



UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA

SEDE GUAYAQUIL

CARRERA DE ELECTRICIDAD

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

“DISEÑO DE UN SISTEMA PUESTA A TIERRA PARA APLICACIÓN
EN UNA INDUSTRIA UTILIZANDO LA NORMATIVA IEEE 80 – 2000”

AUTORES: Derian Franklin Beltrán Espinoza

Eder Giovanni Luna López

TUTOR: Ing. Julio Manuel Silva Becheran

Guayaquil – Ecuador

2023

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DE TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Derian Franklin Beltrán Espinoza con documento de identificación N° 1206421834 y Eder Giovanni Luna López con número de identificación N° 0912311339 manifestamos que:

Somos autores y responsables de 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.

Guayaquil, 3 de septiembre de 2023

Atentamente,



Derian Franklin Beltrán Espinoza

1206421834



Eder Giovanni Luna López

0912311339

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

Nosotros, Derian Franklin Beltrán Espinoza, identificado con el documento N.º 1206421834, y Eder Giovanni Luna López, identificado con el documento N.º 0912311339, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud del que somos autores del Proyecto Técnico " DISEÑO DE UN SISTEMA PUESTA A TIERRA PARA APLICACIÓN EN UNA INDUSTRIA UTILIZANDO LA NORMATIVA IEEE 80-2000", el cual ha sido desarrollado para optar por el título de INGENIERO ELÉCTRICO en la Universidad Politécnica Salesiana facultad 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 en la Universidad Politécnica Salesiana.

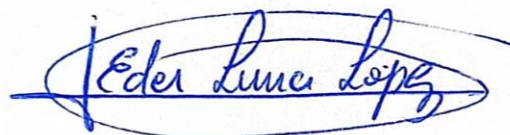
Guayaquil, 3 de Septiembre del 2023

Atentamente,



Derian Franklin Beltrán Espinoza

1206421834



Eder Giovanni Luna López

0912311339

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Julio Manuel Silva Becherán, con documento de identificación N.º 0959623422, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación "DISEÑO DE UN SISTEMA PUESTA A TIERRA PARA APLICACIÓN EN UNA INDUSTRIA UTILIZANDO LA NORMATIVA IEEE 80- 2000", realizado por Derian Franklin Beltrán Espinoza, con documento de identificación N.º 1206421834, y por Eder Giovanni Luna López, con documento de identificación N.º 0912311339, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Proyecto Técnico que cumple con todo los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana

Fecha: 3 de Septiembre del 2023

Atentamente,



Ing. Julio Manuel Silva Becherán

0959623422

DEDICATORIA

Tus palabras de aliento, tu amor incondicional y tu apoyo constante han sido la fuente de mi fortaleza a lo largo de esta ardua travesía académica. Dedico esta tesis de ingeniería eléctrica a mi amada madre, Nelly Espinoza. Tú has sido mucho más que una madre durante este viaje académico, has sido mi apoyo inquebrantable, el pilar fundamental que ha sostenido mis sueños y la guía que ha iluminado mi camino hacia la culminación de mi carrera.

Desde el primer día de clases hasta este momento, has estado a mi lado, animándome en los momentos difíciles y celebrando conmigo en los momentos de triunfo.

Derian Franklin Beltrán Espinoza

Dedico este logro en primer lugar a Dios quien me ha guiado y me ha dado la fortaleza de seguir adelante.

A mi madre por su comprensión y apoyo incondicional a lo largo de mi vida

A mi esposa e hijos por su estímulo constante fomentando en mí el deseo de superación y de triunfo en la vida, en especial a mi hijo Michael quien partió a los brazos del señor a su corta edad, él es quien me ilumina en todo y bendice mis proyectos y quien me demostró a ser fuerte y persistente pese a las adversidades de la vida.

Eder Giovanni Luna López

AGRADECIMIENTOS

En la culminación de este largo y desafiante viaje académico, deseo expresar mi profundo agradecimiento a todas las personas que han contribuido de manera significativa a la realización de esta tesis de ingeniería eléctrica.

En primer lugar, quiero expresar mi gratitud a mi familia, en especial a mi madre, Nelly Espinoza, por ser mi apoyo inquebrantable, mi inspiración y mi guía durante todo este proceso. Tus palabras de aliento y tu amor incondicional me han impulsado a seguir adelante incluso en los momentos más difíciles.

A mis amigos y compañeros de clase, les agradezco por compartir este viaje conmigo. Sus conversaciones, colaboración y apoyo mutuo han hecho que esta experiencia sea mucho más enriquecedora y memorable.

Agradezco a mis profesores y asesores por su dedicación y orientación a lo largo de mis estudios, sus conocimientos y consejos han sido fundamentales para mi formación como ingeniero eléctrico.

Por último, agradezco a todas las personas que, de una forma u otra, han influido en mi vida y en mi camino hacia la ingeniería eléctrica, cada experiencia y cada desafío han contribuido a mi crecimiento personal y profesional.

Esta tesis es el resultado de un esfuerzo conjunto y el apoyo de muchas personas. A todos ustedes, les estoy profundamente agradecido.

Con gratitud,

Derian Franklin Beltrán Espinoza

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a cada docente que formo parte de este proceso académico, que con sus conocimientos hemos obtenido bases fundamentales para nuestra vida profesional.

A mi madre Genith López y mi esposa Angelica Rodríguez por ser la motivación e inspiración ya que con sus consejos y ayuda he logrado seguir adelante.

A mis compañeros de curso que después nos hicimos grandes amigos y así cada día siempre nos incentivábamos para poder lograr la meta y obtener el título profesional de Ingeniero Eléctrico.

Eder Giovanni Luna López

RESUMEN

El diseño de un sistema de puesta a tierra es esencial para garantizar la seguridad de los trabajadores y el adecuado funcionamiento de los equipos eléctricos en una industria. Para este proyecto se ha planteado la necesidad de diseñar un sistema de puesta a tierra aplicando la normativa IEEE 80-2000, que establece las reglas para la construcción de estos sistemas. Este proceso se ha llevado a cabo en la empresa INDAMI, una industria dedicada a la minería y el sector industrial. Para ello, se han adquirido datos de diseño a partir de las características de demanda de la fábrica, la realización de cálculos para diseñar la malla de puesta a tierra de acuerdo con los requisitos normativos y operacionales, así como la simulación del sistema mediante el software ETAP.

La empresa INDAMI, con su enfoque en la minería y la industria, enfrenta desafíos específicos relacionados con la alta demanda de energía eléctrica y la presencia de equipos de gran potencia. Estos equipos generan corrientes significativas que deben ser gestionadas adecuadamente para evitar riesgos eléctricos y garantizar la protección de los trabajadores. Además, la presencia de estructuras metálicas, como cajas de control, introduce complejidades adicionales en el diseño de la malla de puesta a tierra, ya que se debe asegurar una distribución uniforme de la corriente en todo el entorno.

Uno de los aspectos fundamentales de este proyecto es la aplicación de la normativa IEEE 80-2000, el cumplimiento de esta normativa es esencial para garantizar la seguridad y el rendimiento óptimo del sistema. Para lograrlo, se han llevado a cabo mediciones y recopilación de datos en la empresa INDAMI, que servirán como base para el diseño de la malla de puesta a tierra y la posterior simulación en el software ETAP.

Para el proyecto se realizó el cálculo y diseño de la malla de puesta a tierra, así como la simulación para demostrar su correcto funcionamiento. El resultado será un sistema de puesta a tierra seguro y eficiente que cumple con los estándares normativos y protege tanto a los trabajadores como a los equipos eléctricos en la empresa.

ABSTRACT

The design of a grounding system is essential to guarantee the safety of workers and the proper functioning of electrical equipment in an industry. For this project, the need to design a grounding system has been raised applying the IEEE 80-2000 standard, which establishes the rules for the construction of these systems. This process has been carried out in the company INDAMI, an industry dedicated to mining and the industrial sector. To do this, design data has been acquired from the demand characteristics of the factory, calculations have been carried out to design the grounding mesh in accordance with regulatory and operational requirements, as well as system simulation using software ETAP.

The INDAMI company, with its focus on mining and industry, faces specific challenges related to the high demand for electrical energy and the presence of high-power equipment. This equipment generates significant currents that must be adequately managed to avoid electrical risks and guarantee the protection of workers. In addition, the presence of metallic structures, such as control boxes, introduces additional complexities in the design of the grounding mesh, since a uniform distribution of the current must be ensured throughout the environment.

One of the fundamental aspects of this project is the application of the IEEE 80-2000 standard, compliance with this standard is essential to guarantee the security and optimal performance of the system. To achieve this, measurements and data collection have been carried out at the INDAMI company, which will serve as the basis for the design of the grounding grid and the subsequent simulation in the ETAP software.

For the project, the calculation and design of the grounding mesh was carried out, as well as the simulation to demonstrate its correct operation. The result will be a safe and efficient grounding system that meets regulatory standards and protects both workers and electrical equipment in the business.

ÍNDICE GENERAL

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DE TRABAJO DE TITULACIÓN	ii
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA	iii
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTOS.....	vi
RESUMEN	viii
ABSTRACT	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xv
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xvi
CAPÍTULO I.....	1
CONSIDERACIONES GENERALES	1
1.1 Tema del trabajo de titulación.....	1
1.2 Antecedentes	1
1.3 Problemática	4
1.4 Justificación	4
1.5 Delimitación.....	4
1.6 Impacto y beneficiarios.....	4
1.6.1 Beneficiarios directos	5
1.6.2 Beneficiarios indirectos	5
1.7 Objetivos.....	5
1.7.1 Objetivo general	5
1.7.2 Objetivos específicos.....	5
CAPÍTULO II.....	6

MARCO TEÓRICO	6
2.1 Características generales de un sistema de puesta a tierra	6
2.2 Impacto corriente eléctrica en el cuerpo	7
2.3 Requisitos generales para los sistemas de puesta a tierra	9
2.4 Valores referenciales y las aplicaciones de la resistencia de la tierra	10
2.5 Mantenimiento para los Sistemas de Puesta a Tierra.....	12
2.6 Electrodo s	13
2.7 Diseño general	13
2.8 Sistema de malla de puesta a tierra	17
2.9 Resistividad en la tierra.....	18
2.10 Mediciones de resistividad en los terrenos	22
2.10.1 Método de wenner.	23
2.10.2 Método Schlumberger	25
2.11 Perfiles de resistividad	26
2.11.1 Resistividad de suelos típicos	26
2.11.2 Ejemplos de perfiles de resistividad	27
2.12 Métodos de la medición de los sistemas de puesta a tierra.....	28
2.13 Elementos de medición de los sistemas puesta a tierra.....	29
2.13.1 Comprobador 1623-2 geo de Fluke	29
2.14 Conductores en los sistemas puesta a tierra	30
2.15 Tratamiento químico para la tierra.....	32
2.16 Software ETAP (versión 21.0.2)	33
2.17 Proceso de Instalación de Sistemas de Puesta a Tierra	34
CAPITULO III	37
METODOLOGÍA	37
3.1 Metodología de la investigación	37
3.1 Lugar geográfico y la situación actual de la empresa	37

3.2	Antecedentes del lugar.....	38
3.3	Procedimiento que seguir.....	38
CAPITULO IV.....		41
PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....		41
4.1	Recolección de datos en el campo	41
4.2	Mediciones de resistividad del suelo	41
4.3	Datos recogidos en la visita técnica	43
4.4	Cálculos para el diseño de la malla de puesta a tierra.....	47
4.5	Cálculo del diámetro del calibre del conductor	48
4.6	Cálculos de la resistencia de la malla	50
4.7	Comprobación en ETAP	51
4.9	Tabla de Resultados en comparacion con la corriente de falla	57
CONCLUSIONES		60
RECOMENDACIONES		61
REFERENCIAS.....		62
ANEXOS.....		67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Principales objetivos que busca la puesta a tierra	6
Figura 2 Riesgo eléctricos	7
Figura 3 Curva de soportabilidad de una persona	9
Figura 4 Sistema de puesta a tierra[12]	10
Figura 5 Materiales de los sistemas a tierra [13]	10
Figura 6 Medición de tensiones de paso y contacto	11
Figura 7 Mantenimiento de SPT[14]	12
Figura 8 Conexión a tierra de tuberías.....	13
Figura 9 placa de tierra	14
Figura 10 Tira o cable a tierra.....	15
Figura 11 Varilla enterrada	16
Figura 12 Malla de puesta a tierra [22].....	17
Figura 13 Principales capas en el suelo	20
Figura 14 Granulometría de los suelos[24]	21
Figura 15 Megger.[25]	23
Figura 16 Esquema de mediciones con el método Wenner	24
Figura 17 Esquema de mediciones con el método Schlumberger	25
Figura 18 Perfil de resistividad.....	26
Figura 19 Perfil de resistividad para zona con capa superficial arcillosa y húmeda y capa inferior rocosa.....	27
Figura 20 Perfil de resistividad para zonas con capa superficial muy seca, capa inferior arenosa	27
Figura 21 Perfil de resistividad para Zonas con terreno rocoso y seco	28
Figura 22 Elemento de medición.....	29
Figura 23 Kit del comprobador 1623-2 GEO de Fluke[29]	30
Figura 24 Conductor a tierra soldado a una varilla de cobre.....	31
Figura 25 Conductores a tierra de Copperweld	32
Figura 26 Principales características del software ETAP	34
Figura 27 Partes de una conexión de puesta a tierra.....	35
Figura 28 Lugar de empresa INDAMI CIA. LTDA	37
Figura 29 Mediciones realizadas en la empresa	38
Figura 30 Mediciones en el área destinada a la instalación de malla a tierra	41
Figura 31 Mediciones de Resistividad del terreno	42

Figura 32 Procedimiento de las mediciones de malla de puesta a tierra	42
Figura 33 Configuración geométrica de la malla	48
Figura 34 cálculo de la resistencia de la malla	51
Figura 35 Programa en ETAP.....	51
Figura 36 Configuración de la malla en ETAP	52
Figura 37 malla en 2D en ETAP	53
Figura 38 Malla en 3D en ETAP	53
Figura 39 Configuración del suelo	54
Figura 40 Terreno de estudio	54
Figura 41 Caso de estudio para la malla de puesta a tierra.....	55
Figura 42 Resultados en ETAP	56
Figura 43 Resultado de los voltajes de paso y de toque	56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Valores referénciales del sistema de puesta a tierra	11
Tabla 2 Tiempo de mantenimiento de sistema de puesta a tierra	12
Tabla 3 Resistencia típica de suelos	19
Tabla 4 Principales niveles de resistividad en los suelos típicos	27
Tabla 5 Resultado de las mediciones de resistividad del terreno.....	43
Tabla 6 Datos de la malla	45
Tabla 7 Datos de corriente de falla y de línea.....	45
Tabla 8 Datos de la temperatura donde se instalara la malla.....	46
Tabla 9 Resultados de malla de puesta a tierra	46
Tabla 10 Jabalinas para la malla de puesta tierra.....	46
Tabla 11 Resultados del calibre del conductor	49

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1 Parámetros para la selección del conductor.....	67
ANEXO 2 Mediciones de resistividad del terreno	68
ANEXO 3 Medicion de exploración con el electrodo.....	69
ANEXO 4 Mediciones en diferentes puntos del terreno	70

CAPÍTULO I

CONSIDERACIONES GENERALES

1.1 Tema del trabajo de titulación

Diseño de un sistema puesta a tierra para aplicación en una industria utilizando la normativa IEEE 80 -2000

1.2 Antecedentes

Muchas industrias usan maquinaria que depende de la energía eléctrica, debido a esto han cobrado una gran importancia en las empresas, al momento de realizar diseños para sistemas eléctricos, debido a que proporcionan una gran seguridad para el personal que los manipula, así como también a los equipos.[1]

Internacional

En Tunja, Colombia Correa [2] realizo un proyecto en el municipio de Guacamayas sobre el diseño y la implementación en una subestación de 34.5 kv de un sistema a tierra para protección contra rayos, que tuvo como objetivo el análisis descrito en el tema. Como resultado, también se realiza revisión de los modelos actuales que se encuentran en uso en la subestación. Los diversos componentes que conforman el sistema de puesta a tierra se utilizaron como criterios para la evaluación. Como resultado se evaluaron las medidas tomadas con los equipos de medición adecuados (telurómetro) y su técnica de medida adecuada (método de Wenner) para registrar los datos de los calibres de los conductores, la puesta a tierra, las distintas uniones y la topología del grupo.

