1.3. Contribuciones	16
1.4. Organización del documento	16
2. Marco teórico referencial: Sistemas de puesta a tierra (SPT)	17
2.1. Introducción	17
2.2. Sistema de puesta a tierra (SPT)	17
2.3. Resistividad del terreno	18
2.4. Interpretación de las medidas de resistividad del suelo	20
2.5. Resistencia de puesta a tierra (RPT)	21
2.6. Tratamiento del suelo para disminuir la resistividad	22
2.7. Impedancia de impulso	26

3. Materiales y metodología	28
3.1. Introducción	28
3.2. Paso 1: Recolección de datos	29
3.2.1. Problemas de la investigación de campo	30
3.2.2. Método Wenner	31
3.2.3. Información de Campo	33
3.3. Paso 2: Modelado del terreno	33
3.3.1. Modelo de suelo uniforme	34
3.3.2. Modelo de suelo de dos capas por método gráfico Sunde	35
3.4. Paso 3: Implementación de diseños de SPT	37
3.5. Paso 4: Cálculo de la resistencia de puesta a tierra (RPT)	39
3.5.1. Resistencia a tierra de una varilla	39
3.5.2. Resistencia a tierra de la conexión de dos varillas	40
3.5.3. Resistencia a tierra de la conexión de tres varillas en línea	42
3.5.4. Resistencia a tierra de una malla triangular	42
3.5.5. Resistencia a tierra de mallas cuadradas y rectangulares	43
3.6. Paso 5: Medición de la resistencia de puesta a tierra	44
3.6.1. Método de caída de potencial	44
3.6.2. Método de abrazadera	47
3.6.3. Método de impulsión	51
3.7. Paso 6: Implementación LRM	53
3.8. Paso 7: Diseño de SPT	55
4. Resultados	56
4.1. Introducción	56
4.2. Resultados de las mediciones de resistividad	56
4.3. Resultados del modelamiento de los terrenos	60
4.4. Resultados de cálculos y mediciones de la RPT	60
4.5. Análisis de resultados	64
4.5.1. RPT de impulso	64
4.5.2. Efecto de LRM	72
4.5.3. LRM premezclado y LRM seco	77
4.5.4. Rangos de variación de la RPT con LRM	80
4.6. Programa computacional y App	81
5. Discusión	86

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	7
6. Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros	90
6.1. Conclusiones	90
6.2. Recomendaciones	92
6.3. Trabajos futuros	94
7. Glosario	95
Bibliografía	107
Anexos	107
A. Características de los LRM	108
A.1. LMR premezclado	108
A.1.1. Método de construcción	109
A.2. LMR seco	110
A.2.1. Método de construcción	112
B. Cotización de materiales	113
C. Variación porcentual de la RPT con LRM	114

Índice de figuras

2.1. Puesta a tierra elemental	18
3.1. Diagrama de la metodología del proyecto.	29
3.2. Método de cuatro puntos arreglo Wenner	31
3.3. Curva de resistividad típica	32
3.4. Telurómetro digital marca Sonel modelo MRU-200-GPS.	33
3.5. Modo típico de curva aparente de suelo de una capa.	34
3.6. Método gráfico de Sunde	35
3.7. Curva de resistividad del suelo	36
3.8. Configuraciones básicas de SPT aplicadas en cada terreno.	38
3.9. Coeficientes k_1 y k_2	41
3.10. Gráfica del método FOP.	45
3.11. Impedancia típica versus espaciado de sondas para el método FOP.	46
3.12. Medición de resistencia mediante el método de abrazadera	47
3.13. Ejemplo práctico del método de abrazadera	49
3.14. Pinzas de medición de RPT.	50
3.15. El principio de medir la RPT con dos pinzas	51
3.16. Determinación de los parámetros de una impulsión corta	52
3.17. Configuraciones básicas de SPT con LRM.	54
4.1. Direcciones para la medición de resistividad.	57
4.2. RPT de impulso vs resistividad de 1V	65
4.3. RPT de impulso con LRM vs resistividad de 1LRMV	65
4.4. RPT de impulso vs resistividad de 2VL	65
4.5. RPT de impulso con LRM vs resistividad de 2LRMV	65
4.6. RPT de impulso vs resistividad de 3VL	66
4.7. RPT de impulso con LRM vs resistividad de 3LRMV	66
4.8. RPT de impulso vs resistividad de 3VT	66

4.9. RPT de impulso con LRM vs resistividad de 3LRMVT	66
4.10. RPT de impulso vs resistividad de 6VR	67
4.11. RPT de impulso con LRM vs resistividad de 6LRMVR	67
4.12. RPT de impulso vs Diseño SPT en T1	69
4.13. RPT de impulso con LRM vs Diseño SPT en T1	69
4.14. RPT de impulso vs Diseño SPT en T2	69
4.15. RPT de impulso con LRM vs Diseño SPT en T2	69
4.16. RPT de impulso vs Diseño SPT en T3	70
4.17. RPT de impulso con LRM vs Diseño SPT en T3	70
4.18. RPT de impulso vs Diseño SPT en T4	70
4.19. RPT de impulso con LRM vs Diseño SPT en T4	70
4.20. RPT de impulso vs Diseño SPT en T7	71
4.21. RPT de impulso con LRM vs Diseño SPT en T7	71
4.22. RPT de impulso vs Diseño SPT en T8	71
4.23. RPT de impulso con LRM vs Diseño SPT en T8	71
4.24. RPT vs resistividad de 1V	73
4.25. RPT vs resistividad de 2VL	73
4.26. RPT vs resistividad de 3VL	73
4.27. RPT vs resistividad de 3VT	73
4.28. RPT vs resistividad de 6VR	74
4.29. RPT vs Diseño SPT en T1	75
4.30. RPT vs Diseño SPT en T2	75
4.31. RPT vs Diseño SPT en T3	76
4.32. RPT vs Diseño SPT en T4	76
4.33. RPT vs Diseño SPT en T7	76
4.34. RPT vs Diseño SPT en T8	76
4.35. Compacidad de LRM	79
4.36. Programa computacional de diseños de SPT.	82
4.37. Aplicación móvil de diseños de SPT.	82
4.38. Ejemplo de un diseño complejo de SPT.	85
A.1. LRM premezclado.	109
A.2. Instrucciones de construcción de LRM premezclado	110
A.3. LRM seco.	111
A.4. Instrucciones de construcción de LRM seco	112
B.1. Cotización de materiales.	113

Índice de tablas

2.1. Valores de resistividad medidos en el cantón Cuenca.	20
2.2. Valores de referencia para resistencia de puesta a tierra.	22
4.1. Mediciones de la resistividad del terreno 1 (T1).	57
4.2. Mediciones de la resistividad del terreno 2 (T2).	57
4.3. Mediciones de la resistividad del terreno 3 (T3).	58
4.4. Mediciones de la resistividad del terreno 4 (T4).	58
4.5. Mediciones de la resistividad del terreno 5 (T5).	58
4.6. Mediciones de la resistividad del terreno 6 (T6).	59
4.7. Mediciones de la resistividad del terreno 7 (T7).	59
4.8. Mediciones de la resistividad del terreno 8 (T8).	59
4.9. Resistividad de cada terreno.	60
4.10. Cálculos y mediciones de la RPT en T1.	61
4.11. Cálculos y mediciones de la RPT en T2.	61
4.12. Cálculos y mediciones de la RPT en T3.	62
4.13. Cálculos y mediciones de la RPT en T4.	62
4.14. Cálculos y mediciones de la RPT en T5.	63
4.15. Cálculos y mediciones de la RPT en T6.	63
4.16. Cálculos y mediciones de la RPT en T7.	63
4.17. Cálculos y mediciones de la RPT en T8.	64
4.18. Resumen de resultados del método de impulsión.	68
4.19. Resumen de resultados del efecto de LRM.	74
4.20. Precios unitarios de los materiales.	77
4.21. Resumen de la disminución de RPT con LRM.	78
4.22. Disminución de la RPT con LRM según la resistividad del terreno y diseño de SPT.	80

ÍNDICE DE TABLAS

11

C.1. Disminución porcentual de la RPT con LRM con varillas de 2,4m y conductor #2.	115
C.2. Disminución porcentual de la RPT con LRM con varillas de 1,8m y conductor #4/0.	116
C.3. Disminución porcentual de la RPT con LRM con varillas de 2,4m y conductor #4/0.	117

Resumen

El presente trabajo propone configuraciones de sistemas de puesta a tierra (**SPT**) para distintos valores de resistividad del terreno. Estas configuraciones se realizan tanto con materiales comunes (varillas y conductor) así como materiales de baja resistividad (**LRM**, del inglés Low-Resistivity Material). Se parte de la medición de la resistividad aparente de distintos terrenos, para posteriormente utilizar los modelos de suelo uniforme y de dos capas mediante el método gráfico para interpretar la resistividad. La resistividad permitirá calcular la resistencia de puesta a tierra (**RPT**) de las configuraciones a implementar.

Al emplear distintas configuraciones de **SPT** se medirá la **RPT**, mediante los métodos de caída de potencial, de abrazadera y de impulso. El primer método utiliza electrodos auxiliares y se mide con la malla de puesta a tierra desconectada de la red, el segundo método utiliza una pinza y se mide cuando la malla de puesta a tierra se encuentra conectada a la red, mientras que el tercer método simula la caída de un rayo.

En base a la combinación de cálculos y mediciones, y el uso de materiales **LRM** disponibles en el mercado local se determinan diferentes diseños de **SPT**. Además, se desarrollará un software que permitirá mostrar el diseño recomendado de puesta a tierra según la resistencia requerida.

Estos diseños se basan en la combinación de conductores y varillas, de longitudes y radios utilizados particularmente en nuestro país. Además, se muestran diseños alternativos utilizando **LRM** que se disponen en el mercado local. Con una herramienta informática el diseñador podrá disponer del costo referencial en función de los elementos que involucran una determinada propuesta de **SPT**. Esta herramienta será de utilidad para los ingenieros eléctricos, electricistas, investigadores o personas vinculadas al área de protecciones.

Abstract

The present work proposes configurations of grounding systems (SPT) for different values of ground resistivity. These configurations are made with both common materials (rods and conductor) as well as low resistivity materials (LRM, from English Low-Resistivity Material). It starts from the measurement of the apparent resistivity of different soils, to later use the uniform and two-layer soil models through the graphical method to interpret the resistivity. The resistivity will allow to calculate the grounding resistance (RPT) of the configurations to be implemented.

By using different configurations of SPT, the RPT will be measured, using the fall of potential, clamp-on and impulse methods. The first method uses auxiliary electrodes and is measured with the grounding mesh disconnected from the network, the second method uses a clamp and is measured when the grounding mesh is connected to the network, while the third method simulates the drop of a lightning bolt.

Based on the combination of calculations and measurements, and the use of materials LRM available in the local market, different designs of SPT are determined. In addition, software will be developed that will allow to show the recommended grounding design according to the required resistance.

These designs are based on the combination of conductors and rods, which lengths and radii are used particularly in our country. Also, alternative designs using LRM, that are available in the local market are shown. With a computer tool, the designer will be able to dispose of the referential cost based on the elements involved in a given SPT proposal. This tool will be useful for electrical engineers, electricians, researchers or people related to the area of protections.

Capítulo 1

Introducción

Este capítulo describe los objetivos, justificación y la importancia de realizar diseños de sistemas de puesta a tierra (SPT) adecuados. Inicialmente se describe el problema, los objetivos y contribuciones científicas de este trabajo.

1.1. Descripción general del problema

Los SPT constituyen una parte integral de los sistemas de energía eléctrica (instalaciones de transmisión y distribución). Garantizan la seguridad del personal y los equipos contra las corrientes de falla causadas por descargas atmosféricas, fallas de dispositivos o sobretensiones. Por lo tanto, un SPT efectivo es necesario para que cualquier corriente de falla se pueda descargar de manera efectiva y segura a la tierra [1].

En el Ecuador, la falta de normativa impide implementar configuraciones que consideran determinadas variables que pueden garantizar que los SPT operen en forma adecuada. Dentro de las variables que favorecen el diseño de un SPT, se tienen la resistividad del suelo, longitudes, radios de las varillas, conductor de tierra [2] o profundidad de enterramiento. Otro parámetro fundamental y que no suele ser considerado es la falta de uniformidad de los terrenos. Por ejemplo, terrenos de, más de una capa son considerados como de resistividad uniforme, por tanto esto afecta a las condiciones de diseño y al equipamiento que se busca proteger. Todos estos factores pueden propiciar diseños sobredimensionados o que no satisfagan las necesidades requeridas de resistencia a tierra [2].

Con el fin de reducir la resistencia del suelo a valores deseados, se suele incrementar el número de **conductores horizontales** (de malla) o varillas. Sin embargo, este procedimiento o “reducción física”, no siempre permite lograr este objetivo. Como alternativa se recomienda aumentar el radio del electrodo de tierra modificando el suelo circundante con material de baja resistividad (**LRM**, del inglés Low-Resistivity Material) (reducción química) [3], [4], [5].

La formulación comúnmente utilizada de la normativa IEEE Std. 80-2013¹ para el diseño de **SPT**, requiere de un cálculo extenso y pueden conducir a una infinidad de diseños. Puesto que esta norma está enfocada principalmente para la seguridad en la conexión a tierra de subestaciones de CA, precisa el cálculo de tensiones tolerables de paso y toque, sin embargo, para sistemas de distribución (puestas a tierra de transformadores o medidores residenciales), este factor no es requerido. De aquí la necesidad de establecer diseños prácticos de **SPT** sin la necesidad de recurrir a programas complejos que utilicen excesivas variables.

Los diseños recomendados se determinan en base a la combinación de cálculos y mediciones, y el uso de materiales **LRM** disponibles en el mercado local y serán presentados en un programa computacional. Por ello se espera que el programa proporcione diseños prácticos de puesta a tierra de forma que se obtenga la resistencia adecuada. A más de ello el diseñador podrá establecer el costo referencial del sistema idóneo para una instalación específica.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Diseñar un programa computacional que presente configuraciones de puesta a tierra incluyendo materiales de baja resistividad (**LRM**).

1.2.2. Objetivos específicos

- Conocer los parámetros que influyen en el diseño de los **SPT**.

¹IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding

- Establecer configuraciones de **SPT** mediante la aplicación de un conjunto de configuraciones propuestas para medir la resistencia a tierra y contrastar los resultados con los supuestos teóricos.
- Evaluar el comportamiento de las configuraciones propuestas adicionando materiales de baja resistividad.
- Elaborar un programa computacional para las configuraciones de puesta a tierra que incluya los costos de las soluciones planteadas.

1.3. Contribuciones

Los resultados de este proyecto permitirán contribuir con diseños de **SPT** que se determinan en base a la combinación de cálculos y mediciones, y el uso de materiales **LRM**.

Los beneficiarios de este trabajo serán ingenieros eléctricos, electricistas, estudiantes y personas en general relacionados con el sector eléctrico que requieran un **SPT** eficiente sin sobredimensionarlo.

1.4. Organización del documento

El Capítulo 1 presenta la descripción del problema y objetivos del trabajo. En el Capítulo 2 se muestra el estado del arte de los **SPT**. En el Capítulo 3 se da a conocer la metodología utilizada. En el Capítulo 4 se presenta los resultados obtenidos de las pruebas de campo y su análisis. En el Capítulo 5 se realiza la discusión de los resultados. Finalmente en el Capítulo 6 se establecen conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros.

Capítulo 2

Marco teórico referencial: Sistemas de puesta a tierra (SPT)

2.1. Introducción

En este capítulo se describe el estado del arte de los [SPT](#) y la aplicación de los [LRM](#) en los mismos.

2.2. Sistema de puesta a tierra (SPT)

Las puestas a tierra son comunes en todo el sistema eléctrico. Están presentes en casi todos los puntos del sistema eléctrico, esto incluye la estación generadora, las líneas de transmisión y los cables que distribuyen la energía eléctrica. La puesta a tierra más elemental satisface los requisitos para considerarse sistema. En la Figura [2.1](#) se ilustra un ejemplo relativo.

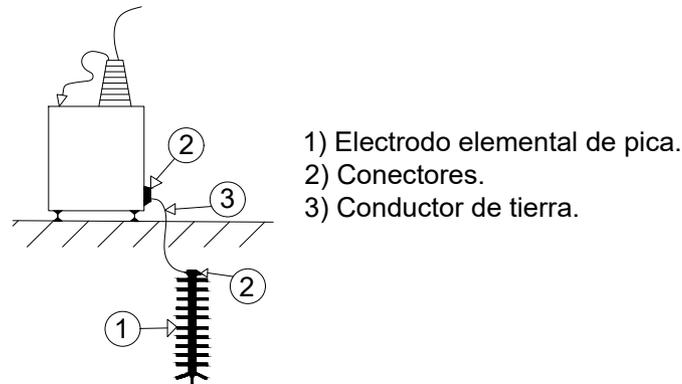


Figura 2.1: Puesta a tierra elemental [6].

La función primaria del **SPT** es proporcionar diversas rutas para derivar corrientes eléctricas hacia la tierra, o bien, establecer contacto con ella sin exceder los límites de cualquier equipo de operación evitando afectar la continuidad del servicio.

El uso de un **SPT** en varias formas y geometrías garantiza la seguridad de las personas y el funcionamiento fiable de los equipos eléctricos. Muchos investigadores han propuesto varias formas de encontrar el diseño óptimo del **SPT**, los autores en [7] realizan un análisis comparativo de tres configuraciones de mallas de puesta a tierra enterradas en un modelo de suelo de dos capas. Se diseñan mallas de conexión a tierra con espacios iguales y desiguales para cada forma y se encuentra que la malla rectangular con espacios desiguales da mejores resultados que otros diseños considerados. El estudio muestra que la malla rectangular tiene un valor mínimo de **RPT**.

2.3. Resistividad del terreno

La resistividad es un parámetro importante para aplicaciones de ingeniería como son el diseño y análisis de **SPT**, estudios de transitorios electromagnéticos, estudios de corrosión y diseño de protección catódica, estudios geológicos y arqueológicos y evaluación de la contaminación del suelo. Además, la resistividad del suelo se utiliza para la caracterización de materiales y la estimación de

parámetros del suelo como la porosidad, densidad, contenido de agua, salinidad y resistencia de los suelos [8].

Las necesidades de construir subestaciones en terrenos montañosos con disponibilidad de espacio reducido y con alta resistividad, dificultan el diseño de SPT efectivo. Por ello, en [9] los autores presentan un diseño optimizado de SPT en estas condiciones críticas.

Para el cálculo y diseño de un SPT es fundamental que se investigue la resistividad del terreno en la ubicación deseada de la conexión, para fijar la composición general y el grado de homogeneidad del suelo. Existen varias tablas en la literatura de ingeniería que muestran los rangos de resistividad para varios suelos y rocas como en [3], [10], [11], [12], [13], [14]. Sin embargo, no se recomienda estimar la resistividad basándose en la clasificación del terreno debido a que éstas dan solamente una aproximación, por lo que las pruebas de resistividad reales son imprescindibles [3], [15].

El efecto de la humedad, las sales disueltas y la temperatura tiene influencia en el valor de resistividad del suelo. Hasta cierto punto, la resistividad disminuye bruscamente con el aumento del contenido de humedad, del mismo modo, una pequeña cantidad de sal presente en la humedad produce una fuerte disminución de la resistividad. Con una disminución de la temperatura por debajo de 0°C, la resistividad aumenta bruscamente. Esto se debe a que la humedad presente en el suelo se congelará haciendo que el suelo esté completamente seco [16].

El presente proyecto se desarrolla en zonas rurales debido a que existen amplias zonas verdes en donde se pueden realizar las pruebas de campo con los elementos involucrados en un SPT. En el cantón Cuenca, se han desarrollado estudios que involucran la medición directa de la resistividad del suelo como en [17], [18] y [19] donde se obtuvieron los valores que se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Valores de resistividad medidos en el cantón Cuenca.

Resistividad medida ($\Omega \cdot m$)								
5,48	11,53	13,02	13,17	13,45	13,61	13,95	14,05	14,16
14,87	14,88	14,99	15,63	15,94	16,24	16,34	16,41	16,91
17,06	17,12	17,18	19,49	19,86	23,80	24,10	27,10	29,40
49,54	103,16	104,34	106,41	110,68	120,28	144,05	202,12	247,57

2.4. Interpretación de las medidas de resistividad del suelo

Explicar la resistividad aparente obtenida en el campo puede ser la parte más difícil del procedimiento de medición. El objetivo básico es llegar a un modelo de suelo que se aproxime al suelo real. Debe tenerse en cuenta que el modelo de suelo es solo una aproximación de las condiciones reales del suelo y es imposible lograr una combinación perfecta [3].

Los modelos de resistividad más comunes son el modelo de suelo homogéneo y de dos capas. En ocasiones reales, el suelo homogéneo rara vez existe, y el resultado de la medición que usualmente se obtiene es resistividad equivalente o resistividad aparente. El modelo de dos capas suele ser una buena aproximación de muchas estructuras de suelo, mientras que los modelos de suelo multicapa pueden usarse para condiciones de suelo más complejas. La interpretación de las mediciones de resistividad puede realizarse manualmente o mediante técnicas de análisis informático [3], [11].

Se han realizado y reportado en la literatura estudios sobre la interpretación de la resistividad aparente del suelo, tal como en [20] donde los autores desarrollaron una metodología para modelos **biestratificados** de suelos para ser aplicados en el estudio y análisis de mallas de **SPT** aplicados a los sectores industriales. En [21] se utilizan el método de optimización para encontrar el valor de resistividad equivalente del suelo. Mientras que, en [22] se presenta un modelo teórico para el análisis de **SPT** ubicados en suelos multicapa en los que se incrustan heterogeneidades arbitrarias (volúmenes finitos).

La metodología del modelo terrestre bi-estratificado se puede utilizar para la investigación y el análisis

2.5. Resistencia de puesta a tierra (RPT)

La resistencia del suelo se considera como el factor principal para determinar la geometría de cualquier SPT, ya que es el parámetro que mide cuánto resiste el suelo al flujo de corriente de falla en la tierra [5], [23].

El desarrollo de un electrodo de tierra de baja resistencia es un requisito fundamental para satisfacer las solicitudes de los alimentadores de un sistema eléctrico de distribución, pues la ruta de retorno de falla es a través de la tierra. Cuanto menor es la RPT, los requisitos de operatividad se cumplen satisfactoriamente.

Por otro lado, las instalaciones con niveles más bajos de corriente de falla a tierra no requieren un valor tan bajo de RPT como los sistemas más grandes con niveles más altos de corriente de falla a tierra. La RPT del sistema de menos de 1 ohmio puede obtenerse mediante el uso de varios electrodos individuales conectados entre sí. Una resistencia tan baja se requiere para subestaciones grandes, líneas de transmisión o estaciones generadoras. Las resistencias en el rango de 1 a 5 ohmios se encuentran generalmente adecuadas para subestaciones de plantas industriales y edificios, así como de grandes instalaciones comerciales [10].

Por otro lado, existen normas por parte de cada empresa distribuidora en donde se establecen los límites del valor de RPT. En el caso de la empresa distribuidora local EERCS¹ S.A., el límite máximo es de 25 Ω para distribución y estructuras de subtransmisión [24]. Para la Empresa Eléctrica de Quito S.A. [25] se establece que el valor de RPT no debe sobrepasar los 25 Ω para instalaciones aéreas y 5 Ω para instalaciones subterráneas. En [26] se describe el caso de varias empresas de distribución colombianas, y se establece que el valor de la RPT no será mayor de 25 Ω en acometidas domiciliarias, 20 Ω en estructuras de líneas de distribución y 10 Ω en subestaciones de media tensión. Así mismo para la Empresa Eléctrica Regional del Sur S.A. establece que la RPT tiene un valor máximo de 10 Ω para su conexión con el neutro en alimentadores primarios, centros de transformación, juegos de pararrayos, entre otros [27].

En razón a que la RPT es un indicador esencial en un SPT, la Tabla 2.2 muestra

¹Empresa Eléctrica Regional Centro Sur

valores referenciales que pueden ser considerados, presentados por el reglamento técnico de instalaciones eléctricas (RETIE) [28] del ministerio de minas y energía de Colombia. Estos valores son adoptados de las normas técnicas IEC 60364-4-442 [29], ANSI/IEEE 80 [3], NTC 2050 [30] y NTC 4552 [31].

Tabla 2.2: Valores de referencia para resistencia de puesta a tierra.

# Ítem	Aplicación	Valores máximos de RPT
1	Estructuras y torrecillas metálicas de líneas o redes con cable de guarda.	20 Ω
2	Subestaciones de alta y extra alta tensión.	1 Ω
3	Subestaciones de media tensión.	10 Ω
4	Protección contra rayos.	10 Ω
5	Punto neutro de acometida en baja tensión.	25 Ω
6	Redes para equipos electrónicos o sensibles.	10 Ω

Cabe mencionar que el valor de 25 Ω se indica en el NEC² [32], donde se aplica a la resistencia máxima para un solo electrodo que consiste en una varilla, tubería o placa. Si se obtiene una mayor resistencia para un solo electrodo, se requiere un segundo electrodo de cualquiera de los tipos especificados en el NEC.

Diferentes estándares, como el Estándar IEEE 80-2013³ [3] y el Estándar IEEE 665-1995⁴ [33] recomiendan el uso de fórmulas empíricas simples para analizar los parámetros del SPT. Estas fórmulas empíricas se obtienen en base a un tratamiento aproximado del SPT utilizando análisis teóricos, cálculos numéricos y pruebas de simulación [11].

