



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE ELECTRICIDAD

**PROPUESTA DEL MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE
PUESTA A TIERRA DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA
SALESIANA SEDE CUENCA**

Trabajo de titulación previo a la obtención
del título de Ingeniero Eléctrico

**AUTORES: DANIEL ANDRES LUDEÑA AGUILAR
JUAN DANIEL GALARZA LITUMA**

TUTOR: ING. HERNAN PATRICIO GUILLEN COELLO

Cuenca – Ecuador

2023

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Juan Daniel Galarza Lituma con documento de identificación N° 0107498743 y Daniel Andrés Ludeña Aguilar con documento de identificación N° 1104099435; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 13 de septiembre del 2023

Atentamente,



Daniel Andres Ludeña Aguilar

1104099435



Juan Daniel Galarza Lituma

0107498743

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL
TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA
SALESIANA**

Nosotros, Juan Daniel Galarza Lituma con documento de identificación N° 0107498743 y Daniel Andrés Ludeña Aguilar con documento de identificación N° 1104099435, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto técnico: “Propuesta del mejoramiento del sistema de puesta a tierra de la universidad politécnica salesiana sede cuenca”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 13 de septiembre del 2023

Atentamente,



Daniel Andres Ludeña Aguilar

1104099435



Juan Daniel Galarza Lituma

0107498743

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Hernán Patricio Guillen Coello con documento de identificación N° 0102063120, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “PROPUESTA DEL MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA”, realizado por Juan Daniel Galarza Lituma con documento de identificación N° 0107498743 y por Daniel Andrés Ludeña Aguilar con documento de identificación N° 1104099435, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 13 septiembre del 2023

Atentamente,



Firmado electrónicamente por:
**HERNAN PATRICIO
GUILLEN COELLO**

Ing. Hernán Guillen Coello

0102063120

DEDICATORIA

A mis queridos padres, Nestor y Saula, cuya dedicación y sacrificio han sido mi mayor motivación. Su amor incondicional y apoyo constante han guiado cada paso en este camino académico. A mis apreciados hermanos, Alejandro y Stefany, cómplices de risas y hombros en los momentos difíciles. A mi novia, Valeria, por creer en mí en todo momento. Tu apoyo ha sido mi fuente de fuerza y valor. A mis entrañables amigos de la universidad, quienes compartieron no solo conocimiento, sino también risas, desafíos y un valioso compañerismo.

Daniel Andres Ludeña Aguilar

Con profundo cariño y gratitud, a mis amados padres, Carlos y Beatriz, por su inquebrantable apoyo y amor incondicional. A mis queridos hermanos, Carlos y Valeria, cuya inspiración siempre ha sido mi motor. A mis sobrinos, fuente de alegría y motivación constante. También a mis amigos y compañeros, cuya amistad y aliento han sido fundamentales en este camino. Y un agradecimiento especial a Lia, cuyo apoyo constante iluminó cada paso de este viaje.

Juan Daniel Galarza Lituma

RESUMEN

El presente trabajo de tesis se llevó a cabo con el propósito fundamental de analizar y evaluar el sistema de puesta a tierra en la Universidad Politécnica Salesiana, Sede Cuenca. La meta primordial consistió en proponer una optimización de dicho sistema, considerando tanto su situación actual como las futuras expansiones y edificaciones previstas para la institución. El análisis del estado actual del sistema de puesta a tierra, así como la formulación de mejoras, se sustentaron en las directrices normativas establecidas por organismos reconocidos como [1], [2], [3], [4].

Para la determinación de la resistividad del suelo, se empleó el método de Wenner, mientras que para evaluar la resistencia de puesta a tierra de las mallas preexistentes se adoptó el método del 62%. Para calcular la resistencia de puesta a tierra de la nueva malla propuesta, se desarrolló un código en MATLAB. Siguiendo las ecuaciones prescritas en las normativas mencionadas, se obtuvo como resultado la selección de un conductor de calibre 1/0 con una longitud de 1854 metros lineales de conductor calibre 1/0 AWG, así como 182 metros del mismo tipo de conductor pero en variante TTU, y obteniendo una resistencia de 0.0471 ohmios.

La propuesta aborda tanto los requerimientos actuales como los proyectados, brindando una solución técnica sólida y sostenible en concordancia con los más altos estándares de la ingeniería. En este contexto, se destaca la importancia de una puesta a tierra eficiente y confiable como componente esencial de la infraestructura eléctrica, garantizando la seguridad y continuidad de las operaciones en el entorno universitario.

ABSTRACT

The present thesis work was conducted with the primary purpose of analyzing and evaluating the grounding system at the Salesian Polytechnic University, Cuenca Campus. The main goal was to propose an optimization of the said system, considering both its current status and the future expansions and constructions planned for the institution. The analysis of the current state of the grounding system, as well as the formulation of improvements, were based on normative guidelines established by recognized organizations such as [1], [2], [3], [4].

The Wenner method was employed for determining the soil resistivity, while the 62% method was adopted for evaluating the grounding resistance of the existing grids. A MATLAB code was developed to calculate the grounding resistance of the proposed new grid. Following the equations prescribed in the mentioned standards, the outcome resulted in the selection of a 1/0 gauge conductor with a length of 1854 linear meters of 1/0 AWG gauge conductor, along with 182 meters of the same type of conductor but in a TTU variant, obtaining a resistance of 0.0471 ohms.

The proposal addresses both the current and projected requirements, providing a technically sound and sustainable solution in accordance with the highest engineering standards. In this context, the importance of an efficient and reliable grounding system is emphasized as an essential component of the electrical infrastructure, ensuring safety and operational continuity in the university environment.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|----------|
| CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN | I |
| CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR | II |
| CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN | III |
| DEDICATORIA | IV |
| RESUMEN | V |
| ÍNDICE DE FIGURAS | X |
| ÍNDICE DE TABLAS | XII |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| OBJETIVOS | 3 |
| 1 SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA | 4 |
| 1.1 Introducción | 4 |
| 1.2 Componentes de un Sistemas de puesta a tierra | 4 |
| 1.2.1 El suelo | 4 |
| 1.2.2 Barraje de puesta a tierra | 5 |
| 1.2.3 Conductor de puesta a tierra | 6 |
| 1.2.4 Electrodo de puesta a tierra | 6 |
| 1.2.5 Uniones | 7 |
| 1.2.6 Terminales de compresión | 7 |
| 1.3 Resistividad del terreno | 9 |
| 1.3.1 Medición de la Restividad del terreno | 10 |
| 1.3.1.1 Método de Wenner | 11 |
| 1.3.1.2 Método de Schlumberger | 12 |
| 1.3.2 Mejoramiento del suelo | 13 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1.3.3 | Modelamiento de tipo de suelos | 14 |
| 1.3.3.1 | Suelo Uniforme | 15 |
| 1.3.3.2 | Suelo de dos capas por método gráfico | 16 |
| 1.4 | Resistencia (Impedancia) de puesta a tierra | 17 |
| 1.4.1 | Medición de la Resistencia de puesta a tierra | 18 |
| 1.4.1.1 | Método de los dos puntos | 18 |
| 1.4.1.2 | Método de los tres puntos | 19 |
| 1.4.1.3 | Método de caída de potencial | 21 |
| 1.4.1.4 | Método de <i>Clamp on</i> | 24 |
| 1.5 | Criterios de diseño de un sistema de puesta a tierra | 24 |
| 1.5.1 | Corriente de malla (I_G) | 25 |
| 1.5.1.1 | Corriente simétrica de falla a tierra (I_F) | 25 |
| 1.5.1.2 | Factor de decremento (D_f) | 26 |
| 1.5.1.3 | Factor de división de corriente (S_f) | 27 |
| 1.5.2 | Duración de falla (t_f) y Duración de shock (t_s) | 27 |
| 1.5.3 | Geometría de la malla | 27 |
| 1.5.4 | La resistividad del material de la superficie. (ρ_s) | 28 |
| 1.5.5 | Resistividad del suelo (ρ) | 30 |
| 1.5.6 | Conductor | 30 |
| 1.5.7 | Tensiones tolerables | 33 |
| 1.6 | Validación del sistema de puesta a tierra | 34 |
| 1.6.1 | Ecuación de Schwarz para suelo uniforme | 35 |
| 1.6.2 | Ecuación de Schwarz para suelo de dos capas | 37 |
| 1.6.3 | Ecuación de Sverak | 37 |
| 1.6.4 | Tensión real de toque | 38 |
| 1.6.5 | Tensión real de paso | 41 |
| 2 | ANÁLISIS DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA ACTUAL DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA | 43 |
| 2.1 | Criterios de análisis | 43 |
| 2.1.1 | Medición de Resistencia de puesta a tierra | 43 |
| 2.1.2 | Medición de la Resistividad del suelo | 44 |
| 2.1.3 | <i>M_LAT</i> (Laboratorio alta tensión) | 47 |
| 2.1.4 | <i>M_GM</i> (Guillermo Mensi) | 48 |
| 2.1.5 | <i>M_MR</i> (Mario Rizzini) | 49 |
| 2.1.6 | <i>M_PCH</i> (Pantalla Cancha) | 49 |
| 2.1.7 | <i>M_AUT</i> (Automotriz) | 50 |
| 2.1.8 | <i>M_CIMA</i> (CIMA) | 51 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 2.1.9 | <i>M_GJB</i> (Generador Juan Botasso) | 52 |
| 2.1.10 | <i>M_BIB</i> (Biblioteca) | 52 |
| 3 | PROPUESTA DE DISEÑO SISTEMA DE PUESTA A TIERRA | 54 |
| 3.1 | Recorrido | 55 |
| 3.2 | Cálculos | 55 |
| 3.3 | Evaluación técnica y económica | 61 |
| 4 | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 63 |
| 4.1 | Conclusiones | 63 |
| 4.2 | Recomendaciones | 64 |
| | ANEXOS | 66 |
| A | Medición de la resistencia de puesta a tierra de las mallas existentes | 67 |
| B | Medición de la resistividad del suelo | 75 |
| C | Código Matlab para diseño de la propuesta | 80 |
| D | Planos | 83 |
| | BIBLIOGRAFÍA | 87 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | | |
|------|--|----|
| 1.1 | Varilla de cobre con sus accesorios [5]. | 7 |
| 1.2 | Proceso de aplicación de soldadura exotérmica [6]. | 8 |
| 1.3 | Perno Ojo [4]. | 9 |
| 1.4 | Derivación de compresión tipo C [4]. | 10 |
| 1.5 | Barra de puesta a tierra [4]. | 11 |
| 1.6 | Aplicación del método de Wenner [Autor]. | 12 |
| 1.7 | Aplicación del método de Schlumberger [Autor]. | 14 |
| 1.8 | Curva común de resistividad aparente en suelo uniforme [Autor]. | 16 |
| 1.9 | Metodo Grafico de Sunde [7]. | 17 |
| 1.10 | Método de los dos puntos [8]. | 19 |
| 1.11 | Medición de la resistencia de tierra con el Método de los tres puntos [8]. | 21 |
| 1.12 | Método de los tres puntos [9]. | 22 |
| 1.13 | Método de caída de potencial [1]. | 22 |
| 1.14 | Método de caída de potencial [1]. | 23 |
| 1.15 | Método clamp-on [1]. | 24 |
| 2.1 | Plano actual de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca | 44 |
| 2.2 | Simbología del plano | 45 |
| 2.3 | Telurometro Amprobe GP-2 [8] | 45 |
| 2.4 | Telurometro SONEL MRU-200-GPS [10] | 46 |
| 3.1 | Propuesta de la MPT | 56 |
| 3.2 | Interfaz programa Matlab | 57 |
| 3.3 | Corriente de falla | 58 |
| 3.4 | Área y Perímetro de la malla | 59 |
| 3.5 | Parámetros para los cálculos | 60 |
| 3.6 | Resultados Obtenidos de los cálculos | 61 |
| A.1 | Medición de resistencia de malla de puesta a tierra del laboratorio de alta tensión | 67 |
| A.2 | Medición de resistencia de malla de puesta a tierra del edificio Gui- llermo Mensi | 68 |

| | | |
|-----|---|----|
| A.3 | Medición de resistencia de malla de puesta a tierra del edificio Mario Rizzini | 69 |
| A.4 | Medición de resistencia de malla de la pantalla en la cancha de fútbol | 70 |
| A.5 | Medición de resistencia de malla de puesta a tierra del transformador ubicado en la parte posterior al edificio de Automotriz | 71 |
| A.6 | Medición de resistencia de malla de puesta a tierra del generador del edificio Juan Botasso | 72 |
| A.7 | Medición de resistencia de malla de puesta a tierra del transformador ubicado a un lado del edificio CIMA | 73 |
| A.8 | Medición de resistencia de malla de puesta a tierra del edificio de Biblioteca | 74 |
| B.1 | Medición de resistividad del suelo alrededor del laboratorio de alta tensión, Terreno 1 | 75 |
| B.2 | Medición de resistividad del suelo alrededor del edificio Mario Rizzini, Terreno 2 | 76 |
| B.3 | Medición de resistividad del suelo en la cancha, Terreno 4 | 77 |
| B.4 | Medición de resistividad del suelo frente al edificio Juan Botasso, Terreno 5 | 78 |
| B.5 | Medición de resistividad del suelo en la parte inferior del edificio Juan Botasso donde se encuentra el Generador, Terreno 6 | 79 |
| C.1 | Primera parte del código | 81 |
| C.2 | Segunda parte del código | 81 |
| C.3 | Tercera parte del código | 82 |
| C.4 | Cuarta parte del código | 82 |
| D.1 | Plano actual de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca | 83 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | | |
|------|--|----|
| 1.1 | Resistividades de varios tipos de suelos [11] | 5 |
| 1.2 | <i>Typical surface material resistivities</i> [2]. | 29 |
| 1.3 | Constantes de materiales [9]. | 31 |
| 1.4 | Constantes de materiales para Kf [2]. | 32 |
| 2.2 | Promedio de resistividad del suelo | 46 |
| 2.1 | Mediciones de resistividad del terreno | 47 |
| 2.3 | Resistencia de la MLAT | 47 |
| 2.4 | Parámetros de la MLAT | 48 |
| 2.5 | Resistencia de la MGM | 48 |
| 2.6 | Parámetros de la MGM | 48 |
| 2.7 | Resistencia de la MMR | 49 |
| 2.8 | Parámetros de la MMR | 49 |
| 2.9 | Resistencia de la MPCH | 50 |
| 2.10 | Parámetros de la MPCH | 50 |
| 2.11 | Resistencia de la MAUT | 50 |
| 2.12 | Parámetros de la MAUT | 51 |
| 2.13 | Resistencia de la MCIMA | 51 |
| 2.14 | Parámetros de la MCIMA | 51 |
| 2.15 | Resistencia de la MGJB | 52 |
| 2.16 | Parámetros de la MGJB | 52 |
| 2.17 | Resistencia de la MBIB | 53 |
| 2.18 | Parámetros de la MBIB | 53 |
| 3.1 | Presupuesto para el diseño planteado | 61 |

INTRODUCCIÓN

Un buen sistema de puesta tierra es crucial en los sistemas de energía eléctrica para garantizar la seguridad de las personas y los equipos eléctricos y electrónicos conectados al mismo. Un Sistema de Puesta a Tierra (SPT) proporciona un camino de baja resistencia para que fluyan las corrientes de falla, minimizando así el riesgo de choque eléctrico y protegiendo contra daños [1].

A lo largo de la historia, se han llevado a cabo diversas iniciativas y normativas para regular la conexión a tierra en edificaciones, desde la propuesta de la Conferencia Nacional sobre Reglas Eléctricas Estándar (NCSER) en 1905 para conectar los sistemas de corriente alterna a tierra a través de tuberías de agua, hasta la invención de electrodos de cobre y el desarrollo del método de los tres electrodos para medir la resistencia de la conexión a tierra, en 1918 [12]. En 1961, la publicación de la primera versión de la norma [2] marcó un hito en la estandarización de la puesta a tierra. Actualmente, existen diversas normas y versiones que regulan el análisis y construcción de sistemas de puesta a tierra en edificaciones, lo que evidencia la importancia de este aspecto en la seguridad eléctrica.

En [11], se realizan mediciones de las Mallas de Puesta a Tierra (MPT) utilizando métodos como el *clamp on*; Esta herramienta que se ha convertido en una práctica común en la industria, permite medir la resistencia de puesta a tierra sin necesidad de interrumpir el suministro eléctrico. Con esta tecnología, se puede obtener información precisa y confiable sobre la calidad del sistema de puesta a tierra. La implementación de estas medidas modernas asegura una mayor eficiencia y eficacia en la realización de las mediciones.

De [9], plantea que se pueden realizar mediciones de la resistividad de un terreno extenso utilizando el método Wenner el cual es una técnica para medir la resistividad eléctrica de suelos y rocas. De acuerdo con [13], este método involucra cuatro electrodos equidistantes que se insertan en el suelo a lo largo de una línea recta. Los

electrodos externos sirven como electrodos de corriente, mientras que los electrodos internos miden la caída de voltaje a través del suelo. El espacio entre los electrodos determina la profundidad de penetración de la corriente en el suelo. Al medir la caída de voltaje y conocer la corriente, se puede calcular la resistividad del suelo.

Para el diseño del mejoramiento se propone una unión entre las mallas existentes de los distintos laboratorios y edificios de la Universidad Politecnica Salesiana (UPS) en los cuales se encuentre una MPT para formar así una conexión equipotencial entre las mismas, bajo los criterios de la normativa [2], [14], y [3].

OBJETIVOS

Objetivo General

Proponer un mejoramiento del sistema de puesta a tierra de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca interconectando las mallas existentes para formar un sistema robusto.

Objetivos Específicos

- Identificar las características y especificaciones técnicas de las mallas de puesta a tierra existentes en la universidad basadas en las normativas vigentes nacionales e internacionales.
- Determinar un plan de interconexión de las mallas de puesta a tierra existentes en la universidad, que permita mejorar la eficiencia y seguridad de los sistemas eléctricos y electrónicos que se utilizan en la institución.
- Evaluar los beneficios técnicos y económicos de la implementación del plan de interconexión de las mallas de puesta a tierra en la universidad.

CAPÍTULO 1

SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA

1.1. Introducción

Los sistemas de puesta a tierra son una parte esencial de cualquier instalación eléctrica, brindando seguridad y protección a personas y equipos. En términos simples, poner a tierra significa conectar un conductor a tierra o un cuerpo conductor grande, como una tubería de agua de metal, para crear una ruta de baja resistencia para que las corrientes de falla fluyan de manera segura lejos de las personas y los equipos [15]. Los sistemas de conexión a tierra evitan descargas eléctricas, incendios y daños en los equipos por rayos, sobretensiones y otras fallas eléctricas, una conexión a tierra adecuada minimiza el riesgo de descarga eléctrica y peligros de incendio. El diseño y la instalación adecuada de la conexión a tierra son fundamentales para garantizar la confiabilidad y seguridad de cualquier sistema eléctrico. En este capítulo, discutiremos los conceptos básicos de los sistemas de puesta a tierra, sus tipos, componentes y principios de diseño.

1.2. Componentes de un Sistemas de puesta a tierra

1.2.1. El suelo

Es la capa superior de la tierra la cual cubre la mayor parte de terreno en la misma, está compuesta de varios minerales como lo son, las rocas, arcilla, arena, limo, aire, agua y materiales orgánicos compuestos de animales y plantas muertas. El suelo tiene varias propiedades entre ellas la resistencia y resistividad eléctrica factores muy importantes al momento de diseñar un sistema de puesta a tierra pues

estos valores dependerán del tipo de suelo, y del contenido de agua en el mismo ya que su resistividad baja cuando existe alto contenido de esta, en cambio si el suelo es seco y con partículas pequeñas actuara como no-conductor por ejemplo la arena, rocas, arcillas [5], [6]. A continuación en la tabla 1.1 se presentan varios tipos de suelos con su resistividad.

Tabla 1.1: Resistividades de varios tipos de suelos [11]

| Tipo de suelo | Resistividad en Wm |
|---|--------------------|
| Terrenos pantanosos | 30 |
| Limo | 20 a 100 |
| Humus | 10 a 150 |
| Turba humeda | 5 a 100 |
| Arcilla plastica | 50 |
| Margas y arcillas compactas | 100 a 200 |
| Arena arcillosa | 50 a 500 |
| Arena silicea | 200 a 3000 |
| Suelo pedregoso cubierto de cesped | 300 a 500 |
| Calizas blandas | 100 a 300 |
| Calizas compactas | 1000 a 5000 |
| Calizas agrietadas | 500 a 1000 |
| Pizarras | 50 a 300 |
| Rocas de mica y cuarzo | 800 |
| Granitos y gres procedentes de alteracion | 1500 a 10000 |
| Granitos y gres muy alterados | 100 a 600 |
| Hormigon | 2000 a 3000 |
| Grava | 2000 a 5000 |

1.2.2. Barraje de puesta a tierra

El barraje de puesta a tierra es un elemento esencial en los sistemas de puesta a tierra, ya que su función principal es el de enlace entre la malla o el electrodo de puesta a tierra y los elementos eléctricos a proteger. Generalmente están hechos de aluminio o de cobre para que sea capaz de soportar elevadas corrientes eléctricas [9]. El objetivo de la misma es de brindar un punto seguro de conexión por el cual la corriente puede fluir hacia la malla o el electrodo de puesta a tierra y así asegurar una adecuada protección y seguridad del sistema eléctrico. Es por esto que el barraje de puesta a tierra debe estar en continua inspección y mantenimiento para asegurar su correcto funcionamiento [16].