En la revisión para el sistema encargado de proteger contra rayos que sigue, se ampliarán los muchos dispositivos y componentes instalados, como el tipo de conductor, el bajante y el calibre, las variedades de colectores y dispositivos contra sobretensiones, entre otros. En el desarrollo del proyecto se realizaron cálculos y el respectivo diseño de la subestación, brindar un plan de mantenimiento y una propuesta para mejorar la infraestructura y reducir los efectos de fallas en el sistema y descargas temporales por la alta densidad poblacional de la zona.

Gutiérrez [3] en Cúcuta- Colombia donde se estudia los efectos de las corrientes de falla que pasa por los sistemas a tierra, donde se instalarán equipos electrónicos, que requieren una gran protección para evitar problemas como: mal funcionamiento y daños en los equipos. Así mismo su finalidad es proteger al personal que se encuentre dentro del hospital. También se requiere el cumplimiento de los estándares y normativas de diseños

para los sistemas de puesta a tierra usado.

Una vez terminado y aprobado el estudio de la resistividad del suelo, se evidencia los pasos que siguieron para el estudio del sistema de mallas a tierra. Basándose en esta investigación, se determina la idoneidad de la ubicación de las mallas de acuerdo con la información registrada en el expediente. Además, se proporciona una tabla que muestra cuánto se reduce la resistencia en las zonas específicas como resultado de la implementación de estas mallas. Y finalmente la cantidad de conductor de cobre, varillas y cemento necesario para la ejecución de dicho proyecto.

Nacional

Moya y Pilatasig [4] en Latacunga – Ecuador donde se realiza un estudio enfocado en un laboratorio, que usa equipos de alto voltaje ubicado en la Universidad técnica del Cotopaxi para la implementación de un sistema de a tierra para proteger los equipos. El método para calcular el tamaño de la malla a tierra y que cumpla con el estándar IEEE STD 80/2000 que da las reglas a seguir para la implementación de las mallas para las subestaciones eléctricas, el cual es fundamental para salvaguardar diversas herramientas y dispositivos para poder medir: control y transformación. Su objetivo principal con esta investigación es conocer la resistencia del suelo y conocer corrientes de paso y contacto, velando por la seguridad de todos y de todo.

Se realizó una investigación técnica, consistente en realizar un estudio previo a la instalación de la malla a partir de la toma de datos con el telurómetro, para calcular el porcentaje de afectación. Los hallazgos del estudio confirmaron que debido a que el suelo carece de sales solubles, tiene un alto valor de resistividad y debe modificarse para obtener valores que cumplan con el estándar IEEE STD 80/2000.

Además, los minerales y la humedad tienen un impacto en la resistividad. Esta investigación tiene como objetivo proponer una forma de descargar corrientes eléctricas a tierra manteniéndose dentro de los rangos de trabajo seguros de los equipos y la red. Para descubrir el mejor diseño para usar más tarde en el laboratorio, realizamos los cálculos para esto en tres diseños distintos revisando un diseño en cuadrado, otro rectangular y uno para una malla en forma de "L", sugeridos por el estándar.

Se utilizó el software ETAP para ejecutar una simulación de cortocircuito para evaluar si la malla se diseñó correctamente para evitar sobretensiones y no tener impacto en el sistema de puesta a tierra.

Changoluisa y Monga [5] en Latacunga – Ecuador en su proyecto sobre el análisis de la central GASGREEN S.A. ubicada en Quito diseñando un sistema a tierra previendo las futuras expansiones en la planta. El mismo, trato de las fallas en el sistema que resultaron en daños a los equipos de protección y evaluó los sistemas de blindaje y del sistema puesta a tierra en Gasgreen, por lo que se consideró una posible ampliación. Para ello, se llevaron a cabo mediciones tanto de la resistividad del terreno como de la puesta a tierra, arrojando resultados con resultados de resistividad del terreno $40,4 \Omega\text{-m}$ y resistencia de la puesta a tierra 986Ω .

Luego se procedió a modelar los sistemas en el software ETAP, teniendo en cuenta el estado actual del sistema y las condiciones actuales, considerando un valor de resistividad en el terreno de $23,57 \Omega\text{-m}$. Los resultados arrojaron una resistencia de la malla a tierra con un valor de $0,588 \Omega$ y con una tensión de toque de $854,4 \text{ V}$, que es superior a los valores aceptables, con lo cual cuando se realice una ampliación, este conjunto de protecciones no ofrecería las garantías de una correcta dispersión de corrientes de falla para el correcto funcionamiento de la planta debido a que quedaría lejos de la zona de protección la segunda etapa de los generadores.

El software se utilizó para verificar las mejoras, que incluyeron crear la tercera etapa del sistema y se obtuvieron datos de la resistencia de la puesta tierra con valor de 0.414Ω y tensión de contacto 589 V , valores que quedan dentro de los límites aceptables. Mientras que se aconseja emplear dos pararrayos de material piezoeléctrico con un delta mínimo de 10 metros y con un diámetro de cobertura de al menos 80 metros para toda la planta para el sistema de blindaje previsto.

De acuerdo con Monga et al. [6] en Quito – Ecuador con el dónde se plantea un sistema a tierra para cumplir con las necesidades de una expansión en una central de generación distribuida, su investigación trata sobre las fallas en el iste resultado en daños a los equipos de protección y la consideración de una futura expansión, su investigación examinó por medio de simulación un sistema de protección a tierra. Lo que condujo a realizar las mimas mediciones que los anteriores, utilizando el estándar IEEE 81.

Luego se modelo y se simulo el sistema en ETAP compuesto por un pararrayos tipo dipolo como en condiciones de corriente con valores de resistividad en el terreno de 23.57 m , con resistencia de 0.588 , y una tensión de contacto de $854,4 \text{ V}$, que supera los valores que indica la normativa para ser efectiva; cuando se lleve a cabo una expansión, esta combinación de precauciones no ofrecerá las garantías esenciales para la operación

efectiva de la planta ya que tres de los generadores serán trasladados más allá de la zona de protección. Además de desarrollar la ampliación, se probaron mediante simulaciones los cambios al sistema que se sugirieron, y se obtuvieron valores de $0.414\Omega \cdot m$ para la puesta a tierra y tensión de contacto de 589 V que se encuentran dentro de lo que indica la normativa.

1.3 Problemática

El diseño de un sistema de puesta a tierra en la empresa INDAMI CIA. LTDA se enfrenta a desafíos que tiene la industria minera y su entorno operativo. La alta demanda de energía eléctrica en esta industria, impulsada por equipos y maquinarias de alto consumo, genera corrientes significativas que deben ser manejadas adecuadamente para garantizar la seguridad del personal y la integridad de los equipos. La presencia de instalaciones y estructuras metálicas, como cajas de control metálicas, motores, maquinaria especializada y otros componentes que influyen en el diseño de la malla, ya que la distribución de corriente debe ser uniforme y eficiente en todo el entorno.

1.4 Justificación

Este proyecto se realiza para evitar la peligrosidad de las corrientes de defectos producidas por las perturbaciones impacte en la vida de los trabajadores y el correcto funcionamiento de equipos eléctricos, se debe proveer la protección adecuada para la maquinaria con dispositivos para evitar el ingreso de estos transitorios a los sistemas y la corriente de falla sea dispersada por la conexión con el sistema a tierra; sirviendo no solo para la protección de equipos e infraestructuras sino también para dar seguridad de las personas.

El proyecto contribuirá significativamente al desarrollo profesional de los estudiantes, además de dar una visión en el ámbito laboral sobre los sistemas de puesta a tierra.

1.5 Delimitación

El enfoque del proyecto se realizará en la empresa INDAMI CIA. LTDA, la información obtenida se simulará usando el software ETAP.

1.6 Impacto y beneficiarios

El propósito del proyecto es generar un gran impacto en el interés y la importancia en el público académico y general, al presentar los datos de la evaluación y la simulación de un sistema de malla de puesta a tierra.

1.6.1 Beneficiarios directos

Se beneficiarán los directivos y trabajadores de la empresa INDAMI CIA. LTDA al hacer una evaluación preventiva para poder asegurar que la malla de puesta a tierra se encuentre en óptimas condiciones ya que se prevé asegurar un diagnóstico preciso que brinde la tranquilidad de que sus empleados y los equipos al estar protegidos contra posibles fallas , minimizando los riesgos producidos por descargas eléctricas, fallas en devanado de motores eléctricos y contactos de partes energizadas con tableros de control, ya que esta garantiza un entorno de trabajo seguro y reduce el riesgo de accidentes eléctricos.

1.6.2 Beneficiarios indirectos

Este proyecto permite al público interesado en el ámbito eléctrico comprender mejor el tema sobre los sistemas de puesta a tierra, además en la empresa el sistema de puesta a tierra reduce la posibilidad de interrupciones en la producción debido a fallas eléctricas, lo que resulta en una mayor eficiencia operativa y una disminución en los tiempos de inactividad. Así mismo, un sistema de puesta a tierra efectivo sirve para ayudar a preservar la vida útil de los equipos eléctricos, evitando daños costosos y costosas reparaciones o reemplazos.

1.7 Objetivos

1.7.1 Objetivo general

Diseñar un sistema puesta a tierra mediante la aplicación de norma IEEE 80-2000 de construcción para garantizar la seguridad de los trabajadores y el correcto funcionamiento de los equipos eléctricos.

1.7.2 Objetivos específicos

- Adquirir los datos de diseño mediante las características de demanda de la fábrica para elaborar una tabla de información.
- Realizar los cálculos necesarios para diseñar la malla de puesta a tierra, con el propósito de definir su modelo y configuración óptimos y cumpliendo con los requisitos operacionales que indican las normativas.
- Realizar la simulación del sistema de puesta a tierra mediante el software ETAP (versión 21.0.2) para demostrar los resultados de funcionamiento.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Características generales de un sistema de puesta a tierra

La operación y funcionamiento de los sistemas de puesta a tierra tiene entre las principales características son:

- La finalidad por la cual se construye el sistema de puesta a tierra.
- La función que realiza.
- Los parámetros que se deben cumplir para una correcta operación.

En esencia, un sistema de puesta a tierra tiene diferentes objetivos específicos que abarcan diversas áreas. Entre los propósitos primordiales destacan la salvaguarda de vidas, lograda mediante la reducción de diferencias de potencial entre partes no conductoras y el suelo. También se persigue la protección de equipos contra sobretensiones, canalizando la corriente lejos de componentes metálicos. Además, el control de sobrevoltajes es esencial para garantizar la integridad de los sistemas eléctricos.[7]

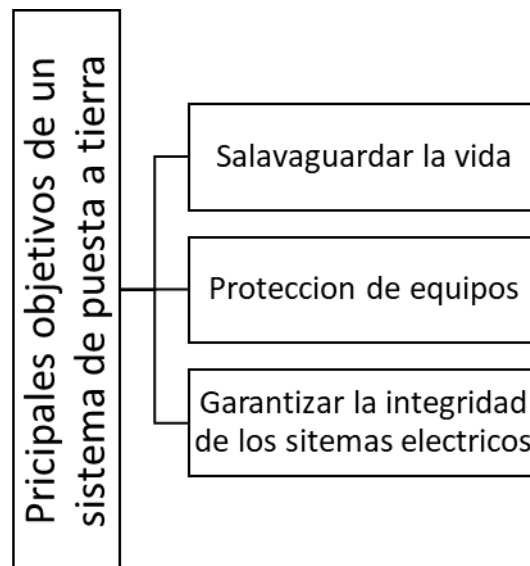


Figura 1 Principales objetivos que busca la puesta a tierra

Como veremos en el proyecto la elección de factores adecuados para un sistema de puesta a tierra es crucial para su rendimiento. Esto abarca desde la resistencia requerida según el tipo de instalación hasta una alta resistencia a la corrosión. La durabilidad de la instalación y la accesibilidad para el mantenimiento son igualmente factores que considerar,

formando un conjunto de requisitos interdependientes que aseguran el éxito del sistema en su conjunto.

2.2 Impacto corriente eléctrica en el cuerpo

La implementación eficaz de un sistema de malla a tierra juega un papel fundamental en la protección de personas y bienes contra diversos riesgos eléctricos. Entre los efectos potenciales se encuentran caídas de rayos, descargas estáticas e interferencias electromagnéticas. Por ende, la comprensión de los efectos que tiene la corriente eléctrica en el cuerpo humano resulta esencial.

En el contexto actual, donde la dependencia de la energía eléctrica es crucial, se han realizado investigaciones para comprender los efectos fisiológicos del paso de corriente a través del cuerpo humano. Desde lesiones secundarias hasta la muerte por fibrilación ventricular, las consecuencias pueden ser desde físicas hasta mortales. La fibrilación ventricular, caracterizada por la actividad anómala del corazón, puede llevar a la falta de suministro sanguíneo a los órganos vitales. A continuación, en la Figura 2 se muestra el principal riesgo eléctrico en sobretensiones con una caja metálica que muestra la diferencia de contar o no con un sistema de puesta a tierra.[8]

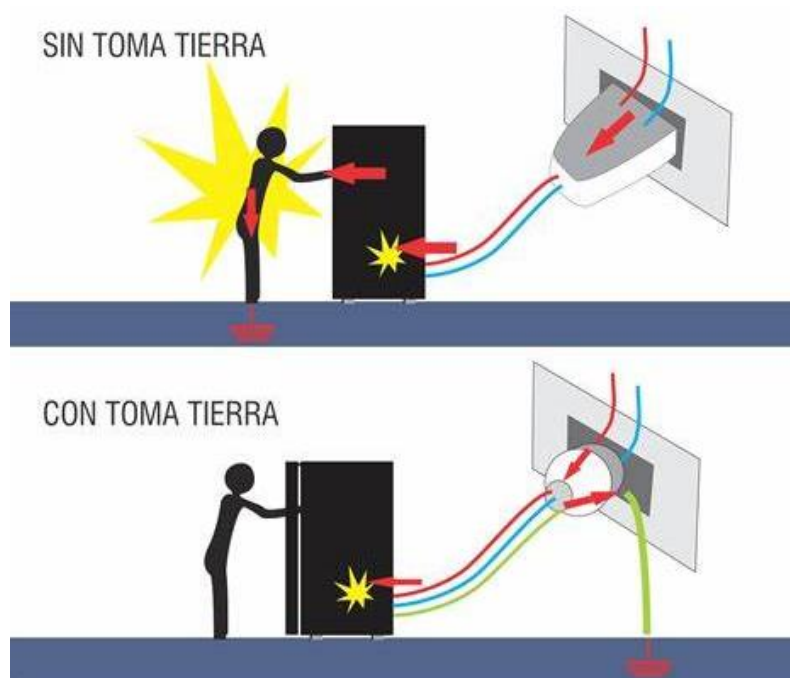


Figura 2 Riesgo eléctricos

La tetanización, por otro lado, engloba contracciones musculares involuntarias causadas por la corriente eléctrica. Además de sus efectos físicos, la corriente eléctrica puede

afectar el sistema nervioso central, alterando la función respiratoria y conduciendo a la asfixia y el paro respiratorio. Consecuencias como contracciones musculares, aumento de la presión sanguínea y paro temporal del corazón también pueden manifestarse como resultado de la descarga eléctrica a través del cuerpo.[9]

Riesgo eléctrico

Es un gran problema el paso de corriente eléctrica a través el cuerpo, debido a que puede tener problemas que van desde pequeñas lesiones como lo serian: los golpes, las caídas, etc.; y pueden llegar a causar la muerte debido a la fibrilación ventricular si la persona es expuesta suficiente tiempo a la corriente eléctrica, esto significa que la persona pasa a formar parte del circuito eléctrico. La fibrilación ventricular consiste movimientos rápidos y erráticos del corazón, donde deja de circular sangre a diversos órganos, además, si continua con ese ritmo puede llegar a causar la muerte en cuestión de minutos.