2.6. Tratamiento del suelo para disminuir la resistividad

Se han propuesto varios métodos y materiales para aliviar el problema de la alta resistividad del suelo y el alto valor de la resistencia del terreno [34]. En las investigaciones analizadas [1], [4], [5], [16], [23], [34], [35], [36], [37], [38], [39], [40], se busca que el LRM posea ciertas características para mejorar aún más el rendimiento del propio SPT, por ejemplo la capacidad de retener la humedad

²National Electrical Code

³IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding

⁴IEEE Guide for Generating Station Grounding

en el suelo en las proximidades de la varilla de tierra, cambio del tipo de suelo circundante para que sea menos resistente o crear una capa de protección para evitar la corrosión de la varilla de tierra [35]. Por lo tanto, es importante elegir un material de mejora adecuado para los propósitos del SPT, según el tipo de suelo y el clima del área [23].

Actualmente, la bentonita es utilizada ampliamente como LRM y se recomienda en el Estándar IEEE 80-2013⁵ [3]. Si se agrega a una cantidad suficiente de agua, la bentonita puede absorber hasta cinco veces su peso en agua. Además, puede aumentar hasta 13 veces su volumen seco, así mismo es capaz de adherirse a casi cualquier superficie que toque [1], [5], [35], [37], [38], [41].

Una revisión realizada en [1] indica que la bentonita como LRM se desempeña bien en presencia de agua con una disminución de la resistencia de hasta el 60%, siendo un material químicamente inerte, por lo tanto, un agente no corrosivo para electrodos metálicos.

Además de la bentonita, se han utilizado productos naturales como la zeolita, la perlita y la vermiculita [23], y productos químicos como el sodio, potasio, cal y magnesio [36]. Estos tratamientos son ventajosos cuando las varillas largas no son prácticas debido a los estratos de roca u otras obstrucciones a la conducción profunda.

En [42] los autores analizan el comportamiento de la arena seca, la bentonita y el cemento en diferentes condiciones de voltaje. Demostraron que al aplicar corriente alterna al contenedor lleno de arena y bentonita, parte del material se inflaba del contenedor durante el experimento y después de la prueba, se encontró la formación de fulgurita. Siendo así que, el comportamiento de los materiales depende en gran medida de la forma de onda de voltaje aplicado y la duración de la misma. Además, se observa que el tiempo de ruptura en el caso de la bentonita es considerablemente menor que el del cemento. Como las fulguritas tienen una resistencia muy alta en comparación con el material original, los comportamientos resistivos generales de los electrodos de tierra pueden cambiar en presencia de corrientes de fuga en los sistemas de media y alta tensión.

⁵IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding

En [39] se presenta una metodología para la evaluación de la RPT, en diversas condiciones meteorológicas de los SPT integrados en el suelo natural, así como en los compuestos de mejora del suelo, utilizando las redes neuronales artificiales (ANN, del inglés Artificial Neural Networks). Realizan pruebas con 6 diferentes tipos de mejoradores de suelo: suelo natural que consta de una varilla que se coloca como referencia, hormigón conductor, bentonita, compuesto químico A, compuesto químico B y compuesto químico C. Se realiza mediciones durante un año, observándose que la RPT tiende a aumentar en épocas de sequía.

En [43], [44] se analizan las características de los materiales de mejora, sulfato de cobre ($CuSO_4$) y cloruro de sodio ($NaCl$) mezclados con suelos en condiciones de impulso. Demostrando que el porcentaje más efectivo de $CuSO_4$ para reducir la resistividad de la arena con un 5% de contenido de agua es de 2.5%. Además, encuentran que las mezclas de arena de $NaCl$ tienen mejor conductividad que las mezclas de arena de $CuSO_4$ en condiciones de alto impulso.

En [45], los autores realizaron pruebas de campo de electrodos de puesta a tierra horizontales y electrodos de anillo horizontal con y sin LRM en un rango de resistividad del suelo de $700\Omega \cdot m$ a $1400\Omega \cdot m$ aplicando una corriente de impulso en el rango de $8kA$ a $34kA$. Obtuvieron una disminución de la resistencia entre 21% a 73.4% según el nivel de LRM utilizado, indicando además que el diámetro efectivo es de $20cm$. Todo esto con relación al SPT que no tiene LRM. Demostraron que mientras la resistividad del suelo es más alta, el efecto del LRM es más obvio. Así también, que el LRM es más efectivo en dispositivos de conexión a tierra simples que en SPT complejos.

En [35] se analiza el comportamiento de LRM de bentonita en tres sitios diferentes, llegando a la conclusión de que el LRM obtiene mejores resultados en el terreno con mayor resistividad. Determinaron, además, que la RPT en cada varilla fluctuó a lo largo del año de prueba debido a las variaciones estacionales.

Como se puede consultar en [38] se realizaron pruebas con la bentonita como LRM, logrando una reducción de 36% por varilla. Sin embargo, sólo se probaron las varillas de puesta a tierra y las resistividades en todos los sitios de prueba fueron muy bajos ($37\Omega \cdot m$, $75\Omega \cdot m$ y $107\Omega \cdot m$). Además, el efecto corrosivo de la bentonita no fue considerado.

En [40] se desarrolla LRM mediante el uso de productos químicos tales como bentonita, arcilla de bentonita, agua, arena de desierto, $NaCl$, $MgSO_4$, $CuSO_4$ y $CaCl_2$. La combinación de estos diferentes materiales puede utilizarse para la reducción de la RPT. Todos los análisis se estudiaron mediante pruebas de laboratorio. Se establece que la arena del desierto posee un valor de resistividad extremadamente alto, pero se reduce drásticamente a $4,3 \Omega \cdot m$ con la adición de agua y algo de sal. Sin embargo, esta composición no retiene el agua, ya que a temperatura ambiente la humedad se evapora en un par de días, dejando una muestra de tipo de roca sólida con una resistividad muy alta. Finalmente demostraron que en terrenos con resistividad superiores a $250 \Omega \cdot m$ se puede reducir la RPT en un 40%, y cuando la resistividad del terreno es superior a $300 \Omega \cdot m$ se puede reducir la RPT aproximadamente un 50%.

Materiales como la zeolita, la perlita y la vermiculita [23] se emplean ampliamente en el sector agrícola como LRM y tienen características similares a las de la bentonita. El análisis establece que la zeolita, la perlita y la vermiculita tienen la capacidad de retener la humedad y es muy útil para aumentar la efectividad del SPT. Sin embargo, cada uno de los materiales tiene sus propios inconvenientes y limitaciones. Por ejemplo, la vermiculita, a pesar de ser capaz de poseer un alto porcentaje de capacidad de retención de agua que es comparable con la bentonita, tiene un bajo porcentaje de porosidad. Mientras que, en el caso de la perlita, exhibe una densidad aparente relativamente baja y una baja capacidad de retención de agua, lo que hace que este material no pueda funcionar bien como un LRM. Por último, la zeolita solo posee un valor óptimo en la capacidad de retención de agua, pero funciona perfectamente en cualquier tipo de suelo y condición climática. Como resultado, se indica que entre los tres LRM, la zeolita es el material agrícola más adecuado que se puede utilizar para los propósitos del SPT.

En [1] los autores han diseñado una tabla en donde se puede observar el porcentaje de reducción de la RPT cuando se utiliza diferentes LRM, mientras que en [46] se observa el comportamiento del LRM a lo largo del tiempo. Finalmente, los autores en [9] presentan técnicas que incluyen electrodos químicos, alfombrillas de alambre rectangulares auxiliares y materiales para mejorar la tierra, para lograr la resistencia deseada del SPT en suelos de alta resistividad.

2.7. Impedancia de impulso

El comportamiento del impulso de rayo de los electrodos de puesta a tierra juega un papel importante en la protección contra rayos de los sistemas de potencia [47]. Los SPT para protección contra rayos deben probarse con corrientes cuyas características de tiempo sean similares a los de los rayos. En tal caso, la medición de la impedancia de impulso puede ser una parte importante del diseño o análisis de un SPT [48]. Por otro lado, bajo suficientes corrientes de impulso rápido de gran magnitud, se produciría la ionización del suelo [49], [50], [51].

El estudio de los efectos de varios factores en la respuesta de los SPT muestra que el rendimiento de impulso de los SPT depende de tres factores: la geometría del electrodo de puesta a tierra, las propiedades eléctricas del suelo y la corriente del rayo (forma de onda) o la intensidad de corriente [52].

Los autores en [53] implementaron SPT en tres sitios con diferente resistividad del suelo. Realizaron mediciones con un generador de impulsos, determinando que la RPT del suelo de baja resistividad era constante y la RPT del suelo de alta resistividad disminuía con el aumento de las magnitudes de corriente, lo que sugiere un proceso de ionización del suelo no lineal.

En [44] se realizaron experimentos utilizando arcilla húmeda y arena mezcladas con cantidades controladas de $NaCl$ para obtener una variedad de materiales de baja resistividad. Se encontró que, en condiciones de impulso, la resistividad aparente de la arcilla húmeda disminuyó con el aumento de las magnitudes de corriente, lo que sugiere un efecto de temperatura o un proceso de ionización del suelo no lineal.

En [54] se prueban cuatro SPT diferentes a frecuencia industrial y a altas corrientes de impulso. Se encontró que los valores de la resistencia de impulso para todos los SPT son inferiores a los de la resistencia de corriente continua (R_{CC}).

En [55] los autores reportan los resultados de un estudio experimental de la característica de impulso de electrodos de tierra prácticos, donde determinaron que la resistencia al impulso disminuye con la magnitud de la corriente debido a la ionización del suelo.

En [56] se presentan métodos experimentales y analíticos para la evaluación de la impedancia de impulso. Los resultados obtenidos a través de mediciones in situ proporcionaron la impedancia de puesta a tierra de impulso y la relación impedancia-resistencia de tierra, demostrando que el modelo analítico que proponen se puede utilizar para una estimación rápida de la impedancia de impulso.

Capítulo 3

Materiales y metodología

3.1. Introducción

En el presente proyecto de desarrollo se utiliza el método deductivo con el objeto de partir de aspectos generales de la investigación para llegar a aspectos particulares [57]. El proyecto se ha dividido en los siguientes pasos tal como se observa en el diagrama de la Figura 3.1.

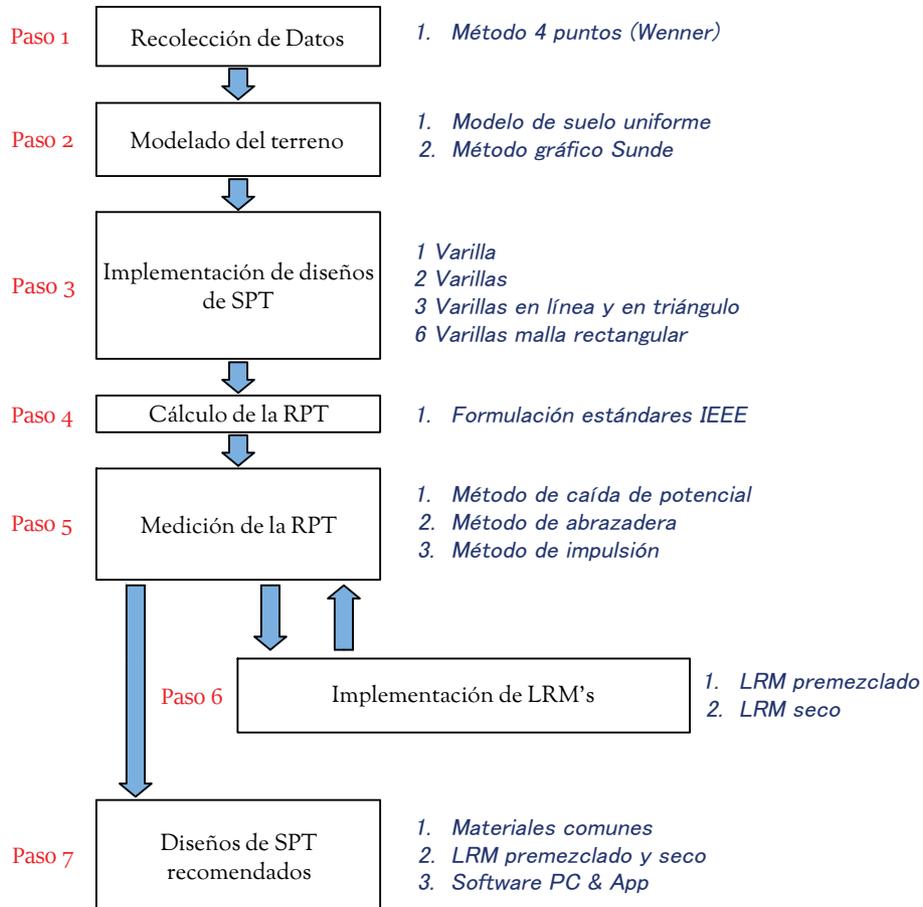


Figura 3.1: Diagrama de la metodología del proyecto.

3.2. Paso 1: Recolección de datos

En la primera fase del proyecto se realiza la recolección de datos [58], específicamente la medición de la resistividad de los terrenos mediante el uso de un telurómetro. Los valores de resistividad están comprendidos entre $1 \Omega \cdot m$ a $250 \Omega \cdot m$, esto con el propósito de realizar pruebas de campo en diferentes valores de resistividad del suelo utilizando las mismas configuraciones de SPT.

Cada configuración se realizará con materiales comunes (varillas y conductor de cobre) y con LRM, así mismo se analizará la variación de la RPT con la medición del impulso tipo rayo, esto proporcionará una comparación directa sobre el efecto de la resistividad del suelo.

3.2.1. Problemas de la investigación de campo

Este estudio se limita a ocho terrenos con diferente resistividad del suelo debido a que los materiales involucrados, pruebas y mediciones de campo tienen un alto costo y dificultad. En la literatura se observan pruebas de campo de SPT en terrenos con distintos valores de resistividad, por ejemplo en [17], [53], [59] se miden 3 terrenos, en [60] y [61] se miden 4 terrenos, en [62] se miden 5 terrenos, en [5] se miden 9 terrenos y en [63] se miden 11 terrenos.

Otro factor a considerar es que los SPT dependen en gran medida del cobre. Debido a su valor como chatarra, el cobre es un material atractivo en el comercio irregular [64], [65]. Para evitar el robo y el vandalismo de los materiales utilizados, se realizan las pruebas de campo en zonas rurales de la ciudad de Cuenca (específicamente de la parroquia de Sinincay), en donde los autores pueden mantener resguardados los materiales en el transcurso de este estudio.

Para el cálculo y diseño de un SPT es fundamental que se investigue la resistividad del terreno en la ubicación deseada de la conexión, para determinar el grado de homogeneidad del suelo. Existen varias tablas en la literatura, como en manuales y publicaciones de ingeniería [3], [10], [11], [12] que muestran los rangos de resistividad para varios suelos y rocas. Sin embargo, no se recomienda estimar la resistividad basándose en la clasificación del terreno debido a que estas dan solamente una aproximación, por lo que las pruebas de resistividad reales son imprescindibles [3].

Con las mediciones se determina si existen cambios relevantes de la resistividad con respecto a la profundidad. Típicamente, hay varias capas, cada una de las cuales tiene una resistividad diferente. A menudo, también ocurren cambios laterales, pero en comparación con los verticales, estos suelen ser más graduales. El número de lecturas debe ser mayor cuando las variaciones son grandes, especialmente si algunas lecturas son tan altas como para sugerir un posible problema de seguridad [3].

Existen mapas de suelos, formaciones vegetales, aptitudes agrícolas, ecológicos, entre otros, así como el software QGIS que es un sistema de información geográfica donde se visualiza clasificaciones de suelos; sin embargo, estos no definen la resistividad del terreno y presentan una clasificación muy general. En [17] utilizan mapas geológicos del Ecuador generados por el instituto geográfico militar (IGM) para determinar la composición del suelo, sin embargo, la medición de la resistividad es necesaria.

3.2.2. Método Wenner

El método Wenner es un buen método para medir la resistividad aparente de terrenos extensos. Las cuatro picas auxiliares se instalan en el suelo con una profundidad de b y separadas por un intervalo a (en línea recta) (ver Figura 3.2). La corriente de prueba (I) pasa entre las dos picas externas y el potencial (V) entre las dos picas internas se mide con un potenciómetro o voltímetro de alta impedancia. Por tanto, la relación V/I da la resistencia (R) en ohmios [66].

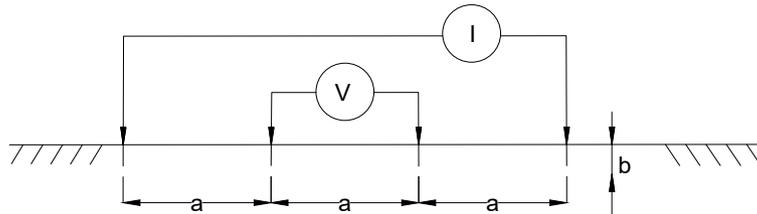


Figura 3.2: Método de cuatro puntos arreglo Wenner [66].

Mediante la ecuación 3.1 se calcula la resistividad aparente del terreno:

$$\rho = \frac{4\pi aR}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2+4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2+b^2}}} \quad (3.1)$$

donde:

ρ : resistividad aparente del terreno, [$\Omega \cdot m$]

R : resistencia medida del terreno, [Ω]

a : distancia entre picas adyacentes, [m]

b : profundidad a la que se entierra la pica, [m]

Teóricamente, los electrodos deben ser contactos puntuales o electrodos hemisféricos de radio b . Sin embargo, en la práctica, generalmente se colocan cuatro picas en una línea recta a intervalos a , accionadas a una profundidad no superior a $0,1a$. Entonces, el usuario puede asumir $b = 0$ y la ecuación 3.1 se convierte en:

$$\rho = 2\pi aR \quad (3.2)$$

Un conjunto de lecturas tomadas con diferentes espaciamentos de las sondas proporciona un conjunto de resistividades que, cuando se traza contra el espaciamento, indica si hay capas distintas de suelo o roca y da una idea de sus respectivas resistividades y profundidad (Figura 3.3).

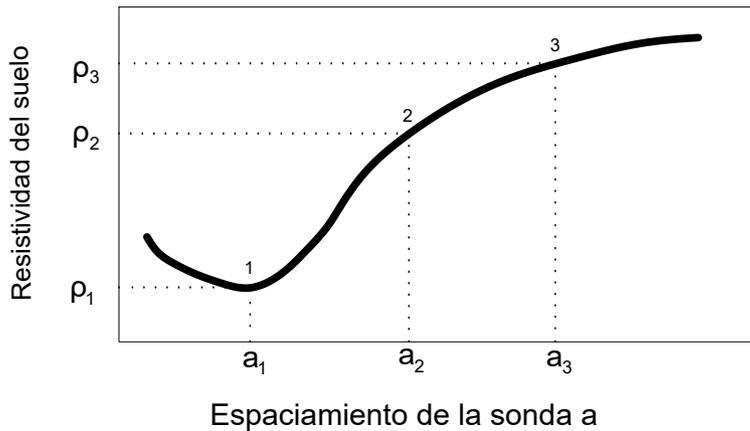


Figura 3.3: Curva de resistividad típica [11].

Es ventajoso tomar mediciones a lo largo de varios perfiles alrededor del área de interés para detectar cambios laterales en la resistividad del suelo, así como para determinar cualquier posible efecto de interferencia en las mediciones debidas a objetos conductores cercanos. Otra manera de ganar la confianza de que los objetos conductores en la tierra no afectan a las mediciones es repetir la misma medición en la misma ubicación, pero 90° con respecto a la primera. En este caso los valores medidos deben correlacionarse [66].

3.2.3. Información de Campo

La recolección de datos se lo realiza en terrenos rurales que son ideales para realizar las mediciones de resistividad. Estas se realizan con el telurómetro digital marca Sonel modelo MRU-200-GPS que se observa en la Figura 3.4. Con este equipo digital se obtiene la resistividad en ohmios-metro mediante el método de cuatro puntos arreglo Wenner especificado en la normativa IEEE 80-2013¹ [3].



Figura 3.4: Telurómetro digital marca Sonel modelo MRU-200-GPS.

3.3. Paso 2: Modelado del terreno

Con las mediciones de las resistividades aparentes de los terrenos obtenidas en el paso 1, se procede a modelar cada terreno para obtener su resistividad. Para variaciones moderadas se utiliza el modelo de suelo uniforme y para variaciones notables de la resistividad con respecto a la profundidad se utiliza el modelo de suelo de dos capas.

¹IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding

3.3.1. Modelo de suelo uniforme

Este modelo debe ser usado cuando hay una variación moderada en la resistividad aparente como se muestra en la Figura 3.5. En condiciones de suelo homogéneas, este modelo puede ser moderadamente preciso [3], [67].

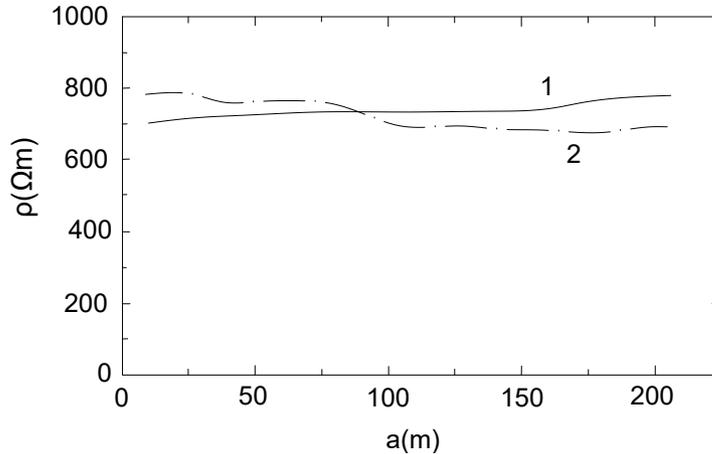


Figura 3.5: Modo típico de curva aparente de suelo de una capa.

Cuando el contraste entre las diferentes resistividades de capa es moderado, se puede usar un valor medio de resistividad del suelo como primera aproximación o para establecer el orden de magnitudes. La resistividad uniforme aproximada del suelo puede obtenerse tomando una media aritmética de los datos de resistividad aparente medida como se muestra en la ecuación 3.3.

$$\rho_{a(av1)} = \frac{\rho_{a(1)} + \rho_{a(2)} + \rho_{a(3)} + \dots + \rho_{a(n)}}{n} \quad (3.3)$$

donde:

$\rho_{a(1)}, \rho_{a(2)}, \rho_{a(3)} \dots \rho_{a(n)}$: resistividades medidas, obtenidas a diferentes espacios en el método Wenner, [$\Omega \cdot m$].

n : número de mediciones.

Normalmente, las resistividades observadas varían cuando se trazan en función del espaciado de la sonda. Las grandes variaciones en el espaciado de las sondas (una variación de más del 30% de la media aritmética) indican que la tierra no es uniforme y se debe utilizar un modelo de suelo de dos capas [13].

3.3.2. Modelo de suelo de dos capas por método gráfico Sunde

En este método, el gráfico de la Figura 3.6 se utiliza para acoplar un modelo de dos capas, fundamentándose con los datos de prueba del método Wenner.

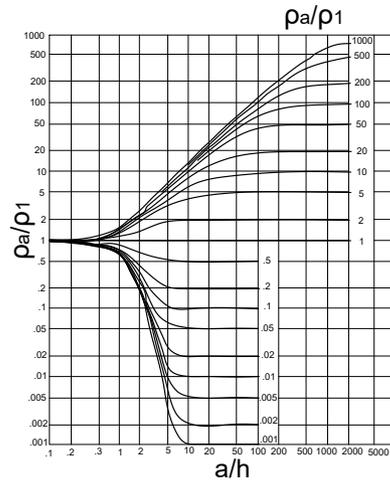


Figura 3.6: Método gráfico de Sunde [3].

Los valores de ρ_1 y ρ_2 se adquieren trazando las mediciones de resistividad. En la Figura 3.7 se observa la curva trazada de la resistividad de terreno con los datos del terreno tipo uno de la Tabla E2 de la normativa IEEE 80-2013 [3].

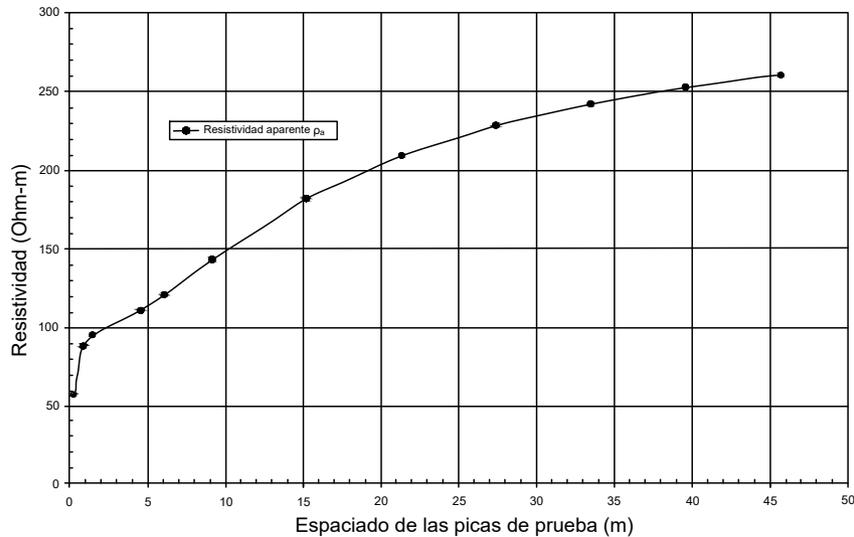


Figura 3.7: Curva de resistividad del suelo [3].