1.2.3. Conductor de puesta a tierra

El conductor en el sistema de puesta a tierra es un elemento crucial para el correcto funcionamiento del sistema, y puede estar hecho de cobre o aluminio, dependiendo de la aplicación el conductor puede estar desnudo o tener un recubrimiento para protegerlo de condiciones ambientales adversas. El principal propósito del conductor es crear una conexión entre el barraje del sistema de puesta a tierra y la varilla o la malla de puesta a tierra. Es importante que el conductor sea dimensionado adecuadamente, ya que debe ser capaz de transportar la corriente de falla a descargar [6]. Si el conductor no es capaz de transportar dicha corriente, puede ocasionar graves daños tanto a las personas como a los equipos conectados al sistema de puesta a tierra. Por lo tanto, el dimensionamiento del conductor debe ser cuidadosamente calculado para garantizar la seguridad del sistema y de las personas que lo utilizan .

1.2.4. Electrodo de puesta a tierra

“An electrode is a device used in grounding systems to provide a safe path for electrical current to flow into the ground” [17]. La resistencia a tierra de cualquier SPT depende del tipo de electrodo utilizado en el sistema. El cobre es el material más común debido a su alta conductividad y resistencia a la corrosión. También se utilizan acero inoxidable, aluminio y acero galvanizado para los electrodos de tierra. Existen tres tipos de varillas de cobre para sistemas de puesta a tierra: varilla de cobre sólido, varilla de acero revestida de cobre y varilla de acero con núcleo de cobre recubierto, vease en la figura 1.1 un ejemplo de estas.. Las placas, varillas cilíndricas y mallas también se utilizan como electrodos de tierra. A veces, es difícil insertar una varilla de cobre sólido en terrenos duros y rocosos sin doblarla. En este caso, se utiliza la varilla de cobre con núcleo de acero para insertarla en el suelo duro debido a su propiedad de resistencia al desgarro del revestimiento [5], es importante considerar pozos o cajas de revisión para en un futuro analizar el estado del SPT. resulta frecuente hallar el uso de conductores de cobre de 7 hilos con calibre 2/0 AWG (American Wire Gauge). Estos conductores presentan propiedades mecánicas que benefician la rigidez de la malla, además de poseer una resistencia natural a la corrosión.

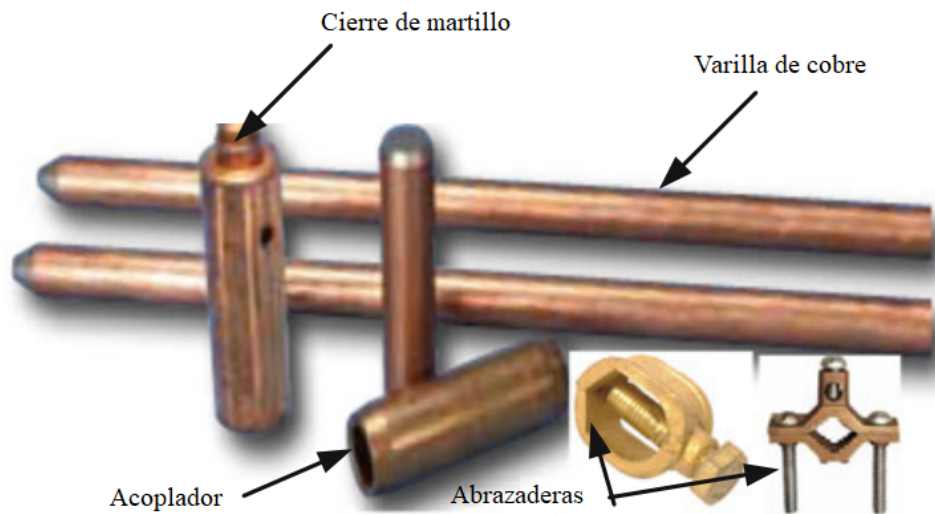


Figura 1.1: Varilla de cobre con sus accesorios [5].

1.2.5. Uniones

Las conexiones o uniones son un elemento crucial en los SPT debido a que su fiabilidad depende de ello. Dado que estas conexiones a menudo no reciben inspecciones continuas ni mantenimiento, es fundamental que se realicen de manera impecable. Existen dos tipos de conexiones: las mecánicas o manuales y las exotérmicas [6]. Las conexiones mecánicas son una técnica más antigua y se utilizan varios tipos de conectores certificados, aunque también hay muchos no certificados que pueden generar malas prácticas y conexiones inadecuadas desde un punto de vista técnico.

Por otro lado, las conexiones exotérmicas son las más utilizadas debido a la seguridad que proporcionan, como se observa en la Fig. 1.2. Se trata de un tipo de soldadura que permite garantizar dos continuidades gracias a una reacción química entre el óxido de cobre y el aluminio. Estos elementos se combinan mediante calor para formar una soldadura muy estable entre los dos conductores a unir [16]. Existen varias marcas de equipos para realizar conexiones exotérmicas, siendo las más utilizadas en nuestro país Cadweld, Mexweld o Thermoweld.

1.2.6. Terminales de compresión

Según la norma [4], En el proceso de interconexión en la estructura de la red, se requerirá llevar a cabo empalmes que cumplan con ciertas directrices. Estos empalmes deben ser realizados utilizando una ponchadora que aplique fuerza, en un rango

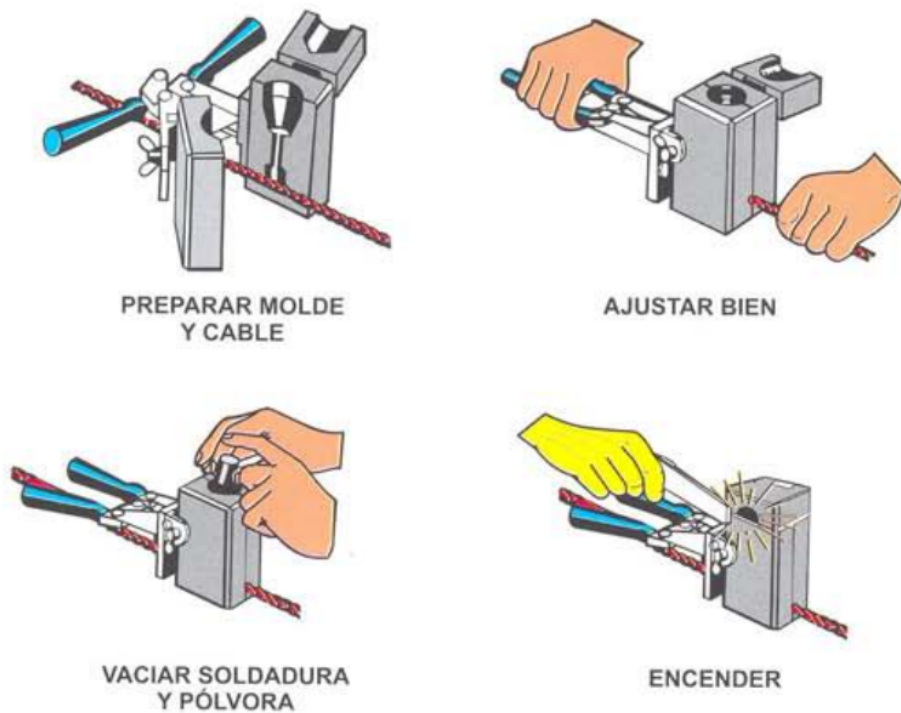


Figura 1.2: Proceso de aplicación de soldadura exotérmica [6].

que varía entre 7 y 20 toneladas. La magnitud de la fuerza necesaria se ajustará según el calibre del conductor en cuestión.

En situaciones en las que se precise emplear una barra de conexión a tierra se utilizará una barra conductora de cobre como la de la figura 1.5. Esta barra contendrá perforaciones cuyos tamaños seguirán el estándar NEMA para orificios de perno. La barra en sí deberá tener un grosor mínimo de 6 mm y un ancho de 50 mm. Antes de llevar a cabo la conexión, es esencial llevar a cabo una limpieza adecuada.

Para asegurar una conexión robusta, se utilizarán conectores con dos perforaciones, que son comúnmente denominados conectores de perno ojo, véase la figura 1.3. Además, se explorarán otras alternativas como las derivaciones de tipo C como los de la figura 1.4, las cuales permiten la interconexión de dos conductores de manera eficiente y segura.



Figura 1.3: Perno Ojo [4].

1.3. Resistividad del terreno

La medición de la resistividad del suelo es un aspecto fundamental que debe considerarse por su rol de gran importancia en el diseño de un SPT eficiente. Aunque mediante la clasificación del tipo de suelo se pueda realizar una estimación de la resistividad, conviene tener en cuenta que dicho valor no puede considerarse concluyente debido a la inherente falta de homogeneidad en los suelos [18]. Por lo tanto, es fundamental llevar a cabo mediciones de campo precisas utilizando diferentes métodos para aproximar el valor de resistividad más preciso posible, ya que este es uno de los aspectos más influyentes en la descarga de corrientes en el terreno.

Una consideración primordial para la implementación efectiva de un SPT es la comprensión exhaustiva de las características del suelo donde será instalado. Cada suelo posee propiedades únicas que pueden afectar directamente la eficacia de un SPT. Dentro de estas propiedades, la resistividad juega un papel fundamental y, por lo tanto, debe ser evaluada meticulosamente. Al medir la resistividad del suelo, se debe hacer un promedio de los efectos de las diversas capas que lo conforman en el área de estudio, dado que la homogeneidad completa resulta prácticamente inalcanzable. Esta consecuencia se conoce como resistividad aparente y se acepta una precisión del 5%, como adecuada [19].

Existen varios tipos de suelos que pueden presentarse en la medición de resistividad. Los suelos uniformes, aunque poco comunes, son aquellos en los que la medición de la resistividad no varía considerablemente con el aumento de la profundidad. Los suelos de dos capas, por otro lado, presentan una capa superior con una resistividad



Figura 1.4: Derivación de compresión tipo C [4].

finita que varía significativamente en comparación con la capa inferior. Esto también se aplica a los suelos de múltiples capas, donde se encuentran múltiples resistividades para diferentes profundidades y posiciones. Además, la resistividad del suelo puede variar según factores como la temperatura, la concentración de sales, la humedad y la permeabilidad [5].

1.3.1. Medición de la Resistividad del terreno

La resistividad del suelo no es un factor estandarizado, varía dependiendo de la composición del mismo y del tipo de suelo. Es por esto que existen diferentes técnicas de medición que brindan mayor fiabilidad en la obtención de estos datos, más allá de las propiedades intrínsecas de cada suelo. Conociendo que los suelos pueden ser uniformes, de doble capa o multicapa, la correcta identificación de la composición del suelo aportará significativamente a la efectividad del SPT.

Se puede encontrar diversos métodos confiables para medir la resistividad del suelo, como el método de Lee, el método de Schlumberger, el método de Dipolo-Dipolo, entre otros [6]. Sin embargo, el método de Wenner debido a su adecuación a

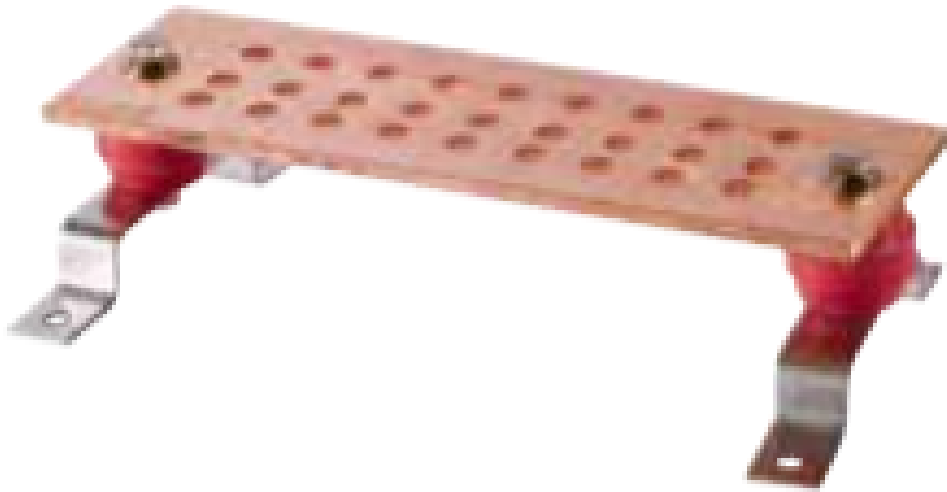


Figura 1.5: Barra de puesta a tierra [4].

las necesidades y aceptación generalizada se elige como el mas adecuado para efectos de la norma [1].

1.3.1.1. Método de Wenner

Para llevar a cabo el método de Wenner, se requiere un telurómetro que cuente con cuatro entradas para conectar los cuatro electrodos, tambien conocidas como picas, que se insertarán en el suelo a analizar. Estos electrodos se introducen en el terreno a analizar en línea recta, a una distancia **a** entre ellos y se insertan a una profundidad igual **b**. Esta distancia **b**, se recomienda que este entre los 0.15m a 0.20m. [19]. Los dos electrodos que estan a los extremos inyectan una corriente de medida, mientras que los dos electrodos que se encuentran en la mitad permiten la medición de potencial [9]. Se recomienda hacer varias mediciones, variando las distancias y dirección de los electrodos, para poder detectar posibles interferencias o cambios bruscos de resistividad. Finalmente utilizando la ley de Ohm, el telurómetro calcula la resistencia del suelo y, con este dato, se determina la resistividad aparente del suelo a través de la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{4\pi aR}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2+4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2+b^2}}} \quad (1.1)$$

Donde:

ρ : Resistividad aparente del suelo [Ωm]

a : Distancia entre picas [m]

b : Profundidad de enterramiento [m]

R : Resistencia [Ω]

Generalmente muchos equipos de medición de resistividad, suelen calcular internamente la resistividad aparente y nos dan el valor directamente evitando el cálculo.

En la Figura 1.6 podemos ver la forma de aplicación a través del telurómetro del método Wenner.

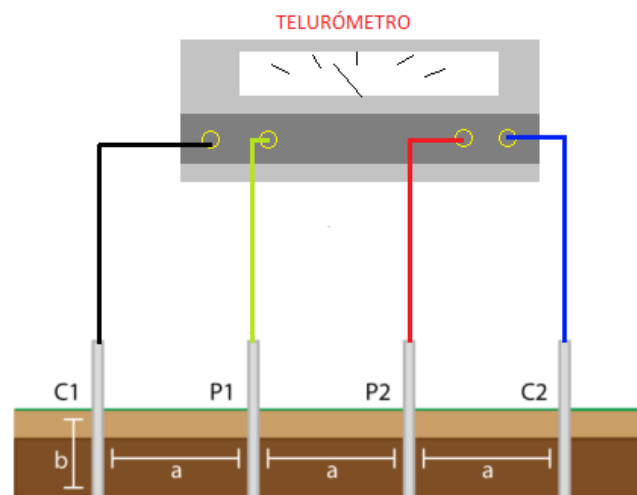


Figura 1.6: Aplicación del método de Wenner [Autor].

1.3.1.2. Método de Schlumberger

Este método, aunque análogo al método Wenner, tiene ciertas distinciones clave que se fundamentan en el mismo concepto de implantar cuatro varillas en el suelo en una línea recta, conectados a un telurómetro. Sin embargo, en el método Schlumberger, la equidistancia entre los electrodos no se mantiene, a diferencia del método Wenner [20]. Las dos puntas centrales, que son las responsables de la medición de potencial, se colocan a una distancia 'c', mientras que las dos puntas exteriores, que inyectan la corriente para la medición, están a una distancia 'd' de las puntas centrales.

El método Schlumberger ofrece una ventaja distintiva en términos de eficiencia temporal durante la implementación. A diferencia del método Wenner, que requiere múltiples cambios de distancias para los cuatro electrodos y mediciones a diferentes distancias para un análisis comparativo adecuado, el método Schlumberger sólo requiere ajustar la distancia 'd', es decir, la distancia de las puntas exteriores, facilitando así el proceso de medición.

Al igual que el método Wenner, a través de esta medición obtenemos la resistencia, y debemos calcular la resistividad aparente a través de la siguiente ecuación, siempre y cuando la distancia 'b' sea relativamente mas pequeña que las distancias 'c' y 'd', a la vez que la distancia 'c' sea minimo dos veces mas grande que 'd' [9].

$$\rho = \frac{\pi c(c + d)R}{d} \quad (1.2)$$

Donde:

ρ : Resistividad aparente del suelo [Ωm]

c : Distancia entre picas centrales [m]

d : Distancia entre picas exteriores [m]

R : Resistencia medida [Ω]

En la Figura 1.7 podemos ver la forma de aplicación del método de Schlumberger conectado a travez del telurómetro.

1.3.2. Mejoramiento del suelo

En numerosas ocasiones, el terreno en el que se planea instalar el SPT puede presentar una resistividad considerablemente alta. Reducir la resistencia de tierra únicamente mediante la incorporación de más varillas a la red puede ser una tarea ardua. Ante este escenario, existen diversas estrategias sugeridas para abordar este problema frecuente:

- En primer lugar, se puede recurrir a la utilización de componentes naturales como los sulfatos de cobre, magnesio y calcio. Otra opción es el uso de una

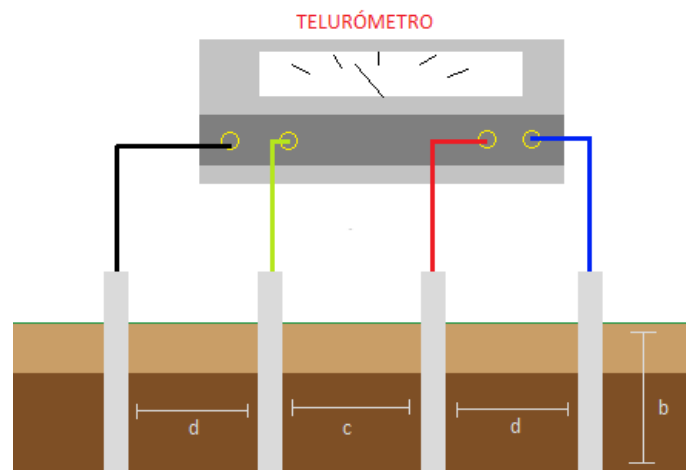


Figura 1.7: Aplicación del método de Schlumberger [Autor].

arcilla denominada bentonita, compuesta principalmente por montmorillonita. Este material no es corrosivo y presenta una resistividad de $2,5 \Omega \cdot m$. Para aplicar estos compuestos, es necesario realizar una excavación en el terreno y rellenar la cavidad creada con los mencionados componentes, rodeando la varilla enterrada [1].

- Otro enfoque implica el uso de electrodos químicos, los cuales son fabricados en cobre y adoptan la forma de un tubo relleno de sales. Este dispositivo posee pequeñas aberturas que permiten la disolución de las sales e introducen humedad al sistema, permitiendo que la solución salina se filtre en el terreno que se pretende tratar.
- Además, se puede hacer uso de los denominados suelos artificiales, los cuales suelen presentarse en formatos gelatinosos o en forma de polvo de partículas finas. Estos suelos artificiales poseen resistividades inferiores a $0,12 \Omega \cdot m$. Habitualmente se instalan alrededor de las varillas, y en el caso de electrodos tipo platina, se aplican en capas: se coloca una capa base, luego el electrodo, y finalmente se cubre con otra capa [21]. Estos suelos artificiales también se pueden mezclar con el terreno local.

1.3.3. Modelamiento de tipo de suelos

Tras seleccionar el método apropiado para la medición de la resistividad del suelo, es de vital importancia utilizar estas diversas mediciones para caracterizar el tipo de suelo con el que se está trabajando al diseñar el sistema de puesta a tierra [10]. Las fluctuaciones representativas a estas mediciones pueden ser complejas, pero es

esencial entender que cualquier modelado es una aproximación de las condiciones reales del suelo.

Los modelos de suelo más frecuentemente adoptados son los de suelo uniforme y suelo de dos capas. Sin embargo, pueden surgir situaciones donde las diferencias entre las mediciones mínimas y máximas sean tan significativas que ni el modelo de dos capas logre proporcionar una representación fidedigna. En dichas circunstancias, se recurre a programas de alta precisión para modelar un suelo multicapa [7]. .