Esto puede afectar al centro nervioso alterando la función respiratoria hasta ocasionar asfixia, y por consecuente un paro respiratorio. Además, puede producir otros factores como: el aumento de la presión, contracciones musculares, dificultades para respirar, paro cardiaco temporal, entre otras.[10]

Intensidad de corriente

La intensidad con la que la corriente eléctrica llega al organismo está entre las principales causas que influyen en el efecto y las diferentes lesiones resultantes de un accidente eléctrico. Se observan varios efectos asociados a diferentes niveles de intensidad de corriente, los cuales impactan en diversos grados en el cuerpo humano y se denominan umbrales de soportabilidad.

El umbral de percepción es la mínima corriente que causa una sensación en una persona. Esta sensación es constante en corriente alterna, mientras que en corriente continua solo se percibe cuando hay cambios en la intensidad.

El umbral de reacción indica la mínima corriente que genera una contracción muscular en el cuerpo. Por otro lado, el umbral de no soltar hace referencia a la corriente maxima que una persona puede soportar sin soltar los electrodos a los que está conectada. En corriente alterna, este valor se establece en 10 mA, independientemente del tiempo de exposición. En corriente continua, es más complejo determinar el punto específico en el

cual no se puede soltarlos electrodos, ya que desde el momento de inicio y de interrupción de la corriente generan dolor y llegan a causar contracciones musculares.[11]

El umbral de fibrilación ventricular es el que representa el nivel mínimo de corriente con el que se puede causar fibrilación ventricular en el corazón. En corriente alterna, este punto de umbral disminuye significativamente, si el tiempo en el cual la corriente eléctrica se extiende más de un ciclo cardíaco. La Figura 3 muestra la curvas de soportabilidad para los humanos expuestos a corrientes industriales, en función del tiempo de exposición, conforme a las normas establecidas por la IEC, es importante tener en cuenta el tiempo en el que la corriente pasa por el organismo y su intensidad.[10]

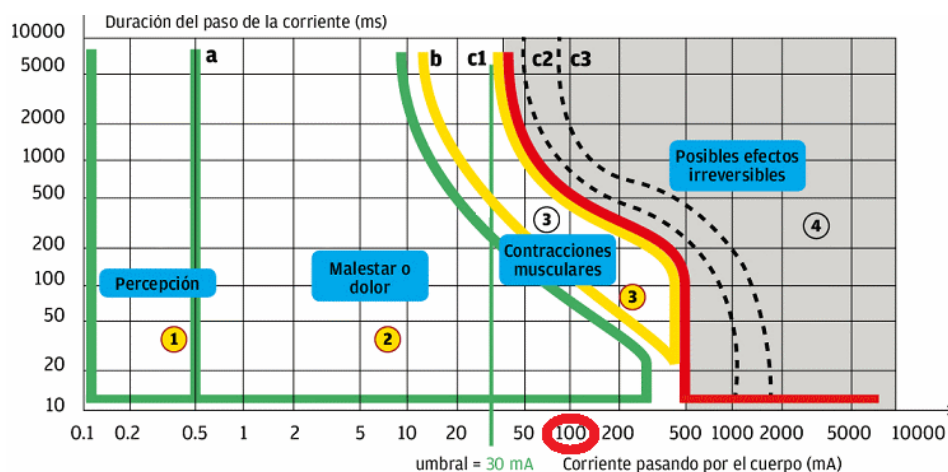


Figura 3 Curva de soportabilidad de una persona

2.3 Requisitos generales para los sistemas de puesta a tierra

- Los elementos principales de metal que funcionan como refuerzo estructural en un edificio deben estar permanentemente conectados al sistema de puesta a tierra general.
- Se debe realizar una verificación para analizar las características que tiene electrodo seleccionado y del sistema a tierra y su conexión con la red, asegurando el cumplimiento de las normativas actuales.

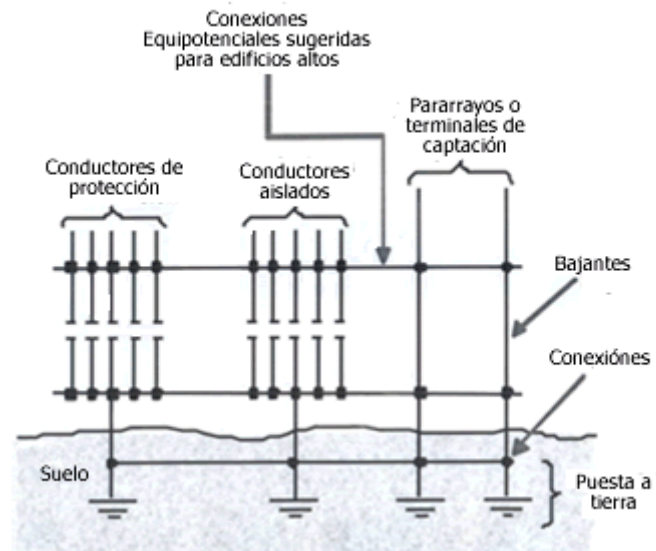
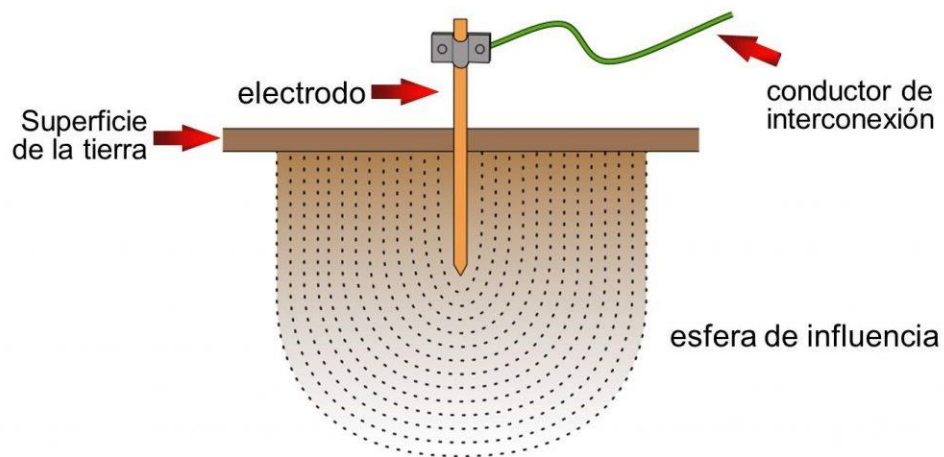


Figura 4 Sistema de puesta a tierra[12]

Materiales usados para la Puesta a Tierra:

- Electrodo.
- Cable conductor del Electrodo a Tierra.
- Conductor de Protección.



12

Figura 5 Materiales de los sistemas a tierra [13]

2.4 Valores referenciales y las aplicaciones de la resistencia de la tierra

Un diseño efectivo de un sistema de puesta a tierra debe asegurar un paso eficiente de tensiones de contacto, paso y tensiones transferidas, ya que una conexión directa al sistema limita la máxima elevación de potencial. A continuación, se muestra una tabla

con las principales aplicaciones de los sistemas a tierra y los valores máximos de resistencia en ohms.

Aplicación del sistema de puesta a tierra	Valores máximos de resistencia
Usados para subestaciones de alta y extra alta tensión.	1 Ω
Protección contra rayos.	10 Ω
Redes para equipos electrónicos sensibles	10 Ω
Subestaciones de media tensión.	10 Ω
Estructuras y torres metálicas	20 Ω
Punto neutro para acometida de bajo voltaje.	25 Ω

Tabla 1 Valores referénciales del sistema de puesta a tierra

Medición de Resistencia:

Es esencial medir la resistencia del sistema a tierra antes de poner en marcha un sistema eléctrico.

Medición de Voltaje de Paso y Voltaje de Contacto:

El cálculo de las tensiones calculadas tanto de paso como de contacto durante la fase de diseño deben ser medidas antes de poner en funcionamiento a las subestaciones.

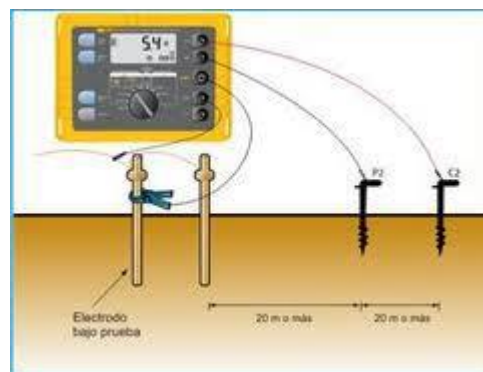


Figura 6 Medición de tensiones de paso y contacto

2.5 Mantenimiento para los Sistemas de Puesta a Tierra

Con el tiempo, los componentes que componen el sistema a tierra pueden perder eficacia debido a las fallas eléctrica, corrosión, daños mecánicos y la caída de rayos. Tabla de intervalos máximos entre mantenimientos de puesta a tierra (tomada del RETIE).

Nivel de tensión de las instalaciones	Tiempo en el realizar inspección visual	Inspecciones visuales y mediciones
Baja	1 año	5 años
Media	3 años	6 años
Alta y extra alta	2 años	4 años

Tabla 2 Tiempo de mantenimiento de sistema de puesta a tierra

Para revisar el estado actual del sistema el mantenimiento deben realizarse las siguientes pruebas como parte de inspección:

- Medir resistencia de la malla a tierra
- Realizar ensayos de equipotencialidad
- Medir corrientes de modo común

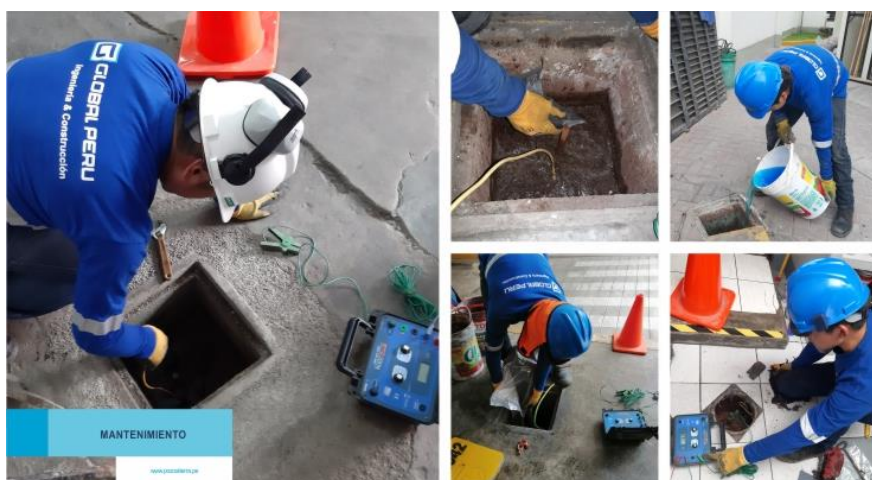


Figura 7 Mantenimiento de SPT[14]

El registro de inspección del SPT debe incluir al menos:

- Estado general de los conductores de la malla.
- Información sobre el nivel de corrosión de la malla.
- Estado actual de conexiones entre los conductores y los componentes del circuito.

- Valores de resistencia.
- Documentación de todos los cambios realizados desde la última inspección.
- Resultados de las pruebas realizadas.

2.6 Electrodo

Los electrodos son la parte básica de los sistemas a tierra debido a que establecen la conexión física necesaria para disipar la corriente hacia la tierra. Se distinguen dos tipos fundamentales de electrodos: el natural, que se encuentra intrínseco en la instalación y abarca elementos metálicos enterrados, como tuberías de agua, la estructura del edificio (si está conectada adecuadamente a tierra) y el refuerzo metálico de la cimentación.

Los electrodos manufacturados se instalan con la finalidad de tener un mejor rendimiento para los sistemas a tierra, incluyendo mallas de alambre, placas metálicas, conductores de cobre desnudo y varillas enterradas directamente en el terreno.[15]

2.7 Diseño general

Tipo de conexión de puesta a tierra

Para el diseño general del sistema es importante la conexión con el suelo, otro nombre que se suele asignar es puesta a tierra eléctrica, se aplica en carcasas, sistemas de cableado y equipos eléctricos[16]. Los tipos más comunes de sistemas de conexión a tierra eléctrica incluyen.

Tubería a tierra

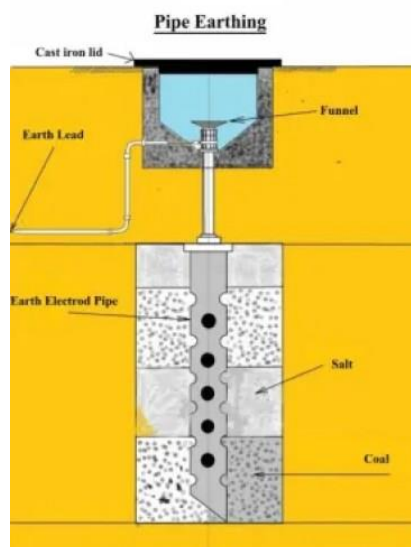


Figura 8 Conexión a tierra de tuberías

La conexión a tierra mediante una tubería es un método común que utiliza una tubería de acero para enlazar un conductor eléctrico con la tierra. Se erige un tubo de acero galvanizado con un diámetro de 38 mm y una longitud de 2 m en posición vertical en el suelo, funcionando como un electrodo de tierra para la tubería.

El tamaño de la tubería de hierro varía según la humedad del suelo y la intensidad de la corriente. La humedad del suelo determina la profundidad máxima para instalar las tuberías de acero y representa la opción más efectiva y asequible.