Para obtener h se realiza lo siguiente [3]:

- En el eje y representar la curva de resistividad aparente, y en el eje x el espaciado entre las picas de prueba.
- Con la curva obtenida en a) se valora ρ_1 y ρ_2 .
- Determinar ρ_2/ρ_1 , y en el gráfico Sunde seleccionar una curva que coincida estrechamente.
- Seleccionar el valor de ρ_a/ρ_1 en la curva ρ_2/ρ_1 .
- En el eje de abscisas establecer el valor de a/h .
- Calcular ρ_a multiplicando el valor obtenido en d) por ρ_1 .
- Determinar el espaciado de las picas de prueba correspondiente en el gráfico de resistividad aparente de a).
- Calcular h , utilizando la separación de las picas adecuada, a .

Un ejemplo del uso de este método se puede observar en la sección 13.4.2.2 “Modelo de suelo de dos capas por el método gráfico” de la normativa IEEE 80-2013 [3]. Cabe mencionar que de los ocho pasos que se indica en la normativa, para este proyecto se utilizan los primeros seis, de donde se obtiene la resistividad aparente de cada terreno, dato que posteriormente se requiere para el cálculo de la RPT.

3.4. Paso 3: Implementación de diseños de SPT

En la tercera fase del proyecto se implementan un conjunto de configuraciones de puesta a tierra en los terrenos medidos (ver Figura 3.8). Debido a que los materiales involucrados, pruebas y mediciones de campo tienen un alto costo y dificultad, las configuraciones se limitan hasta 3 varillas en los terrenos 1,2,3,4,7 y 8; y, hasta 6 varillas en los terrenos 5 y 6. Además, se eligen estas configuraciones debido a que se puede contrastar los valores medidos de RPT con los cálculos de las ecuaciones desarrolladas previamente y publicadas en la literatura [3], [10], [63].

Así mismo, en la literatura se observan varias pruebas de campo con distintas configuraciones, tales como en [53] donde se instala una malla de $2 \times 2 m$ en tres terrenos de distinta resistividad. En [62] se instalan 5 varillas de forma individual en cada uno de los 5 terrenos de distinta resistividad y en [68] realiza una variación de varillas de 3 cilindros con longitud fija ($l = 50 cm$).

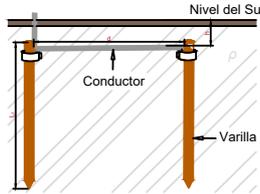
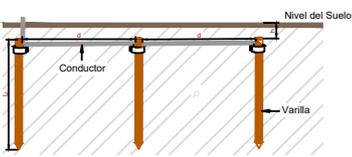
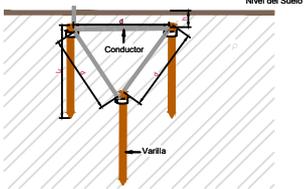
Código de configuración	Representación gráfica	Terrenos
1V		Terreno 1 Terreno 2 Terreno 3 Terreno 4 Terreno 7 Terreno 8
2VL		Terreno 1 Terreno 2 Terreno 3 Terreno 4 Terreno 7 Terreno 8
3VL		Terreno 1 Terreno 2 Terreno 3 Terreno 4 Terreno 7 Terreno 8
3VT		Terreno 1 Terreno 2 Terreno 3 Terreno 4 Terreno 7 Terreno 8
6VR		Terreno 5 Terreno 6

Figura 3.8: Configuraciones básicas de SPT aplicadas en cada terreno.

El código de cada configuración se detalla a continuación:

- **1V:** Una varilla colocada en forma vertical.

- **2VL:** Dos varillas conectadas en línea.
- **3VL:** Tres varillas conectadas en línea.
- **3VT:** Tres varillas conectadas en forma triangular.
- **6VR:** Seis varillas conectadas formando una malla rectangular.

Los materiales para cada configuración involucran varillas de cobre con longitud (L_r) de $1,80m \times 5/8"$, separadas entre sí a una distancia (d) de $3,80m$. El conductor de cobre trenzado desnudo #4AWG se entierra a una profundidad (h) de $0,25m$.

3.5. Paso 4: Cálculo de la resistencia de puesta a tierra (RPT)

A continuación, se presenta la formulación para calcular la RPT de los diseños de SPT, cuyas ecuaciones se encuentran en los estándares IEEE 80-2013 [3] y 142-2007 [10], ecuaciones adicionales se toman de la investigación realizada en [63].

3.5.1. Resistencia a tierra de una varilla

La RPT para la configuración de una varilla en disposición vertical (ver configuración 1V de la Figura 3.8) puede calcularse mediante la ecuación (3.4) desarrollada por Dwight (Tabla 4-5 del estándar IEEE 142-2007 [10]).

$$R = \frac{\rho}{2\pi L_r} \left(\ln \frac{4L_r}{b} - 1 \right) \quad (3.4)$$

donde:

- ρ : resistividad del terreno, [$\Omega \cdot m$]
- L_r : longitud de la varilla, [m]
- b : radio de la varilla, [m]

3.5.2. Resistencia a tierra de la conexión de dos varillas

El cálculo de la RPT para dos y tres varillas desarrollado en [63], a diferencia de las ecuaciones de Dwight, consideran el efecto de la RPT del conductor.

La RPT de dos varillas (ver configuración 2VL de la Figura 3.8) se calcula mediante la ecuación (3.5). R_1 , R_2 y R_m se obtienen mediante las ecuaciones (3.6), (3.7) y (3.8) respectivamente.

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m} \quad (3.5)$$

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi d} \left[\ln \left(\frac{2d}{a'} \right) + 4k_1 - k_2 \right] \quad (3.6)$$

$$R_2 = \frac{\rho}{4\pi L_r} \left[\ln \left(\frac{4L_r}{b} \right) - 1 + \frac{8k_1 \times L_r}{d} (\sqrt{2} - 1)^2 \right] \quad (3.7)$$

$$R_m = R_1 - \frac{\rho}{\pi d} \left[\ln \left(\frac{L_r}{\sqrt{h \times 2a}} \right) - 1 \right] \quad (3.8)$$

donde:

ρ : resistividad del terreno, [$\Omega \cdot m$]

L_r : longitud de la varilla, [m]

R_1 : resistencia a tierra del conductor, [Ω]

R_2 : resistencia a tierra de las varillas, [Ω]

R_m : resistencia mutua entre la malla y las varillas, [Ω]

R_g : resistencia total del sistema, [Ω]

d : distancia de separación entre dos varillas, $d > L_r$, [m]

h : profundidad de enterramiento del conductor, [m]

a : radio del conductor, [m]

a' : es a para el conductor en la superficie de la tierra, [m] ó

a' : es $\sqrt{a \cdot 2h}$ para conductores enterrados a una profundidad h , [m]

k_1 y k_2 : coeficientes [véase la Figura 3.9]

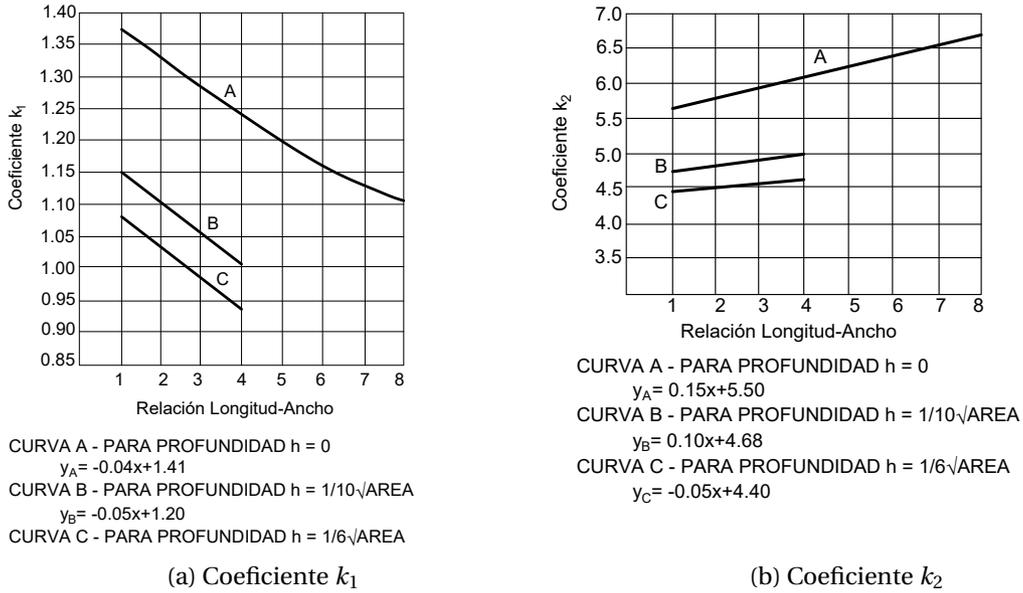


Figura 3.9: Coeficientes k_1 y k_2 [3].

Para el proceso de cálculo de la RPT del presente estudio, se utilizan las ecuaciones (3.9) y (3.10) obtenidas de las curvas B de la Figura 3.9 para k_1 y k_2 respectivamente.

$$k_1 = -0,05 \left(\frac{L_x}{L_y} \right) + 1,20 \tag{3.9}$$

$$k_2 = 0,10 \left(\frac{L_x}{L_y} \right) + 4,68 \tag{3.10}$$

donde:

- k_1 y k_2 : son los coeficientes
- L_x : longitud máxima de los conductores de malla en x, largo, [m]
- L_y : longitud máxima de los conductores de malla en y, ancho, [m]

Según [63], $x = 1$ para las configuraciones de dos varillas conectadas linealmente (3.5.2), tres varillas conectadas linealmente (3.5.3) y tres varillas conectadas en forma triangular (3.5.4).

3.5.3. Resistencia a tierra de la conexión de tres varillas en línea

La RPT total del sistema para las configuraciones de tres varillas en disposición lineal (ver configuración 3VL de la Figura 3.8) se obtiene mediante la ecuación (3.5). En este caso, R_1 , R_2 y R_m se establecen mediante las ecuaciones (3.11), (3.12) y (3.13) respectivamente.

$$R_1 = \frac{\rho}{2\pi d} \left[\ln \left(\frac{4d}{a'} \right) + 4k_1 - k_2 \right] \quad (3.11)$$

$$R_2 = \frac{\rho}{6\pi L_r} \left[\ln \left(\frac{4L_r}{b} \right) - 1 + \frac{4k_1 \times L_r}{d} (\sqrt{3} - 1)^2 \right] \quad (3.12)$$

$$R_m = R_1 - \frac{\rho}{2\pi d} \left[\ln \left(\frac{L_r}{\sqrt{h \times 2a}} \right) - 1 \right] \quad (3.13)$$

donde:

ρ : es la resistividad del terreno, [$\Omega \cdot m$]

L_r : es la longitud de la varilla, [m]

R_1 : es la resistencia a tierra del conductor, [Ω]

R_2 : es la resistencia a tierra de las varillas, [Ω]

R_m : es la resistencia mutua entre la malla y las varillas, [Ω]

d : es la distancia de separación entre dos varillas, $d > L_r$, [m]

h : es la profundidad de enterramiento del conductor, [m]

a : es el radio del conductor, [m]

a' : es a para el conductor en la superficie de la tierra, [m] ó

a' : es $\sqrt{a \cdot 2h}$ para conductores enterrados a una profundidad h , [m]

k_1 y k_2 : son los coeficientes [véase la Figura 3.9]

3.5.4. Resistencia a tierra de una malla triangular

La RPT de la malla triangular (ver configuración 3VT de la Figura 3.8) se calcula mediante la ecuación (3.5), en donde, R_1 , R_2 y R_m se definen con las ecuaciones (3.14), (3.15) y (3.16) respectivamente.

$$R_1 = \frac{\rho}{3\pi d} \left[\ln \left(\frac{6d}{a'} \right) + \frac{3k_1 \times d}{\sqrt{A}} - k_2 \right] \quad (3.14)$$

$$R_2 = \frac{\rho}{6\pi L_r} \left[\ln \left(\frac{4L_r}{b} \right) - 1 + \frac{2k_1 \times L_r}{\sqrt{A}} (\sqrt{3} - 1)^2 \right] \quad (3.15)$$

$$R_m = R_1 - \frac{\rho}{3\pi d} \left[\ln \left(\frac{L_r}{\sqrt{h \times 2a}} \right) - 1 \right] \quad (3.16)$$

donde:

ρ : es la resistividad del terreno, $[\Omega \cdot m]$

L_r : es la longitud de la varilla, $[m]$

R_1 : es la resistencia a tierra del conductor, $[\Omega]$

R_2 : es la resistencia a tierra de las varillas, $[\Omega]$

R_m : es la resistencia mutua entre la malla y las varillas, $[\Omega]$

d : es la distancia de separación entre dos varillas, $d > L_r$, $[m]$

h : es la profundidad de enterramiento del conductor, $[m]$

a : es el radio del conductor, $[m]$

a' : es a para el conductor en la superficie de la tierra, $[m]$ ó

a' : es $\sqrt{a \cdot 2h}$ para conductores enterrados a una profundidad h , $[m]$

k_1 y k_2 : son los coeficientes [véase la Figura 3.9]

A : es el área cubierta por los conductores, $[m^2]$

3.5.5. Resistencia a tierra de mallas cuadradas y rectangulares

El cálculo de la RPT de la malla rectangular con configuración 6VR de la Figura 3.8 se calcula a través de las ecuaciones de Schwarz. La resistencia total (R_g) para un suelo uniforme que contiene conductores y varillas se calcula con la ecuación (3.5). Mientras que R_1 , R_2 y R_m se definen con las ecuaciones (3.17), (3.18) y (3.19) respectivamente. Los coeficientes k_1 y k_2 se obtienen de las Figuras 3.9a y 3.9b respectivamente.

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[\ln \left(\frac{2L_c}{a'} \right) + \frac{k_1 \times L_c}{\sqrt{A}} - k_2 \right] \quad (3.17)$$

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi n_R L_r} \left[\ln \left(\frac{4L_r}{b} \right) - 1 + \frac{2k_1 \times L_r}{\sqrt{A}} (\sqrt{n_R} - 1)^2 \right] \quad (3.18)$$

$$R_m = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[\ln \left(\frac{2L_c}{L_r} \right) + \frac{k_1 \times L_c}{\sqrt{A}} - k_2 + 1 \right] \quad (3.19)$$

La ecuación (3.19) también puede escribirse como la ecuación (3.20).

$$R_m = R_1 - \frac{\rho}{\pi L_c} \left[\ln \left(\frac{L_r}{\sqrt{h \times 2a}} \right) - 1 \right] \quad (3.20)$$

donde:

ρ : resistividad del terreno, [$\Omega \cdot m$]

L_r : longitud de la varilla, [m]

R_1 : resistencia a tierra del conductor, [Ω]

R_2 : resistencia a tierra de las varillas, [Ω]

R_m : resistencia mutua entre la malla y las varillas, [Ω]

h : profundidad de enterramiento del conductor, [m]

a : radio del conductor, [m]

a' : es a para el conductor en la superficie de la tierra, [m] ó

a' : es $\sqrt{a \cdot 2h}$ para conductores enterrados a una profundidad h , [m]

k_1 y k_2 : coeficientes [véase la Figura 3.9]

L_c : longitud total de los conductores conectados a la malla, [m]

A : área cubierta por los conductores, [m^2]

n_R : número de varillas situadas en la zona A

3.6. Paso 5: Medición de la resistencia de puesta a tierra

La medición de la RPT se realiza mediante los métodos de caída de potencial y el método de abrazadera descritos en la normativa IEEE 81-2012 [66] para proceder a comprobar con los cálculos teóricos. Además, se realiza la medición de la RPT con el método de impulsión según la norma EN 62305-1:2006 [69], esto permite simular la caída de rayos en un sistema de protección a tierra.

3.6.1. Método de caída de potencial

El método de caída de potencial (FOP, por sus siglas del inglés fall of potential) implica pasar una corriente entre la malla de tierra (G) y una pica de corriente (CP), y luego medir el voltaje entre G y una pica de potencial (PP) (ver Figura 3.10) [66].

La distancia "X" para la pica de potencial a menudo es de 62% de la distancia de la sonda de corriente, esto cuando las picas de corriente y potencial tienen el mismo sentido [66]. El valor de 0.618 (61,8%) fue probado por primera vez por Curdts [70].

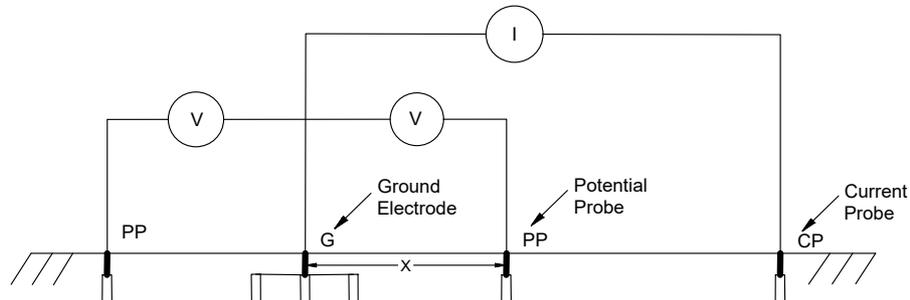


Figura 3.10: Gráfica del método FOP [66].

La Figura 3.11 presenta la curva representativa de impedancia versus distancia de la sonda de potencial (PP), con un suelo de resistividad uniforme. La curva correspondiente a PP y CP en direcciones opuestas entre sí se comporta de manera diferente. Así mismo, se recomienda realizar dos mediciones adicionales: una ubicando a la sonda de potencia al 52% (PP_{52%}) y otra al 72% (PP_{72%}) [71]. Si los resultados de las mediciones de la RPT difieren entre sí más del 3%, se debe aumentar significativamente la distancia entre la sonda de corriente (CP) y la toma de tierra medida (G) y volver a medir [72].

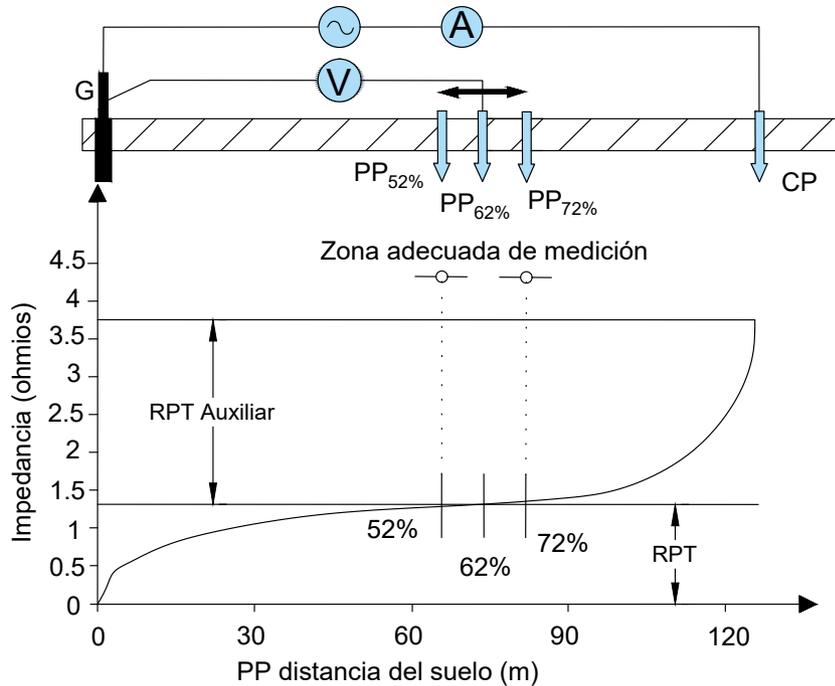


Figura 3.11: Impedancia típica vs espaciado de sondas para el método FOP.

Es necesario conocer el origen de referencia para medir las distancias de los electrodos auxiliares (sondas de corriente y voltaje). Para suelos hemisféricos, el origen es el centro del suelo. Mientras que para un SPT grande y complejo, el centro eléctrico podría no ser el mismo que el centro geométrico de la red de tierra. A diferencia del centro geométrico, la ubicación del centro eléctrico depende en gran medida del perfil de densidad de corriente en y alrededor de los conductores de la red de tierra [66].

La prueba de caída de potencial mide la resistencia entre un punto en la red del suelo y la tierra remota. Si un valor de prueba es mucho más alto de lo esperado, entonces los cables de prueba pueden haberse conectado a un conductor que no estaba conectado adecuadamente a la red de tierra. Si se sospecha una conexión deficiente, las mediciones se pueden repetir en otros puntos de la red de tierra. Si los valores originales y repetidos varían dramáticamente, entonces la red de tierra puede estar dañada. Alternativamente, se pueden realizar pruebas de continuidad antes de realizar la prueba de caída de potencial [66].

3.6.2. Método de abrazadera

En el método de abrazadera o medición por pinza, el medidor de pinza mide la resistencia de un electrodo de conexión a tierra sujetándolo al cable de bajada, como se ilustra en la Figura 3.12. Cuando se enciende, el medidor de pinza induce un voltaje con una frecuencia definida, generalmente entre 1 kHz y 3.4 kHz, en el sistema de tierra integrado, incluido el electrodo de tierra bajo medición. El voltaje inducido hace que una corriente (I_{test}) fluya hacia el sistema multicircular, que se mide con el medidor. La relación voltaje-corriente (impedancia) se determina y se muestra en formato digital por el medidor. El método se basa en la suposición de que la impedancia del sistema neutral (o blindaje) multiaterrizado, excluyendo el electrodo de tierra bajo prueba, es tan pequeña en comparación con el electrodo de tierra bajo prueba, que se puede suponer que es cero ($Z_{eq} = 0$). Con esta suposición, la lectura indicada se aproxima a la resistencia del electrodo de tierra cuando se usa correctamente.

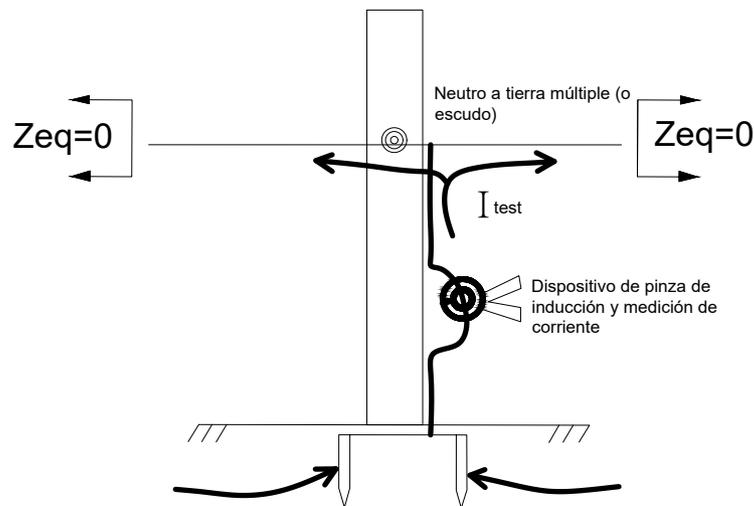


Figura 3.12: Medición de resistencia mediante el método de abrazadera [66].

Aunque este método es práctico y ampliamente utilizado para las líneas de transmisión y distribución, su teoría se presta a algunas limitaciones de aplicación que se enumeran a continuación [66]:

a) La aplicación se limita a un electrodo de tierra conectado a un sistema de

conexión a tierra de impedancia relativamente baja.

- b) Se puede introducir un gran error en la medición de prueba si la reactancia inductiva del sistema de apantallado o neutro multiaterrizado es relevante en comparación con la **RPT** que se está midiendo.
- c) Los empalmes o conexiones corroídas en el sistema neutral (o cable de blindaje) pueden influir en la lectura.
- d) El método no es aplicable a un **SPT** de conexión múltiple, como una malla de tierra de una subestación, un poste multiconectado o las tierras de una estructura.
- e) La lectura puede ser errónea con el ruido de alta frecuencia. Durante la medición de una toma de tierra de alta resistencia puede producirse una elevada relación ruido/señal.

La Figura 3.13 muestra un ejemplo práctico de donde el método de abrazadera es altamente efectivo en situaciones con múltiples tierras en paralelo, o con el electrodo de tierra probado conectado a un segundo electrodo de muy baja resistencia (por ejemplo, un sistema de tierra muy grande). La aplicación es una tierra paralela interconectada, como una línea de distribución o transmisión, el sistema neutral completa el retorno. Cuantos más retornos, menor es la contribución de elementos extraños a la lectura y, por lo tanto, mayor es la precisión. Incluso un elemento “malo” (alta resistencia) entre muchos retornos de baja resistencia no es suficiente para generar un error en la medición. Pero, si los retornos son pocos, o todos los elementos son “altos” (alta resistencia), entonces el error puede ser grande. Este método no se puede utilizar en terrenos aislados, ya que no hay una ruta de retorno, por lo que no es aplicable para las comprobaciones de instalación o la puesta en marcha de nuevos sitios.

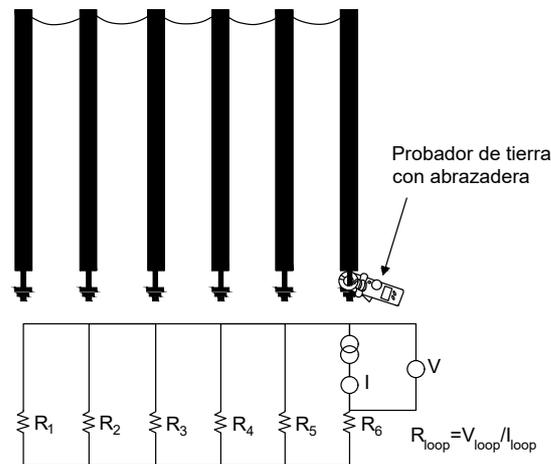


Figura 3.13: Ejemplo práctico del método de abrazadera [66].