1.3.3.1. Suelo Uniforme

En el ámbito de la ingeniería eléctrica, un suelo se considera uniforme cuando existe una variabilidad mínima en las mediciones de resistividad (como podemos ver en la figura 1.8), es decir, una discrepancia que no supera el 30 % entre los valores extremos [7]. Este parámetro de uniformidad juega un papel crucial al dimensionar sistemas de puesta a tierra, ya que permite un comportamiento más predecible. Para estimar la resistividad aparente de dicho suelo, se puede utilizar un valor medio de todas las mediciones realizadas en diferentes direcciones y distancias. Este enfoque integral ofrece una representación más robusta y precisa de la resistividad del suelo, vital para su comportamiento eléctrico, lo que se puede lograr a través de la siguiente ecuación [1]:

$$\rho = \frac{\rho_1 + \rho_2 + \rho_3 + \dots + \rho_n}{n} \quad (1.3)$$

Donde:

ρ : Resistividad aparente del suelo [Ωm]

$\rho_1, \rho_2, \rho_3, \text{etc}$: Resistividades aparentes medidas [Ωm]

n: numero de mediciones

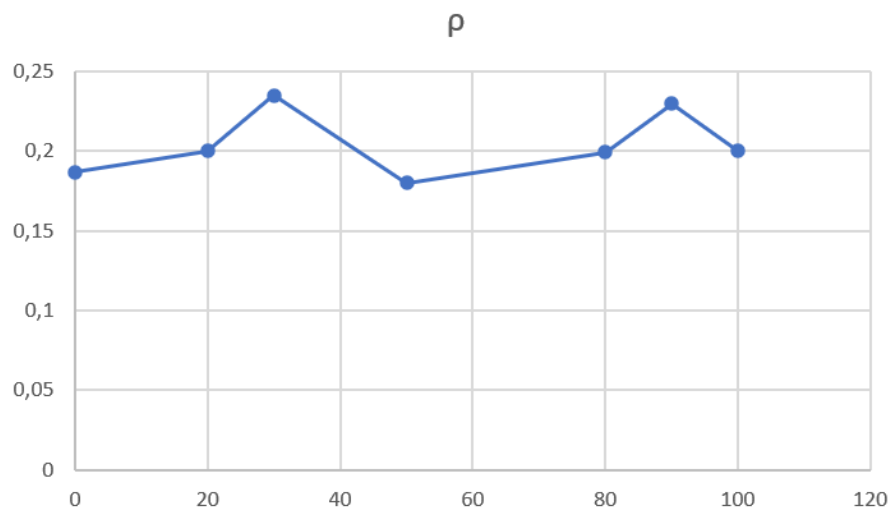


Figura 1.8: Curva común de resistividad aparente en suelo uniforme [Autor].

1.3.3.2. Suelo de dos capas por método gráfico

Al observar una variación superior al 30 % entre las mediciones de resistividad aparente, como se describió anteriormente, esto sugiere que el suelo no es uniforme y podría modelarse más precisamente como un suelo de dos capas. Este modelo consiste en una capa a nivel superior de profundidad medible 'h' y resistividad ρ_1 , situada sobre una segunda capa de profundidad no medible o infinita con resistividad ρ_2 [7].

Determinar la profundidad 'h' de la capa superior es el aspecto más desafiante en este enfoque, debido a las variaciones intrínsecas en las propiedades del suelo. Para facilitar esta tarea, se puede recurrir al método gráfico Sunde, una herramienta efectiva para la estimación de esta variable crítica.

Se obtiene h a través de los siguientes pasos:

1. Se representa la curva de resistividad aparente en el eje y , por otro lado se ubica en el eje x el espacio 'a' entre las picas utilizadas.
2. A partir del gráfico mencionado en 1), se pueden estimar los valores de ρ_1 y ρ_2 basándose en las mediciones de resistividad (ρ_a) obtenidas para diferentes separaciones relacionadas con profundidades de muestreo de bajo y alto valor. La resistividad del primer estrato (ρ_1) se aproxima a la medición correspondiente a la separación de baja profundidad, mientras que la resistividad del segundo estrato (ρ_2) se aproxima a la medición correspondiente a la separación

de alta profundidad. Estas estimaciones se realizan considerando la relación entre las mediciones de resistividad y las profundidades de muestreo asociadas en el gráfico.

3. Calcular ρ_2/ρ_1 , y en el gráfico 1.9 seleccionar la curva que coincida o se aproxime mas.
4. Se selecciona el valor de ρ_a/ρ_1 a la curva ρ_2/ρ_1 que corresponda.
5. Después de definir el punto en 4), se establece el valor de a/h en el eje x .
6. Se obtiene ρ_a al multiplicar el valor de ρ_1 obtenido en 4) por ρ_a/ρ_1 .
7. Determinar el espacio 'a' de las picas utilizadas, se obtiene de la grafica ρ_a de 1).
8. Se calcula h , al utilizar el espacio entre picas 'a' mas adecuado.

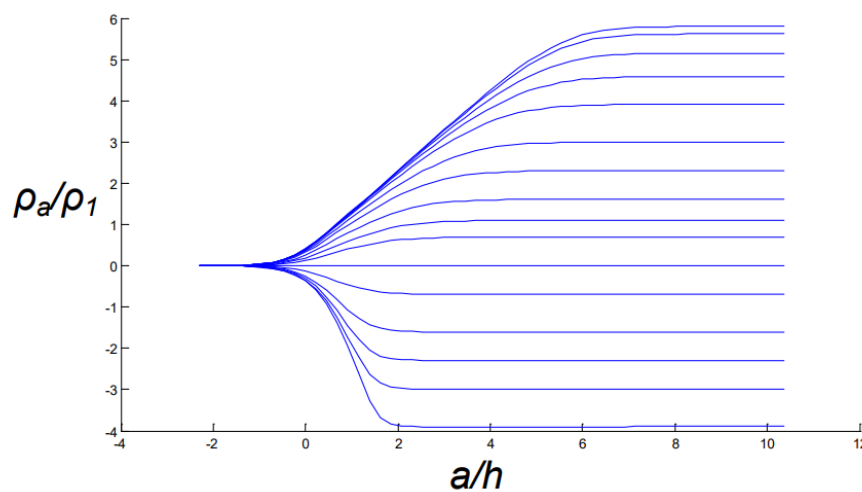


Figura 1.9: Metodo Grafico de Sunde [7].

1.4. Resistencia (Impedancia) de puesta a tierra

Las conexiones a tierra presentan impedancias complejas que afectan su capacidad para conducir corriente. Es importante destacar que la resistividad del suelo en el área de la conexión tiene un impacto en las frecuencias de potencia, siempre y cuando el sistema de puesta a tierra sea lo suficientemente pequeño como para que la resistencia sea el factor dominante. Sin embargo, en aplicaciones que involucran frecuencias más altas, como las telecomunicaciones y los pararrayos, los componentes

complejos de la impedancia son significativos, mientras que la resistencia se vuelve menos relevante. Para evaluar el sistema de puesta a tierra, existen técnicas de medición tanto para sistemas aislados como para sistemas interconectados. En el contexto de esta investigación, el término resistencia” se utilizará para referirse a la impedancia a tierra. [1]

La impedancia de un sistema de puesta a tierra está fuertemente influenciada por la resistividad del suelo, la extensión del sistema y la configuración del electrodo enterrado, tal como se mencionó en la sección 1.2.1.

Durante los dos primeros años, debido a los cambios climáticos, se observa una reducción en la impedancia de puesta a tierra. Después de este período, la impedancia tiende a mantenerse relativamente constante. Existe poca correlación entre la resistencia medida a nivel de entierro y la resistencia total de la malla de puesta a tierra. Sin embargo, esta falta de correlación se aplica principalmente a mallas que utilizan electrodos largos que alcanzan una profundidad significativa en el suelo. En contraste, las mallas de puesta a tierra que se encuentran sobre capas de alta resistividad, como rocas, grava o permafrost, presentarán una relación más estrecha entre la resistencia medida y la resistencia total de la malla.

Se puede obtener un valor teórico el cual difiere por varias causas indicadas en [1].

1.4.1. Medición de la Resistencia de puesta a tierra

Las mediciones de resistencia en mallas de tierra y electrodos de tierra se han llevado a cabo desde la década de 1950 [1]. Estos datos proporcionan una estimación del aumento del potencial de tierra. Existen varios métodos de mediciones, dependiendo del equipo a utilizar, información disponible, si se encuentra energizado o no, Se mencionaran dichos métodos a continuación [1]:

1.4.1.1. Método de los dos puntos

En este método, se realiza la medición de la resistencia del electrodo de tierra objeto en serie con un electrodo de tierra auxiliar como se observa en la figura 1.10. Se asume que la resistencia del electrodo auxiliar es despreciable en comparación con la resistencia del electrodo de tierra objeto. El valor medido representa entonces la

resistencia del electrodo de tierra objeto. Una aplicación práctica de este método es la medición de la resistencia de una varilla de tierra conducida en relación con una casa residencial cercana. Por lo general, una casa residencial cuenta con un sistema de puesta a tierra de baja impedancia debido a su interconexión con el conductor neutro del sistema de suministro eléctrico. Utilizar dicho sistema de puesta a tierra como electrodo auxiliar puede proporcionar un resultado de prueba con una precisión razonable. Es importante tener en cuenta que este método puede presentar grandes errores al realizar pruebas en tierras de baja resistencia. Además, si el electrodo objeto y el electrodo auxiliar se encuentran muy cerca uno del otro, la resistencia mutua entre ambos puede generar errores en la medición. No obstante, este método resulta una herramienta útil cuando se requiere una prueba binaria de aceptable o no aceptable. [1] [9]

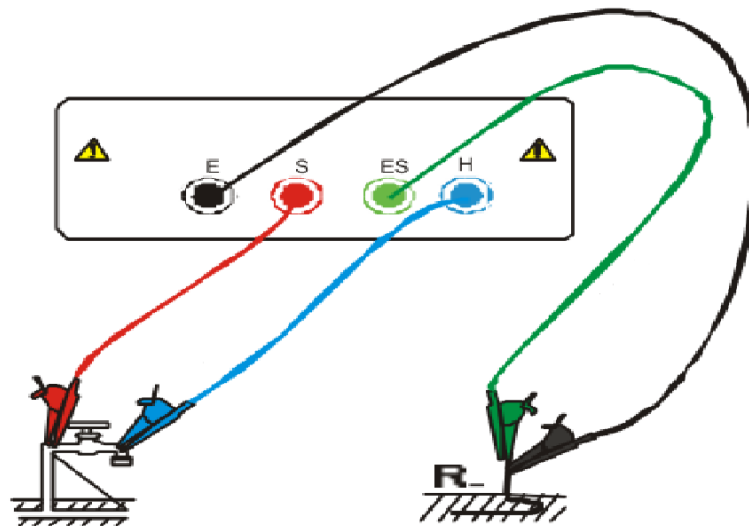


Figura 1.10: Método de los dos puntos [8].

1.4.1.2. Método de los tres puntos

En este método se emplean dos electrodos de medición auxiliares (r_2 y r_3). La malla que se va a evaluar se designa como r_1 [1]. A las resistencias mutuas se les asignan los símbolos r_{12} , r_{13} y r_{23} , donde:

$$r_{12} = r_1 + r_2 \quad (1.4)$$

$$r_{13} = r_1 + r_3 \quad (1.5)$$

$$r_{23} = r_2 + r_3 \quad (1.6)$$

Resolviendo de las ecuaciones anteriores y despejando para r_1 se tiene:

$$r_1 = \frac{(r_{12}) - (r_{23}) + (r_{13})}{2} \quad (1.7)$$

Mediante la medición de la resistencia en serie de cada par de electrodos de tierra y sustituyendo los valores de resistencia en la ecuación, es posible determinar el valor de r_1 , que representa la resistencia del electrodo de tierra en prueba. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la precisión de esta medición se ve afectada por la resistencia de los electrodos auxiliares en comparación con el electrodo bajo prueba. Si los electrodos auxiliares presentan una resistencia significativamente mayor, los errores en las mediciones individuales se magnificarán en el resultado final. [9] [6]

Para obtener mediciones precisas, es necesario que los electrodos se encuentren a una distancia lo suficientemente grande entre sí para minimizar las resistencias mutuas. En casos donde la separación entre los electrodos es insuficiente, pueden surgir resultados absurdos, como resistencias nulas o negativas.

En el caso específico de la medición de la resistencia de una varilla de tierra, se recomienda separar los tres electrodos al menos tres veces la profundidad de la varilla en cuestión. Esta recomendación se basa en la premisa de que los electrodos auxiliares se instalan a una profundidad igual o menor que la varilla de tierra en prueba. [1]

La figura 1.11 presenta de manera ilustrativa el método de medición de resistencia utilizando el telurómetro AMPROBE G-2A y la técnica de las tres puntas. Este método se utiliza para evaluar la resistencia de tierra en sistemas eléctricos, tanto en instalaciones pequeñas como en instalaciones de mayor envergadura. En sistemas pequeños, se aplica la configuración de tres puntas, donde la sonda de corriente (terminal H, cable azul) se coloca a una distancia del contorno del equipo de tierra equivalente a cinco veces la diagonal del área del equipo. Esta disposición garantiza una mayor precisión en la medición, permitiendo una evaluación más confiable de la resistencia de tierra en sistemas de menor tamaño. Por otro lado, en sistemas de mayor escala, también se emplea el método de las tres puntas, pero con una variación en la distancia de posicionamiento de la sonda de corriente. En este caso, la sonda de corriente se ubica a una distancia del contorno del equipo de tierra que corresponde a la diagonal del área del equipo. Esta adaptación tiene en cuenta las proporciones y características particulares de los sistemas de mayor envergadura, proporcionando resultados acordes a su magnitud.

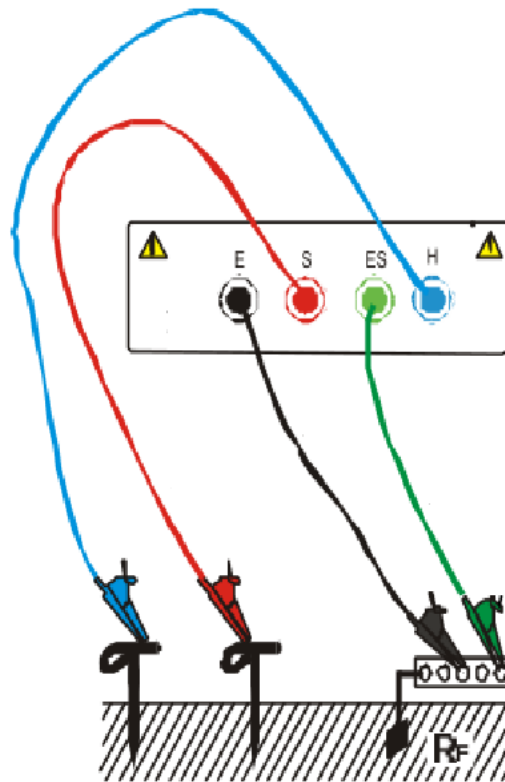


Figura 1.11: Medición de la resistencia de tierra con el Método de los tres puntos [8].

Es importante destacar que a medida que el sistema de electrodos de puesta a tierra se vuelve más grande y complejo, este método se vuelve más difícil de aplicar y se prefieren otras técnicas de medición que ofrecen una mayor precisión.

En resumen, si se busca obtener resultados confiables y precisos en la medición de resistencia de electrodos de tierra, es fundamental considerar adecuadamente la distancia entre los electrodos y la resistencia de los electrodos auxiliares, especialmente en sistemas de puesta a tierra de mayor envergadura. [1]

La figura 1.12 ilustra de que manera colocar las picas para este método, se asimila a un triángulo.

1.4.1.3. Método de caída de potencial

El método de caída de potencial implica la generación de corriente entre un electrodo de tierra (G) y una sonda de corriente (CP), seguido de la medición de la tensión entre G y una sonda de potencial (PP), como se muestra en la Figura 1.13. Para garantizar resultados precisos y minimizar las influencias entre electrodos

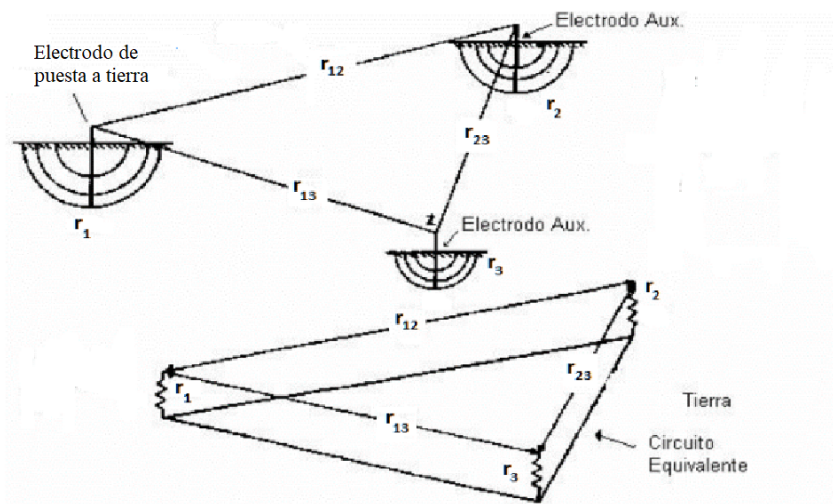


Figura 1.12: Método de los tres puntos [9].

debido a resistencias mutuas, es común ubicar la sonda de corriente a una distancia significativa del electrodo de tierra que está siendo probado; esta separación ayuda a evitar interferencias no deseadas y proporciona mediciones más confiables de la resistencia de tierra.

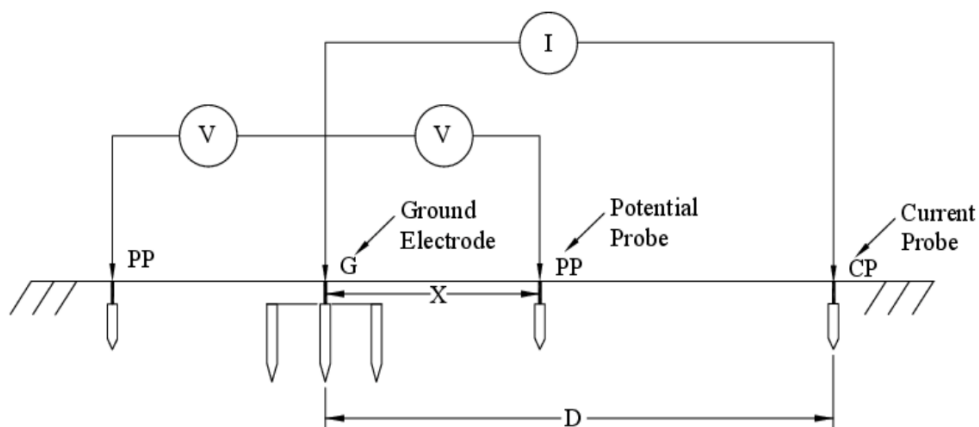


Figura 1.13: Método de caída de potencial [1].

Es fundamental considerar la ubicación adecuada de las sondas de corriente y potencial. La distancia de separación entre la sonda de corriente y el electrodo de tierra en prueba, identificada como D en la figura 1.13, debe ser al menos cinco veces la dimensión más grande del electrodo. Por lo general, la sonda de potencial se coloca en la misma dirección que la sonda de corriente, aunque también se puede ubicar en dirección opuesta. Para determinar la distancia de la sonda de potencial, denominada "X", cuando ambas sondas están en la misma dirección, se aplica la regla del 62 %, que implica seleccionar el 62 % de la distancia de la sonda de corriente.

La ubicación precisa de la sonda de potencial es esencial para lograr mediciones precisas de resistencia, asegurando que esté libre de influencias tanto del electrodo en prueba como de la sonda de corriente. Una técnica práctica para verificar la ausencia de influencias externas consiste en obtener múltiples lecturas de resistencia moviendo la sonda de potencial entre la malla de tierra y la sonda de corriente con variaciones al 52 y 72 %. [9]. Al obtener dos o tres lecturas consecutivas de resistencia constante, se puede considerar el valor promedio como una representación precisa de la resistencia real, empleando el método de la pendiente plana. [1] [6].