Placa de tierra

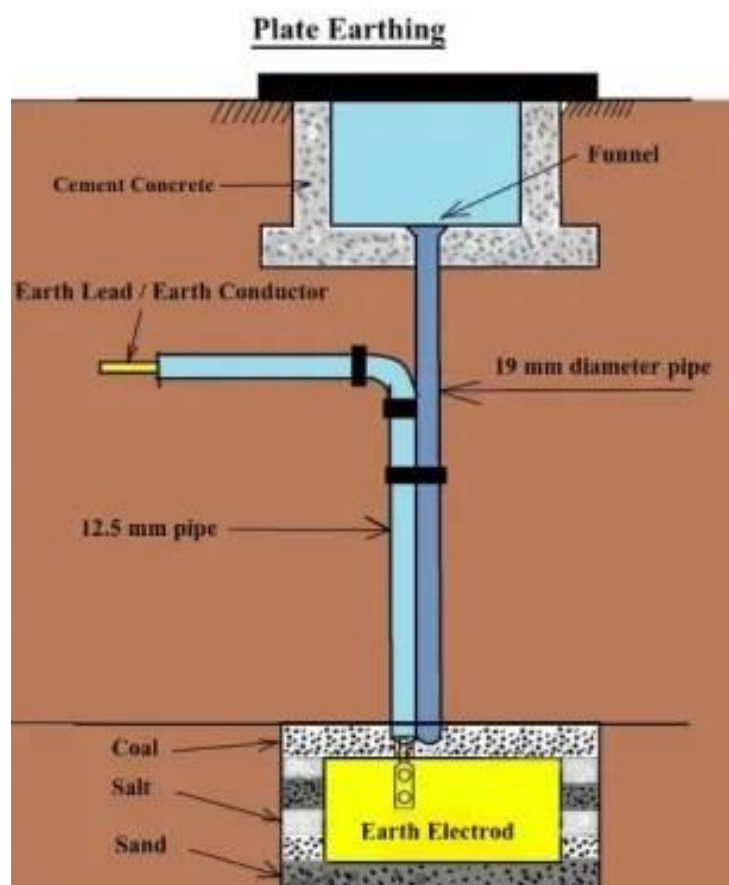


Figura 9 placa de tierra

En este método, placas fabricadas de cobre o hierro galvanizado se instalan verticalmente en una excavación de tierra a menos de 3 metros de la superficie. Para optimizar la efectividad del sistema a tierra, es esencial mantener las condiciones de humedad en la tierra que rodea la placa. Esta placa se conecta a los cables eléctricos y canaliza las cargas eléctricas hacia la tierra.[17]

Tira o cable a tierra

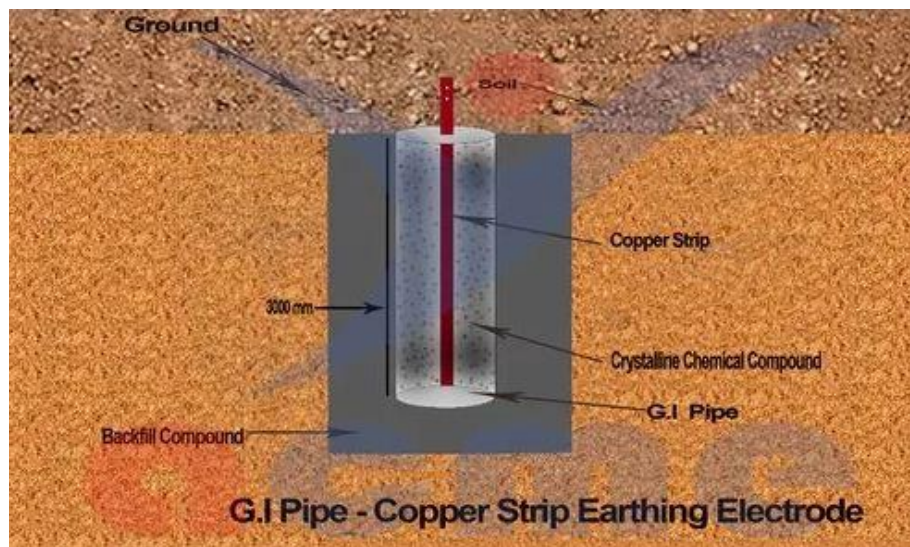


Figura 10 Tira o cable a tierra

En esta variante, un electrodo de cinta con una sección transversal mínima de 6.0 mm^2 se encastra horizontalmente en una zanja con una profundidad mínima de 0.5 m. Si el electrodo es de hierro o acero galvanizado, su sección transversal debe ser al menos de $25 \text{ mm} \times 1.6 \text{ mm}$.

Un conductor con una longitud de al menos 15 m proporciona la resistencia necesaria cuando se entierra en el suelo.

Varilla puesta a tierra

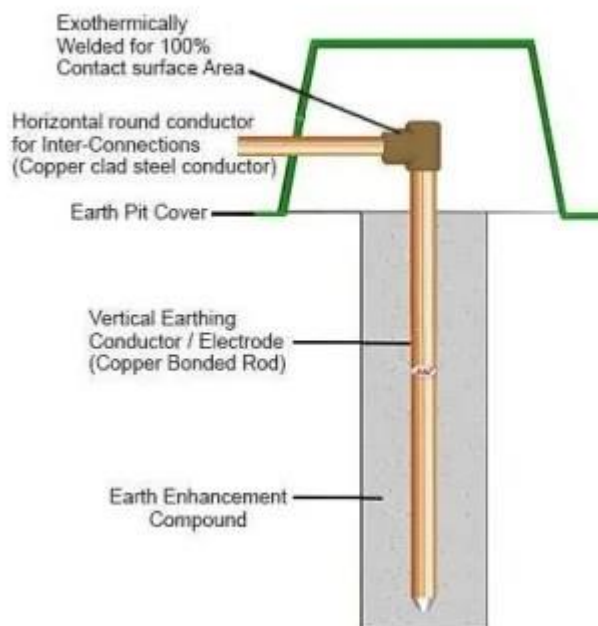


Figura 11 Varilla enterrada

En este enfoque, se utiliza una varilla de cobre junto con una tubería de acero galvanizado se inserta verticalmente en el suelo mediante un proceso manual o con un martillo. La profundidad a la cual se entierra el electrodo afecta la resistencia a tierra.

Las varillas, enterradas a una profundidad determinada, dirigen la electricidad de cortocircuito hacia el suelo, esta técnica es apropiada para suelos arenosos y resulta muy económica.[18]

Ventajas

- La puesta a tierra es el método más seguro y eficaz para proteger edificaciones y a las personas contra la electrocución.
- La tierra carece de potencial eléctrico y se considera neutra. Un cable de baja resistencia conecta los equipos a tierra para mantener el equilibrio.
- Los metales, cuando están debidamente conectados a tierra, no conducen corriente, permitiendo su uso en sistemas eléctricos sin preocuparse por la conductividad.

- Con las conexiones a tierra adecuadas, los picos de tensión y las sobrecargas no afectan a los humanos, ni a la maquinaria que este conectada.
- Disminuye el riesgo de incendios causados por fugas eléctricas.

2.8 Sistema de malla de puesta a tierra

Son parte fundamental para los equipos eléctricos, la puesta a tierra debido a que sirve para garantizar la seguridad de las personas y proteger los equipos eléctricos. La malla de puesta a tierra es un sistema diseñado para establecer una conexión segura entre los equipos eléctricos y la tierra, permitiendo la disipación segura de corrientes de falla. La evaluación de los sistemas de malla de puesta a tierra es crucial para verificar su efectividad y asegurar que cumplan con las normas y regulaciones aplicables.[19]

Los sistemas de malla de puesta a tierra desempeñan varias funciones importantes. En primer lugar, proporcionan un camino de baja resistencia para conducir las corrientes de fallas, lo que minimiza los efectos de un evento de falla en el sistema eléctrico. Además, la malla de puesta a tierra ayuda a limitar la tensión a un nivel seguro durante una falla, evitando descargas eléctricas peligrosas. [20]

La evaluación de los sistemas de malla de puesta a tierra debe basarse en las normas y regulaciones pertinentes. Deben seguir el alineamiento con los estándares como la norma IEEE 80-2000 o las regulaciones locales. Estos estándares establecen las reglas para la resistencia de puesta a tierra, la distribución espacial de los electrodos de tierra y otros parámetros importantes para la evaluación.[21]



Figura 12 Malla de puesta a tierra [22]

2.9 Resistividad en la tierra

El factor primordial en la medición de resistencia en los suelos no radica únicamente en el electrodo utilizado, sino en la propia resistividad del terreno. Por este motivo, es esencial conocer esta para el cálculo y diseño adecuado de los sistemas de conexión a tierra.

La resistividad del suelo hace referencia a su capacidad para conducir electricidad y se define también como la resistencia que tiene un suelo específico. Al medirla, se consideran los efectos de las diversas capas que componen el suelo bajo estudio, ya que estas capas rara vez tienen una composición uniforme. El resultado es la "Resistividad Aparente", que también es conocida como "Resistividad del Terreno".[23]

Siguiendo la norma NOM-022-STPS-1999, que dice que la resistividad se define como la resistencia que tiene un terreno de un metro por cada lado al paso de la corriente eléctrica. Y la norma NOM-008-SCFI-1993 su expresión debe estar en Ohm-m, una unidad de medida utilizada internacionalmente. La resistividad del terreno presenta una variación considerable en todo el planeta y se ve influida por diversos factores, que incluyen:

- Composición del suelo
- Estratigrafía
- Sales solubles
- Granulometría
- Estado de humedad
- Temperatura
- Compactación

COMPOSICIÓN DEL TERRENO

La composición del suelo depende de su naturaleza. Debido a que cada suelo tiene su propia resistencia, por ejemplo, en el terreno con suelo arcilloso normal presenta una resistividad de 40-500 ohm-m, lo que se traduce en una resistencia a tierra de 15 a 200 ohmios para una varilla enterrada a 3 metros. Para tener un punto de referencia, la resistividad que ofrece el suelo rocoso es de 5000 ohm-m o más alta, lo que hace

virtualmente imposible lograr una resistencia a tierra de 100 ohmios o menos con una única varilla.

ESTRATIGRAFÍA

Debido a que todas las capas de suelo no son uniformes, en una varilla de electrodo típica de 3 metros de longitud, se encuentran al menos dos capas distintas de suelo, se presentan los diferentes valores de los diferentes terrenos con su resistividad.

Naturaleza del tipo de terreno	Resistividad en Ω -m
terrenos pantanosos	Hasta 3
Limo	20-100
Humus	10-150
Arcilla plástica	Hasta 50
Marga y arcilla compacta	100-200
Margas del jurásico	30-40
Arena arcillosa	50-500
Arcilla silícica	200-3000
Suelo pedregoso cubierto de césped	300-500
Suelos pedregosos desnudo	1500-3000
Calizas blandas	100-300
Calizas compactas	1000-5000
Calizas agrietadas	500-1000
Pizarra	50-300
Rocas de mica y cuarzo	Hasta 800
Granito gris	1500-10000
Grava	3000-5000

Tabla 3 Resistencia típica de suelos

Así mismo hay que tener en cuenta la distancia en el terreno en la que se va a instalar la malla de puesta a tierra porque entre mayor profundidad cambian las capas del suelo.

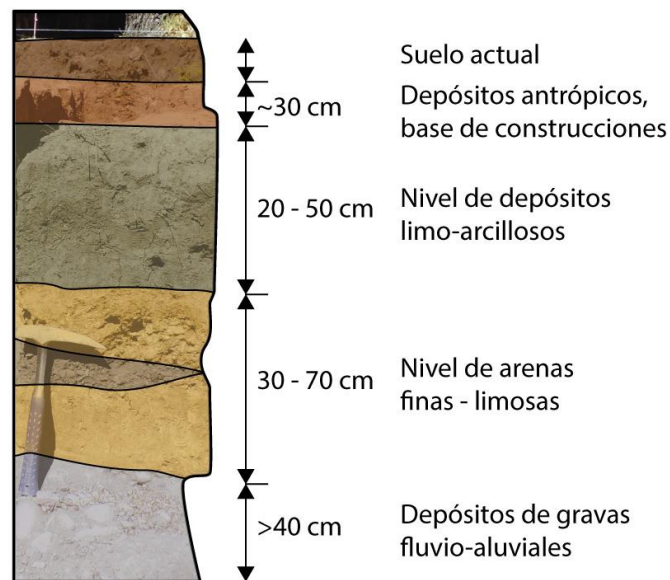


Figura 13 Principales capas en el suelo

SALES SOLUBLES

Hace referencia a la cantidad de electrolitos en el suelo, como la humedad, minerales y sales disueltas, determina en gran medida su resistividad. Por ejemplo, para concentraciones de sal (NaCl) del 1% en peso o mayores, donde la resistividad es prácticamente constante. Sin embargo, para concentraciones menores, la resistividad es considerablemente alta.

GRANULOMETRÍA

Es un factor importante para los sistemas que incide en la porosidad, la retención de humedad y el contacto con los electrodos, afectando la resistividad. Por ejemplo, la resistividad que tiene un suelo de grava es mayor que la de un suelo donde haya la arena, a su vez este tiene una mayor resistividad que la arcilla.

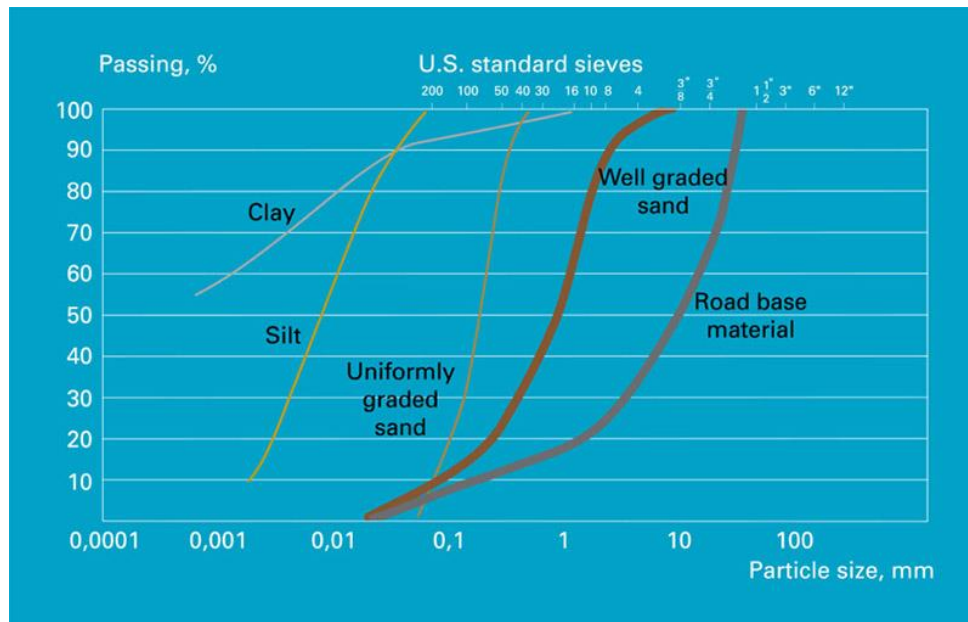


Figura 14 Granulometría de los suelos[24]

ESTADO HIGROMÉTRICO

Es el contenido de agua y la humedad que tienen un impacto significativo. La resistividad aumenta considerablemente cuando el contenido de humedad es inferior al 15% en peso. Sin embargo, cuando el contenido de humedad supera el 15%, la resistividad se vuelve prácticamente constante. En épocas secas, un terreno puede tener una resistividad que lo excluya del sistema de tierras, lo que requiere diseñar el sistema considerando el peor escenario.