La principal ventaja del método de abrazadera es que es rápido y fácil, puesto que no hay que introducir ninguna sonda auxiliar en la tierra ni desconectar la varilla de tierra del sistema. El método de abrazadera también incluye la unión y la resistencia de conexión general del sistema y puede medir la corriente de fuga que fluye a través del sistema. Esta información no está disponible en una prueba FOP, este método mide solo el electrodo de tierra, no la unión del sistema. Con el método de abrazadera, se mostrará un enlace “abierto” o de alta resistencia en la lectura porque el probador de abrazadera utiliza el conductor de conexión a tierra como parte del retorno [66].

Se requiere conocer las características del método de prueba para garantizar resultados y análisis precisos. Por ejemplo, si otra parte del SPT está en el “área de resistencia” del electrodo bajo prueba, entonces el resultado será menor que la resistencia real del electrodo, lo que podría conducir a una falsa sensación de seguridad. Además, la prueba se realiza a una frecuencia alta para permitir que los transformadores sean lo más pequeños posible desde un punto de vista práctico [66].

Una desventaja final del probador de tierra con pinza es que no hay pruebas integradas para el método. Con las pruebas de caída de potencial, el operador puede verificar los resultados aumentando las distancias entre las sondas. Con

el método de abrazadera, se tiene una sola lectura, la cual puede ser correcta o errónea [66].

Al medidor de RPT con abrazadera se puede sumar otros instrumentos de prueba para mejorar la confianza en los resultados. Sin embargo, es una parte importante del kit de herramientas de pruebas de tierra, junto con un probador de caída de potencial. El probador de pinza se puede utilizar para identificar problemas rápidamente. Se puede usar un probador de caída de potencial para confirmar los resultados de esos problemas. Este enfoque permite al operador ahorrar tiempo y mejorar la precisión [66].

En el presente proyecto se emplea el equipo digital Sonel MRU-200-GPS que incorpora la función de medición de RPT de 2 pinzas [72], basado en el método de abrazadera. La pinza N-1 (ver Figura 3.14a) sirve como circuito generador y la pinza C-3 (ver Figura 3.14b) como circuito receptor.



(a) Pinza N – 1

(b) Pinza C – 3

Figura 3.14: Pinzas de medición de RPT.

En la Figura 3.15 se observa la medición de la RPT en E_1 (R_{E1}). A esta puesta a tierra están conectadas otras puestas a tierra con resistencias R_{E2} , R_{E3} ... R_{E6} . La pinza de generación (N-1) sirve para generar la tensión (U) en el circuito. La corriente (I) que fluye en el circuito depende del valor de la resistencia del circuito, a medida que el valor de la resistencia disminuye, la corriente aumenta. La pinza de recepción (C-3) mide la corriente que fluye en el circuito. A base de esto se calcula el valor de la RPT [73].

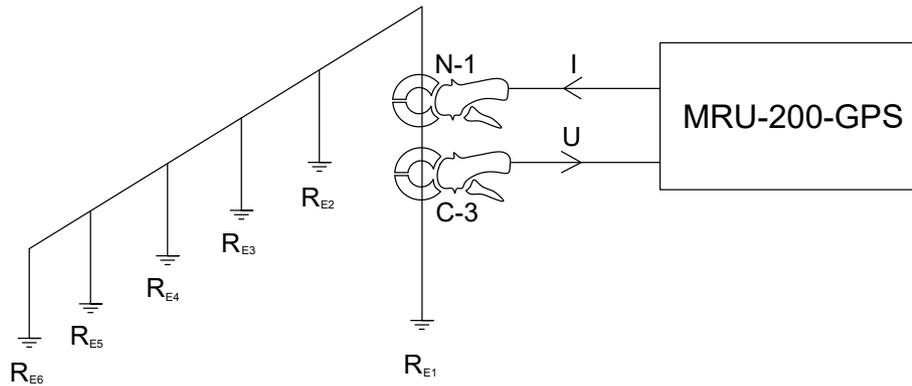


Figura 3.15: El principio de medir la RPT con dos pinzas [73].

3.6.3. Método de impulsión

La medida de la puesta a tierra del pararrayos debe ser similar a lo que se observa cuando ocurre una descarga atmosférica. Para cumplir con este requisito, la corriente medida debe configurarse de acuerdo con la descarga atmosférica generada. La forma de impulso medida por este método utilizando el instrumento de medición MRU-200-GPS se muestra en la Figura 3.16 (de acuerdo con EN 62305-1 [69] Protección pararrayos - Parte 1. Exigencias generales).

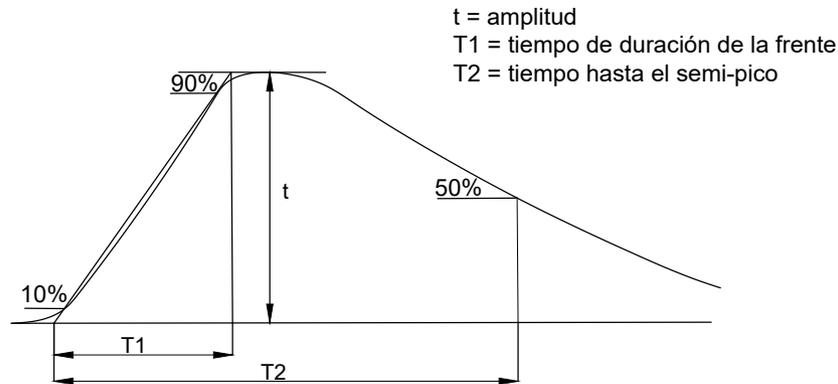


Figura 3.16: Determinación de los parámetros de una impulsión corta [72].

Las descargas atmosféricas alcanzan su valor máximo en amplitud muy rápidamente, mientras que decaen con una frecuencia mucho menor. En la Figura 3.16, T_1 es el tiempo de frente, lo que significa que es el tiempo necesario para que el impulso alcance su valor máximo; T_2 es el tiempo de cola, lo que significa que es el tiempo necesario para que el impulso alcance el 50% después del pico del impulso [74].

Para T_1 , los valores adoptados para las pruebas de acuerdo con [69] suelen ser de hasta $10\mu s$. Como para T_2 , los valores varían de $10\mu s$ hasta $350\mu s$ [74]. El dispositivo utilizado en el presente proyecto permite hacer mediciones con tres formas de impulso (T_1/T_2):

- $4\mu s/10\mu s$.
- $8\mu s/20\mu s$.
- $10\mu s/350\mu s$.

Según EN 62305 [69], el impulso $10\mu s/350\mu s$ corresponde a la forma típica del primer rayo. El impulso con forma $8\mu s/20\mu s$ corresponde al impulso causado por el campo magnético y la corriente del rayo generada en el equipo externo de protección contra rayos (LPS, por sus siglas en inglés) o el impulso causado por la descarga de rayo cercano. Cuanto más corto sea el impulso, mayor será la influencia de la reactancia [73].

3.7. Paso 6: Implementación LRM

El tratamiento químico para reducir la resistividad del suelo consiste en añadir LRM en el suelo local cerca del electrodo con el propósito de mejorar la conductividad eléctrica del suelo y así reducir la resistencia a tierra. Según [11] los métodos de construcción para los dispositivos de tierra de diferentes estructuras en suelos con diferentes resistividades se pueden clasificar en tres categorías: relleno, penetración y trinchera.

En el presente proyecto se utiliza LRM premezclado y LRM seco. Para su implementación se utiliza el método de relleno, el cual se usa comúnmente en la construcción de una barra de tierra vertical. Las características y los pasos de construcción de los LRM premezclado y LRM seco se observan en los Anexos A.1 y A.2 respectivamente.

Se cubre con LRM las varillas verticales del conjunto de configuraciones de puesta a tierra presentados en la sección 3.4. En la Figura 3.17 se observa el código, la representación gráfica de cada configuración con la cubierta de LRM y los terrenos en donde se ubica cada diseño.

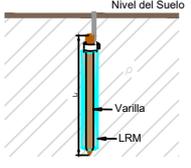
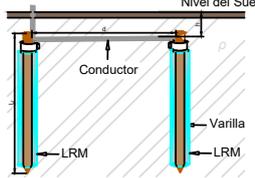
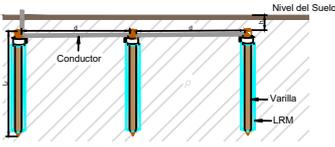
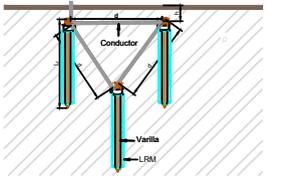
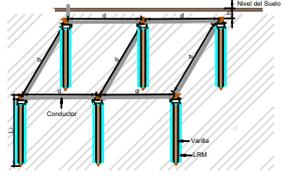
Código de configuración	Representación gráfica	Terrenos
1LRMV		Terreno 1 Terreno 2 Terreno 3 Terreno 4 Terreno 7 Terreno 8
2LRMVL		Terreno 1 Terreno 2 Terreno 3 Terreno 4 Terreno 7 Terreno 8
3LRMVL		Terreno 1 Terreno 2 Terreno 3 Terreno 4 Terreno 7 Terreno 8
3LRMVT		Terreno 1 Terreno 2 Terreno 3 Terreno 4 Terreno 7 Terreno 8
6LRMVR		Terreno 5 Terreno 6

Figura 3.17: Configuraciones básicas de SPT con LRM.

El código de cada configuración se detalla a continuación:

- **1LRMV:** Una varilla con LRM, colocada en forma vertical.
- **2LRMVL:** Dos varillas con LRM, conectadas en línea.

- **3LRMVL:** Tres varillas con LRM, conectadas en línea.
- **3LRMVT:** Tres varillas con LRM, conectadas en forma triangular.
- **6LRMVR:** Seis varillas con LRM, formando una malla rectangular.

3.8. Paso 7: Diseño de SPT

Se diseñan **SPT** para valores de resistividad de $1 \Omega \cdot m$ a $250 \Omega \cdot m$. Se propone este rango debido a que se han realizado estudios en el área rural de Cuenca midiendo la resistividad de distintos terrenos y encontrando valores comprendidos entre este rango como se muestra en la Tabla 2.1.

El rango de la **RPT** a obtener es de 1Ω a 20Ω , esto debido a que la distribuidora local solicita que el límite sea 25Ω , así mismo estos valores están en concordancia con los indicados en la Tabla 2.2. Se consideran también las normas de las diferentes empresas distribuidoras mencionadas en el inciso 2.5.

Cabe mencionar que este valor de 25Ω tiende a disminuir, debido a que, en los últimos años, la demanda de energía eléctrica ha aumentado rápidamente. En consecuencia, para satisfacer los requisitos de carga, ha incrementado la capacidad del sistema de subtransmisión. Por varias razones técnicas y de seguridad, las instalaciones de energía eléctrica deben estar conectadas a tierra y el flujo ininterrumpido de corriente de falla a la tierra se puede lograr manteniendo la **RPT** lo más baja posible [9].

Para estos diseños se utiliza la formulación de las normas IEEE 80-2013 [3], IEEE 142-2007 [10], y las formulaciones desarrolladas en [63].

Posteriormente, en base a las pruebas de campo con **LRM** se definen diseños alternativos de puesta a tierra que incluye el uso de este material. Por otro lado, y una vez establecidas los diferentes diseños y los costos de los materiales se establecerá el costo total de las soluciones planteadas.

Finalmente, se desarrolla un programa computacional y una aplicación móvil que permiten mostrar los diseños recomendados de **SPT** y el costo de cada uno. Como datos de entrada se requiere la resistencia, la resistividad del terreno, la longitud de la varilla y el calibre del conductor.

Capítulo 4

Resultados

4.1. Introducción

El presente capítulo contiene la información detallada de los resultados. Se realiza, ordena y analiza los datos de las resistividades de los terrenos medidas con el telurómetro. Se implementan los diseños de [SPT](#) propuestos, se mide la [RPT](#) y se emplea [LRM](#) para su correspondiente análisis. Finalmente, con los resultados y análisis se procede a realizar el programa computacional y la aplicación móvil de diseños de [SPT](#) recomendados.

4.2. Resultados de las mediciones de resistividad

La medición de resistividad se llevan a cabo en ocho terrenos utilizando el método Wenner descrito en la sección [3.2.2](#). Este método es el adecuado según la normativa IEEE 81-2012 [\[66\]](#). En las Tablas de [4.1](#) a [4.8](#) se observan los resultados de las mediciones.

Los espaciamientos entre picas para cada medición seleccionados para el método Wenner son de $1m$, $2m$ y $3m$. Las mediciones se realizan en 4 direcciones (0° , 45° , 90° y 135°) como se muestra en la Figura [4.1](#).

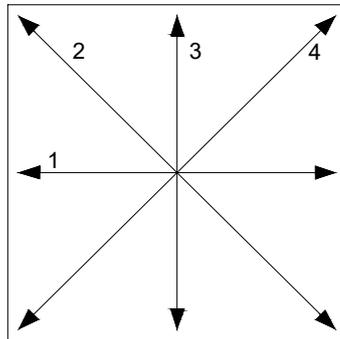


Figura 4.1: Direcciones para la medición de resistividad.

En la Tabla 4.1 se muestran los resultados de las mediciones de la resistividad del terreno 1 (T1).

Tabla 4.1: Mediciones de la resistividad del terreno 1 (T1).

Distancia de Separación (m)	Dirección 1 ($\Omega \cdot m$)	Dirección 2 ($\Omega \cdot m$)	Dirección 3 ($\Omega \cdot m$)	Dirección 4 ($\Omega \cdot m$)	Promedio ($\Omega \cdot m$)
1	25,40	19,20	22,70	22,10	22,35
2	23,20	23,00	23,80	24,10	23,53
3	23,20	25,70	23,40	23,80	24,03

En la Tabla 4.2 se muestran los resultados de las mediciones de la resistividad del terreno 2 (T2).

Tabla 4.2: Mediciones de la resistividad del terreno 2 (T2).

Distancia de Separación (m)	Dirección 1 ($\Omega \cdot m$)	Dirección 2 ($\Omega \cdot m$)	Dirección 3 ($\Omega \cdot m$)	Dirección 4 ($\Omega \cdot m$)	Promedio ($\Omega \cdot m$)
1	47,00	45,60	43,00	46,20	45,45
2	32,20	31,60	32,10	31,30	31,80
3	26,00	27,80	29,00	27,70	27,63

En la Tabla 4.3 se muestran los resultados de las mediciones de la resistividad del terreno 3 (T3).

Tabla 4.3: Mediciones de la resistividad del terreno 3 (T3).

Distancia de Separación (m)	Dirección 1 ($\Omega \cdot m$)	Dirección 2 ($\Omega \cdot m$)	Dirección 3 ($\Omega \cdot m$)	Dirección 4 ($\Omega \cdot m$)	Promedio ($\Omega \cdot m$)
1	132,10	207,00	161,30	151,10	162,88
2	188,90	221,00	207,00	171,30	197,05
3	146,60	—	—	—	146,60

En la Tabla 4.4 se muestran los resultados de las mediciones de la resistividad del terreno 4 (T4).

Tabla 4.4: Mediciones de la resistividad del terreno 4 (T4).

Distancia de Separación (m)	Dirección 1 ($\Omega \cdot m$)	Dirección 2 ($\Omega \cdot m$)	Dirección 3 ($\Omega \cdot m$)	Dirección 4 ($\Omega \cdot m$)	Promedio ($\Omega \cdot m$)
1	127	108,3	128,2	142,8	126,575
2	182,3	166,5	154,8	153	164,15
3	197	—	170	—	183,5

En la Tabla 4.5 se muestran los resultados de las mediciones de la resistividad del terreno 5 (T5).

Tabla 4.5: Mediciones de la resistividad del terreno 5 (T5).

Distancia de Separación (m)	Dirección 1 ($\Omega \cdot m$)	Dirección 2 ($\Omega \cdot m$)	Dirección 3 ($\Omega \cdot m$)	Dirección 4 ($\Omega \cdot m$)	Promedio ($\Omega \cdot m$)
1	236	171,5	232	265	226,125
2	225	216	238	269	237
3	237	186,9	182,1	276	220,5

En la Tabla 4.6 se muestran los resultados de las mediciones de la resistividad del terreno 6 (T6).

Tabla 4.6: Mediciones de la resistividad del terreno 6 (T6).

Distancia de Separación (m)	Dirección 1 ($\Omega \cdot m$)	Dirección 2 ($\Omega \cdot m$)	Dirección 3 ($\Omega \cdot m$)	Dirección 4 ($\Omega \cdot m$)	Promedio ($\Omega \cdot m$)
1	135,3	136,6	139,1	137,9	137,225
2	177,5	155	168	151,3	162,95
3	131,1	174,7	NA	122,9	142,9

En la Tabla 4.7 se muestran los resultados de las mediciones de la resistividad del terreno 7 (T7).

Tabla 4.7: Mediciones de la resistividad del terreno 7 (T7).

Distancia de Separación (m)	Dirección 1 ($\Omega \cdot m$)	Dirección 2 ($\Omega \cdot m$)	Dirección 3 ($\Omega \cdot m$)	Dirección 4 ($\Omega \cdot m$)	Promedio ($\Omega \cdot m$)
1	210,00	224,00	225,00	235,00	223,50
2	181,70	207,00	212,00	210,00	202,68
3	139,60	140,20	172,30	175,60	156,93

En la Tabla 4.8 se muestran los resultados de las mediciones de la resistividad del terreno 8 (T8).

Tabla 4.8: Mediciones de la resistividad del terreno 8 (T8).

Distancia de Separación (m)	Dirección 1 ($\Omega \cdot m$)	Dirección 2 ($\Omega \cdot m$)	Dirección 3 ($\Omega \cdot m$)	Dirección 4 ($\Omega \cdot m$)	Promedio ($\Omega \cdot m$)
1	303,00	290,00	355,00	323,00	317,75
2	259,00	240,00	233,00	274,00	251,50
3	199,00	192,00	179,70	226,00	199,18

4.3. Resultados del modelamiento de los terrenos

Los resultados de las mediciones se interpretaron en modelos de suelo uniforme (ver sección 3.3.1) y el método gráfico Sunde (ver sección 3.3.2). La Tabla 4.9 resume los valores de resistividad del suelo para los ocho terrenos. Según [13], se usa un modelo de suelo uniforme si los valores de resistividad del suelo medidos varían dentro de $\pm 30\%$ de la media aritmética, caso contrario, se puede utilizar un modelo de suelo de dos capas.

Tabla 4.9: Resistividad de cada terreno.

Terreno	Resistividad ($\Omega \cdot m$)	Modelo	Variación
T1	23,30 \approx 24	Suelo uniforme	25%
T2	34,96 \approx 35	Método gráfico Sunde	45%
T3	151,73 \approx 152	Método gráfico Sunde	40%
T4	158,08 \approx 159	Método gráfico Sunde	45%
T5	174,12 \approx 175	Método gráfico Sunde	38%
T6	189,37 \approx 190	Método gráfico Sunde	31%
T7	194,37 \approx 195	Método gráfico Sunde	41%
T8	301,55 \approx 302	Método gráfico Sunde	49%

4.4. Resultados de cálculos y mediciones de la RPT

La medición de la RPT de cada diseño implementado se realiza a través del método de caída de potencia y de abrazadera. Este último se lo realiza para contrastar las lecturas obtenidas a través del primer método (ver sección 3.6.2). Para análisis posteriores se toman los valores de RPT obtenidos a través del método de caída de potencial.

La Tabla 4.10 muestra los valores de RPT calculados y medidos de las puestas a tierra implementadas en el terreno 1 (T1), cuya resistividad es de $24 \Omega \cdot m$. En este terreno se utiliza LRM premezclado (P).

Tabla 4.10: Cálculos y mediciones de la RPT en T1.

Código de configuración	Resistencia calculada (Ω)	Resistencia medida				
		Método de caída de potencial (Ω)	Método de abrazadera (Ω)	Método de impulsión (Ω)		
				4 μ s/10 μ s	8 μ s/20 μ s	10 μ s/350 μ s
1V	12,31	12,40	13,27	5,40	5,60	5,20
2VL	6,24	6,84	8,01	3,90	3,80	3,70
3VL	4,13	5,06	6,48	3,70	4,00	3,50
3VT	3,67	4,80	6,07	3,50	3,60	3,40
1LRMVP	—	7,06	7,81	4,30	4,40	4,60
2LRMVL P	—	5,03	5,56	3,80	3,90	3,60
3LRMVL P	—	3,82	4,47	3,00	3,10	3,10
3LRMVT P	—	3,80	4,44	2,90	3,00	3,10

La Tabla 4.11 muestra los valores de RPT calculados y medidos de las puestas a tierra implementadas en el terreno 2 (T2), cuya resistividad es de 35 $\Omega \cdot m$. En este terreno se utiliza LRM seco (S).

Tabla 4.11: Cálculos y mediciones de la RPT en T2.

Código de configuración	Resistencia calculada (Ω)	Resistencia medida				
		Método de caída de potencial (Ω)	Método de abrazadera (Ω)	Método de impulsión (Ω)		
				4 μ s/10 μ s	8 μ s/20 μ s	10 μ s/350 μ s
1V	17,96	24,03	19,59	12,40	10,30	9,00
2VL	9,10	9,13	9,70	7,00	6,20	5,60
3VL	6,03	5,81	6,60	5,20	4,60	4,30
3VT	5,35	5,50	6,63	4,80	4,10	4,20
1LRMVS	—	15,46	15,78	8,70	8,40	7,50
2LRMVL S	—	7,85	8,54	5,30	5,70	5,00
3LRMVL S	—	5,72	6,22	3,90	3,90	3,70
3LRMVT S	—	5,42	6,22	4,00	3,70	3,60

La Tabla 4.12 muestra los valores de RPT calculados y medidos de las puestas a tierra implementadas en el terreno 3 (T3), cuya resistividad es de 153 $\Omega \cdot m$. En este terreno se utiliza LRM premezclado (P).

Tabla 4.12: Cálculos y mediciones de la RPT en T3.

Código de configuración	Resistencia calculada (Ω)	Resistencia medida				
		Método de caída de potencial (Ω)	Método de abrazadera (Ω)	Método de impulsión (Ω)		
				4 μ s/10 μ s	8 μ s/20 μ s	10 μ s/350 μ s
1V	77,98	72,60	66,10	16,40	16,50	15,80
2VL	39,51	36,42	35,80	12,70	13,00	12,50
3VL	26,18	26,00	26,20	10,20	11,00	10,80
3VT	23,25	22,50	22,10	9,30	10,40	10,00
1LRMVP	—	33,85	33,60	9,20	11,20	11,70
2LRMVL P	—	21,47	21,30	7,10	8,80	9,40
3LRMVL P	—	15,56	16,44	5,90	7,30	7,80
3LRMVT P	—	14,97	15,64	5,90	7,10	7,60

La Tabla 4.13 muestra los valores de RPT calculados y medidos de las puestas a tierra implementadas en el terreno 4 (T4), cuya resistividad es de 159 $\Omega \cdot m$. En este terreno se utiliza LRM seco (S).

Tabla 4.13: Cálculos y mediciones de la RPT en T4.

Código de configuración	Resistencia calculada (Ω)	Resistencia medida				
		Método de caída de potencial (Ω)	Método de abrazadera (Ω)	Método de impulsión (Ω)		
				4 μ s/10 μ s	8 μ s/20 μ s	10 μ s/350 μ s
1V	81,57	93,80	93,40	16,50	17,20	16,80
2VL	41,33	37,98	32,90	12,20	19,90	13,00
3VL	27,38	25,04	25,70	10,30	11,00	10,70
3VT	24,32	21,93	22,50	9,20	10,10	19,80
1LRMVS	—	62,60	44,70	10,30	12,20	13,10
2LRMVL S	—	24,18	18,86	6,70	8,40	9,20
3LRMVL S	—	17,92	17,39	5,70	7,10	8,00
3LRMVT S	—	16,50	17,82	5,40	6,80	7,50

La Tabla 4.14 muestra los valores de RPT calculados y medidos de las puestas a tierra implementadas en el terreno 5 (T5), cuya resistividad es de 175 $\Omega \cdot m$. En este terreno se utiliza LRM premezclado (P).

Tabla 4.14: Cálculos y mediciones de la RPT en T5.

Código de configuración	Resistencia calculada (Ω)	Resistencia medida				
		Método de caída de potencial (Ω)	Método de abrazadera (Ω)	Método de impulsión (Ω)		
				4 μ s/10 μ s	8 μ s/20 μ s	10 μ s/350 μ s
6VR	13,89	12,80	13,51	3,90	4,90	5,50
6LRMVR P	—	7,58	10,40	3,20	4,00	4,60

La Tabla 4.15 muestra los valores de RPT calculados y medidos de las puestas a tierra implementadas en el terreno 6 (T6), cuya resistividad es de $190 \Omega \cdot m$. En este terreno se utiliza LRM seco (S).

Tabla 4.15: Cálculos y mediciones de la RPT en T6.

Código de configuración	Resistencia calculada (Ω)	Resistencia medida				
		Método de caída de potencial (Ω)	Método de abrazadera (Ω)	Método de impulsión (Ω)		
				4 μ s/10 μ s	8 μ s/20 μ s	10 μ s/350 μ s
6VR	15,08	14,93	12,90	3,70	3,80	4,20
6LRMVR S	—	14,33	12,30	3,70	3,90	3,90

La Tabla 4.16 muestra los valores de RPT calculados y medidos de las puestas a tierra implementadas en el terreno 7 (T7), cuya resistividad es de $195 \Omega \cdot m$. En este terreno se utiliza LRM premezclado (P).

Tabla 4.16: Cálculos y mediciones de la RPT en T7.