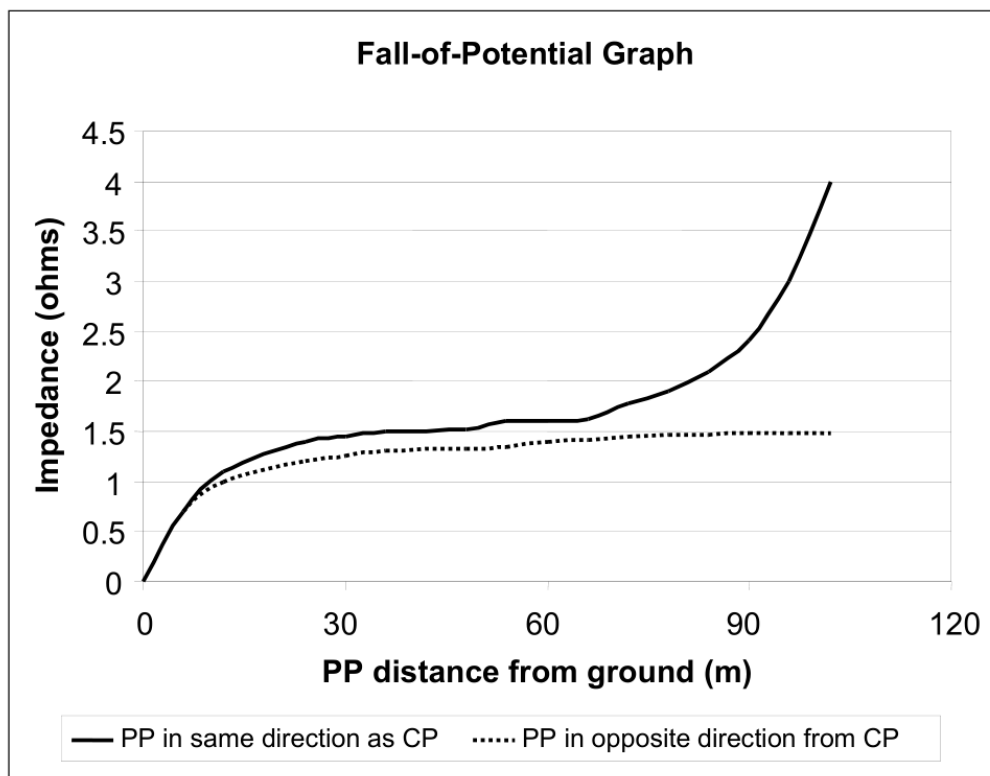


Figura 1.14: Método de caída de potencial [1].

En la figura 1.14 se presentan gráficos representativos de la impedancia en función de la distancia de la sonda de potencial. La línea sólida refleja la orientación de los electrodos auxiliares en la misma dirección, aproximándose a cero cerca del electrodo de tierra y a infinito cerca de la sonda de corriente. Por otro lado, la línea punteada muestra el comportamiento cuando las sondas se encuentran en direcciones opuestas, presentando un comportamiento distinto. Es importante tener en cuenta que los gráficos de la figura corresponden a suelos con resistividad uniforme, y en suelos no uniformes es posible que no se observen secciones de pendiente cero que indican zonas libres de influencias.

De acuerdo con la teoría del método de caída de potencial, en un suelo con resistividad uniforme, la línea punteada siempre se aproximará a la línea sólida

desde abajo. Sin embargo, la distancia de separación requerida es mayor cuando se utilizan sondas en direcciones opuestas. Además, las variaciones debidas a la no uniformidad del suelo son más significativas cuando la sonda de potencial y la sonda de corriente se encuentran en direcciones opuestas.

1.4.1.4. Método de *Clamp on*

El método de *clamp on* elimina la peligrosa y lenta actividad de desconectar el SPT, es rápido y sencillo ya que no se necesitan sondas para insertar en el suelo. Este método de medición no es adecuado para un sistema de puesta a tierra único o aislado, ya que no hay un camino de retorno para la corriente. Se utiliza también para la medición de la resistencia a tierra dentro de las edificaciones. El método se basa en la ley de Ohm, la pinza inyecta un voltaje a una cierta frecuencia esta genera una corriente es entonces que el equipo calcula la resistencia. Vease la figura 1.15.

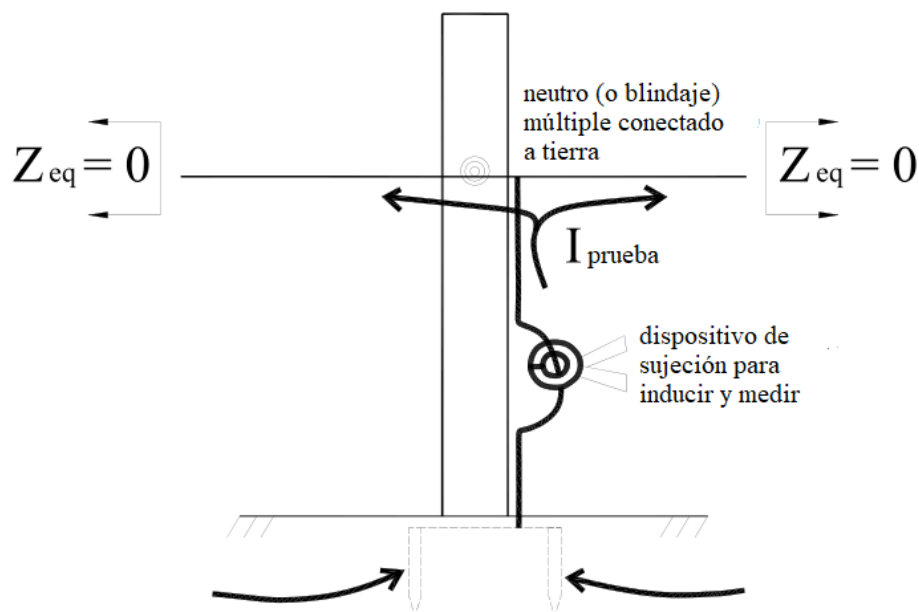


Figura 1.15: Método clamp-on [1].

1.5. Criterios de diseño de un sistema de puesta a tierra

Los objetivos del diseño según la norma [2] son:

- Proporcionar medios para disipar las corrientes eléctricas en la tierra sin exceder los límites de operación y equipo.
- Asegurarse de que una persona en las cercanías de las instalaciones conectadas a tierra no esté expuesta al peligro de una descarga eléctrica crítica. Entre sus parámetros críticos se encuentran:

1.5.1. Corriente de malla (I_G)

La corriente máxima que puede fluir a través de la malla hasta la tierra, es decir, disipar la corriente de falla, está determinada mediante la siguiente ecuación:

$$I_G = I_F \cdot D_f \cdot S_f \cdot C_p \quad (1.8)$$

Donde:

I_G : Corriente máxima a disipar por la malla [A].

$I_F = 3I_O$: Corriente simétrica de falla a tierra [A].

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

S_f : Factor de división de corriente.

1.5.1.1. Corriente simétrica de falla a tierra (I_F)

Para calcular la corriente simétrica de falla se recomienda los siguientes tipos de fallas:

1. Falla Doble línea a tierra, se ignora la resistencia de la falla y la resistencia del SPT, con la siguiente ecuación:

$$(I_F)_{L-L-T} = 3 \cdot I_O = \frac{3 \cdot E \cdot Z_2}{Z_1 \cdot (Z_O + Z_2) + Z_2 \cdot Z_O} \quad (1.9)$$

2. Falla línea a tierra, de igual manera se ignora la resistencia de la falla y la resistencia del SPT, con la siguiente ecuación:

$$(I_F)_{L-T} = 3.I_0 = \frac{3E}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (1.10)$$

Donde:

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

E : Tensión fase - neutro RMS [V].

Z_1 : Impedancia equivalente de secuencia (+) del sistema en el punto de falla.

Z_2 : Impedancia equivalente de secuencia (-) del sistema en el punto de falla.

z_0 : Impedancia equivalente de secuencia (0) del sistema en el punto de falla.

Si el producto de la impedancia de secuencia uno y cero es mayor que el cuadrado de la impedancia dos la falla línea a tierra será la peor, a su vez si en una falla doble línea a tierra ocurre lo viceversa y el producto es menor que el cuadrado entonces será la peor.

1.5.1.2. Factor de decremento (D_f)

Es importante tener en cuenta la corriente asimétrica de falla, que se obtiene al multiplicar la corriente simétrica de falla por el factor de decremento, determinado mediante la siguiente ecuación:

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} \left(1 - e^{-\frac{2t_f}{T_a}}\right)} \quad (1.11)$$

Donde:

t_f : Duración de la falla [s].

T_a : Constante de tiempo de la componente DC.

Y se encuentra mediante:

$$T_a = \frac{X}{wR} = \frac{X}{R} \cdot \frac{1}{2\pi f} \quad (1.12)$$

Donde:

X, R : Componentes de la impedancia subtransitoria de falla que se usan para determinar la relación X/R .

1.5.1.3. Factor de división de corriente (S_f)

Es un coeficiente, que refleja el inverso de la relación entre la corriente simétrica en caso de falla y la porción de corriente que fluye a través de la malla de tierra hacia la tierra circundante, experimenta variaciones durante el transcurso de la falla. No obstante, a efectos de cálculos, se considera constante a lo largo de la duración total de la falla. Este factor, definido por la normativa, se aplica exclusivamente en la ingeniería de diseño de sistemas de puesta a tierra en subestaciones. [2].

1.5.2. Duración de falla (t_f) y Duración de shock (t_s)

Los valores típicos para los tiempos de desconexión y reconexión suelen encontrarse en el rango de 0.25 segundos a 1 segundo. Estos tiempos son el resultado de una combinación de factores que consideran tanto los decrementos de las corrientes de falla como los límites seguros para las corrientes que el cuerpo humano puede soportar. Normalmente se asumen iguales, a no ser de que se den choques sucesivos y la duración de la falla sea la suma de estos como sucede con los reconectores, equipos cuales intentan 3 veces reconectarse al sistema y en el ultimo intento si es que la falla persiste hasta este punto se desconecta totalmente

1.5.3. Geometría de la malla

Es importante destacar que, al momento de diseñar la malla de puesta a tierra, existen otras restricciones además de las consideraciones técnicas. Entre ellas, se

encuentran el presupuesto asignado para la implementación y el espacio disponible para su instalación. Por lo general, la distancia entre conductores varía desde los 15 metros hasta los 3 metros, y la profundidad a la cual se colocan los conductores abarca desde 0.5m hasta 1.5m. [22].

En la sección sobre el dimensionamiento del conductor, se abordará detalladamente este aspecto. Asimismo, el espacio disponible, es decir, el área ocupada por el SPT, desempeña un papel fundamental en el diseño. Una mayor área abarcada por la malla de puesta a tierra resulta en una resistencia menor, evitando así una elevación significativa del potencial de tierra.

Es decir, al construir la MPT, es fundamental tener en cuenta tanto las restricciones técnicas como aquellas relacionadas con el presupuesto y el espacio disponible. La correcta consideración de estos factores asegura un diseño eficiente y seguro del SPT.

1.5.4. La resistividad del material de la superficie. (ρ_s)

La última capa del suelo con la cual se establecerá contacto es de suma importancia y ejerce una influencia significativa en las corrientes de choque. Cuando esta capa está compuesta por un material altamente resistivo, las corrientes de choque tienden a reducirse. En la mayoría de los casos, esta última capa consiste en grava. Estudios previos muestran que cuando este material se humedece, su resistividad experimenta un aumento considerable [23]. Se ha confirmado, mediante otras pruebas, los beneficios de esta propiedad.

Es importante mencionar que varios factores influirán en la resistividad de esta última capa. Entre ellos se encuentran el tamaño de las piedras, su condición, la cantidad de humedad presente, la presencia de polución y otros aspectos relevantes. La Tabla 1.2 presenta la influencia de la humedad en la roca y cómo afecta su resistividad, lo que subraya la necesidad de medir cuidadosamente la resistividad del tipo específico de material utilizar en la capa final del suelo, Debido a la multitud de parámetros variables involucrados, Estas mediciones garantizarán una implementación óptima y efectiva de la capa final del suelo, permitiendo una mejor protección contra las corrientes de choque. La elección adecuada de este material contribuirá a salvaguardar la seguridad de las personas y el correcto funcionamiento de las instalaciones eléctricas. [2]

Tabla 1.2: *Typical surface material resistivities [2].*

| Number | Description of surface material (U.S. state where found) | Resistivity of sample, $\Omega\text{-m}$ | |
|--------|--|---|--|
| | | Dry | Wet |
| 1 | Crusher run granite with fines (NC) | 140×10^6 | 1300 (ground water, 45 $\Omega\text{-m}$) |
| 2 | 1½ in (0.04 m) crusher run granite (GA) with fines | 4000 | 1200 (rain water, 100 $\Omega\text{-m}$) |
| 3 | ¾ in to 1 in (0.02 m to 0.025 m) granite (CA) with fines | --- | 6513 (10 minutes after 45 $\Omega\text{-m}$ water drained) |
| 4 | No. 4 (1 in to 2 in) (0.025 m to 0.05 m) washed granite (GA) | 1.5×10^6 to 4.5×10^6 | 5000 (rain water, 100 $\Omega\text{-m}$) |
| 5 | No. 3 (2 in to 4 in) (0.05 m to 0.1 m) washed granite (GA) | 2.6×10^6 to 3×10^6 | 10 000 (rain water, 100 $\Omega\text{-m}$) |
| 6 | Size unknown, washed limestone (MI) | 7×10^6 | 2000 to 3000 (ground water, 45 $\Omega\text{-m}$) |
| 7 | Washed granite, similar to ¾ in (0.02 m) gravel | 2×10^6 | 10 000 |
| 8 | Washed granite, similar to pea gravel | 40×10^6 | 5000 |
| 9 | No. 57 (¾ in) (0.02 m) washed granite (NC) | 190×10^6 | 8000 (ground water, 45 $\Omega\text{-m}$) |
| 10 | Asphalt | 2×10^6 to 30×10^6 | 10 000 to 6×10^6 |
| 11 | Concrete | 1×10^6 to 1×10^9 ^a | 21 to 200 |

La capa superficial mencionada generalmente tiene un espesor de entre 0.1 y 0.15 m para cumplir su función de aumentar la resistencia al contacto directo de los pies con el suelo, lo que reduce la corriente que podría pasar a través del cuerpo humano. Sin embargo, esta corriente está sujeta a un valor relativo que depende del espesor de la capa superficial, el contacto del pie con esta capa y la resistividad del suelo inferior. Es en este punto que se determina un parámetro C_s , el cual representa el efecto de reducción cuando la resistividad del material de superficie es mayor que la resistividad del suelo.

Existen dos formas de determinar este factor: una es mediante las gráficas de espesor vs. C_s que se encuentran en [2], y la otra es mediante una ecuación general proporcionada por la misma fuente. Esta ecuación es:

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0,09} \quad (1.13)$$

Donde:

C_s : Factor de reducción de la capa principal.

ρ : La resistividad del suelo debajo del material superficial. [Ωm]

ρ_s : es la Resistividad de la capa superficial. [Ωm]

h_s : Es el espesor del material superficial. [m]

Si es que no existe la capa superficial, entonces se asume que el factor de reducción de la capa principal es 1 y que la resistividad de la capa superficial es igual a la resistividad del terreno.

1.5.5. Resistividad del suelo (ρ)

El tema mencionado es ampliamente abordado en la sección 1.3 de esta tesis. Para obtener una comprensión más detallada sobre este aspecto específico, se recomienda consultar dicha sección, donde se examinan en profundidad los conceptos y elementos relevantes relacionados con el tema en cuestión.

1.5.6. Conductor

Toda corriente de falla conlleva el riesgo de generar corrientes superiores a las nominales en un sistema eléctrico, lo que, a su vez, provoca un aumento significativo en la temperatura del conductor de tierra debido al efecto Joule. Por tanto, es crucial llevar a cabo un adecuado dimensionamiento del conductor en relación con esta corriente mencionada, el cual se encuentra con [1] [2] [22]:

$$A_{\text{mm}^2} = \frac{I_F}{\sqrt{\left(\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}} \quad (1.14)$$

Donde:

I_F : Corriente asimétrica de falla RMS en KA, se usa la más elevada encontrada.

A_{mm^2} : Área del conductor en mm^2 .

T_m : Máxima temperatura disponible o temperatura de fusión [$^{\circ}\text{C}$].

T_a : Temperatura ambiente [$^{\circ}\text{C}$].

Tabla 1.3: Constantes de materiales [9].

| Descripción | Conductividad del material (%) | Factor α_r a $20^\circ C$ ($1/^\circ C$) | K_0 a $0^\circ C$ ($^\circ C$) | Temperatura de fusión T_m ($^\circ C$) | ρ_r a $20^\circ C$ ($\mu\Omega \cdot cm$) | Capacidad térmica TCAP [$J/(cm^3 \cdot ^\circ C)$] |
|--|--------------------------------|---|------------------------------------|--|--|--|
| Cobre destemplado trenzado suave | 100.0 | 0.00393 | 234 | 1083 | 1.72 | 3.4 |
| Cobre comercial trenzado duro | 97.0 | 0.00381 | 242 | 1084 | 1.78 | 3.4 |
| Alambre de acero con revestimiento de cobre | 40.0 | 0.00378 | 245 | 1084 | 4.40 | 3.8 |
| Alambre de acero con revestimiento de cobre | 30.0 | 0.00378 | 245 | 1084 | 5.86 | 3.8 |
| Varilla de acero con revestimiento de cobre | 17.0 | 0.00378 | 245 | 1084 | 10.1 | 3.8 |
| Alambre de acero con revestimiento de aluminio | 20.3 | 0.00360 | 258 | 657 | 8.48 | 3.561 |
| Acero, 1020 | 10.8 | 0.00377 | 245 | 1510 | 15.90 | 3.8 |
| Varilla de acero con revestimiento inoxidable | 9.8 | 0.00377 | 245 | 1400 | 17.50 | 4.4 |
| Varilla de acero con capa de zinc | 8.6 | 0.00320 | 293 | 419 | 20.10 | 3.9 |
| Acero inoxidable 304 | 2.4 | 0.00130 | 749 | 1400 | 72.00 | 4.0 |

T_r : Temperatura de referencia para las constantes del material [$^\circ C$].

α_0 : Coeficiente térmico de resistividad a $0^\circ C$ en [$1/^\circ C$].

α_r : Coeficiente térmico de resistividad a la temperatura de referencia T_r [$1/^\circ C$].

ρ_r : Resistividad del conductor de tierra a la temperatura de referencia T_r [$\mu\Omega - cm$].

K_0 : $1/\alpha_0 \circ [(1/\alpha_0) - T_r]$ en [$^\circ C$].

T_C : Duración de la corriente de falta [s].

TCAP : Capacidad térmica por unidad de volumen [$J/(cm^3 \cdot ^\circ C)$].

La Tabla 1.3 proporciona los datos para las constantes α_r , K_o , T_m , ρ_r , y TCAP.

Tabla 1.4: Constantes de materiales para K_f [2].

| Material | Conductivity (%) | T_m^a (°C) | K_f |
|-------------------------------|------------------|--------------|-------|
| Copper, annealed soft-drawn | 100.0 | 1083 | 7.00 |
| Copper, commercial hard-drawn | 97.0 | 1084 | 7.06 |
| Copper, commercial hard-drawn | 97.0 | 250 | 11.78 |
| Copper-clad steel wire | 40.0 | 1084 | 10.45 |
| Copper-clad steel wire | 30.0 | 1084 | 12.06 |
| Copper-clad steel rod | 17.0 | 1084 | 14.64 |
| Aluminum-clad steel wire | 20.3 | 657 | 17.26 |
| Steel 1020 | 10.8 | 1510 | 18.39 |
| Stainless-clad steel rod | 9.8 | 1400 | 14.72 |
| Zinc-coated steel rod | 8.6 | 419 | 28.96 |
| Stainless steel 304 | 2.4 | 1400 | 30.05 |

(1.15) Es una fórmula simplificada para el dimensionamiento del conductor proporcionada en [2] para determinar el calibre del conductor adecuado, se describe a continuación:

$$A_{MCM} = I_F \cdot K, \cdot \sqrt{t_C} \quad (1.15)$$

Donde:

K_F : Constante para el material dado en la Tabla 1.4, usando una $T_a = 40$ °C.

Sin embargo, es importante destacar que, en la práctica, el calibre seleccionado suele ser más grande que el que se basa únicamente en criterios de fusión de corriente. Esto se debe a varios factores esenciales para el rendimiento y la seguridad del sistema eléctrico, los cuales se describen a continuación:

a) Resistencia mecánica y corrosión: El calibre del conductor debe ser lo suficientemente robusto para soportar los esfuerzos mecánicos esperados y resistir la corrosión durante toda la vida útil de la instalación. Esto garantiza que el conductor mantenga su integridad estructural y funcional a lo largo del tiempo, lo que es especialmente relevante en entornos adversos o industriales.

b) Alta conductancia: Es esencial que el conductor posea una alta conductancia eléctrica para prevenir caídas de tensión peligrosas durante una eventual falla en el sistema. Un conductor con una buena conductividad permite una distribución eficiente de la corriente eléctrica, reduciendo las pérdidas y asegurando un funcionamiento óptimo de los equipos conectados.

c) Limitación de la temperatura: El calibre seleccionado también debe ser capaz de limitar la temperatura del conductor, especialmente en condiciones de alta corriente o eventos de cortocircuito. Controlar la temperatura es fundamental para evitar daños en el aislamiento del conductor y para garantizar la seguridad de la instalación.

d) Factor de seguridad: Para asegurar un funcionamiento confiable y seguro del sistema eléctrico, se aplica un factor de seguridad a la instalación de puesta a tierra y a los demás componentes eléctricos. Este factor tiene en cuenta incertidumbres en las condiciones de operación, sobrecargas ocasionales y otros aspectos que podrían influir en la resistencia y comportamiento del sistema.