TEMPERATURA

La resistividad del suelo aumenta a medida que disminuye la temperatura, esto se acentúa aún más cuando la temperatura llega a 0°C. Cuanto mayor es el agua en estado de congelación en el terreno, menor es la movilidad de los electrolitos, que afecta la resistividad del suelo.

COMPACTACIÓN

La compactación del suelo afecta a su resistividad debido a que la resistividad disminuye cuando aumenta su compactación. Por ende, es preferible instalar electrodos en los terrenos que se encuentren lo más compactos posible.

2.10 Mediciones de resistividad en los terrenos

La principal razón por la cual se lleva a cabo una medición de la resistividad en el suelo es con el propósito de determinar cuál es su profundidad y espesor de las capas rocosas en estudios geofísicos, además de identificar los puntos óptimos para ubicar sistemas de tierras en subestaciones, equipos electrónicos, plantas generadoras o transmisores de radiofrecuencia. También se utiliza para evaluar el grado de corrosión en tuberías subterráneas. En términos generales, las áreas con baja resistividad tienden a experimentar un aumento de corrosión en las tuberías subterráneas.[23]

Tener en cuenta la resistividad en todos los puntos del terreno al diseñar sistemas a tierra no es un requisito. Sin embargo, es aconsejable identificar áreas que tengan una resistividad baja para tener una instalación mucho más barata.

Donde el perfil de resistividad del terreno es el resultado de la resistencia a tierra junto con la profundidad a la cual se instalará la puesta tierra. Para llevar a cabo esta medición, es requerido un terrómetro (conocido como telurómetro en algunos países) o un Megger para el suelo que consta de cuatro terminales.

Estos aparatos, según su principio de funcionamiento, son dos tipos: lectura directa y equilibrio en cero. Es esencial que los terrómetros inyecten una corriente con una frecuencia distinta de los 60 Hz con lo que se evita medir voltaje y corriente que son inducidos por ruidos eléctricos. Por ejemplo, nos encontramos en una subestación o línea activa, donde realizamos mediciones de resistencia y resistividad del terreno con un dispositivo de 60 Hz, los campos electromagnéticos de esa frecuencia pueden inducir corrientes en el suelo, lo que distorsionará la medición. De igual manera sucede con la mala conexión de los contactos o con los falsos contactos, se obtendrán señales falsas de corriente y voltaje.[16]

Los terrómetros, tanto analógicos como digitales, deben tener cuatro terminales, dos son para corriente marcados como (C1, C2) y usa otros dos terminales para potencial marcados como (P1, P2), estos vienen numerados en el aparato como C1, P1, P2, C2. Antes de realizar mediciones, los terrómetros deben estar certificados y sometidos a pruebas de resistencia en campo.

Dado que las mediciones de un terrómetro son puntuales, se recomienda realizar mediciones en múltiples direcciones: en el sentido original, a 90 grados del primer punto y en diagonal. Debido a la variabilidad geológica, las mediciones de resistividad suelen mostrar valores dispares. Por lo tanto, es común descartar valores que difieren en un 50% o más del promedio aritmético de todas las mediciones obtenidas.



Figura 15 Megger.[25]

2.10.1 Método de wenner.

El método wenner nació en 1915 por el Dr. Frank Wenner que desarrolló una teoría de un método para sistemas a tierra que lleva su nombre, junto con la ecuación asociada.

Siguiendo el método para medir la resistividad del terreno, se insertan los cuatro electrodos en el terreno donde se desea medir la resistividad. Estos electrodos se deben colocar en línea recta a la a la misma profundidad de exploración. Es importante tener en cuenta que la medición de resistividad depende tanto de la resistividad del terreno como de la distancia entre los electrodos, pero no están significativamente influenciadas por el tamaño y el material que tengan de los electrodos. Sin embargo, sí dependen del tipo de contacto que se establece con la tierra.[10]

Este método consiste en una inyectar una corriente directa hacia el suelo por medio de los electrodos C1 y C2 y se mide el potencial por medio de los electrodos P1 y P2. Los electrodos deben enterrarse en una línea recta y equidistantes entre sí. La relación V/I se denomina resistencia aparente. La resistividad aparente del terreno está relacionada con esta resistencia y la geometría de los electrodos.

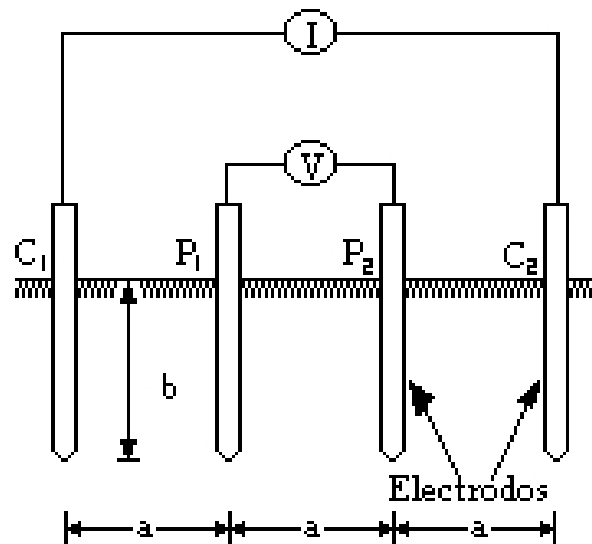


Figura 16 Esquema de mediciones con el método Wenner

En la figura 16 se observa un esquema sobre la distancia y la disposición en la cual colocar los electrodos, en donde por medio de electrodos exteriores se inyecta una corriente y a través de los electrodos interiores se mide el potencial [11]. La resistividad aparente se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{4 \cdot \pi \cdot A \cdot R}{\left[1 + \left[\frac{2 \cdot A}{(A^2 + 4 \cdot B^2)^{0.5}} \right] - \frac{2 \cdot A}{(4A^2 + 4 \cdot B^2)^{0.5}} \right]}$$

Donde:

ρ = Resistividad del terreo

A = Distancia entre electrodos en metros

B = Profundidad de enterrado de los electrodos en metros

R = Lectura del teluometro en ohms

En el caso de que la distancia a la cual se entierran los electrodos (B) es considerablemente menor a la distancia que existe entre el electrodo (A), ósea $A > 20B$, puede usarse la formula simplificada:

$$\rho = 2. \pi. A. R$$

El valor de resistividad obtenido a través de estas ecuaciones tiene como resultado la resistividad promedio en una parte específica del suelo y con un radio que es igual a la distancia que hay entre los electrodos.

Se recomienda tomar lecturas en diversos lugares y en ángulos de 90 grados entre ellas para evitar que estructuras metálicas subterráneas afecten los resultados y obtener así un promedio.

2.10.2 Método Schlumberger

Es una adaptación del método de Wenner, donde también se deben usar cuatro electrodos para realizar las mediciones. La diferencia para este caso es la distancia de separación de los electrodos centrales (a) debe mantenerse constante y las mediciones deben realizarse cambiando la separación de los electrodos ubicado al exterior, a una distancia múltiplo (na) con respecto a los electrodos internos (a)[9]. Se expresa el esquema que corresponde con el método Schlumberger en la siguiente figura.

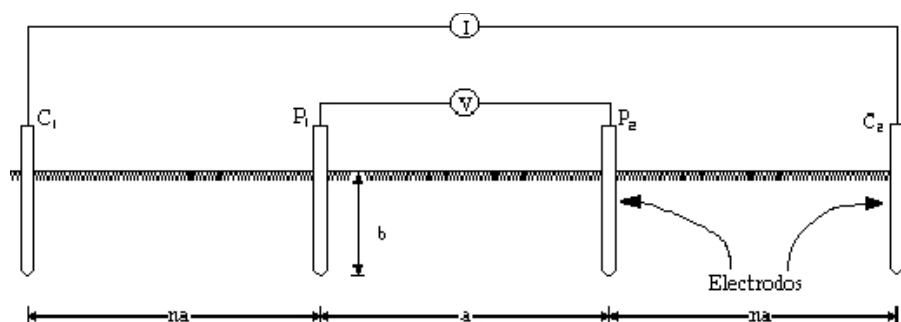


Figura 17 Esquema de mediciones con el método Schlumberger

Usando este método la resistividad está dada por la siguiente ecuación:

$$\rho = 2. \pi. R(n + 1). na$$

Este resulta especialmente útil cuando es necesario determinar resistividades de capas más profundas sin requerir tantas mediciones como son necesarias para llevar a cabo el método Wenner. Así mismo, es empleado cuando se utilizan dispositivos para medir

menos sofisticados. Es recomendable realizar mediciones a ángulo de 90 grados para evitar que estructuras subterráneas afecten las lecturas.

2.11 Perfiles de resistividad

Para realizar las mediciones y obtener el perfil de resistividad en un punto específico, se emplea el Método de Wenner con incrementos en los espacios entre los electrodos de prueba. Por lo general, para cada distancia, se realizan dos mediciones perpendiculares entre sí. Al trazar el promedio de estas mediciones de resistividad (R) en función de la distancia entre los electrodos (a), se obtiene una gráfica conocida como perfil de resistividad aparente del terreno, se muestra a continuación una gráfica de perfil de resistividad.[6]



Figura 18 Perfil de resistividad

2.11.1 Resistividad de suelos típicos

Para realizar las instalaciones de tipos de suelo es muy importante conocer sobre la superficie que se quiere trabajar. A continuación, se enlistan los suelos típicos que se encuentran con su resistividad.

MATERIAL	RESISTIVIDAD
Concreto Mojado	21-100 Ω *m
Asfalto Seco	$2 \cdot 10^6 - 30 \cdot 10^6 \Omega$ *m
Asfalto Mojado	10000 - $6 \cdot 10^6 \Omega$ *m
Concreto Seco	1200-28000 Ω *m

Permafrost	3500 – 4000 Ω^*m
Compuesto GAP seco	0.032 Ω^*m
Compuesto GAP con 30% de agua en masa	0.015 Ω^*m

Tabla 4 Principales niveles de resistividad en los suelos típicos

2.11.2 Ejemplos de perfiles de resistividad

Perfil de resistencia especial para zonas con capa superficial arcillosa y húmeda, subcapa pedregosa: que da un perfil de resistencia ascendente. Se deben utilizar al menos dos capas de valores para simular este comportamiento.



Figura 19 Perfil de resistividad para zona con capa superficial arcillosa y húmeda y capa inferior rocosa

Para zonas que tengan capa superior muy seca y una subcapa arenosa: se muestra el perfil descendente de resistividad.



Figura 20 Perfil de resistividad para zonas con capa superficial muy seca, capa inferior arenosa

Zonas con terreno rocoso y seco. Perfil de resistividad plano, se puede utilizar la resistividad promedio del terreno para simular su comportamiento.



Figura 21 Perfil de resistividad para Zonas con terreno rocoso y seco

2.12 Métodos de la medición de los sistemas de puesta a tierra

Para medir la resistencia de puesta a tierra es fundamental para evaluar la eficacia de estos sistemas y garantizar su correcto funcionamiento. Existen diferentes métodos de medición, incluido el uso de instrumentos de medición especializados y la simulación mediante software como ETAP (versión 21.0.2)

Métodos de medición directa: Los métodos de medición directa se basan en la utilización de instrumentos de medición específicos para medir la resistencia de puesta a tierra. Estos instrumentos incluyen telurómetros y pinzas amperimétricas. El telurómetro se utiliza para medir la resistencia a tierra de los electrodos, mientras que la pinza amperimétrica se utiliza para medir la corriente de falla y calcular la resistencia de puesta a tierra en función de la Ley de Ohm. Estos métodos proporcionan mediciones precisas y son ampliamente utilizados en la industria.[26]



Figura 22 Elemento de medición

Métodos de medición por inyección de corriente: Los métodos de medición por inyección de corriente implican la aplicación de una corriente de prueba controlada al sistema a tierra y la medición de la tensión resultante. Estos métodos utilizan generadores de corriente y voltímetros para realizar mediciones. Estos métodos son efectivos y ampliamente utilizados en la industria eléctrica.

Métodos de medición indirecta: Los métodos de medición indirecta aprovechan las mediciones de otros parámetros eléctricos para estimar la resistencia a tierra. Estos métodos incluyen la medición de la resistividad del terreno, la impedancia de bucle y la resistencia de contacto entre los electrodos de tierra y las estructuras. Estas mediciones se combinan utilizando fórmulas y ecuaciones específicas para calcular la resistencia de puesta a tierra. Aunque estos métodos son menos precisos que los métodos directos, pueden proporcionar una estimación aceptable de la resistencia a tierra.[27]

2.13 Elementos de medición de los sistemas puesta a tierra

2.13.1 Comprobador 1623-2 geo de Fluke

El equipo comprobador usado para las mediciones a tierra es el 1623-2 GEO de la marca Fluke es una herramienta de medición diseñada para evaluar la resistencia de puesta a tierra en instalaciones eléctricas. Este kit proporciona a los profesionales la capacidad de realizar mediciones precisas y confiables en diferentes entornos y condiciones, tiene una precisión de ($\pm 2\%$ de la lectura + 3 d) y cumple con las normativas de seguridad IEC61010-1.[28]

El kit cuenta con varias características que lo hacen altamente efectivo y confiable. Este equipo utiliza la técnica de prueba de tres polos y permite mediciones directas y precisas

de la resistencia de puesta a tierra. Además, ofrece una función de medición de resistividad del suelo y tiene la capacidad de almacenar y descargar datos para un análisis posterior.[29]



Figura 23 Kit del comprobador 1623-2 GEO de Fluke[29]

2.14 Conductores en los sistemas puesta a tierra

Un conductor de tierra se refiere a un cable o barra de metal que está física y eléctricamente conectado a la tierra, con el propósito de establecer una vía de baja resistencia para la corriente en caso de falla a tierra. Esta medida contribuye significativamente a la protección de personas y equipos eléctricos, minimizando los riesgos asociados a sobretensiones peligrosas y cortocircuitos.

La función principal de un conductor a tierra es brindar una ruta segura para las corrientes de falla, lo cual reduce considerablemente la posibilidad de incendios y accidentes por electrocución. Además, este conductor también protege los equipos eléctricos de daños causados por sobretensiones transitorias.

Es crucial destacar que el conductor a tierra juega un papel esencial en el funcionamiento efectivo para dispositivos de protección contra sobre tensiones en sistemas con conexión a tierra. En este contexto, el conductor a tierra suele ser un conductor neutro que dirige las corrientes de falla hacia la fuente de energía y ayuda a mantener la seguridad del sistema [30]



Figura 24 Conductor a tierra soldado a una varilla de cobre

Este requisito es reflejado en el código eléctrico, donde la sección 250.24 (C) especifica de las conexiones a tierra deben llevarse a un recinto de desconexión de servicio y ser conectadas al mismo. Esto es válido para sistemas con conexión a tierra, independientemente de si el conductor a tierra suministra una carga o no.

En sistemas con conexión a tierra, el conductor a tierra de un servicio a menudo es un conductor neutro. Sin embargo, en sistemas con diferentes topologías, como sistemas delta con conexión a tierra en esquina, el conductor de fase puede ser el conductor a tierra.