Código de configuración	Resistencia calculada (Ω)	Resistencia medida				
		Método de caída de potencial (Ω)	Método de abrazadera (Ω)	Método de impulsión (Ω)		
				4 μ s/10 μ s	8 μ s/20 μ s	10 μ s/350 μ s
1V	100,04	96,80	95,50	11,00	12,60	12,40
2VL	50,69	48,80	50,60	9,10	10,50	10,70
3VL	33,58	31,70	34,10	7,00	8,40	8,70
3VT	29,82	27,36	31,50	6,80	8,40	9,30
1LRMV P	—	53,20	43,20	8,80	10,70	11,80
2LRMVL P	—	26,58	28,20	7,00	8,80	9,80
3LRMVL P	—	21,89	20,30	5,50	6,90	8,10
3LRMVT P	—	21,01	18,90	5,40	6,70	7,80

La Tabla 4.17 muestra los valores de RPT calculados y medidos de las puestas a tierra implementadas en el terreno 8 (T8), cuya resistividad es de $302 \Omega \cdot m$. En este terreno se utiliza LRM seco (S).

Tabla 4.17: Cálculos y mediciones de la RPT en T8.

Código de configuración	Resistencia calculada (Ω)	Resistencia medida				
		Método de caída de potencial (Ω)	Método de abrazadera (Ω)	Método de impulsión (Ω)		
				4 μ s/10 μ s	8 μ s/20 μ s	10 μ s/350 μ s
1V	154,94	160,9	RE>149,90	11,30	12,90	13,80
2VL	78,50	76,30	70,90	9,60	11,60	12,00
3VL	52,01	44,00	43,80	8,10	9,70	10,10
3VT	46,19	42,80	42,20	8,00	8,10	10,60
1LRMVS	—	31,26	33,34	8,70	10,30	10,70
2LRMVL S	—	15,73	15,46	5,60	6,80	7,10
3LRMVL S	—	12,23	12,50	4,80	5,90	6,30
3LRMVT S	—	12,18	12,14	4,50	4,60	6,10

4.5. Análisis de resultados

A continuación, se realiza el análisis de los principales resultados de este trabajo.

4.5.1. RPT de impulso

RPT de impulso variando la resistividad

En las Figuras de 4.2 a 4.11 se observa la influencia de la resistividad del suelo en la RPT de impulso de diseños SPT comunes y cubiertos con LRM. Se observa que, a mayor resistividad del terreno, mayor es la disminución de la RPT de impulso, lo cual sucede con cada diseño de SPT.

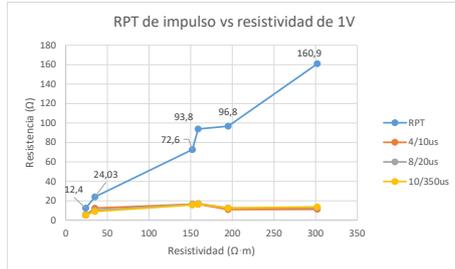


Figura 4.2: RPT de impulso vs resistividad de 1V

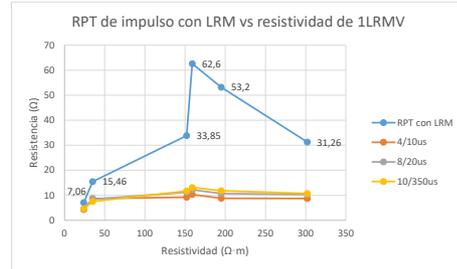


Figura 4.3: RPT de impulso con LRM vs resistividad de 1LRMV

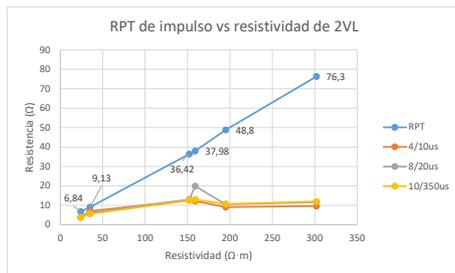


Figura 4.4: RPT de impulso vs resistividad de 2VL

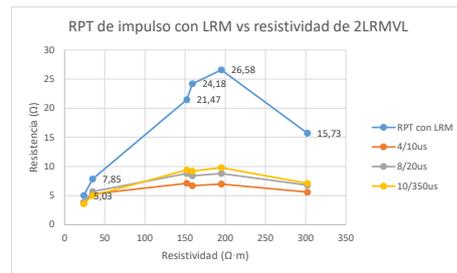


Figura 4.5: RPT de impulso con LRM vs resistividad de 2LRMVL

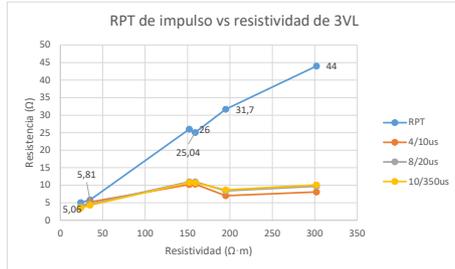


Figura 4.6: RPT de impulso vs resistividad de 3VL



Figura 4.7: RPT de impulso con LRM vs resistividad de 3LRMVL

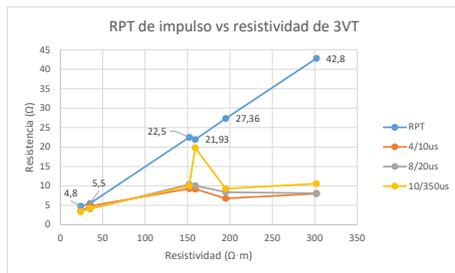


Figura 4.8: RPT de impulso vs resistividad de 3VT

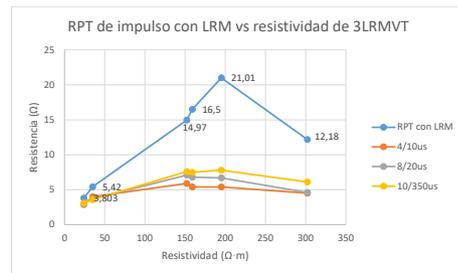


Figura 4.9: RPT de impulso con LRM vs resistividad de 3LRMVT

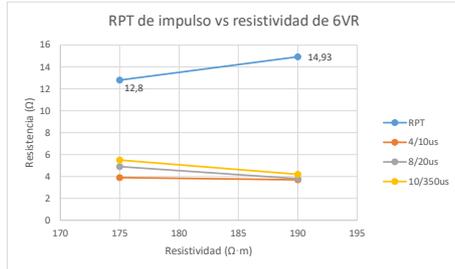


Figura 4.10: RPT de impulso vs resistividad de 6VR



Figura 4.11: RPT de impulso con LRM vs resistividad de 6LRMVR

En diseños de **SPT** de una varilla (1V) la disminución de la RPT de impulso varía del valor original desde 7,00 Ω (esto representa el 56 %) en suelos de baja resistividad como T1 de 24 Ω · m, hasta 149,60 Ω (93 %) en suelos de alta resistividad como T8 de 302 Ω · m. Mientras que cuando se coloca **LRM** en una varilla vertical (1LRMV), la **RPT** disminuye del valor original desde 2,76 Ω (39 %) en suelos de baja resistividad, hasta 22,56 Ω (72 %) en suelos de alta resistividad.

Para diseños más complejos, como es el caso de una malla triangular (3VT), la **RPT** de impulso disminuye de su valor original desde 1,30 Ω (27 %) en suelos de baja resistividad, hasta 34,80 Ω (81 %) en suelos de alta resistividad. Mientras que cuando se coloca **LRM** en las tres varillas verticales (3LRMVT), la **RPT** disminuye de su valor original desde 0,90 Ω (24 %) en suelos de baja resistividad, hasta 7,68 Ω (63 %) en suelos de alta resistividad.

En las filas de la Tabla 4.18 se observa el resumen de las variaciones de la **RPT** de impulso (ΔRPT) en ohmios y en porcentajes a medida que la resistividad incrementa. Se ha medido la **RPT** de impulso para cada diseño de **SPT**, en cada uno de los terrenos y con tres tipos de vertientes de impulso, 4μs/10μs, 8μs/20μs y 10μs/350μs.

Tabla 4.18: Resumen de resultados del método de impulsión.

T	1	2	3	4	5	6	7	8									
$\rho(\Omega \cdot m)$	24	35	152	159	175	190	195	302									
Diseño SPT	Vertiente de impulso	ΔRPT (Ω)	ΔRPT (%)	ΔRPT (Ω)	ΔRPT (%)	ΔRPT (Ω)	ΔRPT (%)	ΔRPT (Ω)	ΔRPT (%)	ΔRPT (Ω)	ΔRPT (%)	ΔRPT (Ω)	ΔRPT (%)	ΔRPT (Ω)	ΔRPT (%)	ΔRPT (Ω)	ΔRPT (%)
1V	4/10 μs	7,00	56%	11,63	48%	56,20	77%	77,30	82%	---	---	---	---	85,80	89%	149,60	93%
	8/20 μs	6,80	55%	13,73	57%	56,10	77%	76,60	82%	---	---	---	---	84,20	87%	148,00	92%
	10/350 μs	7,20	58%	15,03	63%	56,80	78%	77,00	82%	---	---	---	---	84,40	87%	147,10	91%
1LRMV	4/10 μs	2,76	39%	6,76	44%	24,65	73%	52,30	84%	---	---	---	---	44,40	83%	22,56	72%
	8/20 μs	2,66	38%	7,06	46%	22,65	67%	50,40	81%	---	---	---	---	42,50	80%	20,96	67%
	10/350 μs	2,46	35%	7,96	51%	22,15	65%	49,50	79%	---	---	---	---	41,40	78%	20,56	66%
2VL	4/10 μs	2,94	43%	2,13	23%	23,72	65%	25,78	68%	---	---	---	---	39,70	81%	66,70	87%
	8/20 μs	3,04	44%	2,93	32%	23,42	64%	18,08	48%	---	---	---	---	38,30	78%	64,70	85%
	10/350 μs	3,14	46%	3,53	39%	23,92	66%	24,98	66%	---	---	---	---	38,10	78%	64,30	84%
2LRMVL	4/10 μs	1,23	24%	2,55	32%	14,37	67%	17,48	72%	---	---	---	---	19,58	74%	10,13	64%
	8/20 μs	1,13	22%	2,15	27%	12,67	59%	15,78	65%	---	---	---	---	17,78	67%	8,93	57%
	10/350 μs	1,43	28%	2,85	36%	12,07	56%	14,98	62%	---	---	---	---	16,78	63%	8,63	55%
3VL	4/10 μs	1,36	27%	0,61	10%	15,80	61%	14,74	59%	---	---	---	---	24,70	78%	35,90	82%
	8/20 μs	1,06	21%	1,21	21%	15,00	58%	14,04	56%	---	---	---	---	23,30	74%	34,30	78%
	10/350 μs	1,56	31%	1,51	26%	15,20	58%	14,34	57%	---	---	---	---	23,00	73%	33,90	77%
3LRMVL	4/10 μs	0,82	21%	1,82	32%	9,66	62%	12,22	68%	---	---	---	---	16,39	75%	7,43	61%
	8/20 μs	0,72	19%	1,82	32%	8,26	53%	10,82	60%	---	---	---	---	14,99	68%	6,33	52%
	10/350 μs	0,72	19%	2,02	35%	7,76	50%	9,92	55%	---	---	---	---	13,79	63%	5,93	48%
3VT	4/10 μs	1,30	27%	0,70	13%	13,20	59%	12,73	58%	---	---	---	---	20,56	75%	34,80	81%
	8/20 μs	1,20	25%	1,40	25%	12,10	54%	11,83	54%	---	---	---	---	18,96	69%	34,70	81%
	10/350 μs	1,40	29%	1,30	24%	12,50	56%	2,13	10%	---	---	---	---	18,06	66%	32,20	75%
3LRMVT	4/10 μs	0,90	24%	1,42	26%	9,07	61%	11,10	67%	---	---	---	---	15,61	74%	7,68	63%
	8/20 μs	0,80	21%	1,72	32%	7,87	53%	9,70	59%	---	---	---	---	14,31	68%	7,58	62%
	10/350 μs	0,70	18%	1,82	34%	7,37	49%	9,00	55%	---	---	---	---	13,21	63%	6,08	50%
6VR	4/10 μs	---	---	---	---	---	---	---	---	8,90	70%	11,23	75%	---	---	---	---
	8/20 μs	---	---	---	---	---	---	---	---	7,90	62%	11,13	75%	---	---	---	---
	10/350 μs	---	---	---	---	---	---	---	---	7,30	57%	10,73	72%	---	---	---	---
6LRMVR	4/10 μs	---	---	---	---	---	---	---	---	4,38	58%	10,63	74%	---	---	---	---
	8/20 μs	---	---	---	---	---	---	---	---	3,58	47%	10,43	73%	---	---	---	---
	10/350 μs	---	---	---	---	---	---	---	---	2,98	39%	10,43	73%	---	---	---	---

Con esto se determina que, a mayor resistividad, mayor es la reducción de la RPT de impulso de su valor original. Además, cuando se aplica LRM a los diseños de SPT, la RPT de impulso disminuye. Esto se debe a que la RPT disminuye con el LRM por ende la RPT de impulso tiene el mismo efecto. Existen algunas excepciones en el presente trabajo, esto debe esperarse ya que las condiciones climáticas fueron variables durante el desarrollo de este proyecto. Durante la temporada de invierno, la resistividad es menor en comparación con la temporada de verano [75], lo que afecta directamente a la RPT.

RPT de impulso variando el diseño de SPT

Para el análisis de este apartado se muestran las Figuras de 4.12 a 4.23, así como las columnas de la Tabla 4.18 donde se muestran las variaciones de la RPT de impulso (ΔRPT) en ohmios y en porcentajes a medida que incrementa la complejidad del diseño de SPT.

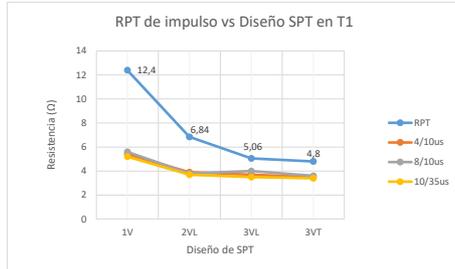


Figura 4.12: RPT de impulso vs Diseño SPT en T1

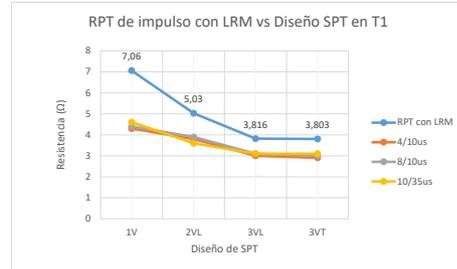


Figura 4.13: RPT de impulso con LRM vs Diseño SPT en T1

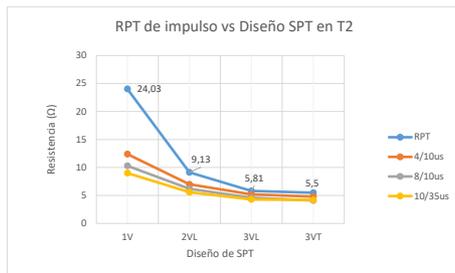


Figura 4.14: RPT de impulso vs Diseño SPT en T2

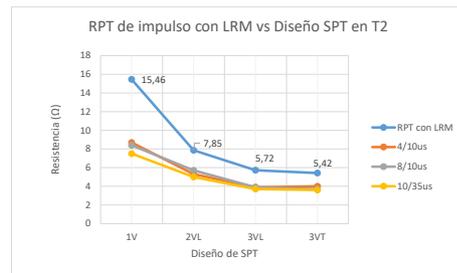


Figura 4.15: RPT de impulso con LRM vs Diseño SPT en T2

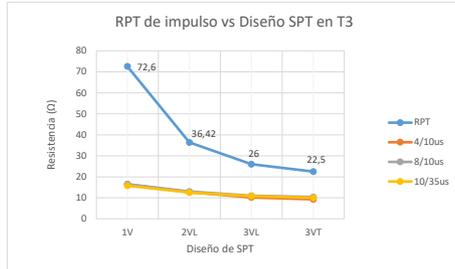


Figura 4.16: RPT de impulso vs Diseño SPT en T3

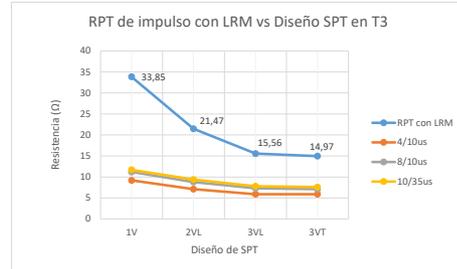


Figura 4.17: RPT de impulso con LRM vs Diseño SPT en T3

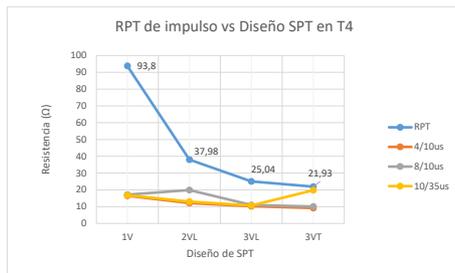


Figura 4.18: RPT de impulso vs Diseño SPT en T4

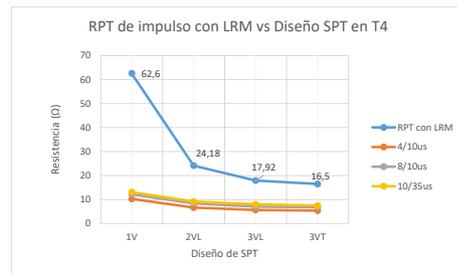


Figura 4.19: RPT de impulso con LRM vs Diseño SPT en T4

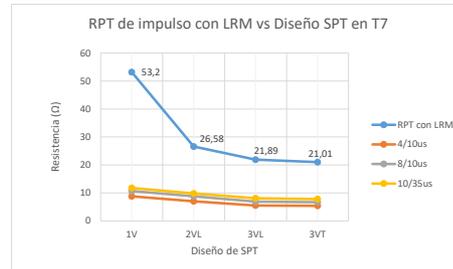
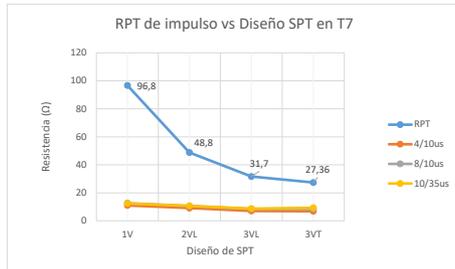


Figura 4.20: RPT de impulso vs Diseño SPT en T7

Figura 4.21: RPT de impulso con LRM vs Diseño SPT en T7

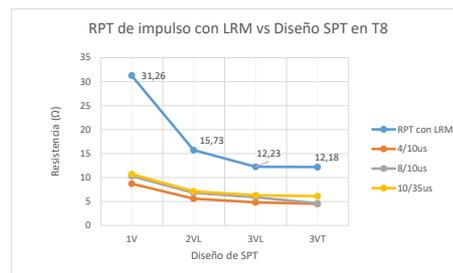
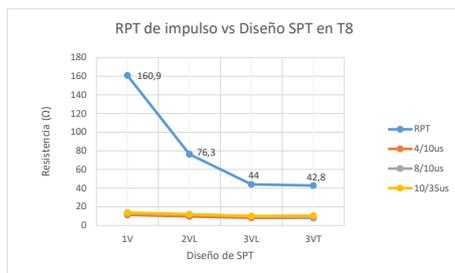


Figura 4.22: RPT de impulso vs Diseño SPT en T8

Figura 4.23: RPT de impulso con LRM vs Diseño SPT en T8

Aquí se observa por ejemplo que, en el diseño de una varilla (1V) colocada en un terreno de baja resistividad (T1), la disminución de la RPT de impulso es de 7,20 Ω (que representa el 58%), mientras que para el diseño de 3VT, colocado en el mismo terreno, es de 1,40 Ω (29%). Ahora, cuando se coloca LRM en las varillas verticales, la RPT de impulso de una varilla (1LRMV) disminuye 2,46 Ω (35%), y en el diseño una malla triangular (3LRMVT) la RPT de impulso disminuye 0,70 Ω (18%).

Por otro lado, en el diseño de una varilla (1V) colocada en un terreno de alta resistividad (T8), la disminución de la RPT de impulso es de 149,60 Ω (93%), mientras que para el diseño de 3VT, colocado en el mismo terreno, es de 34,80 Ω (81%). Cuando se coloca LRM en las varillas verticales, la RPT de impulso de una varilla (1LRMV) disminuye 22,56 Ω (72%), y en el diseño una malla triangular (3LRMVT) la RPT de impulso disminuye 7,68 Ω (63%).

Con esto se determina que, a mayor complejidad del diseño de SPT, menor es la reducción de la RPT de impulso. Además, se interpreta que cuando la RPT es baja, la RPT de impulso no tiene un cambio significativo. Aquí también se corrobora que a mayor resistividad mayor es la disminución de la RPT de impulso. Así mismo, con la cubierta de LRM en los diseños de SPT estos valores disminuyen aún más.

En este trabajo se han realizado mediciones de la RPT de impulso con materiales comunes como varillas y cable conductor, en varios diseños de SPT y en terrenos con diferentes valores de resistividad. Así mismo se ha colocado LRM en cada varilla vertical de cada diseño y se ha medido nuevamente la RPT de impulso obteniendo los resultados de las Tablas 4.10 a 4.17. Si bien es cierto, se podría realizar un análisis más exhaustivo acerca de la RPT de impulso, este trabajo está enfocado principalmente a los diseños de SPT con la cubierta de LRM, quedando abierta la posibilidad de realizar futuros trabajos con los datos recolectados del método de impulsión.

4.5.2. Efecto de LRM

Efecto de LRM en terrenos con diferentes valores de resistividad

En las Figuras de 4.24 a 4.28 se observa la influencia de la resistividad del suelo en la RPT cuando las varillas verticales de cada diseño de SPT son cubiertos con LRM. Se observa que, a mayor resistividad del terreno, mayor es la disminución de la RPT con LRM.

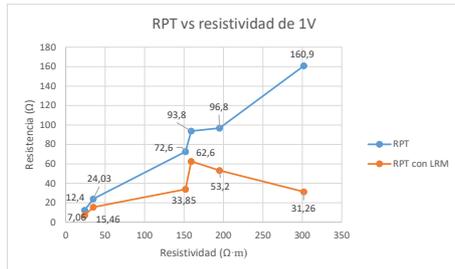


Figura 4.24: RPT vs resistividad de 1V

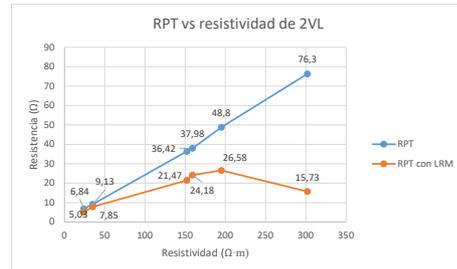


Figura 4.25: RPT vs resistividad de 2VL

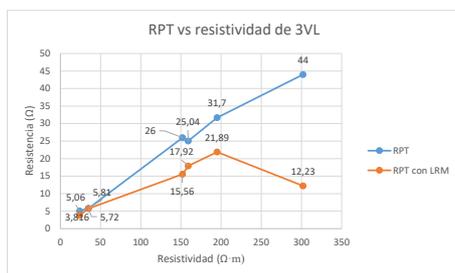


Figura 4.26: RPT vs resistividad de 3VL

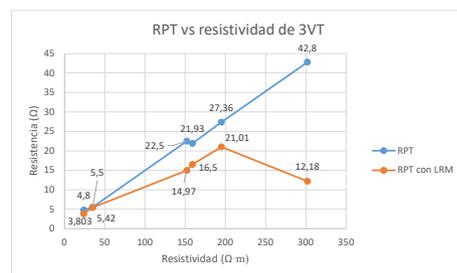


Figura 4.27: RPT vs resistividad de 3VT

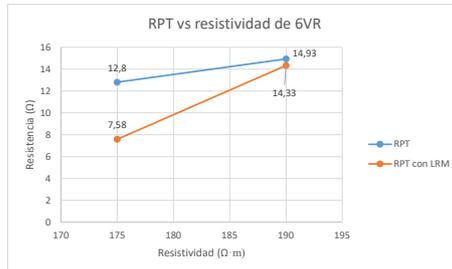


Figura 4.28: RPT vs resistividad de 6VR

En diseños de SPT de una varilla con LRM (1LRMV) la disminución de la RPT varía de su valor original desde 5,34 Ω (esto representa el 43%) en suelos de baja resistividad como T1 de 24 Ω · m, hasta 129,64 Ω (81%) en suelos de alta resistividad como T8 de 302 Ω · m.

Para un diseño más complejo al anterior, como es el caso de una malla triangular con LRM (3LRMVT), la disminución de la RPT varía de su valor original desde 1,00 Ω (21%) en suelos de baja resistividad como T1 de 24 Ω · m, hasta 30,62 Ω (72%) en suelos de alta resistividad como T8 de 302 Ω · m.

La disminución de la RPT (ΔRPT) con LRM de cada diseño en ohmios y en porcentajes, esto a medida que aumenta la resistividad de los terrenos, se observa en las columnas de la Tabla 4.19. En este estudio se han cubierto las varillas verticales con LRM premezclado (P) y con LRM seco (S).

Tabla 4.19: Resumen de resultados del efecto de LRM.