En conclusión, la elección de un calibre de conductor adecuado va más allá de simplemente basarse en la capacidad de fusión de corriente. Factores como la resistencia mecánica, resistencia a la corrosión, conductancia, temperatura y seguridad son esenciales para garantizar el correcto funcionamiento y la protección del sistema eléctrico en diversas condiciones de operación. El análisis y consideración cuidadosa de estos aspectos resulta crucial para el éxito y la confiabilidad de las instalaciones eléctricas.

Resulta frecuente hallar el uso de conductores de cobre de 7 hilos con calibre 2/0 AWG (*American Wire Gauge*). Estos conductores presentan propiedades mecánicas que benefician la rigidez de la malla, además de poseer una resistencia natural a la corrosión. [6]

1.5.7. Tensiones tolerables

Se procederá a calcular los límites correspondientes para un cuerpo de 50 kg y otro de 70 kg. Con el fin de garantizar la seguridad de un individuo ante situaciones de riesgo eléctrico, se determinarán las tensiones de contacto y de paso tolerables utilizando las ecuaciones siguientes [22] :

$$E_{P_{50\text{kg}}} = (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \quad (1.16)$$

$$E_{P_{70\text{kg}}} = (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \quad (1.17)$$

A continuación las tensiones de toque se calculan mediante:

$$E_{t_{50\text{kg}}} = (1000 + 1,5C_s \cdot \rho_s) \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \quad (1.18)$$

$$E_{t_{70\text{kg}}} = (1000 + 1,5C_s \cdot \rho_s) \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \quad (1.19)$$

Donde:

E_p : Tensión de paso. [V]

E_t : Tensión de toque. [V]

C_s : Se calcula mediante

1.6. Validación del sistema de puesta a tierra

Es fundamental verificar la resistencia de un SPT para asegurar su correcto diseño y minimizar la corriente de falla a través de la misma. Para lograr esto, se deben respetar las resistencias máximas establecidas para cada tipo de sistema según las normas establecidas.

En [2], se establece que en subestaciones pequeñas, la resistencia puede variar entre 1 y 5 ohmios, dependiendo de las condiciones atmosféricas locales, mientras que en subestaciones de mayor tamaño, la resistencia no debe superar 1 ohmio. Por otro lado, para sistemas más simples que constan de un solo electrodo, como una varilla de Copperweld, se establece que la resistencia máxima debe ser de 25 ohmios, lo que se utiliza comúnmente en entornos pequeños, como hogares [3], [2].

Esto permite minimizar la elevación del potencial de tierra, también conocido como GPR (Ground Potential Rise). El GPR se calcula mediante la multiplicación de la corriente máxima a disipar por la malla de puesta a tierra y la resistencia de la misma. La fórmula para calcular el GPR es:

$$GPR = I_g \cdot R_g \quad (1.20)$$

Donde:

I_g : Corriente máxima a disipar de la malla de puesta a tierra [A]

R_g : Resistencia de la malla de puesta a tierra [Ω]

Existen varias ecuaciones disponibles para calcular la resistencia obtenida después del diseño del SPT, pero las ecuaciones de Schwarz y Sverak son las más precisas y relevantes. Ambas ecuaciones logran el mismo resultado, pero con diferentes coeficientes y ventajas específicas [24]. La ecuación de Sverak tiene la ventaja de poder utilizarse para el cálculo en MPT tanto regulares como irregulares. En cambio la de Schwarz se puede calcular dependiendo de si se modelo el tipo de suelo homogéneo o de dos capas. Estos cálculos se realiza con las siguientes ecuaciones presentadas.

1.6.1. Ecuación de Schwarz para suelo uniforme

Estas ecuaciones proporcionan una herramienta precisa y efectiva para determinar la resistencia de la malla de puesta a tierra, considerando la resistividad del suelo, la geometría de la malla, su area a cubrir, el conductor, sus coeficientes K_1 y K_2 , entre otros .Según [2], para determinar la resistencia de un SPT en Ω , se utiliza la expresión,

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi \cdot L_c} \left[\ln \left(\frac{2 \cdot L_c}{\sqrt{d_c \cdot h}} \right) + \frac{K_1 \cdot L_c}{\sqrt{A}} - K_2 \right] \quad (1.21)$$

$$R_2 = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot n_r \cdot L_r} \left[\ln \left(\frac{8 \cdot L_r}{d_r} \right) - 1 + \frac{2 \cdot K_1 \cdot L_r}{\sqrt{A}} (\sqrt{n_r} - 1)^2 \right] \quad (1.22)$$

$$R_m = \frac{\rho}{\pi \cdot L_c} \left[\ln \left(\frac{2L_c}{L_r} \right) + \frac{K_1 \cdot L_c}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right] \quad (1.23)$$

$$K_1 = -0,05 \frac{L_x}{L_y} + 1,2 \quad (1.24)$$

$$K_2 = 0,1 \frac{L_x}{L_y} + 4,68 \quad (1.25)$$

$$R_g = \left[\frac{R_1 \cdot R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2 \cdot R_m} \right]. \quad (1.26)$$

Donde:

R_1 : Resistencia de los conductores horizontales de la malla. $[\Omega]$

R_2 : Resistencia de todas las varillas de la malla. $[\Omega]$

R_m : Resistencia mutua entre R_1 y R_2 $[\Omega]$

R_g : Resistencia del SPT $[\Omega]$

L_x : Largo de la malla de puesta a tierra $[\Omega]$

L_y : Ancho de la malla de puesta a tierra $[\Omega]$

A : Área de la malla de puesta a tierra $[m^2]$

L_c : Longitud del conductor horizontal de la malla de puesta a tierra $[\Omega]$

d_c : Diametro del conductor de la malla $[m]$

d_r : Diametro de las varillas $[m]$

a : Radio del conductor horizontal de la malla de puesta a tierra $[\Omega]$

h : Profundidad de enterramiento de la malla de puesta a tierra $[\Omega]$

L_r : Longitud de varilla $[\Omega]$

r : Radio de varilla $[\Omega]$

ρ : Resistividad del terreno $[\Omega m]$

K_1 : Coeficiente de Schwarz K_1 .

K_2 : Coeficiente de Schwarz K_2 .

1.6.2. Ecuación de Schwarz para suelo de dos capas

De igual manera las ecuaciones para el suelo de dos capas son muy similares pero se realizó pequeños cambios en las ecuaciones de R_1 , R_2 , R_m , aunque los coeficientes K_1 y K_2 se mantienen igual, y se agrega la ecuación ρ_a

$$R_1 = \frac{\rho_1}{\pi \cdot L_c} \left[\ln \left(\frac{2 \cdot L_c}{\sqrt{d_c \cdot h}} \right) + \frac{K_1 \cdot L_c}{\sqrt{A}} - K_2 \right] \quad (1.27)$$

$$R_2 = \frac{\rho_a}{2 \cdot \pi \cdot n_r \cdot L_r} \left[\ln \left(\frac{8 \cdot L_r}{d_2} \right) - 1 + \frac{2 \cdot K_2 \cdot L_r}{\sqrt{A}} - (\sqrt{n_r} - 1)^2 \right] \quad (1.28)$$

$$R_m = \frac{\rho_a}{\pi \cdot L_c} \left[\ln \left(\frac{2 \cdot L_c}{L_r} \right) + \frac{K_1 \cdot L_c}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right] \quad (1.29)$$

$$\rho_a = \frac{L_r \cdot \rho_1 \cdot \rho_2}{\rho_2(H - h) + \rho_1(L_r + h - H)} \quad (1.30)$$

Donde:

ρ_1 : Resistividad de la primera capa [Ωm]

ρ_2 : Resistividad de la segunda capa [Ωm]

ρ_a : Resistividad aparente en [Ωm]

H : Espesor de la primera capa [m]

1.6.3. Ecuación de Sverak

La ecuación desarrollada por Sverak es ampliamente empleada para calcular la resistencia de MPT en suelos homogéneos. Es especialmente aplicada en MPT que no incluyen varillas de tierra en el perímetro. Los resultados obtenidos mediante esta ecuación presentan similitudes con los obtenidos mediante las Ecuaciones de Schwarz, lo cual valida su utilidad en el análisis y diseño de SPT eficientes. Su

incorporación en la investigación proporciona una sólida base teórica y enriquece la comprensión de los principios fundamentales que presiden la resistencia de las mallas de puesta a tierra. En [2], se determina la resistencia de un SPT en Ω , con la siguiente expresión de Sverak:

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h \cdot \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (1.31)$$

Donde:

A: Área de la malla de puesta a tierra [m^2].

L_T : Longitud del conductor de la malla de puesta a tierra (cable y varillas) [m].

h : Profundidad de enterramiento de la malla de puesta a tierra [m]

ρ : Resistividad del terreno [Ωm]

R_g : Resistencia del sistema de puesta a tierra [Ω]

1.6.4. Tensión real de toque

Tras el diseño de la malla de puesta a tierra, se procede a contrastar el valor real de la tensión de contacto con el umbral tolerable de tensión de contacto, el cual se calcula en función del peso corporal de una persona. Este cálculo se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$E_m = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_m \cdot K_i}{L_M} \quad (1.32)$$

Donde:

ρ : Resistividad del terreno en [Ωm].

I_g : Corriente máxima a disipar [A]

K_m : Factor de espaciamiento para la tensión de toque

K_i : Factor Correctivo por Geometría de la Malla

Se calcula el factor de espaciamento para la tensión de toque K_m , con la siguiente ecuación:

$$K_m = \frac{1}{2 \cdot \pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d_C} + \frac{(D + 2 \cdot h)^2}{8 \cdot D \cdot d_C} - \frac{h}{4 \cdot d_C} \right) + \frac{K_{ii}}{k_h} \ln \left(\frac{8}{\pi(2 \cdot n - 1)} \right) \right] \quad (1.33)$$

Donde:

D : Espacio Entre Conductores Paralelos [m]

h : Profundidad de enterramiento de la malla de puesta a tierra [m]

d_C : Diámetro del conductor de la malla [m]

K_{ii} : Factor Correctivo del Efecto de las varillas

k_h : Factor Correctivo por Profundidad de los Conductores

El factor k_h , toma en cuenta los efectos causados por profundidad de la malla, calculado a través de:

$$k_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_o}} \quad (1.34)$$

Por otro lado el factor correctivo del efecto de las varillas $K_{ii}=1$ siempre y cuando la malla de puesta a tierra cuente con varillas en el perímetro de la malla o en sus esquinas. El otro caso cuando la malla no cuenta con varillas en el perímetro, este se calcula de la siguiente forma;

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 \cdot n)^{2 \cdot n}} \quad (1.35)$$

Donde:

n : N° Efectivo de Conductores Paralelos de la malla

Los valores de n depende de la geometria de la malla.

Cuadradas:

$$n = n_a \quad (1.36)$$

Rectangulares:

$$n = n_a \cdot n_b \quad (1.37)$$

En L:

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_C \quad (1.38)$$

Rectangular equivalente:

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_C \cdot n_d \quad (1.39)$$

$$n_a = \frac{2 \cdot L_C}{L_P}; n_b = \sqrt{\frac{L_P}{4 \cdot \sqrt{A}}}; n_C = \left[\frac{L_X \cdot L_Y}{A} \right]^{\frac{0,7 \cdot A}{L_X \cdot L_Y}}; n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_X^2 + L_Y^2}} \quad (1.40)$$

Donde:

L_x : Largo de la malla de puesta a tierra [m]

L_y : Ancho de la malla de puesta a tierra [m]

L_c : Longitud del conductor horizontal de la malla de puesta a tierra [m]

L_p : Longitud del perímetro de la malla [m]

D_m : Distancia máxima entre dos puntos de la malla [m]

El factor correctivo por la irregularidad de la geometría de la malla K_i , se calcula con la siguiente ecuación:

$$K_i = 0,644 + n \cdot 148 \quad (1.41)$$

Finalmente depende del numero de varillas enterradas, se puede calcular la longitud real enterrada de la malla L_M con las siguiente ecuación, si la malla no contiene varillas o contiene pocas pero ninguna esta en las esquinas de la malla:

$$L_M = L_C + n_r \cdot L_r \quad (1.42)$$

En cambio si la malla esta compuesta por muchas varillas especialmente en las esquinas y el perímetro de la misma, se calcula con la siguiente ecuación:

$$L_M = L_C + \left[1,55 + 1,22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_X^2 + L_Y^2}} \right) \right] n_r \cdot L_r \quad (1.43)$$

Donde:

n_r Numero de varillas.

L_r Longitud de varillas [m]

L_c Longitud del conductor horizontal de la malla de puesta a tierra [m]

1.6.5. Tensión real de paso

Asimismo, al evaluar la Tensión Real de Paso, se verifica que su valor sea inferior a la Tensión de Paso Tolerable, la cual se calcula en base al peso corporal de una persona. Esta verificación se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$E_p = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_s \cdot K_i}{L_s} \quad (1.44)$$

El factor de espaciamiento para tensión de paso K_s es aplicable para profundidades h que varían entre 0.25 m y 2.5 m, la misma se calcula con la siguiente ecuación:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 \cdot h} + \frac{1}{D + h} + \frac{1}{D} (1 - 0,5^{n-2}) \right] \quad (1.45)$$

Donde:

D : Espacio Entre Conductores Paralelos [m].

h : Profundidad de enterramiento de la malla de puesta a tierra [m].

n : N° Efectivo de Conductores Paralelos de la malla

Asi mismo la longitud real del conductor L_s , se calcula con el n_r Numero de varillas, L_c Longitud del conductor horizontal de la malla de puesta a tierra y L_r Longitud de varillas , de la siguiente manera:

$$L_S = 0,75 \cdot L_C + 0,85 \cdot n_r \cdot L_r \quad (1.46)$$

CAPÍTULO 2

ANÁLISIS DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA ACTUAL DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA

En este capítulo, se presenta el análisis detallado de las mallas de puesta a tierra existentes en el campus de la universidad se puede ver en las figuras 2.1 y la simbología respectiva en la figura 2.2. La finalidad de este capítulo es de evaluar el estado y levantar información relevante de las mismas. Para lograr este propósito, se llevaron a cabo mediciones precisas de resistencia de cada una de las mallas y se analizó la resistividad de los terrenos cercanos con cada malla. A continuación, se presenta una descripción exhaustiva de la metodología utilizada y los resultados obtenidos.

2.1. Criterios de análisis

2.1.1. Medición de Resistencia de puesta a tierra

Para iniciar el análisis, se llevó a cabo una inspección detallada en conjunto con el Jefe de Mantenimiento de la universidad. Durante esta etapa, se recorrió toda la institución para ubicar y catalogar las diferentes mallas de puesta a tierra presentes en el sistema eléctrico. Con el objetivo de evaluar la eficacia y rendimiento de las mallas existentes, se utilizó el método del 62 % junto con el telurómetro Amprobe GP2, véase la figura 2.3. Para medir la resistencia de las 7 mallas identificadas. Este procedimiento se realizó bajo distintas condiciones operativas para obtener datos representativos y precisos de su comportamiento eléctrico.

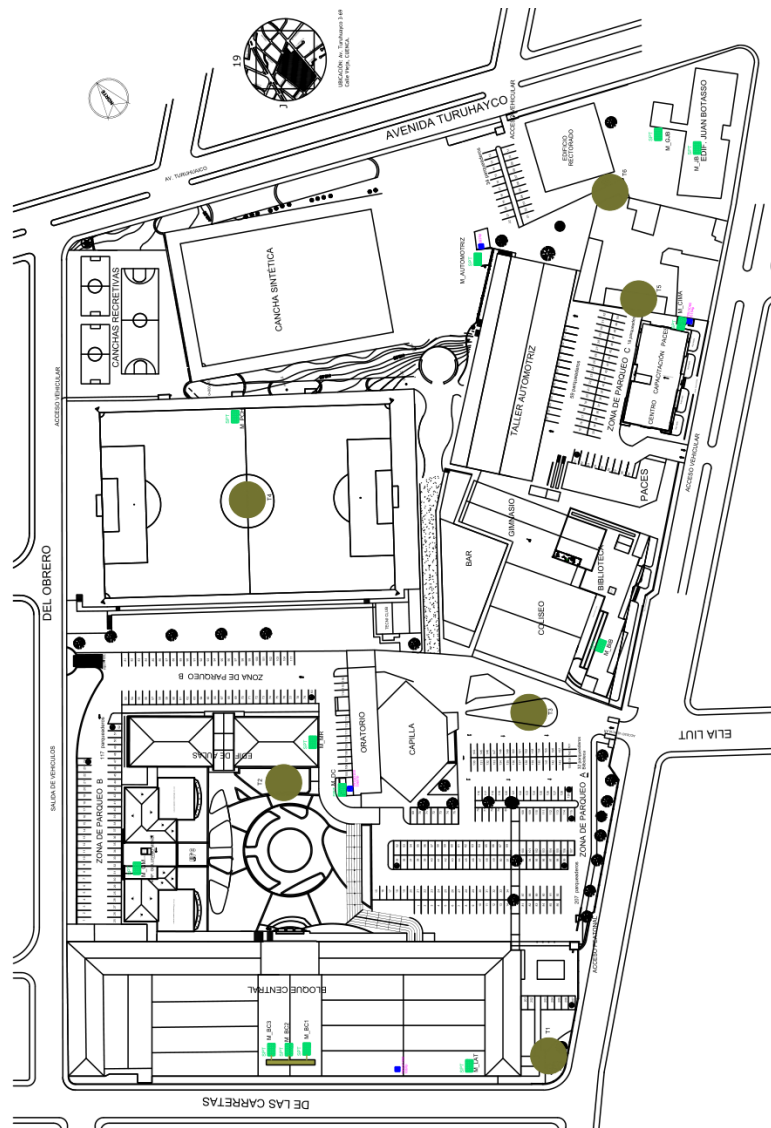


Figura 2.1: Plano actual de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca

Es importante mencionar que, si bien se intentó calcular la resistencia de las mallas mediante ecuaciones de Schwarz o Sverak, algunas características fundamentales del diseño de las mallas no fueron disponibles, como el área, lado mayor, lado menor, profundidad, entre otras. Por lo tanto, para el análisis, solo se utilizaron los valores medidos con el método del 62 %, considerándolos como valores aproximados y conservadores para la evaluación.

2.1.2. Medición de la Resistividad del suelo

Para complementar el análisis de las mallas, se llevó a cabo la medición de la resistividad del suelo en las áreas cercanas a cada malla. Utilizando el telurómetro SONEL MRU-200-GPS, vease en la figura: 2.4. Se realizaron mediciones en terrenos

| SIMBOLOGÍA | |
|--|--------------------------------------|
| SÍMBOLO | DESCRIPCIÓN |
| SPT  | SISTEMA DE PUESTA A TIERRA |
|  | MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD DEL TERRENO |
|  | TRANSFORMADOR EXISTENTE |

Figura 2.2: Simbología del plano



Figura 2.3: Telurometro Amprobe GP-2 [8]

adyacentes para obtener un conjunto de datos representativos de las características eléctricas del suelo.

Siguiendo la norma [1], se evaluó la uniformidad del terreno, considerando la variación entre el valor mínimo y máximo de las mediciones realizadas. Se constató que la variación máxima era del 21 % en cada terreno, lo cual permite considerar el suelo como uniforme según [7].

A partir de los datos obtenidos, se procedió a calcular la resistividad total del terreno para la propuesta de la nueva malla unificada. Se determinó el promedio de todas las resistividades medidas en cada terreno y se obtuvo un valor de 20,71 ohmios metro, que representa la resistividad promedio del suelo donde se implementará la malla unificada.



Figura 2.4: Telurometro SONEL MRU-200-GPS [10]

A continuación en la tabla 2.1 se presenta los datos obtenidos de las mediciones.

Tabla 2.2: Promedio de resistividad del suelo

| Terreno | Promedio de resistividad |
|---------|--------------------------|
| 1 | 20,8875 |
| 2 | 20,9775 |
| 3 | 19,7075 |
| 4 | 21,875 |
| 5 | 19,6075 |
| 6 | 21,225 |

El análisis de resistividad del suelo proporcionó datos fundamentales para comprender las características eléctricas del terreno en el área donde se encuentra ubicada la universidad. A partir de los resultados obtenidos en la tabla 2.2, se han extraído importantes conclusiones que contribuyen a la propuesta de un sistema de puesta a tierra más eficiente y seguro.