Para garantizar el funcionamiento eficaz y seguro, es esencial tener en cuenta la naturaleza de los conductores neutros y a tierra, así como sus conexiones en el sistema eléctrico[19]

Conductor Neutral

Ese término se relaciona con la conexión a un cable que tiene una conexión con el sistema. El conductor neutro del sistema está conectado a un sistema a tierra, sin embargo, no todos los conductores son neutros del sistema.



Figura 25 Conductores a tierra de Copperweld

El punto de referencia del sistema junto con la suma vectorial de los voltajes nominales de todas las demás fases en el sistema que utilizan ese punto como referencia es igual a cero, lo que significa que se encuentra a un potencial de tierra.

En condiciones normales de funcionamiento, el conductor de tierra, o neutro, se encarga de transportar cualquier corriente neutral desequilibrada hacia los devanados de la fuente.

Este mismo principio de transporte de corriente se aplica a los conductores de fase que están conectados a tierra. La diferencia radica en la conexión de fase con el conductor a tierra generalmente lleva la misma cantidad de corriente que usan los conductores sin una conexión a tierra, como ocurre en el caso de los motores trifásico que son alimentado por un sistema con conexión a tierra.[21]

2.15 Tratamiento químico para la tierra

Para los suelos es normal realizar un tratamiento químico es una técnica ampliamente empleada para mejorar las propiedades del terreno a través de la adición de productos químicos. Esta práctica busca diversos objetivos, incluyendo:

- Reducción de la resistencia del sistema a tierra de los electrodos mediante la mejora de la conductividad del terreno circundante, lo cual disminuye la caída de potencial en el terreno.
- Relleno entre el electrodo y terrenos duros, facilitando la instalación de electrodos.

- Mejora en suelos rocosos mediante el uso de explosivos para facilitar la instalación de electrodos.
- Inhibición o retardación de la corrosión de electrodos de hierro, reemplazando electrodos de cobre o hierro galvanizado con ánodos de sacrificio.

Históricamente, se han utilizado diversos métodos para lograr estos objetivos. Uno de ellos consiste en la adición de sales simples, como sulfato de magnesio, sulfato de cobre y cloruro de sodio. Sin embargo, este enfoque no es permanente, ya que las sales pueden ser arrastradas por el agua de lluvia, especialmente en suelos porosos.[20]

Una técnica más avanzada involucra el uso de sales gel, que implica la inyección o irrigación del terreno con soluciones acuosas de dos o más sales, junto con un catalizador, para formar un precipitado estable en forma de gel. Este gel posee alta conductividad eléctrica y resiste la acción de ácidos en el terreno. Uno de los materiales utilizados es la bentonita sódica, que mejora el contacto entre los electrodos y el terreno, así como las propiedades eléctricas cercanas a los electrodos.

En resumen, el tratamiento químico del suelo es una técnica valiosa que permite mejorar la eficiencia y la seguridad para el sistema de puesta a tierra, proporcionando una vía efectiva para reducir la resistencia y mejorar las propiedades eléctricas del terreno.

2.16 Software ETAP (versión 21.0.2)

La evaluación de malla a tierra es esencial para garantizar la seguridad eléctrica de las instalaciones. El método de simulación ETAP (Electrical Transient and Analysis Program) ofrece una herramienta poderosa para evaluar y analizar la eficacia de estos sistemas. ETAP es un software de ingeniería eléctrica ampliamente utilizado que permite simular y analizar diversos aspectos del sistema de energía, incluyendo la puesta a tierra.[31]

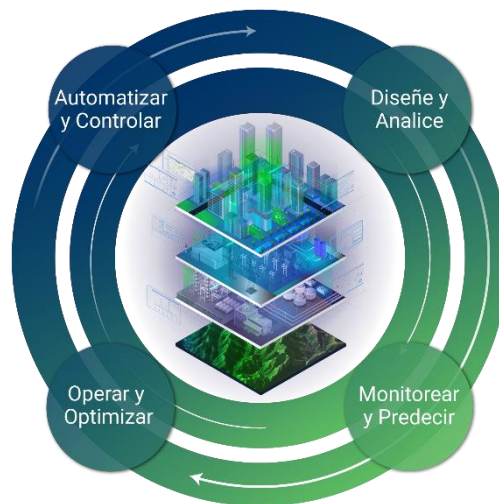


Figura 26 Principales características del software ETAP

El método de simulación ETAP utiliza modelos matemáticos y algoritmos avanzados para simular el comportamiento del sistema. El software permite la creación de un modelo virtual del sistema eléctrico, incluyendo: conductores, electrodos y las conexiones entre ellos. A través de la simulación, se pueden realizar análisis detallados para revisar los datos de diseño como resistencia de puesta a tierra, la distribución de corriente y otros parámetros relevantes.

Proporciona una representación precisa del comportamiento del sistema, lo que permite identificar posibles problemas o deficiencias. Mediante la simulación, se pueden evaluar diferentes escenarios de falla y determinar la respuesta del sistema en cada uno de los casos.

Es esencial tener en cuenta las condiciones ambientales y la ubicación geográfica, ya que pueden afectar la respuesta del sistema de puesta a tierra. Además, se deben considerar las normas y regulaciones aplicables para asegurar que el sistema cumpla con los requisitos establecidos.[31]

2.17 Proceso de Instalación de Sistemas de Puesta a Tierra

Antes de proceder con la respectiva instalación, es importante recordar que la finalidad para implementar el sistema de puesta a tierra son diversos. Entre ellos se incluye proporcionar una vía segura para la corriente de falla, evitando situaciones riesgosas para los usuarios del sistema eléctrico; mantener niveles de tensión uniformes en un sistema

en estrella para las fases; y, en entornos laborales, establecer condiciones seguras para las cargas eléctricas y proteger a los sistemas y estructuras contra las caídas de rayos.[32]

En una residencia, el sistema de puesta a tierra es relativamente sencillo, constando de tres componentes: el electrodo, el conector y el conductor. Es fundamental recordar que los electrodos son el objeto que establece una conexión directa con la tierra. De acuerdo con el artículo 250-52 de la NOM 001 SEDE 2012, puede ser la estructura de los edificios, ser una tubería, un electrodo recubierto de concreto, un anillo a tierra, una varilla como electrodo, o una placa como electrodo. En instalaciones residenciales, la opción más común es la varilla, la cual deberá poseer las características de una longitud que no sea menor a 2.44 m y tener un diámetro de 16 mm.[32]

El conector, es el dispositivo empleado para establecer una conexión efectiva entre conductores o entre conductores y terminales mediante la presión mecánica. Para este caso específico, actúa como punto de unión entre el conductor y los electrodos.

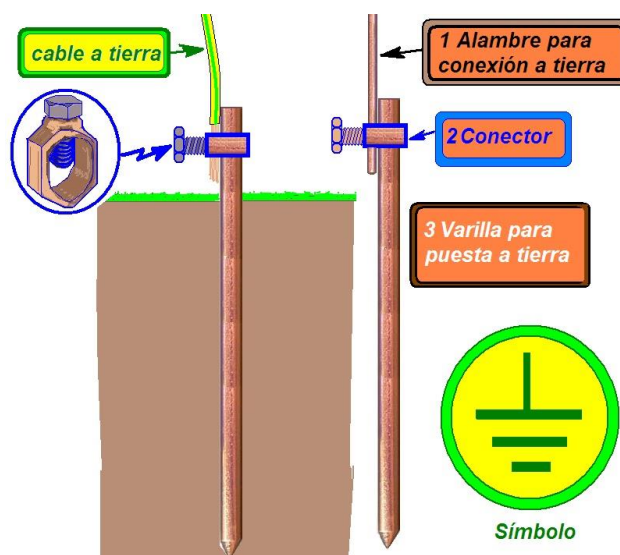


Figura 27 Partes de una conexión de puesta a tierra

El conductor del electrodo es el encargado de conectar al electrodo con los sistemas que se desean proteger. Este conductor suele estar aislado con un recubrimiento verde, otra forma de encontrarlo es verde con rallas de color amarillo o estar desnudo, y debe tener de cumplir con las normativas que tiene la NOM 001 SEDE 2012 donde se muestra una tabla de la con las dimensiones que se deben usar.

Para la instalación de los electrodos, se debe seguir conforme lo muestra el artículo 250-53, puede llevarse a cabo de tres formas: en posición vertical solamente si es posible,

dado que los electrodos con longitud de 2.44 m podrían dificultar esta acción; otra de las opciones es instalarlo en ángulo inclinado, con un ángulo que no sea menor a los 45 grados; por último, si el terreno es rocoso, puede optarse por enterrarlo cavando una fosa teniendo una profundidad que no sea menor que 75 cm.

CAPITULO III

METODOLOGÍA

3.1 Metodología de la investigación

El proyecto se llevará a cabo en la empresa INDAMI CIA. LTDA. En la cual se va a realizar la simulación utilizando el software ETAP (versión 21.0.2) esta herramienta es de fácil acceso para la simulación, con el fin de conocer la ubicación de protecciones y los sistemas de puesta a tierra de la empresa, los datos se obtendrán mediante diversas visitas técnicas en las que evaluara el estado de las instalaciones eléctricas y entender cómo afectan diversos casos en el desempeño de una malla a tierra. Se modelarán la malla de puesta tierra en el simulador.

3.1 Lugar geográfico y la situación actual de la empresa

La empresa INDAMI CIA. LTDA se encuentra ubicada estratégicamente en la región minera de la ciudad de Guayaquil, su ubicación en una zona industrial y minera en crecimiento proporciona acceso a recursos y servicios necesarios para el funcionamiento eficiente de la empresa. A continuación, se muestra su ubicación en Google Maps.



Figura 28 Lugar de empresa INDAMI CIA. LTDA

En cuanto a la situación actual de la empresa, INDAMI CIA. LTDA se encuentra en una fase de expansión y crecimiento sostenido. Dada su especialización en el sector minero e industrial, ha experimentado un aumento de materiales y servicios para otras industrias y

particulares relacionadas con la minería. Esto ha llevado a realizar inversiones en tecnología y maquinaria de vanguardia, así como a la contratación de personal altamente capacitado. La empresa se enorgullece de mantener altos estándares de seguridad y sostenibilidad en sus operaciones, lo que la ha convertido en un referente en la industria. Sin embargo, también se enfrenta a desafíos constantes en términos de gestión de recursos y cumplimiento de regulaciones, entre ellas debido al aumento de maquinarias eléctricas en los últimos años se necesita un sistema a tierra que proporcione una gran seguridad a los equipos y las personas que trabajan en la empresa.

3.2 Antecedentes del lugar

En la empresa INDAMI CIA. LTDA, se prevé realizar un sistema de puesta a tierra para salvaguardar la vida de los trabajadores y la correcta protección de los equipos eléctricos cuando son sometidos a perturbaciones, Así mismo para conocer el área donde se van a realizar la instalación se realizaron visitas técnicas para realizar las respectivas mediciones de suelo y ver cuál es la mejor opción de malla de puesta a tierra.



Figura 29 Mediciones realizadas en la empresa

3.3 Procedimiento que seguir

Para la instalación de la malla de tierra se realizará los siguientes procedimientos:

1. Realizar aperturas de zanja de 40 cm de profundidad x 40 cm de ancho, en las partes trazadas previamente con tiza blanca, o cal, de acuerdo con lo indicado en los planos emitidos para la construcción.
2. Proceder con el hincado de las varillas copperweld de 5/8 pulgadas de diámetro x 8 pies de longitud, mediante percusión manual, con el uso de un capuchón metálico o de

madera de protección. Evitar que se deforme la varilla en el extremo superior por efectos de golpes con el martillo.

3. Instalar el cable de cobre desnudo en la zanja y construir la malla de puesta a tierra mediante uniones exotérmicas, para lo cual disponemos de moldes de grafito para uniones tipo TA, uniones tipo XA, uniones tipo GT, etc., según sea el tipo requerido de acuerdo al plano.

4. Seleccionar el molde, cartucho de soldadura y disco metálico apropiados en base a las características del conductor. Utilizar en chisperos (en buen estado) guantes y tenazas sujetadoras de moldes. Los electricistas deberán utilizar gafas.

5. Verificar que el molde este en buen estado de tal manera que en las cavidades donde ingresan los cables o varillas no existan deformaciones, que permitan el derrame de la mezcla en el momento de la fundición.

6. Realizar la primera suelda precalentando el molde de grafito a 105°C con un soplete de gas propano para evitar la presencia de humedad en el molde.

7. Asegurar de que los conductores estén limpios, para esto se debe precalentar con un soplete de gas propano y utilizar un cepillo de alambres para remover las impurezas.

8. Colocar todos los conductores que están limpios en el molde, deben asegurarse de que los conductores estén secos. El corte del cable deberá ser uniforme con la herramienta adecuada.

9. Colocar el disco metálico en el fondo del molde.

10. Vaciar la soldadura en polvo en el fondo, colocando un poco el polvo de ignición en la orilla del molde.

11. Cerrar la tapa y se inicia la reacción con el chispero por un lado del molde, arrojando chispas hacia el polvo de ignición.

12. Luego de que se produce la reacción, retirar y limpiar el molde con los elementos adecuados que no erosionen el grafito del molde, antes de realizar una nueva conexión.

13. Para conexiones a superficies metálicas, el área a soldar deberá estar limpia, libre de cualquier material abrasivo.

14. Verificar la calidad de la soldadura visualmente notando que no haya porosidades ni que haya formas incompletas producidas por derrames o por no haber utilizado los elementos adecuados. Además, se debe verificar que la soldadura no este fofa.
15. Las derivaciones que sirven para conectar equipos y otros serán protegidos con manguera u otro elemento de tal manera que el tiempo, humedad u otros agentes externos no dañen el conductor.
16. Tomar fotografías para muestreo y archivar para reporte.
17. Realizar las mediciones de resistencia de malla, para comprobar que se ha alcanzado los valores del diseño

CAPITULO IV

PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Recolección de datos en el campo

La implementación de una malla de puesta a tierra adecuado es de gran importancia para dar garantía de seguridad y el rendimiento de las instalaciones eléctricas. En este contexto, para la propuesta del sistema en la empresa INDAMI CIA. LTDA, se llevaron a cabo mediciones y evaluaciones técnicas exhaustivas para asegurar un diseño eficiente y seguro.

En la figura 30 se presenta las mediciones del terreno, donde se está evaluando el área destinada a la instalación de la malla de puesta a tierra. Este proceso involucra una evaluación minuciosa del terreno para determinar la disposición óptima de los electrodos y garantizar una baja resistividad en el suelo.



Figura 30 Mediciones en el área destinada a la instalación de malla a tierra

4.2 Mediciones de resistividad del suelo

Para hallar el resultado de la resistividad del terreno se utilizó el método de Wenner con un equipo similar a MEGGER para la respectiva medición. El valor de la resistividad promedio aparente luego de la medición de puesta a tierra en sitio es de 30 ohm-metro. Las mediciones se realizaron con los electrodos separados a una distancia de 1.5 y 2 metros. A continuación, se visualizan el momento en el que se realizaban las mediciones.



Figura 31 Mediciones de Resistividad del terreno

En la figura 32 se ilustra el procedimiento de medición de la resistividad del suelo, junto con otros datos relevantes obtenidos durante la revisión técnica del terreno. Estos datos son fundamentales para la planificación precisa y la implementación exitosa de la malla de puesta a tierra, asegurando una infraestructura eléctrica segura y confiable en la empresa.