T	ρ(Ω · m)	LRM	1LRMV			2LRMVL			3LRMVL			3LRMVT			6LRMVR		
			ΔRPT (Ω)	ΔRPT (%)	Precio (USD)	ΔRPT (Ω)	ΔRPT (%)	Precio (USD)	ΔRPT (Ω)	ΔRPT (%)	Precio (USD)	ΔRPT (Ω)	ΔRPT (%)	Precio (USD)	ΔRPT (Ω)	ΔRPT (%)	Precio (USD)
1	24	P	5,34	43%	31,18	1,81	26%	72,36	1,24	25%	113,55	1,00	21%	123,55	—	—	—
2	35	S	8,57	36%	42,72	1,28	14%	95,44	0,09	2%	148,15	0,08	1%	158,16	—	—	—
3	152	P	38,75	53%	31,18	14,95	41%	72,36	10,44	40%	113,55	7,53	33%	123,55	—	—	—
4	159	S	31,20	33%	42,72	13,80	36%	95,44	7,12	28%	148,15	5,43	25%	158,16	—	—	—
5	175	P	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5,22	41%	257,10
6	190	S	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,60	4%	326,31
7	195	P	43,60	45%	31,18	22,22	46%	72,36	9,81	31%	113,55	6,35	23%	123,55	—	—	—
8	302	S	129,64	81%	42,72	60,57	79%	95,44	31,77	72%	148,15	30,62	72%	158,16	—	—	—

P = Premezclado
S = Seco

Con esto se determina que, a mayor resistividad del terreno, mayor es la reducción de la RPT con LRM. Tal como se mencionó anteriormente, las condiciones climáticas fueron variables durante el desarrollo de este proyecto. Si se toman nuevas lecturas durante la temporada de invierno se espera que la RPT disminuya, mientras que si se realizan las mediciones en verano la RPT puede incrementar. Así mismo, no existe una tendencia única de reducción de la RPT, esto debido a que los LRMs utilizados en este estudio son de dos tipos de construcción.

Efecto de LRM variando el diseño de SPT

Para el análisis de este apartado se muestran las Figuras de 4.29 a 4.34, así como las filas de la Tabla 4.19, donde se muestran las variaciones de la RPT (ΔRPT) con LRM en ohmios y en porcentajes a medida que incrementa la complejidad del diseño de SPT.

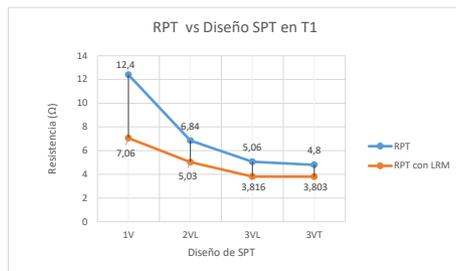


Figura 4.29: RPT vs Diseño SPT en T1



Figura 4.30: RPT vs Diseño SPT en T2

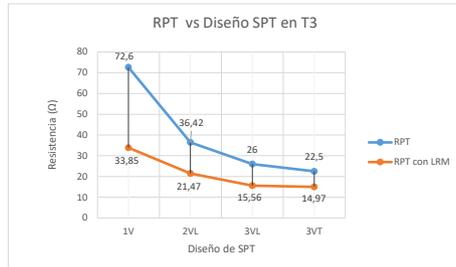


Figura 4.31: RPT vs Diseño SPT en T3

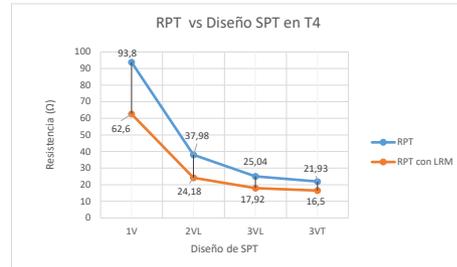


Figura 4.32: RPT vs Diseño SPT en T4

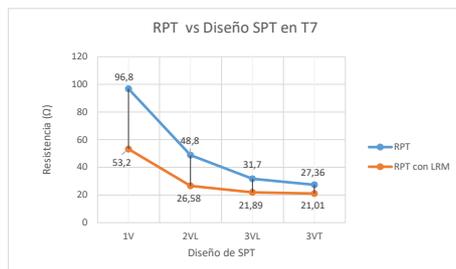


Figura 4.33: RPT vs Diseño SPT en T7

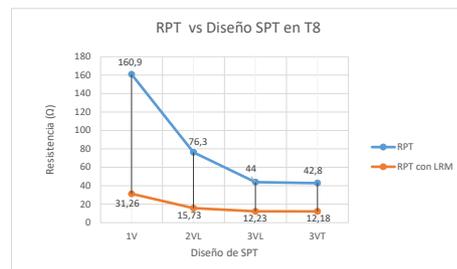


Figura 4.34: RPT vs Diseño SPT en T8

Aquí se observa por ejemplo que, en el diseño de una varilla con **LRM** (1LRMV) colocada en un terreno de baja resistividad como T1 de $24 \Omega \cdot m$, la disminución de la **RPT** de su valor original es de $5,34 \Omega$ (que representa el 43%), mientras que para el diseño de una malla triangular con **LRM** (3LRMVT), colocado en el mismo terreno, es de $1,00 \Omega$ (21%).

Por otro lado, en un terreno de alta resistividad como en T8 de $302 \Omega \cdot m$, la disminución de la **RPT** de su valor original de una varilla con **LRM** (1LRMV) es de $129,64 \Omega$ (81%), mientras que para el diseño 3LRMVT, colocada en el mismo terreno, se tiene una variación de $30,62 \Omega$ (72%).

Con esto se determina que, a mayor complejidad del diseño de SPT, menor es la reducción de la RPT con LRM.

En la Tabla 4.19 se proporciona un costo referencial de los materiales utilizados en cada diseño. A medida que el diseño es más complejo, el costo de los materiales evidentemente es más elevado. Estos costos referenciales se toman del Anexo B y se resumen en la Tabla 4.20.

Tabla 4.20: Precios unitarios de los materiales.

Ítem	Descripción	Unidad	Precio U.
1	Cable Cu desnudo #4	c/m2	\$2,63
2	Cable Cu desnudo #2	c/m2	\$4,26
3	Cable Cu desnudo #4/0	c/m2	\$13,60
4	LRM premezclado 25 lbs	c/u	\$15,34
5	LRM seco 25 lbs	c/u	\$26,88
6	Varilla 5/8" x 1.80m alta camada	c/u	\$9,97
7	Varilla 5/8" x 2.40m alta camada	c/u	\$20,72
8	Perno hendido #4/0	c/u	\$5,87

Además, se realiza el análisis del efecto de LRM en dos mallas de puesta a tierra rectangulares de seis varillas. Una malla se encuentra en el terreno 5 (T5) de $175 \Omega \cdot m$, donde se coloca LRM premezclado en cada una de las varillas verticales obteniendo una reducción de su valor original de $5,22 \Omega$. Otra malla se coloca en el terreno 6 (T6) de $190 \Omega \cdot m$, donde se coloca LRM seco en cada una de las varillas verticales obteniendo una reducción de $0,60 \Omega \cdot m$.

Evidentemente no se obtiene una reducción considerable de la RPT a pesar de que la resistividad de los terrenos es alta, esto debido a que el diseño de SPT es aún más complejo. Por el contrario, estos diseños involucran una mayor cantidad de varillas, conductores y bolsas de LRM, teniendo un precio referencial de materiales de las mallas de 257,10 USD en T5 y 326,31 USD en T6. Por tales motivos, los diseños de SPT con LRM en las varillas verticales se contemplan hasta este diseño. En diseños más complejos se tendrá una disminución de la RPT con LRM casi nula.

4.5.3. LRM premezclado y LRM seco

En la Tabla 4.21 se puede observar el porcentaje de disminución de la RPT cuando se cubre las varillas verticales con LRM. Se utiliza LRM premezclado

(P) y LRM seco (S) en varios diseños de SPT y en terrenos con diferentes valores de resistividad.

Tabla 4.21: Resumen de la disminución de RPT con LRM.

$\rho(\Omega \cdot m)$	1LRMV		2LRMVL		3LRMVL		3LRMVT		*4LRMVC		6LRMVR	
	ΔRPT P(%)	ΔRPT S(%)										
18	37%		28%									
24	43%		26%		25%		21%					
28	43%		36%		31%							
35		36%		14%		2%		1%				
45		37%		28%								
91	39%		27%		24%		23%					
100	37%											
109	41%		47%		44%		26%		27%			
113		57%		34%		38%		39%		28%		
152	53%		41%		40%		33%					
159		33%		36%		28%		25%				
169				42%								
175											41%	
181	50%											
190												4%
195	45%		46%		31%		23%					
302		81%		79%		72%		72%				

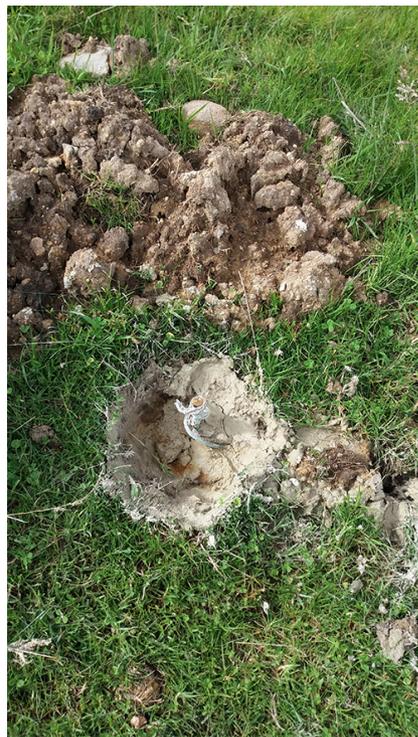
* 4VC: cuatro varillas con LRM, formando una malla cuadrada.

Los resultados del presente trabajo se encuentran en las celdas de color amarillo. Mientras que para complementar este estudio se utilizan los resultados de [5] que se muestran en las celdas de color verde. LRM seco es el mismo utilizado que en este trabajo, mientras que LRM premezclado de [5] pertenece a la marca BenzoElectric.

En las columnas de la Tabla 4.21 se aprecia que a medida que aumenta la resistividad también aumenta el porcentaje de disminución de la RPT con LRM. Por otro lado, en las filas de la Tabla 4.21 se observa que a medida que incrementa la complejidad del diseño de SPT, la disminución de la RPT con LRM es menor.

A pesar de que el efecto de LRM varía con la resistividad o el diseño de SPT, no existe una tendencia lineal, ni logarítmica. Esto debe esperarse debido a la variación de LMR (construcción y marcas), diseños de SPT, resistividad de los terrenos y a las condiciones climáticas variables durante las mediciones de la RPT. Las principales diferencias entre los LRM premezclado y seco son sus precios (ver Tabla 4.20), métodos de construcción (ver Anexo A) y la compacidad de los mismos.

Una vez instalado el LRM, a más de reducir la RPT, lo que se busca es que LRM proporcione una resistividad baja durante la vida útil del SPT. En cuanto a la compacidad de LRM premezclado, este permanece en forma de gel (ver Figura 4.35a), con la finalidad de mejorar la capacidad de absorción, y retención de agua del terreno; y al mantener la humedad busca reducir la resistividad [76]. Por otro lado, LRM seco se transforma en un concreto conductivo para que la tener una conductividad alta y con el propósito que LRM no se deslave o filtre (ver Figura 4.35b) [77]. En el presente trabajo, los dos tipos de LRM han reducido satisfactoriamente la RPT. Sería adecuado repetir las mediciones de RPT y observar el comportamiento de los mismos a largo plazo.



(a) Compacidad LRM premezclado.



(b) Compacidad LRM seco.

Figura 4.35: Compacidad de LRM [5].

4.5.4. Rangos de variación de la RPT con LRM

En la Tabla 4.21 se observa que la disminución de LRM premezclado y seco son similares, por lo tanto, para análisis posteriores se presenta un valor común de disminución de la RPT con LRM para los dos.

Para estimar los rangos de disminución de la RPT con LRM de la Tabla 4.22, en primera instancia se combinan los resultados de LRM premezclado y seco, posteriormente se complementan los rangos de disminución de RPT con LRM con porcentajes conservadores, es decir, que al momento de la implementación de LRM se puede esperar un mayor porcentaje de disminución de la RPT. Además, se procede de esta manera, debido a que el efecto de LRM no presenta una relación lineal o logarítmica con respecto a la resistividad o al diseño del SPT. Así mismo, se debe tener en cuenta que se utilizan distintos LRM (tipos y marcas).

Tabla 4.22: Disminución de la RPT con LRM según la resistividad del terreno y diseño de SPT.

$\rho(\Omega \cdot m)$	1LRMV	2LRMVL	3LRMVL	3LRMVT	4LRMVC	6LRMVR
	$\Delta RPT(\%)$					
1 - 10	30%	21%	16%	13%	12%	11%
11 - 20	37%	28%	25%	21%	19%	18%
21 - 30	40%	28%	25%	21%	19%	18%
31 - 40	40%	28%	25%	21%	19%	18%
41 - 50	40%	28%	25%	21%	19%	18%
51 - 60	40%	28%	25%	23%	22%	25%
61 - 70	40%	28%	25%	23%	22%	25%
71 - 80	40%	28%	25%	23%	22%	25%
81 - 90	40%	28%	25%	23%	22%	25%
91 - 100	40%	28%	25%	28%	27%	25%
101 - 110	40%	40%	38%	28%	27%	25%
111 - 120	50%	40%	38%	33%	29%	27%
121 - 130	50%	40%	38%	33%	29%	27%
131 - 140	50%	40%	38%	33%	29%	27%
141 - 150	50%	40%	38%	33%	29%	27%
151 - 160	50%	40%	38%	33%	29%	27%
161 - 170	50%	40%	38%	33%	29%	27%
171 - 180	50%	46%	38%	36%	33%	30%
181 - 190	50%	46%	38%	36%	33%	30%
191 - 200	50%	46%	38%	36%	33%	30%
201 - 210	50%	46%	40%	38%	36%	30%
211 - 220	55%	50%	40%	38%	36%	30%
221 - 230	55%	50%	45%	40%	36%	30%
231 - 240	60%	55%	50%	45%	40%	33%
241 - 250	60%	55%	50%	45%	40%	33%

En esta Tabla 4.22 se observan los rangos de disminución de la RPT cuando se

cubren las varillas verticales de 1,8m con LRM y se utiliza cable conductor desnudo #2. Se tiene, por ejemplo, para el diseño de SPT de una varilla cubierta con LRM (1LRMV) en terrenos con resistividades de 1 a $10 \Omega \cdot m$ una disminución de la RPT del 30%. Mientras que para terrenos con resistividades de 241 a $250 \Omega \cdot m$ se tiene una disminución de la RPT del 60%.

Ahora, si en un terreno de $10 \Omega \cdot m$ se coloca una varilla de 1,8m su RPT calculada es de $5,13 \Omega$, si se cubre la varilla con LRM su RPT disminuirá un 30% quedando en $3,59 \Omega$. Esto es una disminución de $1,54 \Omega$. Por otro lado, si se coloca una varilla de 1,8m en un terreno de $250 \Omega \cdot m$ su RPT calculada es de $128,26 \Omega$, si se cubre la varilla con LRM su RPT disminuirá un 60% quedando en $51,30 \Omega$. Esto es una disminución de $76,96 \Omega$.

4.6. Programa computacional y App

El programa computacional (ver Figura 4.36) y la aplicación móvil (ver Figura 4.37) desarrollados en este trabajo permiten mostrar los diseños recomendados de SPT y el costo referencial de cada uno. Esto a través del ingreso de la RPT que se requiere obtener, la resistividad del terreno, la longitud de la varilla y el calibre del conductor.



Figura 4.36: Programa computacional de diseños de SPT.

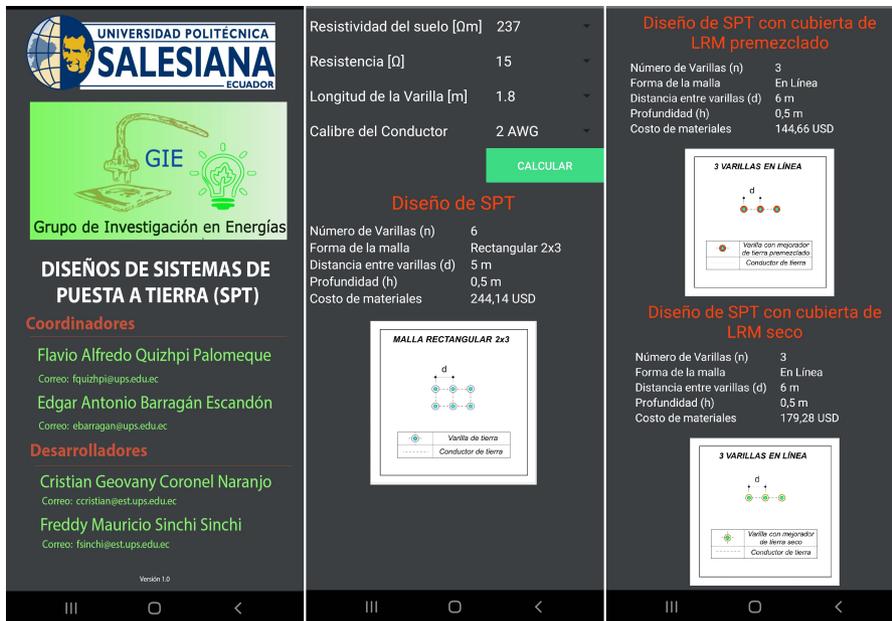


Figura 4.37: Aplicación móvil de diseños de SPT.

La formulación utilizada para el cálculo de la **RPT** de los distintos diseños de **SPT** son: para una la varilla normativa IEEE 142-2007 [10], dos y tres varillas colocadas en forma lineal y en forma triangular [63], para mallas cuadradas y rectangulares IEEE 80-2013 [3]. Así mismo, los parámetros de los diseños de **SPT** se han realizado de acuerdo a las recomendaciones de la normativa IEEE 80-2013 [3]. Donde se indica que las profundidades típicas de la malla de tierra varían de 0,5m a 1,5m separados entre sí por una distancia de entre 3m y 7m.

Para la disminución porcentual de la **RPT** con la cubierta de **LRM** en las varillas verticales de 1.8m de longitud y conductor de cobre desnudo #2 se utiliza la Tabla 4.22. Mientras que los rangos porcentuales de disminución de la **RPT** con **LRM** cuando se utilizan varillas de 2.4m y conductor #2/0; varillas de 1.8m y conductor #4/0; y varillas de 2.4m y conductor #4/0 se muestran en las Tablas C.1, C.2 y C.3 respectivamente (ver Anexo C). Los precios referenciales de estos materiales se calculan con la Tabla 4.20.

Un ejemplo de los resultados que se muestra el programa computacional se observa en la Figura 4.36. Donde se ingresa como datos la resistividad del terreno de $183 \Omega \cdot m$, se pretende obtener una **RPT** igual o menor a 20Ω , se dispone de varillas de 1,8m de longitud y con cable conductor de cobre #2. La aplicación muestra que el diseño recomendado es de una malla triangular conectada por un conductor de 6m de longitud entre varillas, con una profundidad de enterramiento de 0,5m, y finalmente el costo de los materiales es de 124,20 USD. Ahora, el diseño recomendado utilizando **LRM** premezclado es de dos varillas, conectadas entre sí por un conductor de 7m, el precio de materiales de 92,18 USD, mientras que con **LRM** seco es el mismo diseño, pero con un precio de materiales de 115,26 USD. En lugares con insuficiente espacio para la puesta a tierra de la malla triangular (3VT), se puede utilizar el diseño de dos varillas con **LRM** premezclado (2LRMVL), mientras que, en lugares donde no haya disponibilidad de agua, se puede verter directamente el **LRM** seco alrededor de las varillas.

Para los diseños con **LRM** seco y premezclado se tiene un mismo diseño de **SPT**, donde cambia únicamente el costo de los materiales. Esto se debe a que inicialmente, se pensaba obtener diferentes porcentajes de disminución de la **RPT** con **LRM** premezclado y otros porcentajes con **LRM** seco. Sin embargo, observando los resultados de las mediciones se realizó una tabla con porcentajes de disminución de la **RPT** común. Sin embargo, se mantiene esta diferencia-

ción en el programa ya que en trabajos futuros se pretende incluir **LRM** en el cable conductor. Proporcionando al diseñador tres opciones, la primera con materiales comunes, la segunda con **LRM** seco o premezclado en las varillas verticales y la tercera con **LRM** seco o premezclado tanto en las varillas verticales como en el conductor.

En la Figura 4.37 se puede apreciar otro ejemplo, donde se ingresa como datos la resistividad del terreno de $237 \Omega \cdot m$, se pretende obtener una **RPT** igual o menor a 15Ω , se dispone de varillas de 1,8m de longitud y con cable conductor de cobre #2. La aplicación muestra que el diseño recomendado es de una malla rectangular de 6 varillas conectadas entre sí por un conductor de 5m de longitud entre varillas, con una profundidad de enterramiento de 0,5m, y finalmente el costo de los materiales es de 244,14 USD. Ahora, el diseño recomendado utilizando **LRM** premezclado es de tres varillas en forma lineal (3LRMVL), conectadas entre sí por un conductor de 6m, el precio de materiales de 144,66 USD, mientras que con **LRM** seco es el mismo diseño, pero con un precio de materiales de 179,28 USD. Cuando se utiliza **LRM** premezclado se observa un ahorro de 99,48 USD con respecto al diseño original. Mientras que con **LMR** seco se tiene un ahorro de materiales de 64,86.

El programa proporciona diseños de **SPT** para obtener una **RPT** entre 1Ω y 20Ω , y con valores de resistividad del suelo entre $1 \Omega \cdot m$ y $250 \Omega \cdot m$. A medida que incrementa la resistividad y a su vez disminuye la **RPT**, el diseño de **SPT** se vuelve más complejo. Como se analizó anteriormente la aplicación de **LRM** no es recomendable para diseños de **SPT** muy complejos, por lo tanto, en estos casos en el programa computacional y en la App se recomienda únicamente un diseño de **SPT** con materiales comunes tal como se observa en la Figura 4.38.



Figura 4.38: Ejemplo de un diseño complejo de SPT.

Capítulo 5

Discusión

El suelo forma la base de los estudios de puesta a tierra y los pasos principales para obtener su modelo son: la adquisición, procesamiento e interpretación de datos de resistividad. En la actualidad, para medir la resistividad de una gran área de suelo, con estratificación horizontal o vertical, existe el método de prueba principal de cuatro puntos. El cual incluye el método general (no equidistante) y el método de cuatro puntos de Wenner (equidistante), descritos en la normativa IEEE 81-2012 [66]. En el presente trabajo, las mediciones de resistividad se llevaron a cabo en ocho terrenos usando el método Wenner (ver Tablas 4.1 a 4.8) el cual es el más común para este fin [9], [21], [53], [60], [61], [63], [75], [78], [79], [80], [81], [82], [83], [84], [85], [86], [87], [88]. Además, se estudia la resistividad del suelo a profundidades de 1m, 2m y 3m (que son las profundidades de alcance de las varillas verticales con longitudes de 1,8m y 2,4m).

De entre los métodos disponibles, el método Wenner fue el más adecuado para la ejecución de este proyecto. Así mismo, cabe señalar que la mayoría de telurómetros están fabricados para medir la resistividad por este método, como es el caso de los telurómetros Amprobe GP-2 Geo Test y Sonel MRU-200-GPS. Estos instrumentos permiten visualizar directamente el valor de la resistividad en $\Omega \cdot m$. Las lecturas obtenidas han demostrado ser confiables para posteriormente realizar el modelamiento de los terrenos y los diseños de SPT.

Las mediciones de la resistividad se interpretaron en modelos de suelo uniforme y de dos capas por el método gráfico Sunde (ver Tabla 4.9), los cuales están descritos en la normativa IEEE 80-2013 [3]. Estos cálculos suelen ser suficien-

tes, mientras que un modelo de suelo multicapa más preciso rara vez es justificable o técnicamente factible. Un modelo de suelo multicapa se usa cuando se encuentran condiciones de suelo altamente no uniformes, y se requiere programas complejos o métodos gráficos, y rara vez se usa en el diseño [89]. En la literatura existe una gran variedad de métodos e investigaciones para modelar suelos de dos capas o multicapas; método de Marquardt [90], [91], [92], método de imagen [93], Quasi-Newton [94], [95], para capas verticales [81], método de elementos finitos [96], algoritmos genéticos [97], entre otros.

En este estudio, se implementan varias configuraciones de puesta a tierra (ver Figura 3.8). Se eligen estas configuraciones principalmente porque que se puede contrastar los valores medidos de la RPT obtenidos a través de su implementación, con respecto a los cálculos de la RPT. La formulación utilizada para una varilla se obtiene de la ecuación de Dwight de la normativa IEEE 142-2007 [10], para diseños que involucran dos y tres varillas en línea y en disposición triangular se utiliza las ecuaciones desarrolladas en [63]. Por otro lado, para mallas cuadradas y rectangulares se utilizan las ecuaciones de Schwarz de la normativa IEEE 80-2013 [3]. Con esto, se observa la variación de la RPT con diferentes diseños de SPT y con la variación de la resistividad del terreno. En lo posterior esto resulta muy útil, debido a que se puede observar el comportamiento de la RPT cuando se instale LRM en cada una de las varillas verticales. En la literatura se observan varias pruebas de campo con distintas configuraciones a escala reducida donde no se podría observar claramente el efecto de LRM, tales como en [53] donde se instala una malla de $2m \times 2m$ en tres terrenos de distinta resistividad. En [62] se instalan 5 varillas de forma individual en cada uno de los 5 terrenos de distinta resistividad y en [68] se realiza una variación de varillas de 3 cilindros con longitud fija ($l = 50$ cm).

La medición de la RPT de cada diseño implementado con materiales comunes y cuando se instala LRM en cada una de las varillas verticales, se realizó mediante los métodos de caída de potencial y de abrazadera según la normativa IEEE 81-2012 [66], y con el método de impulsión según EN 62305-1 [69]. En la práctica, cuando es posible la desconexión de la puesta a tierra del sistema eléctrico a proteger, es recomendable medir la RPT con el método de cuatro puntos. Por el contrario, cuando el SPT no puede ser desconectado por motivos de seguridad u otros factores, generalmente se mide con el método de abrazadera.