En primer lugar, al evaluar la variación entre los valores mínimos y máximos de resistividad medidos en los diferentes terrenos, se evidencia una variación porcentual del 7.62 % entre el valor mínimo registrado, que corresponde a 19.6, y el valor máximo, alcanzando 21.25 ohmios metro. Esta variación sugiere que el tipo de terreno subyacente es homogéneo y consistente en una sola capa.

Además, se procedió a calcular el promedio de las resistividades medidas en cada terreno, obteniendo un valor de 20,71 [Ω m]. Esta resistividad promedio representa la resistividad total del cuerpo de terreno en el área circundante a la universidad.

Esta información es de relevancia para el estudio y comprensión de las características eléctricas del suelo en la ubicación de la institución académica, lo cual

Tabla 2.1: Mediciones de resistividad del terreno

| Resistividad del terreno | | | |
|--------------------------|---------------------------|------------|-----------------------------------|
| Terreno | Distancia entre picas [m] | Dirección | Resistividad [Ωm] |
| 1 | 5 | Horizontal | 22,15 |
| 1 | 3 | Horizontal | 20,02 |
| 1 | 5 | Vertical | 22,6 |
| 1 | 3 | Vertical | 18,78 |
| 2 | 6 | Horizontal | 23,93 |
| 2 | 3 | Horizontal | 21,25 |
| 2 | 6 | Vertical | 19,74 |
| 2 | 3 | Vertical | 18,99 |
| 3 | 4 | Horizontal | 23,07 |
| 3 | 2 | Horizontal | 18,43 |
| 3 | 4 | Vertical | 19,31 |
| 3 | 2 | Vertical | 18,02 |
| 4 | 12 | Horizontal | 26,3 |
| 4 | 6 | Horizontal | 19,7 |
| 4 | 12 | Vertical | 22,9 |
| 4 | 6 | Vertical | 18,6 |
| 5 | 8 | Horizontal | 23,65 |
| 5 | 4 | Horizontal | 19,88 |
| 5 | 8 | Vertical | 17,5 |
| 5 | 4 | Vertical | 17,4 |
| 6 | 5 | Horizontal | 21,3 |
| 6 | 3 | Horizontal | 19,6 |
| 6 | 5 | Vertical | 22,7 |
| 6 | 3 | Vertical | 21,3 |

contribuirá a una mejor comprensión y planificación de futuros proyectos e infraestructuras en el área.

2.1.3. *M-LAT* (Laboratorio alta tensión)

La malla de puesta a tierra, construida alrededor del año 2010, se localiza junto al bloque central de la universidad, En un terreno cuya resistividad se observa en la tabla 2.1 conectada exclusivamente al laboratorio de alta tensión. Su resistencia de puesta a tierra, véase en la tabla 2.4, inferior a 1Ω , es vital para asegurar la seguridad y permitir experimentos confiables. Requiere un seguimiento riguroso para garantizar su correcto funcionamiento y proteger a estudiantes y personal, un resumen de los datos técnicos más importantes se encuentran en la tabla 2.4.

Tabla 2.3: Resistencia de la MLAT

| 1 era pica [m] | 2 da pica [m] | Resistencia [Ω] |
|----------------|---------------|--------------------------|
| 16,4 | 8,528 52 % | 0,37 |
| 16,4 | 10,168 62 % | 0,38 |
| 16,4 | 11,808 72 % | 0,38 |

Tabla 2.4: Parámetros de la MLAT

| Malla de puesta a tierra | | |
|--------------------------------|-----------------------------|------------------|
| Ubicación | Laboratorio de alta tensión | |
| Resistencia de puesta a tierra | 0.38 | Ω |
| Resistividad del suelo | 20,71 | $\Omega \cdot m$ |
| Tipo de suelo | Uniforme | |

2.1.4. *MGM* (Guillermo Mensi)

La malla de puesta a tierra, localizada bajo el edificio Guillermo Mensi y construida en paralelo con el desarrollo de la universidad, se encuentra aislada y conectada únicamente al mencionado edificio. Su construcción data del año [año de construcción estimado]. Es importante resaltar que actualmente no se cuenta con información detallada acerca de la geometría y ubicación precisa de las estructuras de puesta a tierra, así como tampoco se dispone de datos sobre el número de picas y los valores de resistencia en el momento de su implementación. Estos datos revisten una relevancia significativa para garantizar un mantenimiento adecuado del sistema de puesta a tierra. Asimismo, resulta altamente beneficioso mantener una base de datos que contenga valores referenciales de resistividad del terreno, lo cual será de gran utilidad para futuras construcciones en el área, véase los valores medidos en la tabla 2.5 y 2.6.

Tabla 2.5: Resistencia de la *MGM*

| 1 era pica [m] | 2 da pica [m] | Resistencia [Ω] |
|----------------|---------------|--------------------------|
| 44 | 22,88 52 % | 0,09 |
| 44 | 27,28 62 % | 0,09 |
| 44 | 31,68 72 % | 0,08 |

Tabla 2.6: Parámetros de la *MGM*

| Malla de puesta a tierra | | |
|--------------------------------|-----------------|------------------|
| Ubicación | Guillermo Mensi | |
| Resistencia de puesta a tierra | 0.09 | Ω |
| Resistividad del suelo | 20,71 | $\Omega \cdot m$ |
| Tipo de suelo | Uniforme | |

2.1.5. *M_MR* (Mario Rizzini)

La malla de puesta a tierra, cuya construcción se remonta a aproximadamente [año de construcción], se encuentra estratégicamente situada bajo el edificio Mario Rizzini. Su función principal es asegurar la seguridad y desviar corrientes de falla, con el propósito de prevenir cualquier peligro eléctrico dentro de dicho edificio. La implementación de esta malla representa una medida esencial para salvaguardar las instalaciones y garantizar un entorno eléctricamente seguro tanto para el personal como para los usuarios del edificio.

Es importante mencionar que, actualmente, no se dispone de información detallada sobre el diseño específico de la malla de puesta a tierra. Además, se desconocen datos cruciales como la resistividad del suelo en el momento en que se implementó la malla. Estos datos son fundamentales para el correcto mantenimiento de la malla y para asegurar su óptimo funcionamiento a lo largo del tiempo, los datos de las mediciones realizadas se encuentran en las tablas 2.7 y 2.8

Tabla 2.7: Resistencia de la MMR

| 1 era pica [mt] | 2 da pica [m] | Resistencia [Ω] |
|-----------------|---------------|--------------------------|
| 16,4 | 8,528 52 % | 0,37 |
| 16,4 | 10,168 62 % | 0,38 |
| 16,4 | 11,808 72 % | 0,38 |

Tabla 2.8: Parámetros de la MMR

| Malla de puesta a tierra | | |
|--------------------------------|---------------|------------------|
| Ubicación | Mario Rizzini | |
| Resistencia de puesta a tierra | 0.38 | Ω |
| Resitividad del suelo | 20,71 | $\Omega \cdot m$ |
| Tipo de suelo | Uniforme | |

2.1.6. *M_PCH* (Pantalla Cancha)

Comprende tres electrodos dispuestos en línea recta, fue recientemente construida en la cancha de fútbol de la universidad con el propósito de salvaguardar la pantalla instalada en dicho espacio. Esta implementación fue llevada a cabo en cumplimiento

con la normativa establecida en la sección 250 de [14], que obliga a la implementación de medidas de protección para estos equipos, los datos técnicos de resistencia y de resistividad alrededor de la malla se encuentran tabulados en 2.9 y 2.10

Tabla 2.9: Resistencia de la MPCH

| 1 era pica [mt] | 2 da pica [m] | Resistencia [Ω] |
|-----------------|---------------|--------------------------|
| 30 | 15,6 52% | 1,08 |
| 30 | 18,6 62% | 1,09 |
| 30 | 21,6 72% | 1,09 |

Tabla 2.10: Parámetros de la MPCH

| Malla de puesta a tierra | | |
|---------------------------------------|---------------------------|------------------|
| Ubicación | Pantalla cancha de fútbol | |
| Resistencia de puesta a tierra | 1.09 | Ω |
| Resistividad del suelo | 20,71 | $\Omega \cdot m$ |
| Tipo de suelo | Uniforme | |

2.1.7. *M_AUT* (Automotriz)

La malla de puesta a tierra que nos concierne está asociada al transformador 5925, el cual alimenta el edificio Juan Botasso. Se ubica en la parte lateral de la cancha de fútbol, tras el área de automotriz. La implementación de este SPT es de gran relevancia en el contexto de esta propuesta, ya que actúa como un punto intermedio entre los dos extremos de la Universidad. Su presencia resulta crucial para facilitar la conexión efectiva entre dichos puntos.

Es importante destacar que, lamentablemente, no se cuenta con información documentada acerca del diseño específico de esta malla de puesta a tierra, observense los valores de resistencia y de resistividad en la tabla 2.11 y 2.1 y un resumen de datos importantes en 2.12 sucesivamente. Además, obtener una medición real de la resistividad del terreno en la zona actualmente se complica debido a la presencia de fundiciones cercanas y la reducida disponibilidad de espacio de tierra en la parte frontal.

Tabla 2.11: Resistencia de la MAUT

| 1 era pica [mt] | 2 da pica [m] | Resistencia [Ω] |
|-----------------|---------------|--------------------------|
| 14 | 7,28 52% | 0,35 |
| 14 | 8,68 62% | 0,37 |
| 14 | 10,08 72% | 0,37 |

Tabla 2.12: Parámetros de la MAUT

| Malla de puesta a tierra | | |
|--------------------------------|------------|------------------|
| Ubicación | Automotriz | |
| Resistencia de puesta a tierra | 0.35 | Ω |
| Resistividad del suelo | 20,71 | $\Omega \cdot m$ |
| Tipo de suelo | Uniforme | |

2.1.8. *M_CIMA* (CIMA)

La malla de puesta a tierra del edificio CIMA está ubicada alrededor de su perímetro. El transformador 21462 se encuentra más cercano al punto de conexión desde el poste identificado como 380859. Sin embargo, se carece de información documentada acerca de la resistividad del terreno en los alrededores de la malla, así como de detalles relacionados con su diseño específico.

La medición precisa de la resistividad en el punto en cuestión presenta complicaciones debido a que el área disponible para tal fin se limita únicamente a una parte frontal de jardín. No obstante, se llevaron a cabo mediciones de resistividad en un terreno uniforme y de igual nivel, cuyos valores se encuentran consignados en la tabla 2.1, los valores de resistencia y datos técnicos de relevancia se encuentran en la tabla 2.13 y 2.14.

Tabla 2.13: Resistencia de la MCIMA

| 1 era pica [mt] | 2 da pica [m] | Resistencia [Ω] |
|-----------------|---------------|--------------------------|
| 18 | 9,36 52 % | 0,22 |
| 18 | 11,16 62 % | 0,24 |
| 18 | 12,96 72 % | 0,23 |

Tabla 2.14: Parámetros de la MCIMA

| Malla de puesta a tierra | | |
|--------------------------------|----------|------------------|
| Ubicación | CIMA | |
| Resistencia de puesta a tierra | 0.23 | Ω |
| Resistividad del suelo | 20,71 | $\Omega \cdot m$ |
| Tipo de suelo | Uniforme | |

2.1.9. *M_GJB* (Generador Juan Botasso)

En el contexto de la tesis, se enfatiza la importancia de contar con un Sistema de Puesta a Tierra (SPT) para garantizar el funcionamiento seguro de los generadores en el edificio Juan Botasso. Sin embargo, se enfrentan desafíos debido a la falta de pozos de revisión en la malla, lo que dificulta el mantenimiento y evaluación periódica. El tablero de distribución está alejado de un cuerpo de tierra para medir la resistividad del terreno, los valores de resistividad medida se encuentran en la tabla 2.15 y la resistencia de la malla y datos técnicos importantes en 2.1 y 2.16.

Tabla 2.15: Resistencia de la MGJB

| 1 era pica [mt] | 2 da pica [m] | Resistencia [Ω] |
|-----------------|---------------|--------------------------|
| 33 | 17,16 52 % | 0,19 |
| 33 | 20,46 62 % | 0,19 |
| 33 | 23,76 72 % | 0,20 |

Tabla 2.16: Parámetros de la MGJB

| Malla de puesta a tierra | | |
|--------------------------------|------------------------|------------------|
| Ubicación | Generador Juan Botasso | |
| Resistencia de puesta a tierra | 0.19 | Ω |
| Resitividad del suelo | 20,71 | $\Omega \cdot m$ |
| Tipo de suelo | Uniforme | |

2.1.10. *M_BIB* (Biblioteca)

La malla de puesta a tierra de la biblioteca está ubicada bajo su infraestructura y se encuentra conectada al tablero de distribución. Para evaluar su eficiencia, se aplicó el método del 62% desde el tablero hasta el cuerpo de tierra localizado en la parte frontal de la biblioteca. En el mismo terreno, se realizó una medición de la resistividad en un área uniforme y al mismo nivel que la biblioteca, los valores obtenidos se encuentran detallados en la tabla 2.1. Asimismo, los datos técnicos más relevantes se encuentran resumidos la tabla 2.18 y la resistencia de la MBIB en la tabla 2.17.

Este análisis forma parte de la investigación para comprender la efectividad y desempeño de la malla de puesta a tierra en la biblioteca. Los resultados obtenidos

de la medición de resistividad son fundamentales para determinar la calidad del sistema de puesta a tierra y su capacidad para desviar corrientes de falla de manera segura. Con base en estos datos técnicos, se podrán establecer recomendaciones y acciones de mejora que contribuyan a optimizar el funcionamiento de la malla y asegurar un entorno eléctricamente seguro para la biblioteca y sus usuarios.

Tabla 2.17: Resistencia de la MBIB

| 1 era pica [mt] | 2 da pica [m] | Resistencia [Ω] |
|-----------------|---------------|--------------------------|
| 50 | 26 52 % | 0,17 |
| 50 | 31 62 % | 0,19 |
| 50 | 36 72 % | 0,21 |

Tabla 2.18: Parámetros de la MBIB

| Malla de puesta a tierra | | |
|---------------------------------------|----------|------------------|
| Ubicación | | Biblioteca |
| Resistencia de puesta a tierra | 0.19 | Ω |
| Resitividad del suelo | 20,71 | $\Omega \cdot m$ |
| Tipo de suelo | Uniforme | |

En el cierre de este estudio, es relevante destacar la imposibilidad de llevar a cabo mediciones precisas de la resistencia de puesta a tierra en el bloque central. Se pudo identificar la existencia de tres mallas de puesta a tierra conectadas al mismo barraje en el tablero de distribución general, ubicado en el subsuelo del laboratorio de electrónica de potencia. Desafortunadamente, debido a la falta de un retorno adecuado, no fue factible aplicar el método de clamp on para efectuar la medición, y la ubicación física del barraje tampoco permitió utilizar el método del 62 %.

CAPÍTULO 3

PROPUESTA DE DISEÑO SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

El presente capítulo detalla la propuesta de mejoramiento del sistema de puesta a tierra en la Universidad Politécnica Salesiana, que se fundamenta en la unificación de todas las mallas de puesta a tierra existentes. A pesar de que los sistemas de puesta a tierra actuales en la universidad cumplen con los valores requeridos por las normativas vigentes, el objetivo primordial de esta unión es alcanzar una resistencia de puesta a tierra lo más cercana a cero, con el fin de garantizar la seguridad tanto de los dispositivos electrónicos como de los estudiantes y docentes que transitan por las instalaciones universitarias.

Adicionalmente, se contempla una segunda finalidad, orientada hacia una posible expansión futura de la universidad. En caso de que se realicen construcciones de nuevos edificios en zonas libres dentro del campus, como parqueaderos, canchas de fútbol de césped y sintéticas, entre otras áreas, la malla unificada permitirá aprovechar el máximo espacio posible para realizar derivaciones directas desde los edificios hacia la malla general.

El diseño de la malla se ha adaptado a las características específicas del terreno y a las edificaciones existentes en el campus. Dado que el terreno presenta una topografía irregular y gran parte del área está pavimentada, no fue posible crear una malla con geometría regular. Se llevó a cabo un minucioso análisis de rutas que recorrieran todas las mallas existentes, y se realizaron cruces estratégicos para abarcar la mayor superficie posible. En algunos casos, se debió diseñar rutas de los conductores por lugares seguros, como techos o áreas óptimas sobre las edificaciones, para evitar posibles riesgos para las personas.

3.1. Recorrido

El área del terreno de la Universidad es de **62438,74** m^2 y su perímetro de **1086,2730** m , el recorrido del conductor de la malla propuesta es de **1854,07** m , si bien es cierto la cantidad de conductor total a utilizar es **2036,62** m no todo es del mismo tipo de conductor, sino que, la necesidad de adaptarse a las limitaciones impuestas por estructuras preexistentes en determinados tramos ha llevado a la elección de conductores con aislamiento tipo TTU. Esta opción se enfoca particularmente en las conexiones de las mallas ya establecidas. Estas conexiones se implementarán de manera discreta en los tableros de distribución generales en cada una de las edificaciones, con la finalidad de preservar la integridad del nivel del piso acabado.

En el proceso de ingresar a las diversas edificaciones, se ha considerado la seguridad como una prioridad, lo que ha impulsado la utilización de este tipo de conductor aislado. Aunque se podría considerar la alternativa de utilizar el conductor desnudo protegido por politubo, la elección inicial favorece la estética y coherencia visual del entorno, motivo por el cual se ha optado por la primera opción disponible.

El recorrido de la malla propuesta se observa en la figura [3.1](#)

3.2. Cálculos

Los cálculos para la resistencia de puesta a tierra de la malla propuesta se llevaron a cabo mediante un código desarrollado en MATLAB, el cual siguió las fórmulas y procedimientos establecidos por las normas correspondientes. El código detallado de estos cálculos se encuentran en el anexo [C](#).

El programa desarrollado cuenta con la siguiente interfaz, véase en la figura [3.2](#).

Se detalla a continuación como se obtuvo cada parámetro solicitado en el mismo.

La resistividad del terreno se detalla en el capítulo [2](#), obteniendo un valor de **20,71** $\Omega \cdot m$ y es un terreno uniforme.