Figura 32 Procedimiento de las mediciones de malla de puesta a tierra

Cálculos

Para el cálculo respectivo se considera 4 puntos fundamentales recomendados en los estándares internacionales.

1. Resistencia máxima de puesta a tierra

2. Calibre del conductor

3. Profundidad de la malla

4. Voltajes máximos permisibles. (Tensiones de toque, paso y Potencial máximo de malla).

Para el caso del primer literal, los valores recomendados por el IEEE STD 142-1991 para subestaciones de este tipo es de 1 a 5 ohmios. Para nuestro caso, según el estudio realizado el valor es de 2.29.

En cuanto a la selección del calibre del conductor se utilizará como mínimo 4/0 AWG.

La profundidad de la malla es de 0.4 metros.

Normas

La norma aplicada para el cálculo de la malla está basada en la actual norma IEEE STD 80-2000. Se presenta el modelo de cálculo con el que se realizó el estudio de la malla de tierra.

4.3 Datos recogidos en la visita técnica

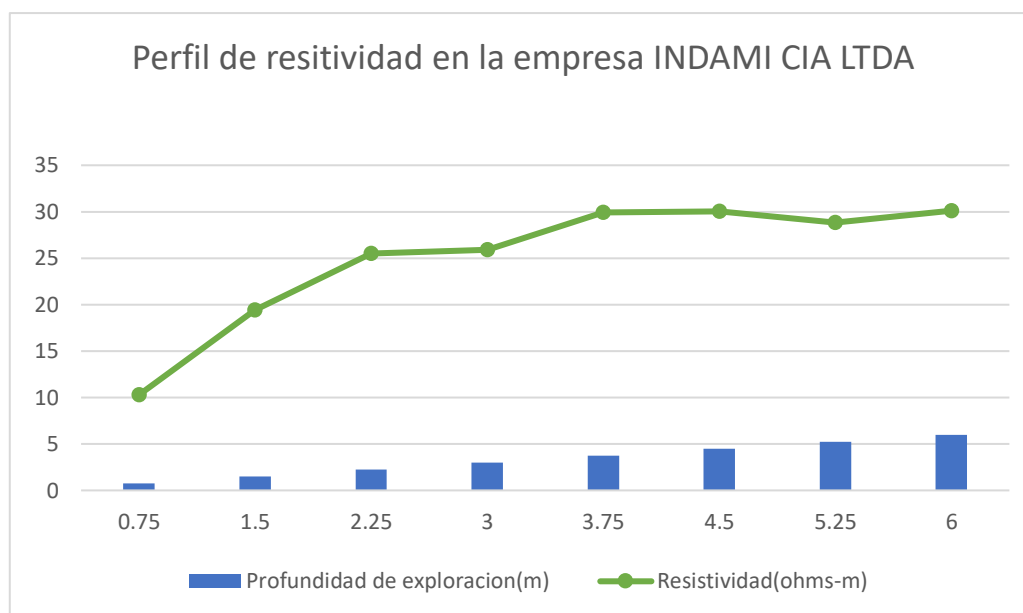
La medición de la resistividad del terreno se llevó a cabo utilizando un electrodo a diferentes profundidades de exploración. Los datos recopilados revelan una relación entre la profundidad y la resistividad del terreno. Se realizó una tabla donde se muestra la relación de la profundidad de exploración con la resistividad del terreno. En el anexo 2 y 3 se muestran las imágenes referentes a las mediciones de resistividad de suelo con los electrodos.

Profundidad de exploración con el electrodo (m)	Resistividad (Ω -m)
0,75	16,38
1.5	19,43
2,25	28,83
3	30

Tabla 5 Resultado de las mediciones de resistividad del terreno

En la visita técnica en la empresa INDAMI CIA. LTDA, se han obtenido datos esenciales sobre las características del terreno que influirán en la efectividad de la instalación. El área abarca un espacio rectangular con un lado mayor de 9 metros y un lado menor de 6

metros. Este tamaño proporciona un espacio adecuado para la implementación de la malla a tierra. Además, se puede encontrar en el anexo 4 las pruebas de mediciones del terreno en diferentes puntos. Sin embargo, no se encontraron cambios significativos en los valores de medición.



La resistividad equivalente es un valor del terreno que es crucial para determinar la eficiencia de la puesta a tierra. En este caso, se ha evaluado y establecido un valor de 30 ohmios por metro. Este parámetro es fundamental para calcular la distribución de corriente y el comportamiento de la malla de puesta a tierra en el terreno circundante. En el anexo 5 se encuentran los resultados completos de las mediciones en el terreno.

Para llevar a cabo un diseño efectivo, se ha considerado un área de malla de 54 metros cuadrados, en la cual se implementará el sistema de puesta a tierra. Esta área garantiza una cobertura adecuada y una distribución uniforme de la corriente de fallas a lo largo del terreno. Además, se ha decidido establecer una profundidad de 0.4 metros para la malla, lo que permitirá una conexión efectiva con el terreno y asegurará la dispersión eficiente de corriente en caso de una falla eléctrica. En la tabla se muestran los datos del terreno en la cual será puesta la malla de puesta a tierra.

DATOS DEL TERRENO		
Lado mayor	m	9
Lado menor	m	6
Resistividad equivalente del terreno (ρ)	$\Omega * m$	30

Área de la malla (A)	m^2	54
Profundidad de la malla (h)	m	0.4

Tabla 6 Datos de la malla

La empresa INDAMI CIA. LTDA ha proporcionado datos cruciales para la implementación exitosa de un sistema de puesta a tierra. Se ha estimado una corriente de fallas a tierra de 5135 A en el lado A del sistema y 2500 A en el lado B, la relación de X/R del sistema, que se establece en 10, lo que destaca la importancia de tener una puesta a tierra efectiva para disipar estas corrientes y prevenir posibles daños a los equipos y riesgos para las personas.

Además, se ha dado a conocer que el factor de decremento, con un valor de 1.026, tiene implicaciones significativas en la respuesta transitoria del sistema durante una falla. Esta información es esencial para garantizar la estabilidad y seguridad del sistema eléctrico en caso de un evento inesperado. Finalmente, la corriente de diseño de los conductores en el lado mayor, estimada en 5269 A, guía el dimensionamiento y selección de los conductores, asegurando que sean capaces de manejar las corrientes esperadas y mantener la integridad del sistema en condiciones normales y de falla. A continuación, se muestra la tabla que contiene los datos eléctricos obtenidos,

CORRIENTE DE FALLA Y DE LÍNEA	
Lado AT, Corriente de falla a tierra (I_f)	5135 A
Lado BT, Corriente de falla a tierra (I_f)	2500 A
Relación X/R	10
Factor de decremento (D_f)	1026
Corriente de los conductores (Lado con mayor I_f)	5269 A

Tabla 7 Datos de corriente de falla y de línea

También se realizó una tabla donde se muestran los datos de las mediciones de campo con respecto a la temperatura ambiente y se estimó la temperatura máxima de operación en el peor de los casos para que no existan problemas con la puesta a tierra en diferentes estaciones del año,

DATOS DE LA TEMPERATURA PARA LA CONEXIÓN
--

Tiempo de despeje para falla (I_f)	0.50 seg
Temperatura Máxima	1083 °C
Temperatura Ambiente	35 °C

Tabla 8 Datos de la temperatura donde se instalará la malla

A continuación, se muestra una propuesta del número de conductores de cada lado de la malla que se realizó en base a los datos del terreno, así como también la distancia que existirá entre ellos para tener una mejor dispersión de las corrientes de falla.

CALCULO DE LA RETÍCULA DE MALLA DEPUESTA A TIERRA		
Lado mayor de la malla Y	m	9
Lado menor de la malla X	m	6
Espacio entre conductores paralelos D	m	3
Nº de conductores paralelos de lado mayor		3
Nº de conductores paralelos de lado menor		4
Longitud total del conductor de la malla L_c	m	51

Tabla 9 Resultados de malla de puesta a tierra

Para asegurar una conexión eficiente con el terreno y garantizar la efectividad de la malla de puesta a tierra en la empresa INDAMI CIA. LTDA, se han previsto el uso de tres jabalinas en el terreno. Estas jabalinas tienen un diámetro de 0.625 pulgadas y una longitud de 3 metros (3 m).

JABALINAS		
Numero de jabalinas n_R		3
Diámetro para las jabalinas 2 b	Pulg	0.625
Longitud de las jabalinas L_f	m	3

Tabla 10 Jabalinas para la malla de puesta tierra

Con los datos obtenidos anteriormente se procederá a realizar una simulación en el software ETAP para corroborar que la malla cumpla con todos los estándares y sea efectiva al momento de salvaguardar la vida humana y proteger a las maquinas contra sobretensiones.

4.4 Cálculos para el diseño de la malla de puesta a tierra

Los datos de diseño geométrico de la malla de puesta a tierra en la empresa INDAMI CIA. LTDA se han establecido para garantizar un sistema efectivo y seguro, donde el área de la malla a tierra es de 6 x 9 metros. A continuación, se realizaron los cálculos del área total que será utilizada para la malla de puesta a tierra.

$$A = l(A) * a(B)$$

$$A = 9m * 6m = 54 m^2$$

Esta área es adecuada para cubrir tanto el espacio horizontal como el vertical, considerando las dimensiones del entorno industrial de la empresa. La longitud del conductor para el mallado se ha calculado utilizando una cantidad de cables en paralelo en relación con las longitudes A y B.

$$L = nA + mB$$

n= Numero cables en paralelo en relación con la longitud A

$$n = 4$$

m=Numero de cables en paralelo en relación con la longitud B

$$m = 3$$

$$L = (4 * 9) + (3 * 6) = 54 m$$

Donde la relación de geometría de la malla es:

$$\frac{\text{Largo}}{\text{Ancho}} = \frac{6}{9} = 0,66$$

Además, la separación entre los conductores, tanto en sentido horizontal como vertical, es de 3 metros, lo que garantiza una distribución uniforme de la corriente en toda el área de mallado. La profundidad de enterramiento en el suelo es de 0.4 metros, lo que proporciona una conexión efectiva con el terreno para la disipación segura de corrientes de falla. El número de conductores de la red son los siguientes:

4 conductores en paralelo. (Horizontal)

3 conductores en paralelo. (Vertical)

Entonces, la cantidad necesaria de conductores para cubrir el área de la malla tanto en el lado horizontal como vertical son:

$$4 \text{ conductores} \times 9 \text{ m} = 36$$

$$3 \text{ conductores} \times 6 \text{ m} = 18$$

$$\text{Total} = 54 \text{ m de conductores}$$

En la figura 33 se muestra la configuración geométrica de la malla donde se especifican las longitudes A y B, y las distancias de las celdas de la malla.

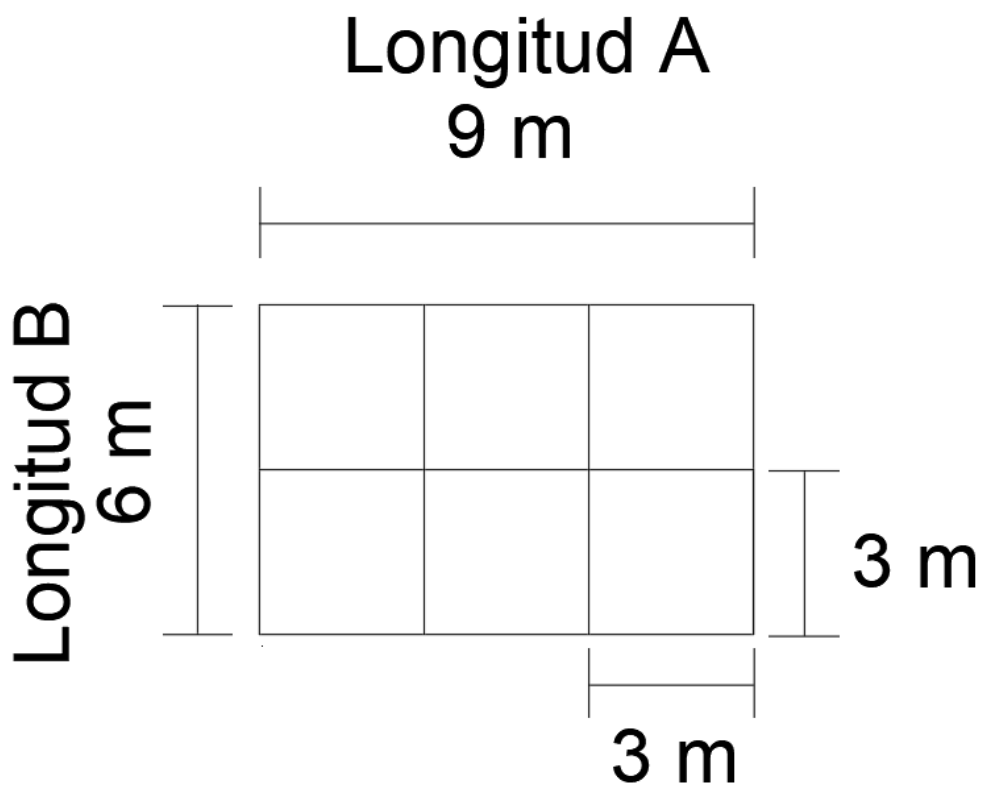


Figura 33 Configuración geométrica de la malla

4.5 Cálculo del diámetro del calibre del conductor

El cálculo del calibre del conductor en los sistemas a tierra es fundamental para garantizar la eficacia del transporte de la corriente de cortocircuito desde las cargas hacia la malla en la disipación de corrientes de falla, utilizando la fórmula:

$$AC = I \left[\frac{33t}{\log \left[\frac{Tm - Ta}{234 + Ta} + 1 \right]} \right]^{1/2}$$

$A_c =$ sección del conductor

$I =$ Corriente máxima de falla

$$I = 5269 \text{ A}$$

$T_m =$ Temperatura máxima en los nodos de la malla

$$T_m = 1083^\circ\text{C}$$

$T_a =$ temperatura ambiente

$$T_a = 35^\circ\text{C}$$

$t =$ Tiempo máximo de despeje de fallas

$$T = 0,50 \text{ seg}$$

Realizando el cambio en la ecuación mostrada el resultado quedara:

$$AC = 5269 \left[\frac{33 * 0,5}{\log \left[\frac{1083 - 35}{234 + 35} + 1 \right]} \right]^{1/2} = 25769.0267 \text{ CM}$$

$$1\text{CM} = 5 \times 10^{-4} \text{mm}^2$$

$$25769.0267\text{CM} = 12.8845\text{mm}^2$$

$$\sqrt{25769.0267} = 3.5894 \text{ mm}$$

Para el caso específico de la empresa INDAMI CIA. LTDA, con una corriente máxima de falla de 5269 A, una temperatura máxima en los nodos de 1083°C con una temperatura ambiente de 35°C, y un tiempo máximo para el despeje de fallas de 0.50 segundos, el resultado arroja un diámetro de calibre de conductor de aproximadamente 3.5894 mm. En el anexo 1 se encuentran los parámetros para la elección del calibre del conductor.