En el presente trabajo se ha establecido que, a mayor resistividad, mayor es

la reducción de la RPT de impulso. Similares resultados se obtuvieron en [98] donde se estudia el problema de seguridad contra rayos del ferrocarril de alta velocidad. Así mismo en [99] se advierte que cuando la resistividad del suelo cambia de 100 a 5103 $\Omega \cdot m$ el efecto de LRM para disminuir la RPT de impulso aumenta del 25 % al 45 %. Concluyen además que el LRM disminuye la RPT de impulso cuando la resistividad del terreno es alta.

En [53] se presenta los hallazgos sobre las características de impulso de tres tipos de suelo mediante mediciones de campo. Se encontró que la RPT de impulso de un suelo de baja resistividad es constante y la RPT de alta resistividad disminuía con el aumento de las magnitudes de corriente. En este trabajo se puede constatar esto comparando por ejemplo con la disminución de la RPT de impulso en T1 y T8 del diseño 3LRMVT. Se establece, que las variaciones de las RPT del impulso en T1 son de 0,9 Ω , 0,8 Ω y 0,7 Ω para formas de onda de 4 μ s/10 μ , 8 μ s/20 μ y 10 μ s/350 μ respectivamente, mientras que en el suelo de alta resistividad (T8) las variaciones son de 7,68 Ω , 7,58 Ω y 6,08 Ω .

En [100] se mide la RPT de impulso de la base de una torre de 110 kV. El valor de la RPT es de 3,6 Ω , mientras que la RPT de impulso es de 3,5 Ω . Esto es una disminución de la RPT de impulso del 0,1 Ω . En el presente trabajo se observa que cuando la RPT es baja la RPT de impulso no tiene una variación significativa, tal es el caso de la malla triangular (3VT) implementada en el terreno 1 (T1), en donde la RPT es de 4,80 Ω , mientras que la RPT de impulso para la forma de onda de 8 μ s/20 μ es de 3,60 Ω . Esto es una disminución de la RPT de impulso del 1,20 Ω .

En [55] la RPT de impulso para una longitud de 18,5m fue de 12,4 Ω que se reduce a 8,2 Ω a medida que la longitud del electrodo horizontal aumenta más allá de los 41,2 m. Esta longitud puede tomarse como una indicación de la longitud efectiva del electrodo, ya que no se logra una reducción significativa de RPT de impulso aumentando más la longitud del electrodo. Aquí se puede evidenciar una vez más que la RPT de impulso disminuye a medida que el diseño de SPT aumenta, en este caso la longitud del electrodo colocada en forma horizontal.

Se destaca además que, a mayor resistividad, mayor es la reducción de la RPT con LRM. Este comportamiento es análogo a resultados de otras investigaciones [16], [59] y [99] en donde se obtienen distintos porcentajes de reducción de la RPT con LRM, esto se debe a que en cada estudio se utilizan distintos LRM,

así como otros diseños de **SPT** y resistividades del suelo.

En [40] los autores muestran que si se utiliza **LRM** en una varilla de conexión a tierra de 2,4 m se reduce la **RPT** aproximadamente en un 40% cuando la resistividad del suelo circundante es mayor a $250 \Omega \cdot m$, y de aproximadamente un 50% cuando la resistividad del suelo circundante es mayor a $300 \Omega \cdot m$. Mientras que en este trabajo se pudo observar que la **RPT** con **LRM** en una varilla de 1,8 m tiene una reducción del 45% cuando la resistividad del suelo es de $195 \Omega \cdot m$, y del 81% cuando la resistividad del suelo circundante es $302 \Omega \cdot m$.

Al igual que lo establecido en [99] se advierte que el efecto de **LRM** para diseños de **SPT** simples es mejor que el de diseños de **SPT** complicados.

Capítulo 6

Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros

6.1. Conclusiones

El valor de la resistividad del suelo es un requisito esencial en el diseño de un [SPT](#). A pesar de que en la literatura existen tablas de la relación del tipo de suelo y su resistividad, así como mapas o cartas geológicas donde se pueden basar para determinar un rango general de resistividad, es indispensable medir la resistividad en la ubicación donde se instalarán los componentes de los [SPT](#).

En este trabajo se midió la resistividad de cada uno de los ocho terrenos mediante el método Wenner de la normativa IEEE 81-2012 [66], en distintas direcciones para evitar lecturas erróneas en el caso de que existan elementos metálicos enterrados en el suelo, así como en diferentes distancias entre picas para conocer el comportamiento de la resistividad en distintas profundidades (ver Tablas 4.1 a 4.8). Esto, utilizando el medidor digital Sonel MRU-200-GPS de la Figura 3.4.

En la práctica no es común encontrar suelos uniformes u homogéneos, ya que generalmente están conformados de dos o más capas horizontales, así mismo pueden presentar capas verticales o laterales. Una mala interpretación o modelamiento del suelo puede conducir a una sobreestimación o subestimación significativa en el proceso del diseño de [SPT](#). En este estudio, para la interpretación de los resultados, se utilizaron los modelos de suelo homogéneo y de

dos capas mencionados en la normativa IEEE 80-2013 [3]. La Tabla 4.9 muestra estos resultados, pero es recomendable un análisis más profundo, debido a que en la actualidad existen varios métodos y software para el análisis de suelos multicapas.

Los terrenos de prueba contienen configuraciones básicas de SPT con materiales comunes (ver Figura 3.8) y con la cubierta de LRM en las varillas verticales (ver Figura 3.17). En la práctica, la disposición de los electrodos de puesta a tierra varía principalmente de acuerdo a la resistividad del terreno y a la RPT que se desea conseguir.

En este trabajo se realizaron las mediciones de la RPT principalmente con el método FOP, mientras que, para confirmar estos resultados se midió con el método de abrazadera. En las Tablas de 4.10 a 4.17 se observan los resultados donde la variación promedio entre estos dos métodos es de 2Ω . Todo esto, utilizando el medidor digital Sonel MRU-200-GPS de la Figura 3.4 y sus accesorios (pinzas N-1 y C-3) de la Figura 3.14.

Por otro lado, se observó que la RPT de impulso depende del tipo de vertiente de impulso ($4\mu s/10\mu s$, $8\mu s/20\mu s$ o $10\mu s/350\mu s$), de la resistividad del suelo y de la configuración del SPT. Se observó que, a mayor resistividad del terreno, la RPT disminuye en gran medida, mientras que para terrenos de baja resistividad la RPT de impulso no tiene cambios significativos. Así mismo, LRM tiene la buena capacidad de disminuir la RPT de impulso, el efecto es muy obvio en terrenos de alta resistividad que en terrenos de baja resistividad (ver Tabla 4.18).

Se instaló LRM en cada una de las varillas verticales de los diseños aquí estudiados, esto para observar el efecto de LRM en la RPT tanto con la variación del diseño de SPT como con la variación de la resistividad del terreno. Se utilizaron LRM premezclado y seco, teniendo en cuenta la variación de costos, forma de construcción y en la compactación de los mismos. Se midió nuevamente la RPT con LRM mediante los tres métodos antes mencionados, considerando que los resultados de los LRM se pueden observar a partir de los 28 días de su implementación, debido al contacto entre las varillas (incluido LRM) y el suelo.

Se observó que la RPT con LRM disminuye notablemente en terrenos de alta resistividad. Mientras que, en terrenos de baja resistividad no ocurre un cambio significativo. Así mismo, el efecto de LRM para diseños de puesta a tierra

simples, como el de una varilla (1V), es mejor que el de diseños de puesta a tierra complejos, como es el caso de una malla rectangular de 6 varillas (6VR) (ver Tabla 4.19).

Este trabajo ha presentado los resultados más importantes de terrenos experimentales, en ocho ubicaciones, cada uno contiene varios diseños de SPT incluyendo LRM, tanto en terrenos de baja resistividad (como T1 de $24 \Omega \cdot m$), como de alta resistividad (como T8 de $302 \Omega \cdot m$). Se presentan aspectos prácticos en la aplicación de procedimientos estándar en la ingeniería de SPT: aplicación del método de Wenner, interpretación del suelo utilizando los resultados del método de medición de Wenner, cálculo de la RPT para las puestas a tierra diseñadas y medición de la RPT. Generalmente los estudios experimentales sobre las características del impulso, y de los efectos de LRM se basan en experimentos de laboratorio y/o a escala reducida.

Los principales resultados de este estudio extenso obtenidos en base a la combinación de cálculos y mediciones, y el uso de LRM se muestran en la Tabla 4.22, donde se presenta los valores porcentuales de reducción de la RPT con LRM con respecto al valor original. Estos porcentajes varían de acuerdo al diseño de SPT y a la resistividad del terreno. El objetivo es presentar los resultados a través de un programa computacional y una aplicación móvil, los cuales proporcionan diseños prácticos de puestas a tierra de forma que se obtenga la resistencia adecuada. Se proponen diseños con materiales comunes y con LRM, a más de ello el diseñador podrá disponer del costo referencial en función de los elementos que involucran una determinada propuesta de SPT.

Todo este estudio fue hecho bajo lineamientos y recomendaciones principalmente de los estándares internacionales IEEE 80-2013 [3], IEEE 142-2007 [10], IEEE 81-2012 [66]. Los ingenieros eléctricos, electricistas, investigadores y personas vinculadas al área de protecciones, pueden utilizar fácilmente la aplicación móvil y/o el programa computacional desarrollados a partir de los resultados de este trabajo.

6.2. Recomendaciones

Se recomienda medir la resistividad del suelo en el sitio seleccionado ya sea para una nueva instalación o en un SPT existente. No es recomendable basarse

en tablas ni en mapas geológicos para determinar la resistividad. Debido a que estas dan solamente una aproximación, por lo que las pruebas de resistividad reales son imprescindibles [3].

El probador de pinza con el método de abrazadera se puede utilizar para identificar problemas rápidamente. Se puede utilizar el método de caída de potencial para confirmar los resultados de esos problemas. Esto, permite al operador ahorrar tiempo y mejorar la precisión [66].

El uso eficiente del material de baja resistividad (LRM) es muy importante en los terrenos donde la resistividad es alta, como en T8 de $302 \Omega \cdot m$. A su vez, su aplicación es ideal en espacios reducidos donde una malla de puesta a tierra más compleja no se pueda instalar.

Se recomienda utilizar principalmente LRM en diseños de SPT simples, tales como una varilla (1V), dos varillas (2VL), 3 varillas en línea (3VL) o en triángulo (3VT), una malla cuadrada de 4 varillas (4VC) y hasta una malla rectangular de 6 varillas (6VR), esto debido a que en diseños más complejos LRM no reduce la RPT de la forma correspondiente, pesar de que se encuentre en un terreno de alta resistividad.

En terrenos donde es difícil obtener agua, se recomienda utilizar los polvos de LRM secos, los cuales se pueden verter directamente alrededor de la varilla de tierra, y el suelo se debe rellenar y apisonar. Por otro lado, LRM premezclado es más económico, este se tiene que mezclar con agua y tierra circundante formando una especie de gel antes de su implementación. Finalmente, los dos proporcionarán el resultado esperado de disminución de la RPT.

Los resultados encontrados en [4] indican que en el diseño del SPT, el uso de un volumen demasiado alto de LRM no reduce la RPT de la manera correspondiente, por lo tanto, puede no ser económico y eficaz [36]. Por tal motivo, se recomienda colocar una sola bolsa de LRM en cada varilla vertical, tanto para LRM premezclado como para LRM seco.

6.3. Trabajos futuros

Las lecturas de RPT de los SPT que involucran LRM según [62] deben repetirse después de aproximadamente un año para investigar los efectos de la compacidad del suelo que pueden afectar la RPT de la varilla y el suelo circundante. Si el LRM pierde su función después de un cierto período de tiempo, la RPT aumentará. Por lo tanto, sería adecuado medir la RPT con LRM a largo plazo de los diseños de SPT implementados en este trabajo, para observar su rendimiento a través del tiempo. En el caso de que la RPT aumente se podría adicionar algunos aditivos para fijar la conductividad de LRM.

En este trabajo fueron analizados SPT con LRM en las varillas verticales, se pueden realizar pruebas de campo adicionando LRM en los conductores horizontales de los diseños de SPT trabajados aquí. Para determinar el efecto porcentual de la disminución de la RPT con LRM tanto en varillas verticales como en conductores horizontales.

Capítulo 7

Glosario

biestratificado Hace referencia a varias capas de resistividad del terreno.

electrodo de tierra horizontal Electrodo que está generalmente enterrado a una profundidad de hasta aproximadamente un metro. Puede consistir en varillas, barras cilíndricas o conductores trenzados y puede disponerse en forma de un electrodo de tierra radial, anular o mallado o una combinación de estos [14].

fulgurita Arenas o areniscas formadas por la caída de un rayo atmosférico.

LRM Low Resistivity Material, se utilizan ampliamente para disminuir las resistencias a tierra de los dispositivos de puesta a tierra en regiones con una alta resistividad del suelo.

rayo Es un fenómeno físico que se caracteriza por una transferencia de carga eléctrica de una nube hacia la tierra, de la tierra hacia la nube, entre dos nubes, al interior de una nube o de la nube hacia la ionosfera [28].

RPT Resistencia de Puesta a Tierra, parte real de la impedancia de puesta a tierra [14].

SPT Sistema de Puesta a Tierra, conjunto de conexiones y dispositivos necesarios para poner a tierra un equipo o un sistema, por separado o conjuntamente [14].

tierra En temas eléctricos se asocia al suelo, terreno, masa chasis, carcasa, armazón, estructura o tubería de agua. El término masa sólo debe utilizarse para aquellos casos en que no es el suelo, como en los aviones, barcos y carros [31].

Bibliografía

- [1] V. P. Androvitsaneas, I. F. Gonos, and I. A. Stathopoulos, “Research and applications of ground enhancing compounds in grounding systems,” *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11, no. 13, pp. 3195–3201, sep 2017.
- [2] J. Montaña, *Teoría de puestas a tierra*, 1st ed. Editorial Universidad del Norte, 2011.
- [3] “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding,” *IEEE Std 80-2013 (Revision of IEEE Std 80-2000/ Incorporates IEEE Std 80-2013/Cor 1-2015)*, pp. 1–226, 2015.
- [4] A. A. Al-Arainy, Y. Khan, M. I. Qureshi, N. H. Malik, and F. R. Pazheri, “Optimized pit configuration for efficient grounding of the power system in high resistivity soils using low resistivity materials,” in *2011 Fourth International Conference on Modeling, Simulation and Applied Optimization*. IEEE, apr 2011, pp. 1–5.
- [5] F. M. Sinchi, F. A. Quizhpi, H. P. Guillén, and S. N. Quinde, “Soil treatment to reduce grounding resistance by applying low-resistivity material (lrm) and chemical ground electrode in different grounding systems configurations,” in *2018 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, 2018, pp. 1–6.
- [6] M. De la Vega, *Problemas de Ingeniería de Puesta a Tierra*, 3rd ed. Editorial Limusa, 2007.
- [7] K. P. Sengar and K. Chandrasekaran, “Comparative analysis of grounding grid configurations with equal and unequal spaced design,” in *2019 IEEE 1st International Conference on Energy, Systems and Information Processing (ICESIP)*, 2019, pp. 1–6.

- [8] Z. G. Datsios, P. N. Mikropoulos, and I. Karakousis, "Laboratory characterization and modeling of dc electrical resistivity of sandy soil with variable water resistivity and content," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 24, no. 5, pp. 3063–3072, 2017.
- [9] P. R. Bonda and M. K. Mishra, "Optimized design of earthing system for substations with high soil resistivity and limited plot area," in *2018 20th National Power Systems Conference (NPSC)*, 2018, pp. 1–6.
- [10] "IEEE recommended practice for grounding of industrial and commercial power systems - redline," *IEEE Std 142-2007 (Revision of IEEE Std 142-1991) - Redline*, pp. 1–215, 2007.
- [11] J. He, R. Zeng, and B. Zhang, *Methodology and Technology for Power System Grounding*. Singapore: John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., nov 2012.
- [12] J. M. Reynolds, *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, 2nd ed., 2011.
- [13] G. Gilbert, "High Voltage Grounding Systems," Ph.D. dissertation, University of Waterloo, 2011.
- [14] Aenor, "UNE-EN 50522 Puesta a tierra en instalaciones de tensión superior a 1 kV en corriente alterna," *Norma española*, p. 71, 2012.
- [15] F. Sinchi and H. Guillén, "Diseño y determinación de sistemas de puesta a tierra mediante pruebas de campo con elementos comunes utilizados en la región, incluyendo GEM y electrodo químico," 2017.
- [16] C. Prabhakar and R. A. Deshpande, "Evaluation of soil resistivity and design of grounding system for hydroelectric generating station in a hilly terrain — a case study," in *2014 International Conference on Advances in Energy Conversion Technologies (ICAECT)*, 2014, pp. 104–107.
- [17] J. Alvaro and C. Uvidia, "Comportamiento de la resistividad eléctrica de los suelos ante variaciones de humedad y grado de compactación," Ph.D. dissertation, Universidad de Cuenca, 2015.
- [18] Á. Pacheco, J. Jiménez, and F. Quizhpi, "Diseño De Sistemas De Puesta a Tierra Partiendo De Un Modelo Biestratificado De Terreno, Aplicando

- Un Software Computacional En El Sector Industrial,” Ph.D. dissertation, Universidad Politécnica Salesiana, 2013.
- [19] H. Barros and L. Ortega, “Análisis y Diseño de la Instalación Eléctrica de una Electrolinera en la Ciudad de Cuenca,” Ph.D. dissertation, Universidad Politécnica Salesiana, 2018.
- [20] Pacheco Guambaña, J. Jiménez, and F. Quizhpi, “Desarrollo de un modelo biestratificado de terreno aplicando un software computacional en el sector industrial,” 10 2013.
- [21] M. Telló, L. T. C. Pulz, V. B. Telló, D. S. Gazzana, F. F. Vidor, and R. G. Ferraz, “Apparent soil resistivity data processing using optimization method,” in *2020 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I CPS Europe)*, 2020, pp. 1–6.
- [22] S. Fortin, N. Mitskevitch, and F. P. Dawalibi, “Analysis of grounding systems in horizontal multilayer soils containing finite heterogeneities,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, no. 6, pp. 5095–5100, 2015.
- [23] W. L. Lai, W. F. H. W. Ahmad, J. Jasni, and M. Z. A. Ab Kadir, “A review on the usage of zeolite, perlite and vermiculite as natural enhancement materials for grounding system installations,” in *2017 IEEE 15th Student Conference on Research and Development (SCORED)*, 2017, pp. 338–343.
- [24] “Revisión y Recepción de Obras | Centrosur.” [Online]. Available: <http://www.centrosur.gob.ec/?q=revision>
- [25] M. Sosa, “Empresa Eléctrica de Quito - Normas para sistemas de distribución - Parte A Guía para diseño de redes de distribución,” p. 162, 2015.
- [26] E. Dominguez and M. Molina, “Normas Técnicas para Diseño y Expansión de las Redes Secundarias del Sistema de Distribución de la Empresa Eléctrica Centro Sur,” Ph.D. dissertation, Universidad de Cuenca, 2011.
- [27] Empresa Eléctrica Regional del Sur S.A, *Normas Técnicas Para El Diseño De Redes Eléctricas Urbanas Y Rurales*, 2012.

- [28] “Anexo General Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) Resolución 9 0708. Ministerio de minas y energía de Colombia,” p. 127, 2013.
- [29] International Electrotechnical Commission, “IEC 60364-4-442 Electrical installations of buildings,” *International Standard*, p. 41, 1999.
- [30] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, “Código eléctrico colombiano NTC2050,” *Código Eléctrico Colombiano*, p. 847, 1998.
- [31] Instituto colombiano de Normas Técnicas y Certificación, “Código eléctrico colombiano NTC4552,” *Código Eléctrico Colombiano*, p. 47, 2004.
- [32] “NFPA 70. National Electrical Code (NEC),” pp. 1–5, 2014.
- [33] “IEEE guide for generating station grounding,” *IEEE Std 665-1995 (R2001) (Revision of IEEE Std 665-1987)*, pp. 1–60, 2011.
- [34] G. Eduful, J. E. Cole, and P. Okyere, “Optimum mix of ground electrodes and conductive backfills to achieve a low ground resistance,” in *2009 2nd International Conference on Adaptive Science & Technology (ICAST)*. Accra, Ghana: IEEE, Dec. 2009, pp. 140–145.
- [35] W. Jones, “Bentonite Rods Assure Ground Rod Installation In Problem Soils,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-99, no. 4, pp. 1343–1346, jul 1980.
- [36] Y. Khan, N. H. Malik, A. A. Al-Arainy, M. I. Qureshi, and F. R. Pazheri, “Efficient use of low resistivity material for grounding resistance reduction in high soil resistivity areas,” in *TENCON 2010 - 2010 IEEE Region 10 Conference*. IEEE, nov 2010, pp. 620–624.
- [37] Y. Tu, J. He, and R. Zeng, “Lightning Impulse Performances of Grounding Devices Covered With Low-Resistivity Materials,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 3, pp. 1706–1713, jul 2006.
- [38] M. Kostic, Z. Radakovic, N. Radovanovic, and M. Tomasevic-Canovic, “Improvement of electrical properties of grounding loops by using bentonite and waste drilling mud,” *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 146, no. 1, p. 1, 1999.

- [39] V. P. Androvitsaneas, F. E. Asimakopoulou, I. F. Gonos, and I. A. Stathopoulos, "Estimation of ground enhancing compound performance using Artificial Neural Network," in *2012 International Conference on High Voltage Engineering and Application*. Shanghai, China: IEEE, Sep. 2012, pp. 145–149.
- [40] E. Al-Ammar, Y. Khan, N. Malik, and N. Wani, "Development of low resistivity material for grounding resistance reduction," in *2010 IEEE International Energy Conference*. Manama, Bahrain: IEEE, Dec. 2010, pp. 700–703.
- [41] N. Hidalgo, A. Senese, E. Cano, and P. Sarquís, "Caracterización y evaluación de la calidad de bentonitas provenientes de las provincias de San Juan y Río Negro (Argentina) para uso en industria petrolera y cerámica," *Boletín Geológico y Minero*, vol. 127, no. 4, pp. 791–806, 2016.
- [42] V. Laverde, M. Z. A. A. Kadir, and C. Gomes, "Performance of backfill materials under impulse and AC testings," in *2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP)*. Vienna, Austria: IEEE, Sep. 2012, pp. 1–7.
- [43] N. Nor, "Effect of Enhancement Materials When Mixed with Sand Under High Impulse Conditions," in *2006 IEEE 8th International Conference on Properties and applications of Dielectric Materials*. Bali, Indonesia: IEEE, Jun. 2006, pp. 916–919.
- [44] N. M. Nor, A. Haddad, and H. Griffiths, "Performance of earthing systems of low resistivity soils," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 4, pp. 2039–2047, 2006.
- [45] Y. Tu, J. He, and R. Zeng, "Lightning Impulse Performances of Grounding Devices Covered With Low-Resistivity Materials," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 3, pp. 1706–1713, Jul. 2006.
- [46] V. P. Androvitsaneas, C. A. Christodoulou, I. F. Gonos, and I. A. Stathopoulos, "Electric resistivity variation of ground enhancing compounds under field conditions," in *2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, 2018, pp. 1–4.
- [47] J. He and B. Zhang, "Progress in lightning impulse characteristics of grounding electrodes with soil ionization," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, no. 6, pp. 4924–4933, 2015.

- [48] T. Horchue, W. Tangtheerajaronwong, S. Wojtas, and M. Woloszyk, "Impulse impedance measurements of lightning protection earthings," in *2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia (GTD Asia)*, 2019, pp. 945–949.
- [49] N. M. Nor, A. Haddad, and H. Griffiths, "Characterization of ionization phenomena in soils under fast impulses," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 1, pp. 353–361, 2006.
- [50] N. Harid, H. Griffiths, and A. Haddad, "Effect of ground return path on impulse characteristics of earth electrodes," in *2011 7th Asia-Pacific International Conference on Lightning*, 2011, pp. 686–689.
- [51] S. Sekioka, T. Sonoda, and A. Ametani, "Experimental study of current-dependent grounding resistance of rod electrode," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 1569–1576, 2005.
- [52] I. Djamel, F. H. Slaoui, and S. Georges, "Transient response of grounding systems under impulse lightning current," in *2016 Electric Power Quality and Supply Reliability (PQ)*, 2016, pp. 71–75.
- [53] M. S. Reffin, N. M. Nor, S. Abdullah, N. Ahmad, and M. Othman, "Impulse characteristics of earth electrodes in different soil resistivity by field measurements," in *2018 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 2018, pp. 331–334.
- [54] M. S. M. Yunus, N. Mohamad Nor, N. Agbor Etobi, and K. Ramar, "Performance of earthing systems for different earth electrode configurations," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, no. 6, pp. 5335–5342, 2015.
- [55] A. Haddad, H. Griffiths, M. Ahmeda, and N. Harid, "Experimental investigation of the impulse characteristics of practical ground electrode systems," in *2010 International Conference on High Voltage Engineering and Application*, 2010, pp. 469–472.
- [56] T. Garma, S. Sesnic, D. Poljak, and M. Blajic, "Impulse impedance of the horizontal grounding electrode: Experimental analysis versus full-wave computational model," in *2016 24th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*, 2016, pp. 1–4.