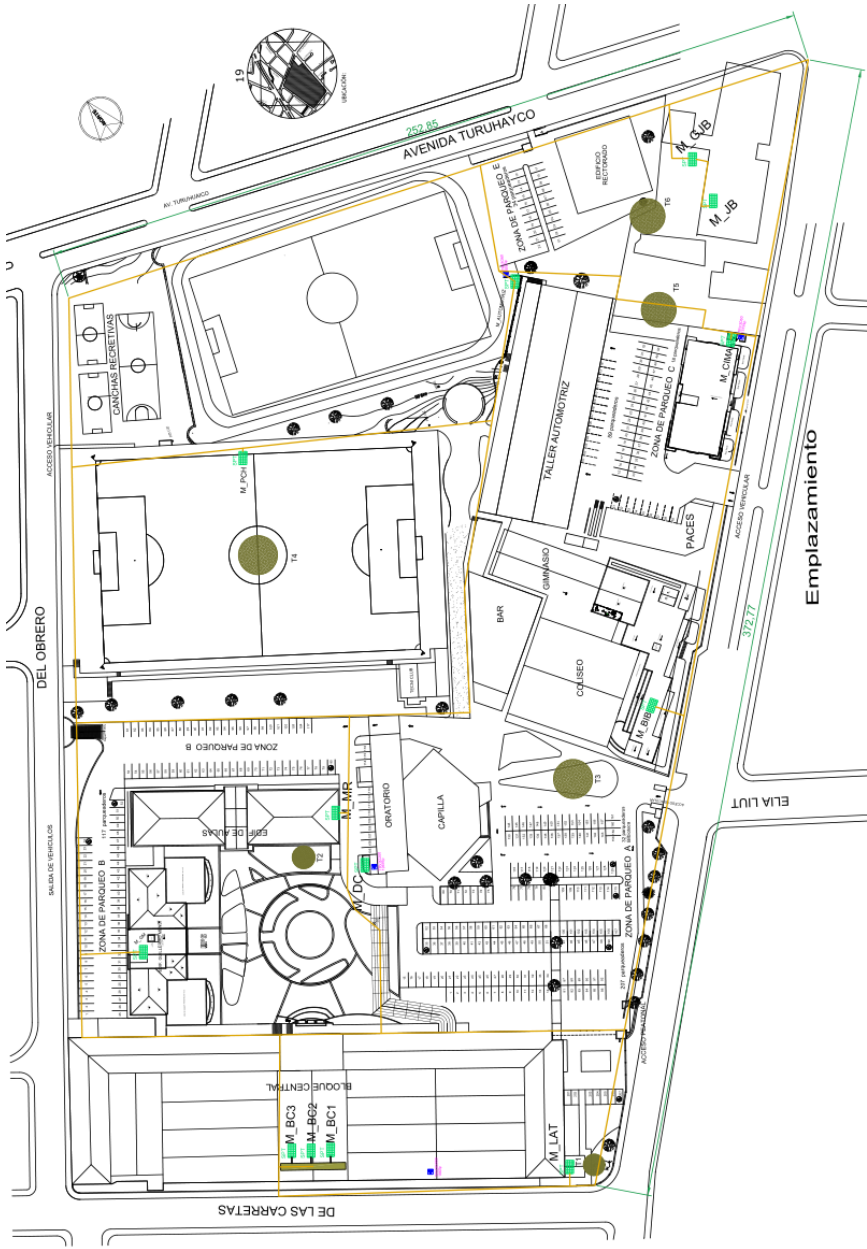
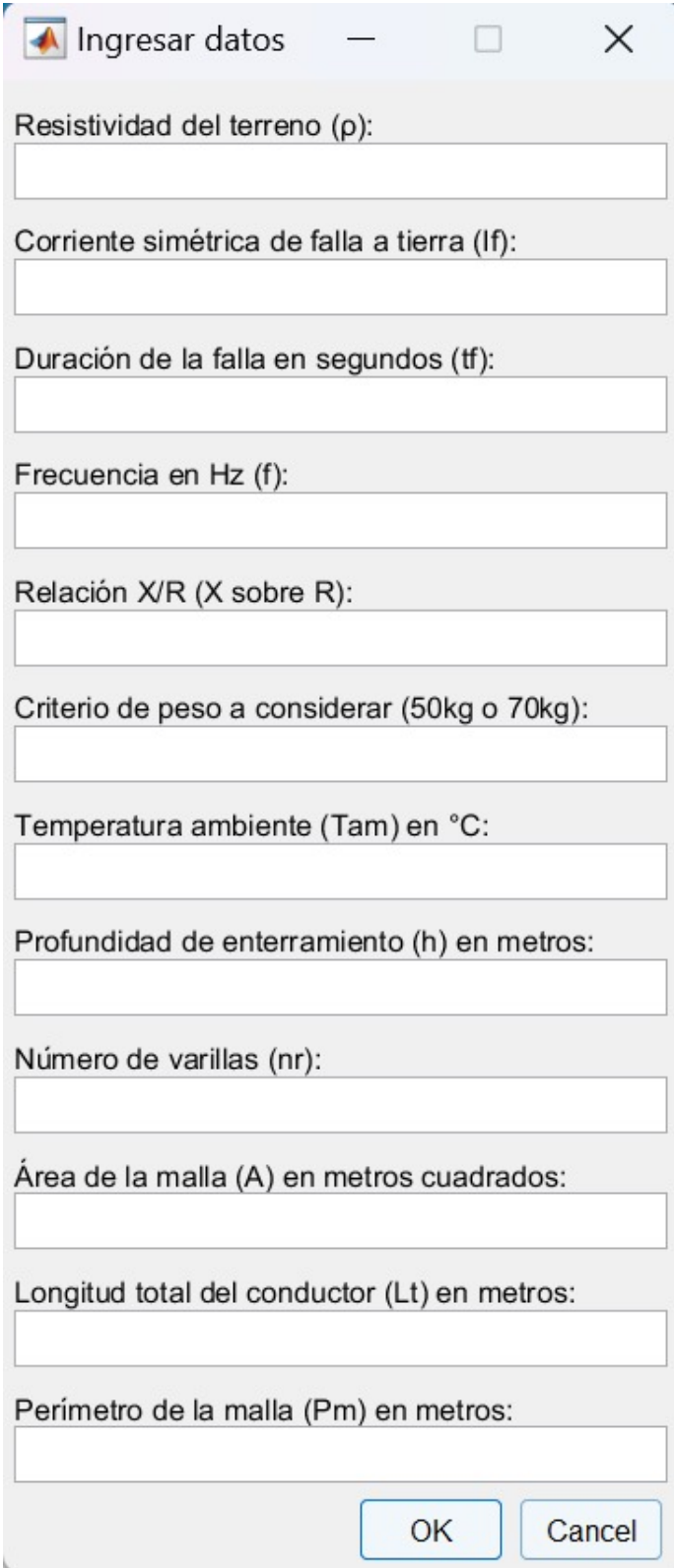


Figura 3.1: Propuesta de la MPT

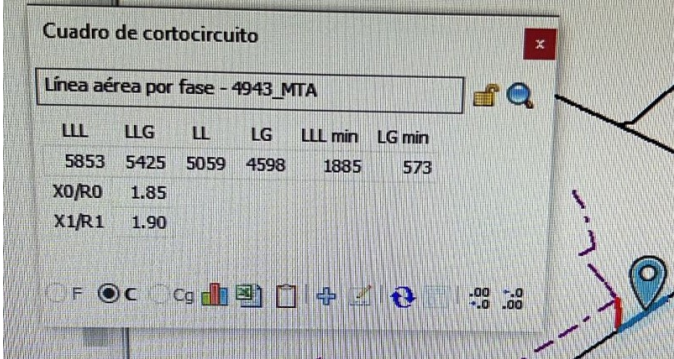


The image shows a MATLAB dialog box titled "Ingresar datos" (Enter data). It contains several input fields for data entry, each with a label and a corresponding text box. The fields are:

- Resistividad del terreno (ρ):
- Corriente simétrica de falla a tierra (I_f):
- Duración de la falla en segundos (t_f):
- Frecuencia en Hz (f):
- Relación X/R (X sobre R):
- Criterio de peso a considerar (50kg o 70kg):
- Temperatura ambiente (T_{am}) en °C:
- Profundidad de enterramiento (h) en metros:
- Número de varillas (n_r):
- Área de la malla (A) en metros cuadrados:
- Longitud total del conductor (L_t) en metros:
- Perímetro de la malla (P_m) en metros:

At the bottom right of the dialog box, there are two buttons: "OK" and "Cancel".

Figura 3.2: Interfaz programa Matlab



| Cuadro de cortocircuito | | | | | | |
|---------------------------------|------|------|------|---------|--------|--|
| Línea aérea por fase - 4943_MTA | | | | | | |
| LLL | LLG | LL | LG | LLL min | LG min | |
| 5853 | 5425 | 5059 | 4598 | 1885 | 573 | |
| X0/R0 | 1.85 | | | | | |
| X1/R1 | 1.90 | | | | | |

Figura 3.3: Corriente de falla

La corriente simétrica de falla a tierra es un dato que nos facilita el ente distribuidor, en este caso particular la Centro Sur son ellos pues quienes tienen toda la información de la red, se solicitó las corrientes de falla en el transformador 21462, véase la figura 3.3.

De esta obtenemos la de mayor magnitud, la cual es la provocada por una falla trifásica obteniendo así un valor de **5853 A**.

La duración de la falla en segundos como se menciona en la subsección 1.5.2, un valor común para el cálculo es **0,5 s** el cual se encuentra dentro del rango.

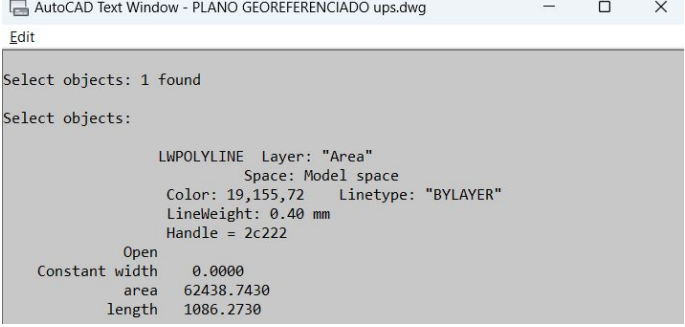
La frecuencia en Herzios del SNI del Ecuador es de **60 Hz**.

Relación X/R, es una relación que se obtiene de los componentes de la impedancia subtransitoria de falla, es un dato que entrega la empresa distribuidora ya que para obtener el mismo se debe hacer el equivalente de Thevenin de la red en el punto deseado, en la figura 3.3 se puede visualizar la misma y de ella obtenemos la de secuencia positiva.

El criterio del peso a considerar según [2] dependerá de lo deseado.

Según [2] los cálculos deberán realizarse tomando como referencia una temperatura ambiente de **20 C**

Es común encontrarse con una medida de **0,5 m** de profundidad de enterramiento y es la medida tomada para el cálculo desarrollado



```
AutoCAD Text Window - PLANO GEOREFERENCIADO ups.dwg
Edit
Select objects: 1 found
Select objects:
LWPOLYLINE Layer: "Area"
              Space: Model space
              Color: 19,155,72 Linetype: "BYLAYER"
              Lineweight: 0.40 mm
              Handle = 2c222
Open
Constant width 0.0000
area 62438.7430
length 1086.2730
```

Figura 3.4: Área y Perímetro de la malla

El número de varillas a colocar depende del criterio de diseño de la malla, en nuestro caso por el tamaño de la malla, no era necesario colocar varillas ya que la resistencia de puesta a tierra fue sumamente baja y se cumplía con el objetivo.

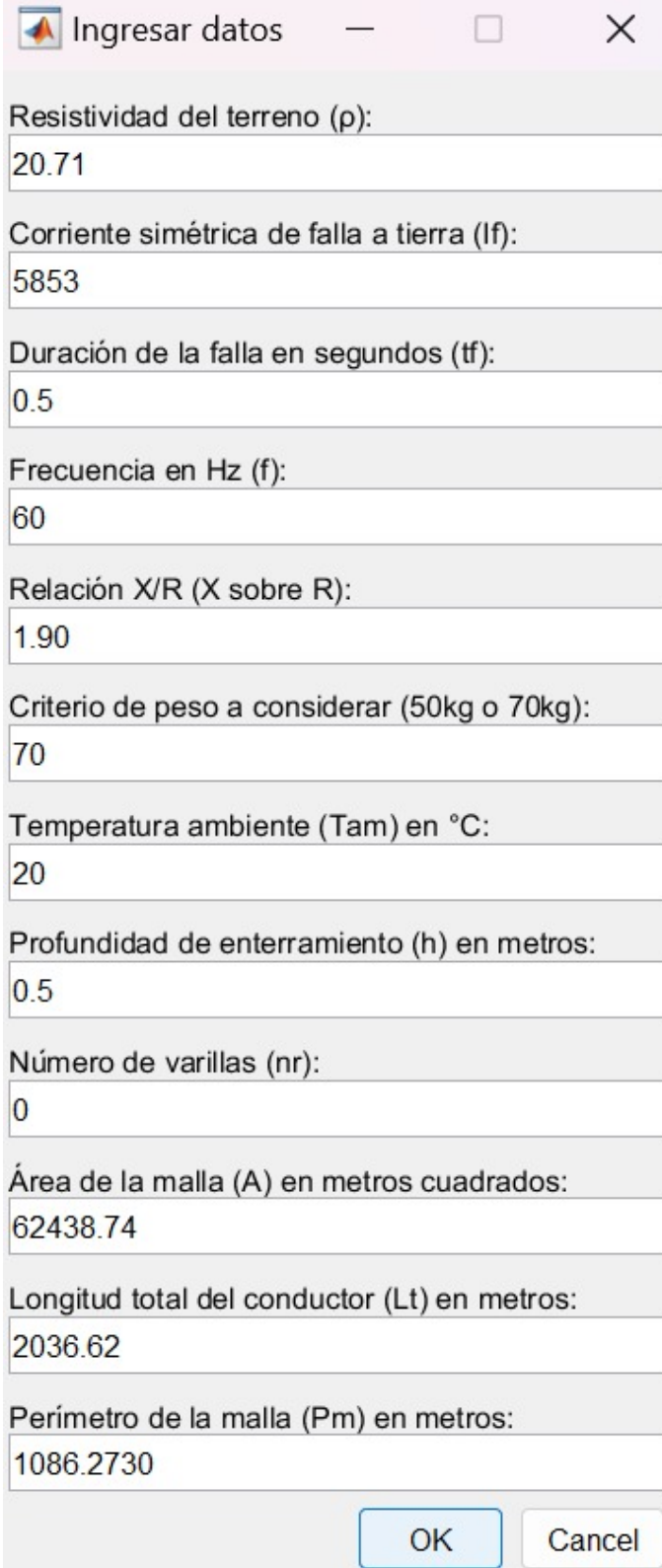
La longitud total del conductor se puede determinar mediante el recorrido del **D**, con un total de **2036,62 m**

Para determinar el tamaño del conductor necesario, se consideró la corriente de falla obtenida, Siguiendo la ecuación 1.15, se calculó el calibre del conductor requerido, dando como resultado un conductor 1/0 AWG. Esta selección garantiza una capacidad adecuada para el manejo seguro y eficiente de la corriente de falla, contribuyendo a una óptima protección del sistema de puesta a tierra en la universidad. Con este, se asegura que el conductor tenga la capacidad suficiente para gestionar el flujo de corriente ante eventualidades, salvaguardando tanto a los equipos eléctricos como a las personas que interactúan en el entorno universitario.

Para calcular la resistencia de puesta a tierra de la malla diseñada, se empleó la ecuación de Sverak, véase 1.31. El Área y Perímetro de la malla en metros cuadrados se encuentra mediante el software AutoCad, obteniendo así los valores **62438,7430 m²** y **1086,2730 m²**, respectivamente, véase la figura 3.4.

Al tabular los datos mencionados en el programa desarrollado en el software Matlab como en la figura 3.5.

Los resultados se visualizan en la figura 3.6.



The image shows a software dialog box titled "Ingresar datos" (Enter data). It contains several input fields with the following values:

| Parameter | Value |
|---|-----------|
| Resistividad del terreno (ρ): | 20.71 |
| Corriente simétrica de falla a tierra (I_f): | 5853 |
| Duración de la falla en segundos (t_f): | 0.5 |
| Frecuencia en Hz (f): | 60 |
| Relación X/R (X sobre R): | 1.90 |
| Criterio de peso a considerar (50kg o 70kg): | 70 |
| Temperatura ambiente (T_{am}) en °C: | 20 |
| Profundidad de enterramiento (h) en metros: | 0.5 |
| Número de varillas (n_r): | 0 |
| Área de la malla (A) en metros cuadrados: | 62438.74 |
| Longitud total del conductor (L_t) en metros: | 2036.62 |
| Perímetro de la malla (P_m) en metros: | 1086.2730 |

At the bottom of the dialog box, there are two buttons: "OK" and "Cancel".

Figura 3.5: Parámetros para los cálculos

DISEÑO DE MALLA DE PUESTA A TIERRA
 Corriente máxima a disipar de la malla I_g : 5882.4246 amperios
 El conductor a elegir es de 14.55 mm²
 Calibre: 1/0
 Diámetro: 9.35 mm
 Resistencia de malla de puesta a tierra R_g : 0.0471 ohmios
 Tension de paso tolerable E_p : 249.6212
 Tension de toque tolerable E_t : 228.9289

Figura 3.6: Resultados Obtenidos de los cálculos

3.3. Evaluación técnica y económica

Con el propósito de ofrecer soluciones integrales a la propuesta planteada, se empleó una variante en la configuración del conductor, incorporando aislamiento. Esta elección se fundamenta en la existencia de áreas donde la ejecución de trabajos civiles no resulta factible, optando por dicho conductor. Este permitiría el paso a través de conductos y cielos rasos en las edificaciones, hasta los diferentes tableros de distribución. Los resultados obtenidos en términos de resistencia se acercan significativamente a cero, alineándose con el objetivo de establecer una red sólida y con perspectivas a futuro.

En relación a la perspectiva económica, en el mercado, se detalla en la siguiente tabla los metrajes y costes del proyecto:

Tabla 3.1: Presupuesto para el diseño planteado

| Descripcion | Precio Unitario | Cantidad | Valor |
|-------------------|------------------------|----------|-------------|
| Cable 1/0 Desnudo | 8.5 | 1854 | 15759 \$ |
| Cable 1/0 TTU | 8.6 | 182 | 1565,2 \$ |
| Barra de Cobre | 98 | 1 | 98 \$ |
| Mano de Obra | 10 % de los materiales | | 1742,22 \$ |
| TOTAL | | | 19164,42 \$ |

Cabe destacar que los valores en la tabla 3.1 son aproximados y pueden variar dependiendo del proveedor. Aunque esta suma podría parecer significativa en principio, al considerar los beneficios y la solidez intrínseca de la malla propuesta, su viabilidad a largo plazo resulta evidente. En futuras construcciones, solo se requeriría la conexión a la red principal, obviando la necesidad de crear 2 o 3 mallas individuales, como es común en la edificación de estructuras que involucran edifi-

cios, transformadores y, de ser necesario, pararrayos. Por lo tanto, el costo presenta un valor sustancial en función de los beneficios que conlleva en el mediano y largo plazo.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

En el contexto técnico, se constata que las diversas infraestructuras de puesta a tierra presentan un nivel adecuado de mantenimiento. No obstante, surge una notable carencia en cuanto a documentación técnica relacionada. En específico, en relación al sistema de puesta a tierra del bloque central, se carece de información precisa sobre la ubicación de las mallas. Esta carencia ha sido exacerbada por la expansión arquitectónica de la universidad, que ha resultado en la pérdida de algunas mallas existentes. Esta situación presenta una problemática crítica no solo para el bienestar de los individuos que llevan a cabo sus labores en esta área, sino también para la salvaguarda de los valiosos equipos que se encuentran en los distintos laboratorios. La naturaleza costosa de estos equipos subraya la importancia de su cuidado meticuloso.

En virtud de lo expuesto, la propuesta de construcción de una malla de puesta a tierra se revela como una medida beneficiosa y necesaria. Esta malla proyectada, caracterizada por una resistencia de 0,0471 Ohmios, tiene la finalidad de abarcar prácticamente la totalidad de la extensión de la universidad. Cabe mencionar que existen áreas inaccesibles debido a cambios en la infraestructura original, que imposibilitan su cobertura. Para la implementación de esta malla, se utilizarán 1854 metros lineales de conductor calibre 1/0 AWG, así como 182 metros del mismo tipo de conductor pero en variante TTU. Estos elementos serán empleados para establecer la conexión entre las mallas preexistentes y la malla propuesta. Dicha conexión se llevará a cabo en los tableros de distribución pertinentes.

Una consideración crucial recae en el Área de Arranque Inicial, se empleará una barra de cobre de dimensiones 10 x 180 mm, con un radio en la esquina de 5,0

mm y un área de 1778,5 mm². Esta barra demostrará la capacidad de soportar una corriente de 6073,6 Amperios en corriente alterna, manteniéndose en un entorno con temperatura ambiente de 20°C.

El impacto de esta propuesta no se limita a la actualidad, sino que proyecta beneficios hacia el futuro. Al evitar la necesidad de construir nuevas y robustas mallas para futuros edificios, laboratorios y demás instalaciones, se promueve la integración de estas estructuras a la malla general, cuyo valor aproximado es de 0 Ohmios. Esto garantizará la disipación efectiva de posibles fallos, asegurando tanto la integridad de los equipos como la seguridad de la comunidad universitaria.

La ejecución de las uniones entre las diversas mallas será llevada a cabo mediante la aplicación de una fuerza de 20 Toneladas a través de una prensa. Esta técnica, inspirada en los sistemas de mallas informáticas, logra una deformación que amalgama los conductores en un ente único y sólido. Esta metodología, enriquecida por su adaptación a los modernos sistemas de puesta a tierra de subestaciones, supera las limitaciones del método convencional de soldadura exotérmica. Esta evolución se debe a la problemática que presentaba el mantenimiento preventivo en ausencia de pozos de revisión adecuados para el método convencional o en su ausencia ocasional.

En síntesis, esta investigación y propuesta de implementación de una malla de puesta a tierra robusta y efectiva para la universidad no solo aborda las deficiencias actuales en el sistema de puesta a tierra, sino que también establece una base sólida para el crecimiento y el cuidado continuo de las instalaciones y equipos en el campus. Esta contribución se erige como un paso crucial hacia la mejora de la seguridad, el rendimiento y la longevidad de los recursos universitarios, beneficiando a toda la comunidad académica y técnica involucrada.

4.2. Recomendaciones

Es fundamental implementar un programa de mantenimiento preventivo de forma periódica tanto para las mallas de puesta a tierra existentes como para la nueva propuesta. Estas revisiones regulares deben abarcar inspecciones minuciosas, mediciones precisas de resistencia y una verificación exhaustiva de las conexiones. De esta manera, se garantizará un funcionamiento adecuado y la seguridad a largo plazo del sistema de puesta a tierra. Se recomienda realizar auditorías técnicas periódicas a cargo de expertos en sistemas de puesta a tierra con el propósito de evaluar el ren-

dimiento y la eficiencia del sistema. Estas auditorías permitirán identificar áreas de mejora potencial y asegurar el cumplimiento de las normativas y estándares vigentes.