- [57] M. E. F. Tapia, “La Ineficacia de la Fianza Expedida a Favor de la Tesorería de la Federación,” dec 2004.
- [58] Francry Maigualida, “Métodos de Recolección de Datos,” Ph.D. dissertation, Universidad de Carabobo., 2004.
- [59] W. F. H. Wan Ahmad, W. L. Lai, J. Jasni, and M. Z. A. Ab-Kadir, “Variations of soil resistivity values due to grounding system installations with natural enhancement material mixtures,” in *2018 34th International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, 2018, pp. 1–5.
- [60] M. S. Sazali, C. L. Wooi, S. N. M. Arshad, T. S. Wong, Z. Abdul-Malek, and H. Nabipour-Afrouzi, “Study of soil resistivity using wenner four pin method: Case study,” in *2020 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)*, 2020, pp. 386–391.
- [61] S. C. Lim, C. Gomes, G. Nourirad, and M. Z. A. A. Kadir, “Significance of localized soil resistivity in designing a grounding system,” in *2014 IEEE 8th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO2014)*, 2014, pp. 324–329.
- [62] Lee Weng Choun, C. Gomes, Mohd Zainal Abidin Ab Kadir, and Wan Fatinhamamah Wan Ahmad, “Analysis of earth resistance of electrodes and soil resistivity at different environments,” in *2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, 2012, pp. 1–9.
- [63] F. M. Sinchi, F. A. Quizhpi, and H. P. Guillén, “Calculation of the earth resistance of the union of two and three rods by modified schwarz equations and field tests,” in *2017 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, 2017, pp. 1–6.
- [64] D. A. Galván and E. Díaz Lozano, “An approach to reduce copper theft in transmission line grounding systems,” in *2013 International Symposium on Lightning Protection (XII SIPDA)*, 2013, pp. 196–200.
- [65] R. Narayan and J. Regan, “Copper theft of earthing systems a worldwide problem,” in *Intelec 2013; 35th International Telecommunications Energy Conference, Smart Power and Efficiency*, 2013, pp. 1–5.

- [66] “IEEE guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potentials of a grounding system - redline,” *IEEE Std 81-2012 (Revision of IEEE Std 81-1983) - Redline*, pp. 1–192, 2012.
- [67] P. D. R. Dilushani, W. R. N. Nawodani, and T. Bambaravanage, “Soil Resistivity Analysis and Earth Electrode Resistance Determination,” vol. 15, no. 2, pp. 26–35, 2020.
- [68] H. D. Rio and A. S. Bambang, “Characteristic study of vertical configuration grounding system with two layer modified using type of different soil for variation of diameter and frequency injection,” in *The 2nd IEEE Conference on Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE) 2014*, 2014, pp. 214–219.
- [69] C. T. AEN/CTN, “EN 62305-1 Protección contra el rayo. Parte 1: Principios generales,” p. 72, 2006.
- [70] E. B. Curdts, “Some of the fundamental aspects of ground resistance measurements,” *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part I: Communication and Electronics*, vol. 77, no. 5, pp. 760–767, 1958.
- [71] J. Ramírez and E. Cano, *Sistemas de puesta a tierra: diseñado con IEEE-80 y evaluado con MEF*, primera ed., 2010.
- [72] Sonel S.A., “Manual de operación medidor de la resistencia efectiva de las puestas a tierra MRU-200-GPS,” vol. 1.06, p. 68, 2017.
- [73] E. Skrzynecki, “Guía sobre la norma EN 62305 medidores de la resistencia efectiva de puestas a tierra,” 2012.
- [74] R. Ferraz, S. Oliveira, A. Silva, J. Nerys, A. Alves, and W. Calixto, “Construction of an impulse current generator prototype applied in electrical grounding systems,” in *2015 CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*, 2015, pp. 649–653.
- [75] A. Selvam and P. Manikandan, “Performance analysis of flyash with bentonite in grounding pit,” in *2016 3rd International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES)*, 2016, pp. 58–61.

- [76] Fm Electrodo, “Gem mejorador de suelo - puesta a tierra.” [Online]. Available: <http://www.fmelectrodo.com/>
- [77] nVent Erico, “Material de Refuerzo de Tierra GEM25A,” p. 4, 2018. [Online]. Available: <https://www.erico.com/catalog/literature/E978B-LASP.pdf>
- [78] M. Li, Y. Gao, T. Zhang, H. Wu, X. Lao, and Z. Chen, “Analysis of soil resistivity characteristics under meteorological conditions in haikou city,” in *2017 IEEE 5th International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC-Beijing)*, 2017, pp. 1–5.
- [79] M. A. Ibrahim, L. Li, and P. Wang, “The design of 220kv substation grounding grid with difference soil resistivity using wenner and schlumberger methods,” in *2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, 2018, pp. 2525–2530.
- [80] K. Thiyagarajan, P. Acharya, L. Piyathilaka, and S. Kodagoda, “Numerical modeling of the effects of electrode spacing and multilayered concrete resistivity on the apparent resistivity measured using wenner method,” in *2020 15th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 2020, pp. 200–206.
- [81] M. Nayel, B. Lu, Y. Tian, and Y. Zhao, “Study of soil resistivity measurements in vertical two-layer soil model,” in *2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, 2012, pp. 1–5.
- [82] Z. R. Radakovic, M. V. Jovanovic, V. M. Milosevic, and N. M. Ilic, “Application of earthing backfill materials in desert soil conditions,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, no. 6, pp. 5288–5297, 2015.
- [83] G. Papaiz-Garbini, L. Pichon, M. Cucchiaro, and N. Haddad, “Multilayer ground determination from apparent resistivities and impact on grounding resistances,” in *2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Tokyo*, 2014, pp. 789–792.
- [84] R. T. Senthilkumar, “Optimization of soil parameters in multiple layers of ground structure,” in *2017 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 2017, pp. 1–5.

- [85] E. P. Santiago, A. J. S. Damasceno, L. C. Rocha, E. F. Cartaxo, and C. A. Frota, "Evaluation of the soil resistivity in the city of manaus aiming small residential grounding systems," in *2011 International Symposium on Lightning Protection*, 2011, pp. 288–293.
- [86] Q. Louw and P. Bokoro, "Soil resistivity: Field tests and estimation of zero-sequence currents," in *2017 IEEE AFRICON*, 2017, pp. 1061–1064.
- [87] S. C. Malanda, I. E. Davidson, E. Singh, and E. Buraimoh, "Analysis of soil resistivity and its impact on grounding systems design," in *2018 IEEE PES/IAS PowerAfrica*, 2018, pp. 324–329.
- [88] M. A. Salam, K. M. Jen, and M. A. Khan, "Measurement and simulation of grounding resistance with two and four mesh grids," in *2011 IEEE Ninth International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, 2011, pp. 208–213.
- [89] A. Ackerman, P. K. Sen, and C. Oertli, "Designing safe and reliable grounding in ac substations with poor soil resistivity: An interpretation of ieee std. 80," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, no. 4, pp. 1883–1889, 2013.
- [90] P. Lagace, M. H. Vuong, M. Lefebvre, and J. Fortin, "Multilayer resistivity interpretation and error estimation using electrostatic images," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 4, pp. 1954–1960, 2006.
- [91] F. Slaoui, S. Georges, and F. Erchiqui, "Interpretation of resistivity sounding data for multi-layer vertical earth model," in *2011 21st International Conference on Systems Engineering*, 2011, pp. 77–81.
- [92] F. Shoui, S. Georges, P. Lagace, and X. Do, "Fast processing of resistivity sounding measurements in n-layer soil," in *2001 Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37262)*, vol. 3, 2001, pp. 1743–1748 vol.3.
- [93] M. Purcar, C. Munteanu, A. Avram, and A. Bojita, "A two layer ground computational model for the numerical simulations of the earthing systems," in *2016 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE)*, 2016, pp. 398–402.

- [94] R. Batista, M. R. de Araújo, and R. R. Saldanha, "Parameter estimation of a two-layer soil model using quasi-newton methods," in *2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*, 2018, pp. 1–6.
- [95] A. Alves, R. Marinho, G. Brigatto, and L. Garces, "Multilayer stratification earth by kernel function and quasi-newton method," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 1, pp. 225–234, 2016.
- [96] M. Jesenik, A. Hamler, and M. Trlep, "Analyzing of a soil model using the finite element method for simulation of soil resistivity measurement," *IEEE Transactions on Magnetics*, pp. 1–1, 2021.
- [97] I. Gonos and I. Stathopoulos, "Estimation of multilayer soil parameters using genetic algorithms," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 1, pp. 100–106, 2005.
- [98] X. Luo, G. Wu, X. Zhang, X. Cao, and F. He, "Lightning impulse characteristic of weak current grounding system of the high-speed railway road-bed section," in *2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, 2014, pp. 647–650.
- [99] Youping Tu, Jinliang He, and Rong Zeng, "Lightning impulse performances of grounding devices covered with low-resistivity materials," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 3, pp. 1706–1713, 2006.
- [100] Y. Lin, J. Li, and W. Guangning, "Measurement of impulse grounding impedance in frequency domain," in *2010 International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application*, vol. 1, 2010, pp. 931–934.
- [101] Secretaría Central de ISO, "Norma Internacional ISO 9001 Sistemas de gestión de la calidad," *Norma Internacional*, p. 29.
- [102] International Electrotechnical Commission, "IEC 62561-7 Lightning protection system components (LPSC) Part-7 Requirements for earthing enhancing compounds," *International Standard*, no. pt. 7, p. 36, 2018.

Anexo A

Características de los LRM

A.1. LMR premezclado

El LRM premezclado utilizado para este trabajo es el Mejorador de suelo - FM compactador plus de 25 lb (ver Figura A.1), cuya función principal es reducir la RPT. Este LRM es un tratamiento natural para suelos de alta resistividad. Sus características son las siguientes [76]:

- Mejora la conductividad eléctrica del terreno, mejorando la disipación de las corrientes del electrodo de puesta a tierra.
- Mantiene un equilibrio de humedad adecuado para la puesta a tierra, debido a su composición la cual favorece la absorción, potenciando la retención de agua y de electrolitos.
- Garantiza la compactación de la puesta a tierra con el suelo, potenciando la efectividad del paso de la corriente.
- Prolonga el tiempo de vida útil de la puesta a tierra, debido a su PH de 6.5-8 (alcalino), que garantiza una mínima corrosión en los electrodos.
- No afecta al medio ambiente, elaborado con materia prima 100% natural, cuenta con hojas de datos de seguridad de materiales (MSDS, por sus siglas en inglés) avaladas por el Ministerio del Ambiente.
- Está en cumplimiento con la normativa de calidad ISO 9001:2015 [101].



Figura A.1: LRM premezclado.

A.1.1. Método de construcción

Los pasos para la implementación de **LRM** premezclado se visualizan en la Figura A.2 y son los siguientes [76]:

- 1) Cavar un agujero en forma cóncava alrededor de la varilla.
- 2) Mezclar la tierra tamizada con todo el contenido de una bolsa de **LRM**, adicionar agua y mezclarlo formando un gel.
- 3) Rellenar el agujero con la mezcla preparada y compactar.
- 4) Colocar el resto de la tierra sin tratar sobre la mezcla preparada y apisonar el suelo después de que el **LRM** se haya solidificado.

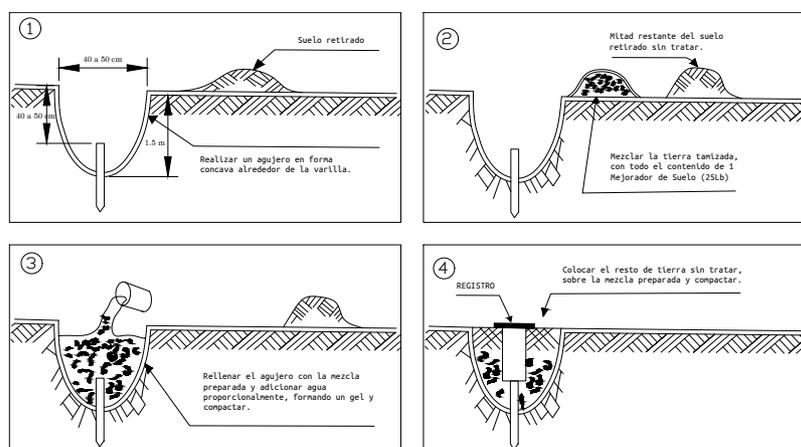


Figura A.2: Instrucciones de construcción de LRM premezclado [76].

A.2. LMR seco

El **LRM** seco utilizado para este trabajo es el GEM25A comercializado por la marca Erico (ver Figura A.3). Es ideal para utilizarse en áreas con pobre conductividad, tales como suelos rocosos, cimas de montaña y suelos arenosos. El **LRM** reduce dramáticamente los valores de **RPT**. Más aún, el **LRM** reduce el tamaño del **SPT** cuando los métodos convencionales no son satisfactorios. Sus características son [77]:

- Mantiene una **RPT** constante durante la vida útil del **SPT**.
- Optimiza el **SPT** en todo tipo de suelos, aún en épocas de sequía.
- No necesita recibir mantenimiento (recargarse con sales o sustancias químicas que puedan ser corrosivas).
- No requiere la presencia continua de agua para conservar su conductividad.
- Contiene cemento Portland, el cual al fraguar se endurece y transforma en un concreto conductivo.
- No se disuelve, descompone o derrama con el paso del tiempo.

- Puede ser mezclado o instalado ya sea húmedo o en su forma seca.
- Se asienta completamente en tres días, cura completamente en 28 días.
- No es un material corrosivo.
- Reduce el vandalismo y el robo, pues es difícil retirar los electrodos y cables del concreto (hormigón).
- Bolsas o cubetas fáciles de manejar de 25 lb (11,3 kg).
- Requiere solamente una persona para instalarlo.
- Supera los requisitos de la norma IEC 62561-7 [102] que establece la referencia para corrosión, filtración, contenido de azufre y otras regulaciones ambientales.
- Cumple con los requisitos de Toxicidad Característica del Procedimiento de Filtración (TCLP) de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (Environmental Protection Agency, EPA).



Figura A.3: LRM seco.

A.2.1. Método de construcción

Los pasos para la implementación de LRM seco se visualizan en la Figura A.4 y son los siguientes [77]:

- 1) Perforar un agujero de 7.5 cm ó más de diámetro y una profundidad 15 cm menor que la longitud del electrodo.
- 2) Colocar el electrodo en el centro del agujero y enterrarlo 30 cm. El extremo superior de la varilla quedará aproximadamente a unos 15 cm del nivel del terreno. Realizar la conexión necesaria.
- 3) Utilizar de 1.5 a 2 galones (5.7 a 7.6 litros) de agua por bolsa. La instalación del LRM en forma seca es aceptada para aplicaciones de varillas verticales.
- 4) Vaciar el LRM alrededor del electrodo. Adicionar agua proporcionalmente y compactar. Esperar a que el LRM endurezca, aproximadamente de 30 minutos a una hora antes de poner el relleno natural del agujero.
- 5) Rellenar la parte superior del agujero con la tierra que se sacó del mismo.

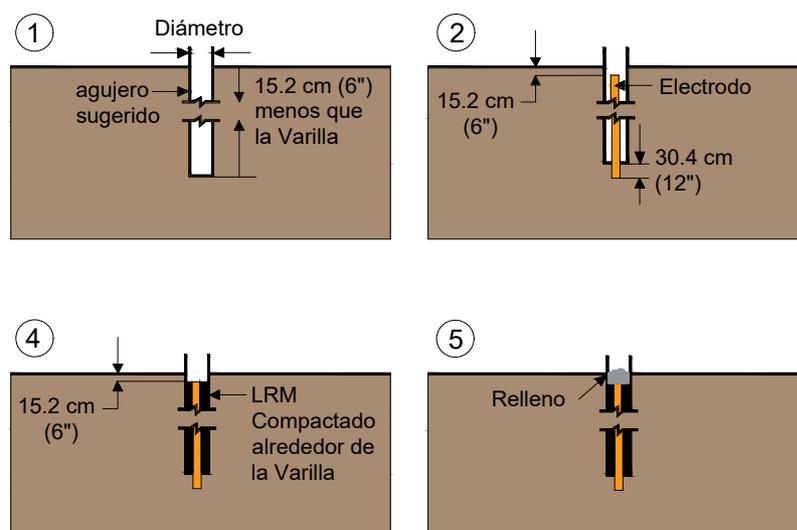


Figura A.4: Instrucciones de construcción de LRM seco [77].

Anexo B

Cotización de materiales

En la Figura B.1 se muestra una cotización de los materiales utilizados en este trabajo.



SISTEL COIMPOR CIA LTDA

Materiales Eléctricos de baja y alta tensión

R.U.C.: 0190479080001

DIRECCION: Jesus Arriaga 3-40 y Alfonso Malo

TELEFONO: (07) 2823447 - (07) 2832864

E-mail: ventas@sistel.com.ec

www.sistel.com.ec

PROFORMA : 000002979

Fecha : Cuenca, 16 de Abril del 2021

Cliente : 004236 UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA

Teléfono : 4135250

CI/RUC : 0190151530001

Dirección : CALLE VIEJA 12-30 Y ELIA LIUT

Pág: 1

CODIGO	CANT.	DESCRIPCION	PRECIO	%	TOTAL	IVA
			US \$	DESCTO.	US \$	
C0209	30	CABLE CU DESNUDO # 4 CENTELSA	2.3500		70.50 *	
C0206	30	CABLE CU DESNUDO # 2 CENTELSA	3.8000		114.00 *	
C0162	30	CABLE CU DESNUDO # 4/0 CENTELSA	12.1400		364.20 *	
G0009	6	CEMENTO GEM 25-A ATERRIZAMIENTO ELECT. CADWELD	24.0000		144.00 *	
MEJ-FM	6	CEMENTO MEJORADOR DE SUELO 25LBS	13.7000		82.20 *	
H0081	6	VARILLA COPERWELD 5/8 X 1.80 ALTA CAMADA	8.9000		53.40 *	
H0118	6	VARILLA COPERWELD 5/8 X 2.40 ALTA CAMADA	18.5000		111.00 *	
M0018	6	PERNO HENDIDO NO.- 4/0	5.2400		31.44 *	

TARIFA 0	TARIFA 12	DESCUENTO	IVA	GASTOS	TOTAL
0.00	970.74	0.00	116.49	0.00	1,087.23

SON : UN MIL OCHENTA Y SIETE DOLAR con 23/100 ctvs.

FORMA DE PAGO :

TIEMPO DE ENTREGA :

VALIDEZ DE LA OFERTA :

OBSERVACIONES :

MONICA TRUJILLO (v)
FIRMA DE RESPONSABILIDAD

Fecha de Impresión: 16 - Abr - 2021 Hora: 1:09:06

Figura B.1: Cotización de materiales.

Anexo C

Variación porcentual de la RPT con LRM

A continuación, se presentan los rangos porcentuales de disminución de la RPT con la cubierta de LRM en las varillas verticales de 1,8m de longitud conectadas con conductor de cobre desnudo #4/0, varillas de 2,4m conectadas con conductor #2, y de varillas de 2,4m conectadas con conductor #4/0. Estos porcentajes se realizan mediante la Tabla Base 4.22.

Los porcentajes de disminución de la RPT con LRM cuando se utilizan varillas de 2,4m de longitud y conductor #2 (ver Tabla C.1), es obtenida mediante la disminución del 4% de los valores porcentuales de la Tabla Base 4.22. Esto debido a que, conforme lo analizado en este trabajo, a medida que incrementa la complejidad del diseño de SPT la disminución de la RPT con LRM es menor, y en base al resultado obtenido en [5], donde se coloca LRM premezclado en una varilla de 1,8m en un terreno de $181 \Omega \cdot m$ obteniendo una reducción de $51,39 \Omega$ mientras que si se coloca LRM en una varilla de 2,4m la disminución es de $37,60 \Omega$. Siendo la diferencia porcentual entre los dos resultados de 3,9%.

Tabla C.1: Disminución porcentual de la RPT con LRM con varillas de 2,4m y conductor #2.

$\rho(\Omega \cdot m)$	1LRMV	2LRMVL	3LRMVL	3LRMVT	4LRMVC	6LRMVR
	$\Delta RPT(\%)$					
1 - 10	26%	17%	12%	9%	8%	7%
11 - 20	33%	24%	21%	17%	15%	14%
21 - 30	36%	24%	21%	17%	15%	14%
31 - 40	36%	24%	21%	17%	15%	14%
41 - 50	36%	24%	21%	17%	15%	14%
51 - 60	36%	24%	21%	19%	18%	21%
61 - 70	36%	24%	21%	19%	18%	21%
71 - 80	36%	24%	21%	19%	18%	21%
81 - 90	36%	24%	21%	19%	18%	21%
91 - 100	36%	24%	21%	24%	23%	21%
101 - 110	36%	36%	34%	24%	23%	21%
111 - 120	46%	36%	34%	29%	25%	23%
121 - 130	46%	36%	34%	29%	25%	23%
131 - 140	46%	36%	34%	29%	25%	23%
141 - 150	46%	36%	34%	29%	25%	23%
151 - 160	46%	36%	34%	29%	25%	23%
161 - 170	46%	36%	34%	29%	25%	23%
171 - 180	46%	42%	34%	32%	29%	26%
181 - 190	46%	42%	34%	32%	29%	26%
191 - 200	46%	42%	34%	32%	29%	26%
201 - 210	46%	42%	36%	34%	32%	26%
211 - 220	51%	46%	36%	34%	32%	26%
221 - 230	51%	46%	41%	36%	32%	26%
231 - 240	56%	51%	46%	41%	36%	29%
241 - 250	56%	51%	46%	41%	36%	29%

Los porcentajes de disminución de la RPT cuando se utilizan varillas de 1,8m de longitud y conductor #4/0 se muestran en la Tabla C.2, estos valores porcentuales se obtienen disminuyendo un 2% de los valores porcentuales de la Tabla Base 4.22. Esto se debe a que se incrementa el calibre del conductor, sin embargo en la literatura [2] se determina que, al aumentar el radio de los conductores enterrados no disminuye apreciablemente el valor de RPT, pero se toma este porcentaje para tener valores conservadores.

Tabla C.2: Disminución porcentual de la RPT con LRM con varillas de 1,8m y conductor #4/0.

$\rho(\Omega \cdot m)$	1LRMV	2LRMVL	3LRMVL	3LRMVT	4LRMVC	6LRMVR
	$\Delta RPT(\%)$					
1 - 10	28%	19%	14%	11%	10%	9%
11 - 20	35%	26%	23%	19%	17%	16%
21 - 30	38%	26%	23%	19%	17%	16%
31 - 40	38%	26%	23%	19%	17%	16%
41 - 50	38%	26%	23%	19%	17%	16%
51 - 60	38%	26%	23%	21%	20%	23%
61 - 70	38%	26%	23%	21%	20%	23%
71 - 80	38%	26%	23%	21%	20%	23%
81 - 90	38%	26%	23%	21%	20%	23%
91 - 100	38%	26%	23%	26%	25%	23%
101 - 110	38%	38%	36%	26%	25%	23%
111 - 120	48%	38%	36%	31%	27%	25%
121 - 130	48%	38%	36%	31%	27%	25%
131 - 140	48%	38%	36%	31%	27%	25%
141 - 150	48%	38%	36%	31%	27%	25%
151 - 160	48%	38%	36%	31%	27%	25%
161 - 170	48%	38%	36%	31%	27%	25%
171 - 180	48%	44%	36%	34%	31%	28%
181 - 190	48%	44%	36%	34%	31%	28%
191 - 200	48%	44%	36%	34%	31%	28%
201 - 210	48%	44%	38%	36%	34%	28%
211 - 220	53%	48%	38%	36%	34%	28%
221 - 230	53%	48%	43%	38%	34%	28%
231 - 240	58%	53%	48%	43%	38%	31%
241 - 250	58%	53%	48%	43%	38%	31%

Finalmente, los valores porcentuales de disminución de la RPT con LRM utilizando varillas de 2,4m de longitud y conductor #4/0 (ver Tabla C.3) se obtiene disminuyendo un 6% de la Tabla Base 4.22, esto corresponde al 4% por el incremento de longitud de la varilla de 1,8m a 2,4m y, el 2% por el incremento del calibre de conductor de #2 a #4/0.

Tabla C.3: Disminución porcentual de la RPT con LRM con varillas de 2,4m y conductor #4/0.

$\rho(\Omega \cdot m)$	1LRMV	2LRMVL	3LRMVL	3LRMVT	4LRMVC	6LRMVR
	$\Delta RPT(\%)$					
1 - 10	24%	15%	10%	7%	6%	5%
11 - 20	31%	22%	19%	15%	13%	12%
21 - 30	34%	22%	19%	15%	13%	12%
31 - 40	34%	22%	19%	15%	13%	12%
41 - 50	34%	22%	19%	15%	13%	12%
51 - 60	34%	22%	19%	17%	16%	19%
61 - 70	34%	22%	19%	17%	16%	19%
71 - 80	34%	22%	19%	17%	16%	19%
81 - 90	34%	22%	19%	17%	16%	19%
91 - 100	34%	22%	19%	22%	21%	19%
101 - 110	34%	34%	32%	22%	21%	19%
111 - 120	44%	34%	32%	27%	23%	21%
121 - 130	44%	34%	32%	27%	23%	21%
131 - 140	44%	34%	32%	27%	23%	21%
141 - 150	44%	34%	32%	27%	23%	21%
151 - 160	44%	34%	32%	27%	23%	21%
161 - 170	44%	34%	32%	27%	23%	21%
171 - 180	44%	40%	32%	30%	27%	24%
181 - 190	44%	40%	32%	30%	27%	24%
191 - 200	44%	40%	32%	30%	27%	24%
201 - 210	44%	40%	34%	32%	30%	24%
211 - 220	49%	44%	34%	32%	30%	24%
221 - 230	49%	44%	39%	34%	30%	24%
231 - 240	54%	49%	44%	39%	34%	27%
241 - 250	54%	49%	44%	39%	34%	27%