Es fundamental planificar meticulosamente la construcción de la malla de puesta a tierra, asegurándose de contar con recursos adecuados, incluyendo personal altamente calificado y herramientas especializadas. Es vital coordinar las etapas del proyecto con otros trabajos de infraestructura para evitar interferencias y lograr una implementación fluida y eficiente.

Es esencial mantener un registro detallado y actualizado de todas las intervenciones realizadas en el sistema de puesta a tierra, incluyendo revisiones, mantenimientos y reparaciones efectuadas. Estos registros serán valiosos para la toma de decisiones futuras y para la mejora continua del sistema.

ANEXOS

ANEXO A

Medición de la resistencia de puesta a tierra de las mallas existentes



Figura A.1: Medición de resistencia de malla de puesta a tierra del laboratorio de alta tensión



Figura A.2: Medición de resistencia de malla de puesta a tierra del edificio Guillermo Mensi



Figura A.3: Medición de resistencia de malla de puesta a tierra del edificio Mario Rizzini



Figura A.4: Medición de resistencia de malla de la pantalla en la cancha de fútbol



Figura A.5: Medición de resistencia de malla de puesta a tierra del transformador ubicado en la parte posterior al edificio de Automotriz



Figura A.6: Medición de resistencia de malla de puesta a tierra del generador del edificio Juan Botasso



Figura A.7: Medición de resistencia de malla de puesta a tierra del transformador ubicado a un lado del edificio CIMA



Figura A.8: Medición de resistencia de malla de puesta a tierra del edificio de Biblioteca

ANEXO B

Medición de la resistividad del suelo



Figura B.1: Medición de resistividad del suelo alrededor del laboratorio de alta tensión, Terreno 1



Figura B.2: Medición de resistividad del suelo alrededor del edificio Mario Rizzini, Terreno 2

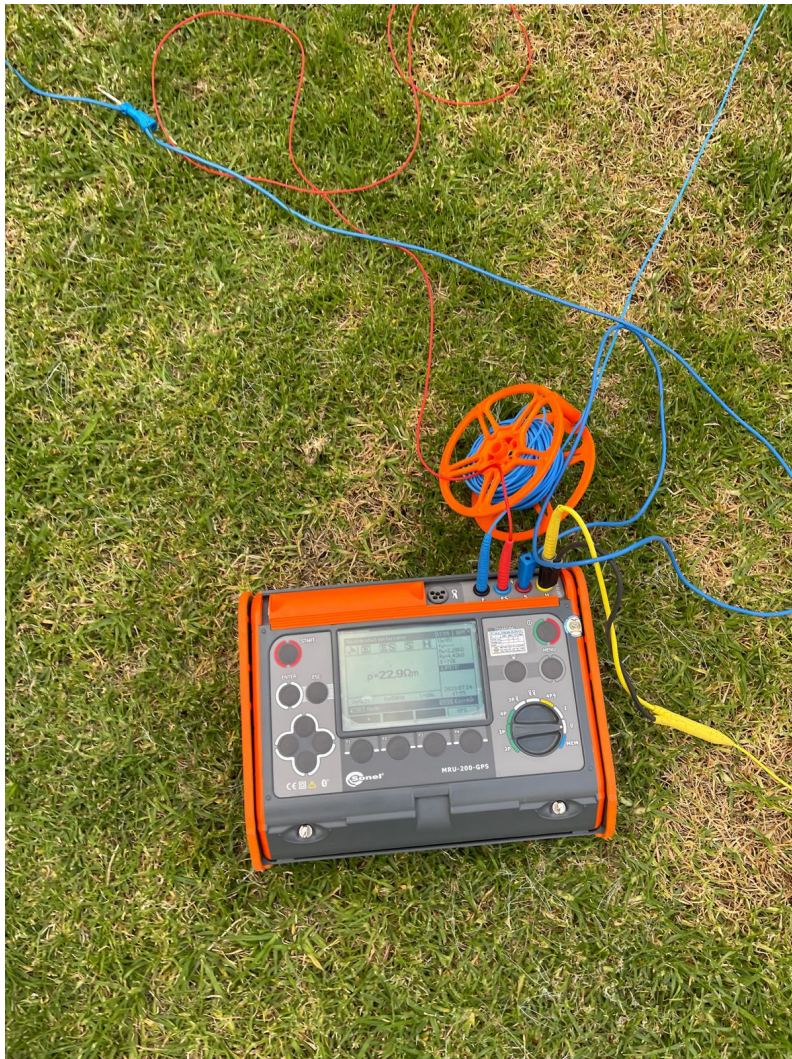


Figura B.3: Medición de resistividad del suelo en la cancha, Terreno 4



Figura B.4: Medición de resistividad del suelo frente al edificio Juan Botasso, Terreno 5

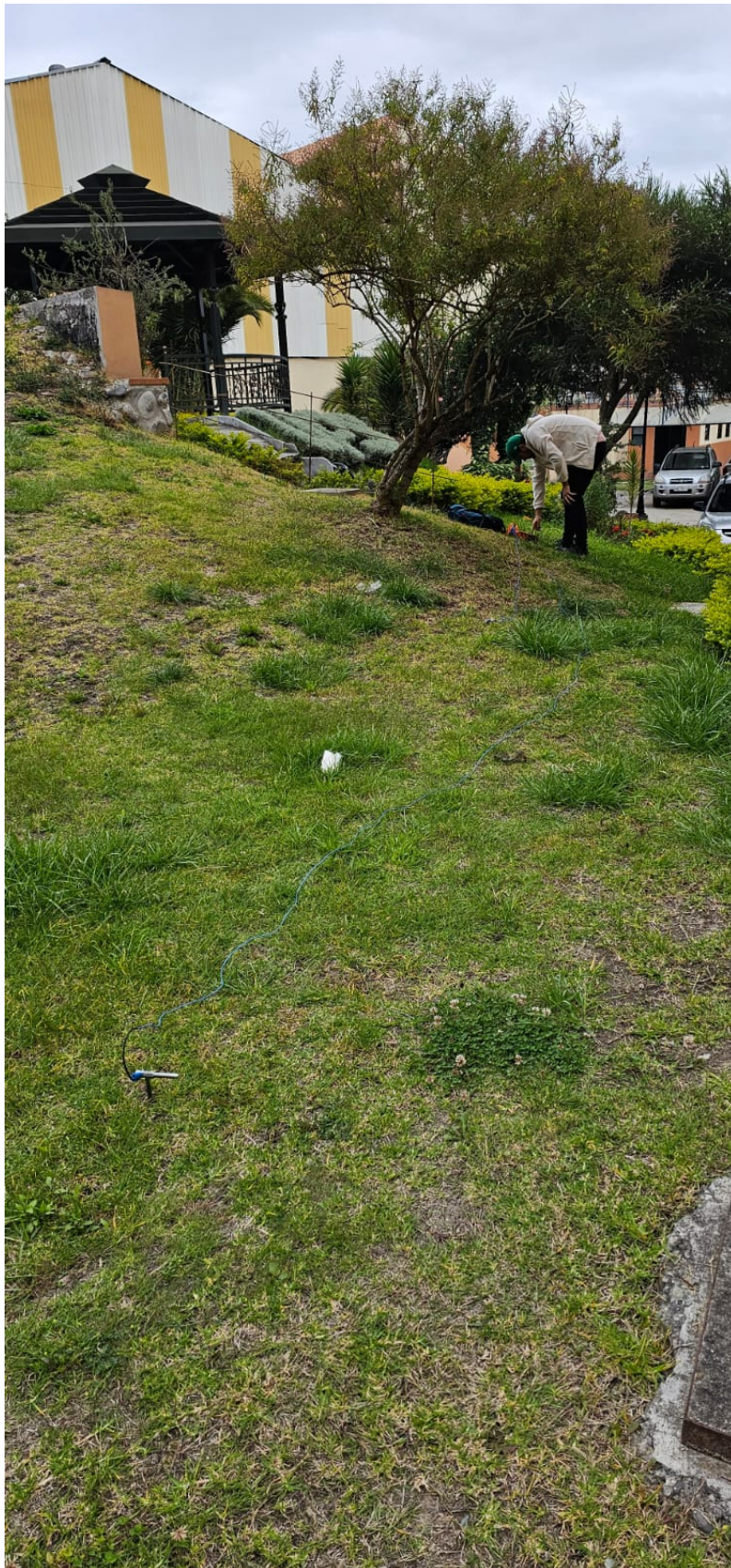


Figura B.5: Medición de resistividad del suelo en la parte inferior del edificio Juan Botasso donde se encuentra el Generador, Terreno 6

ANEXO C

Código Matlab para diseño de la propuesta

```

% DISEÑO DE MALLA DE PUESTA A TIERRA
clear
format bank

texto = 'DISEÑO DE MALLA DE PUESTA A TIERRA';
disp(texto);

% Solicitar datos iniciales
Cp = 1;
Sf = 1;

prompt = {'Resistividad del terreno (p):', ...
          'Corriente simétrica de falla a tierra (If):', ...
          'Duración de la falla en segundos (tf):', 'Frecuencia en Hz (f):', ...
          'Relación X/R (X sobre R):', ...
          'Criterio de peso a considerar (50kg o 70kg):', ...
          'Temperatura ambiente (Tam) en °C:', 'Profundidad de enterramiento (h) en metros:', ...
          'Número de varillas (nr):', ...
          'Área de la malla (A) en metros cuadrados:', ...
          'Longitud total del conductor (Lt) en metros:', ...
          'Perímetro de la malla (Pm) en metros:', };

dlgtitle = 'Ingresar datos';
dims = [1 50];
definput = {'', '', '', '', '', '', '', '', '', '', '', '', '', ''};
answer = inputdlg(prompt, dlgtitle, dims, definput);

rho = str2double(answer{1}); %Resistividad del terreno
If = str2double(answer{2}); %Corriente simetrica de falla a tierra
Sf = 1; %Factor de división de corriente
tf = str2double(answer{3}); %Duracion de la falla en s
ts = tf;
f = str2double(answer{4}); %frecuencia en Hz
X_sobre_R = str2double(answer{5}); % Relación X/R

```

Figura C.1: Primera parte del código

```

Tam = str2double(answer{7}); %Temperatura ambiente en °C
h = str2double(answer{8}); %Profundidad de enterramiento en metros
nr = str2double(answer{9}); %Número de varillas
A = str2double(answer{10}); %Área de la malla en metros cuadrados
Lt = str2double(answer{11}); %Longitud total del conductor en metros
Pm = str2double(answer{12}); %Perímetro de la malla en metros

%Constante de tiempo de la componente DC
Ta = (X_sobre_R)*(1/(2*pi*f));

% Factor de decremento
Df = sqrt(1 + (Ta/tf)*(1-exp(-2*tf/Ta)));

%Factor de disminución de la capa superficial Cs
%Cs = 1 - (0.09*(1-rho/rho_s))/(2*hs+0.09);
Cs=1;

%Corriente máxima a disipar de la malla Ig
Ig = If * Df * Sf * Cp;
fprintf('Corriente máxima a disipar de la malla Ig: %.4f amperios\n', Ig);

%Calibre del conductor
TCAP = 3.42;
K0 = 242;
Tm = 1084;
rho_r = 1.78;
alpha_r = 0.00381;
Amm2 = (If*Df/1000)/sqrt(((TCAP*10^-4)/(ts*alpha_r*rho_r))*log((K0+Tm)/(K0+Tam)));

% Datos de las columnas de los conductores
mm2 = [53; 67; 85; 107; 127; 152; 177; 203; 228; 253; 279; 304; 329; 355; 380];
cal = {'1/0'; '2/0'; '3/0'; '4/0'; '250'; '300'; '350'; '400'; '450'; '500'; '550'; '600'; '650'; '700'; '750'};
mm = [9.35; 10.5; 11.8; 13.3; 15.2; 16.7; 18; 18.5; 19.6; 20.6; 21.7; 22.6; 23.6; 24.4; 25.3];

```

Figura C.2: Segunda parte del código

```

% Encontrar el índice del valor menor a Amm2 en mm2
idx = find(mm2 < Amm2, 1, 'last');

% Si idx está vacío (no se encontró un valor menor a Amm2), elegir el primero
if isempty(idx)
    idx = 1;
end

% Obtener el valor correspondiente en cal
calibre = cal{idx}; % Usamos {} para acceder a la celda de texto

% Obtener el valor correspondiente en mm
diametro = mm(idx);

% Mostrar los resultados
fprintf('El conductor a elegir es de %.2f mm^2\n', Amm2);
fprintf('Calibre: %s\n', calibre);
fprintf('Diámetro: %.2f mm\n', diametro);

% RESISTENCIA DE MALLA DE PUESTA A TIERRA Rg

Lr=2.44;
Rg = rho * ((1 / (Lt+(Lr*nr)) + (1 / sqrt(20 * A)) * (1 + 1 / (1 + h * sqrt(20 / A)))));
fprintf('Resistencia de malla de puesta a tierra Rg: %.4f ohmios\n', Rg);

%Tensión de paso tolerable
if peso == 50
    Ep = (1000+6*Cs*rho)*(0.116/sqrt(ts));
elseif peso == 70
    Ep = (1000+6*Cs*rho)*(0.157/sqrt(ts));
else
    disp('El criterio de peso ingresado no es válido. ');
    Ep = NaN;
end

```

Figura C.3: Tercera parte del código

```

fprintf('Tension de paso tolerable Ep: %.4f ', Ep);

%Tensión de toque tolerable
if peso == 50
    Et = (1000+1.5*Cs*rho)*(0.116/sqrt(ts));
elseif peso == 70
    Et = (1000+1.5*Cs*rho)*(0.157/sqrt(ts));
else
    disp('El criterio de peso ingresado no es válido. ');
    Et = NaN;
end
fprintf('Tension de toque tolerable Et: %.4f ', Et);

```

Figura C.4: Cuarta parte del código

ANEXO D

Planos

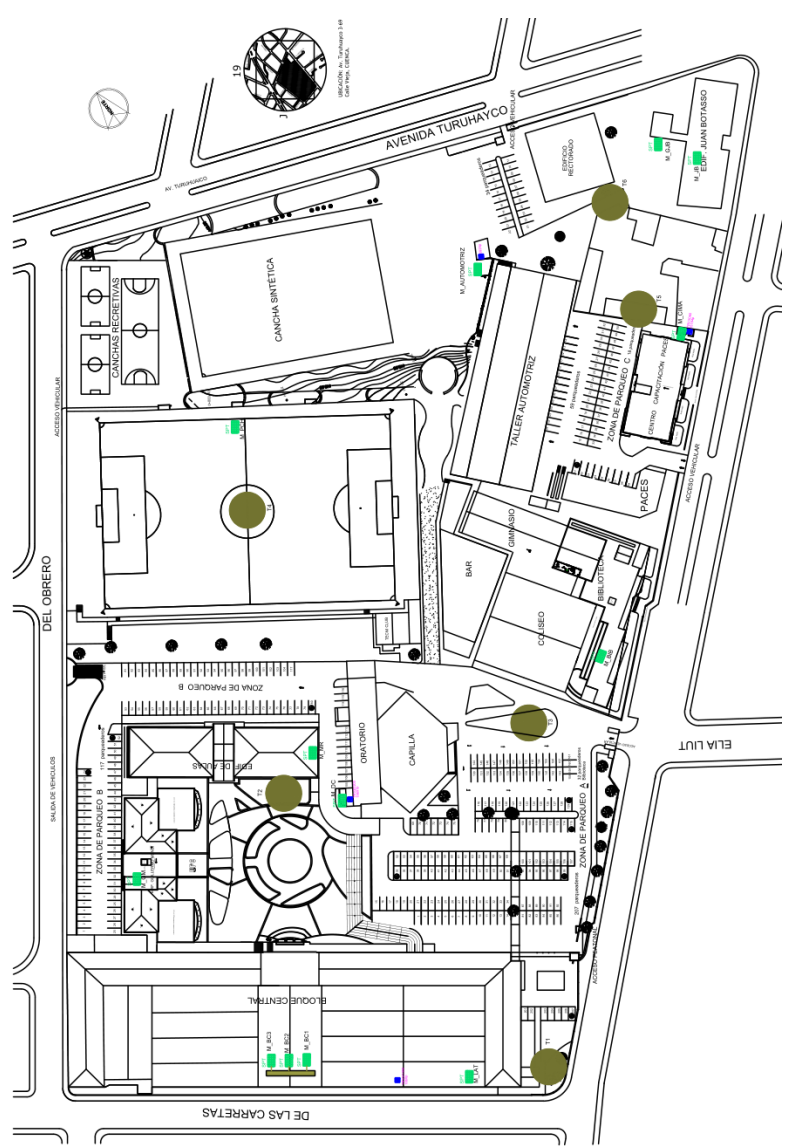


Figura D.1: Plano actual de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca

BIBLIOGRAFÍA

- [1] “IEEE guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potentials of a grounding system,” *IEEE Std 81-2012 (Revision of IEEE Std 81-1983)*, pp. 1–86, Dec 2012.
- [2] “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, May 2015.
- [3] INEN, *Código eléctrico nacional*, Instituto ecuatoriano de la normalización Std., 2001.
- [4] *TIA-607*, TIA Std.
- [5] A. Salam y Q. M. Rahman, *Power Systems Grounding*. Springer London, Limited, 2016.
- [6] F. C. Ospina, *Tierras: Soporte de la Seguridad Eléctrica*, ICONETEC, Ed. ICONETEC, 2005, vol. Tercera Edición.
- [7] G. Gilbert, “High voltage grounding systems,” Ph.D. dissertation, University of Waterloo, 2011.
- [8] AMPROBE, *Earth Ground Tester*, Users Manual, 2012.
- [9] F. M. Sinchi Sinchi, “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, B.S. thesis.
- [10] S. Poland, *USER MANUAL EARTH RESISTANCE METER*, SONEL TEST MEASUREMENT, Santa Clara, Ca. USA.
- [11] J. F. Barbecho Jimbo y C. A. Pérez Quiñónez, “Propuesta para optimización sistemas de malla de puesta a tierra de las áreas de producción de ucem-planta guapán,” B.S. thesis, 2022.

- [12] D. W. Zipse, “History of grounding/earthing practices in the united states,” in *2017 Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC)*, Sep. 2017, pp. 231–244.
- [13] M. S. Sazali, C. Wooi, S. Arshad, T. Wong, Z. Abdul-Malek, y 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.
- [14] NESC 2023, “2023 NESC,” *2023 National Electrical Safety Code(R) (NESC(R))*, pp. 1–365, Aug 2022.
- [15] M. L. Di Silvestre, L. Dusonchet, S. Favuzza, S. Mangione, L. Mineo, M. Mitolo, E. R. Sanseverino, y G. Zizzo, “Interconnections criteria of grounding grids in global grounding systems,” in *2018 IEEE/IAS 54th Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (ICPS)*, May 2018, pp. 1–8.
- [16] C. Andrango, P. Pulumarín, y C. A. C. Eugenio, “Elaboración de un manual para el diseño y mantenimiento de mallas de puesta a tierra,” B.S. thesis, Quito: EPN, 2008, 2014.
- [17] EPRI, “Examination of distribution groundind electrode configurations for optimal lightning perfomance,” Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, Tech. Rep., 2008.
- [18] A. Dhindsa, “Optimization of ac substation ground grid design and calculations,” *IEEE*, p. 9, 2022.
- [19] Ángel Teodoro Pacheco Guambaña, “Diseño de sistemas de puesta a tierra partiendo de un modelo biestratificado de terreno, aplicando un software computacional en el sector industrial,” Master’s thesis, UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, 2013.
- [20] F. M. S. S. CRISTIAN GEOVANNY CORONEL NARANJO, “Diseño y evaluación de configuraciones de puesta a tierra en diferentes tipos de suelo empleando materiales de baja resistividad,” Master’s thesis, Universidad Politécnica Salesiana, 2021.
- [21] P. GUALOTUÑA, “Mejoramiento de los sistemas de puesta a tierra del hospital gineco obstétrico pediátrico de nueva aurora “luz elena arismendi” mediante la inserción de bobinas dechoque,” Master’s thesis, UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANASEDE QUITO, 2022.

-
- [22] J. S. R. CASTAÑO, *SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA: Diseñado con IEEE-80 y evaluado con MEF*, 1st ed., B. Ltda, Ed. Universidad Nacional de Colombia, 2010.
- [23] K. Abledu y D. Laird, "Measurement of substation rock resistivity," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 7, no. 1, pp. 295–301, 1992.
- [24] "Ieee recommended practice for grounding of industrial and commercial power systems," *IEEE Std 142-1991*, pp. 1–240, June 1992.