RESULTADOS DEL CALIBRE DEL CONDUCTOR		
	Diámetro	Calibre
Calibre Mínimo del Conductor:	13,30 mm	4/0

Tabla 11 Resultados del calibre del conductor

4.6 Cálculos de la resistencia de la malla

El cálculo de la resistencia de la malla de puesta a tierra es esencial para garantizar la seguridad eléctrica en instalaciones de la empresa INDAMI CIA. LTDA. Para el cálculo, se ha utilizado la fórmula:

$$Rg = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20 * A}} \left(1 + \frac{1}{h \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right]$$

donde Rg representa la resistencia de la malla. En este caso, ρ es la resistividad del terreno que tiene un valor de 30Ω , L_T es la longitud total de la malla con un valor de 63 metros, A es el área de la malla con $54 m^2$, y h es la profundidad de enterramiento de la malla en el suelo que tiene un valor de 0,4 metros. Estos valores y la fórmula se utilizan para determinar la resistencia de la malla de puesta a tierra de manera precisa, sustituyendo estos valores en la fórmula, se realiza el cálculo de la resistencia de la malla.

$$Rg = 30 \left[\frac{1}{63} + \frac{1}{\sqrt{20 * 54}} \left(1 + \frac{1}{0.4 \sqrt{\frac{20}{54}}} \right) \right]$$

$$Rg = 2,1232\Omega$$

El resultado obtenido es de aproximadamente 2.1232 ohmios. Este valor representa la resistencia de malla a tierra en esta configuración. Es crucial contar con una resistencia de malla adecuada para poder garantizar una gran seguridad de las instalaciones eléctricas y proteger a las personas y equipos de posibles descargas eléctricas.

En la figura 34, se presenta un cálculo detallado de la resistencia de la malla, donde la malla está representada gráficamente en el interior del recuadro. En esta imagen, se pueden observar los datos ingresados para el cálculo, que incluyen la resistividad del suelo, la longitud total de los conductores en la malla, el área de la malla y la profundidad de enterramiento. El resultado obtenido mediante este cálculo computarizado coincide con el cálculo manual previamente realizado, lo que valida la precisión del método de cálculo empleado para determinar la resistencia de la malla a tierra.

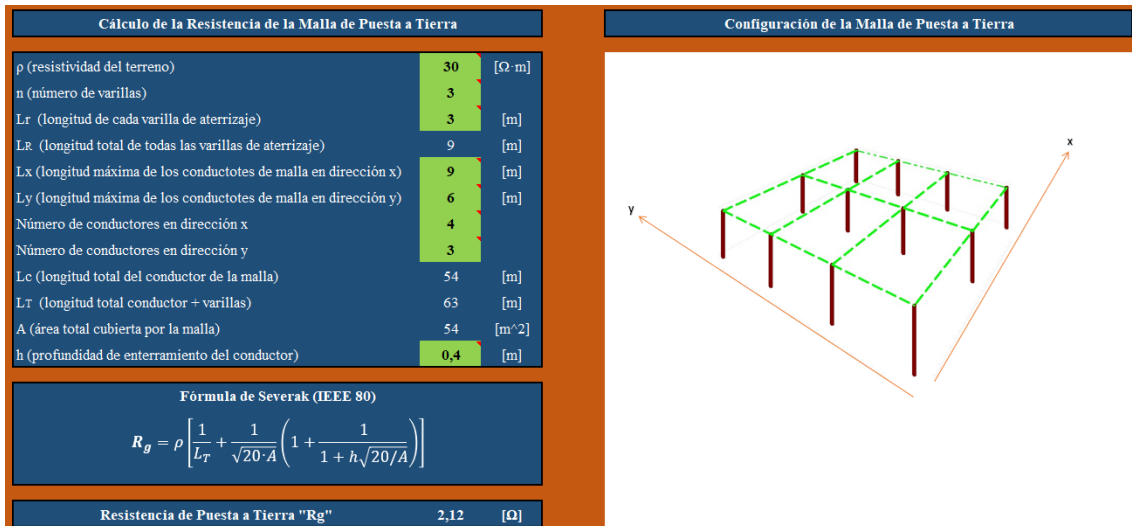


Figura 34 cálculo de la resistencia de la malla

4.7 Comprobación en ETAP

En el proceso de verificar la viabilidad de un sistema de puesta a tierra para la empresa INDAMI CIA. LTDA, se ha empleado un programa de modelado y simulación eléctrica, como el software ETAP. Mediante este programa, se ha logrado diseñar y optimizar la malla de puesta a tierra de manera precisa y eficiente. A continuación, se muestra la figura donde se visualiza la Malla en el programa.

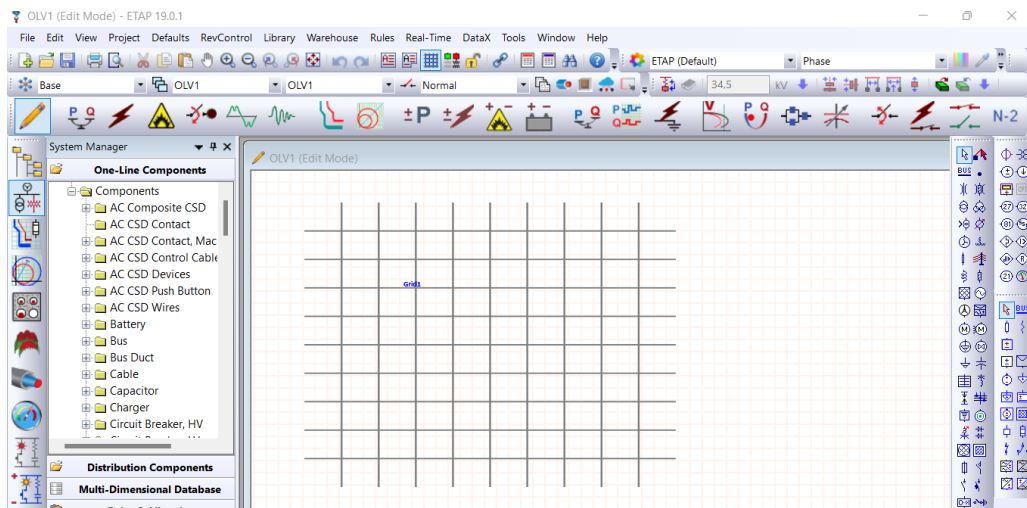


Figura 35 Programa en ETAP

La malla resultante se ha configurado considerando los datos de resistividad del terreno obtenidos en la revisión técnica y según las necesidades de la empresa.

IEEE Group Editor ×

Conductors | Rods |

<p>Grid Size</p> <p>Lx <input type="text" value="9"/> m</p> <p>Ly <input type="text" value="6"/> m</p>	<p># of Conductors</p> <p>X Direction <input type="text" value="3"/></p> <p>Y Direction <input type="text" value="4"/></p>	<p>Material Constants</p> <p>Conductivity <input type="text" value="100.0"/></p> <p>Alpha Factor <input type="text" value="0.00393"/></p> <p>Ko Factor <input type="text" value="234"/></p> <p>Fusing Temperature <input type="text" value="1083"/></p> <p>Resistivity @ 20 C <input type="text" value="1.72"/></p> <p>Thermal Capacity <input type="text" value="3.42"/></p>
<p>Conductors</p> <p>Depth <input type="text" value="0.4"/> m Size <input type="text" value="120"/> sq.mm</p> <p>Type <input type="text" value="Copper, annealed soft-drawn"/></p> <p>Cost <input type="text" value="10"/> \$/m</p>		

Figura 36 Configuración de la malla en ETAP

En la figura se visualiza la forma final que tendrá la malla teniendo en cuenta que el espacio donde se instalara es de 6x9 metros y que la distancia entre conductores para la malla es de 3 metros.

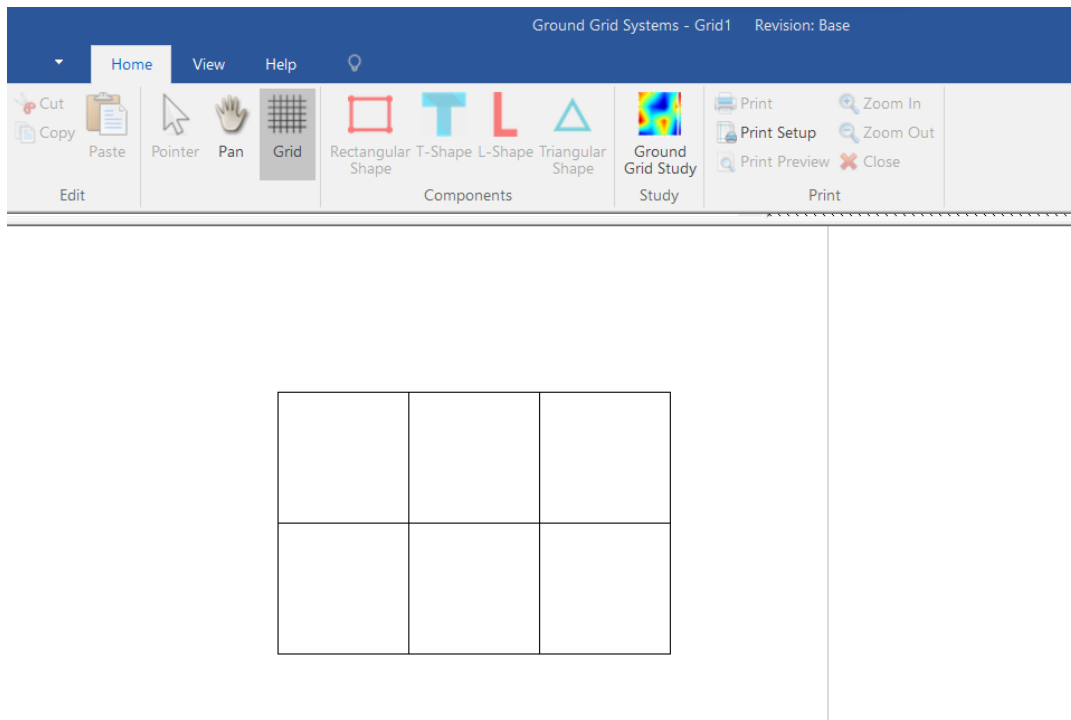


Figura 37 malla en 2D en ETAP

Esta malla ha sido visualizada en un entorno 3D, lo que proporciona una representación más realista de su disposición en el entorno de la subestación, además de mostrar el lugar onde se encuentran los electrodos.

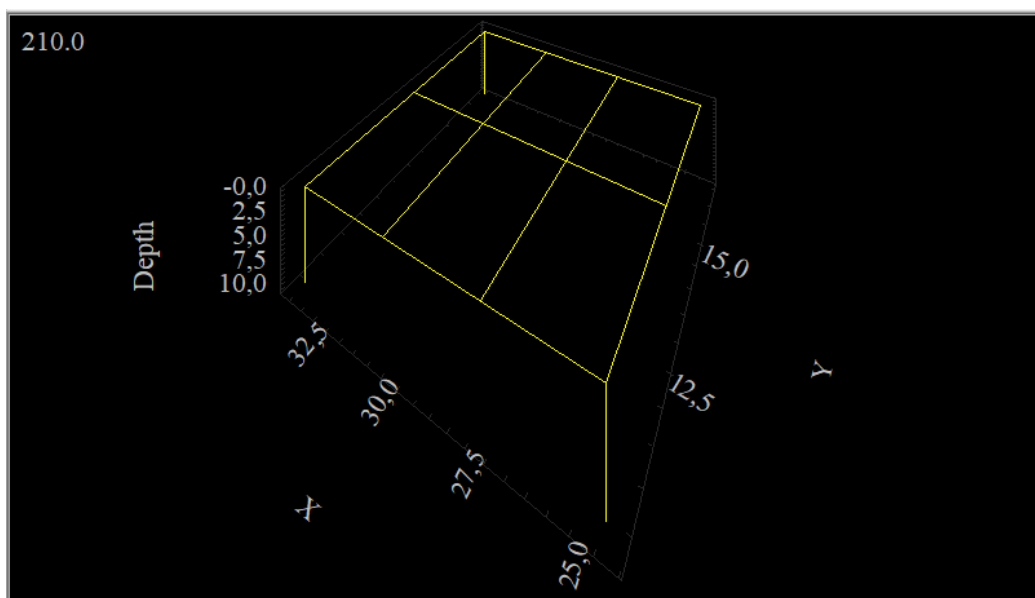


Figura 38 Malla en 3D en ETAP

El programa también permite la visualización detallada del terreno en el que se implementará la malla, para lo cual se usarán los datos medios de terreno para tener un resultado más certero en las zonas con menor desempeño.

The screenshot shows the 'Soil Editor' window with the 'Analysis' tab selected. The interface is divided into sections for defining soil layers. The top section is for the 'Surface Material', with a resistivity of 2500 ohm-m, material 'Clean limestone', and a depth of 0.4 m. Below this, there are radio buttons for 'User-Defined' (selected) and 'Calculated'. The 'Top Layer' is defined with a resistivity of 30, material 'Moist soil', and a depth of 5 m. The 'Lower Layer' is also defined with a resistivity of 30 and material 'Moist soil'. At the bottom, there are 'Help', 'OK', and 'Cancel' buttons.

Layer	Resistivity (ohm-m)	Material	Depth (m)
Surface Material	2500	Clean limestone	0.4
Top Layer	30	Moist soil	5
Lower Layer	30	Moist soil	-

Figura 39 Configuración del suelo

En la figura 40 se muestra el terreno por capas. Sin embargo, debido a los resultados de las mediciones y la profundidad se determinó que la resistividad equivalente del terreno tiene un valor de 30 ohmios por metro. Este parámetro es fundamental para calcular la distribución de corriente y el comportamiento de la malla de puesta a tierra en el terreno circundante.

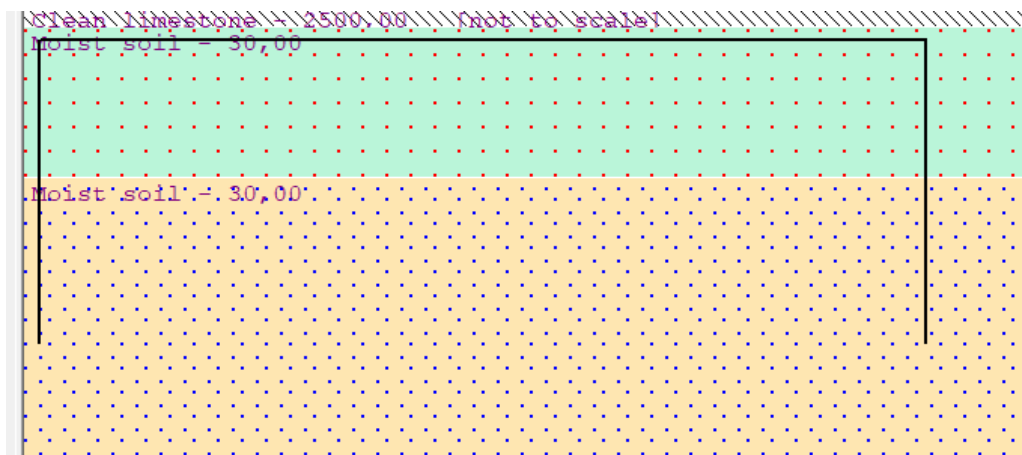


Figura 40 Terreno de estudio

Para ilustrar su funcionalidad, se ha realizado un caso de estudio de descarga eléctrica en el entorno simulado, lo que permite evaluar el comportamiento de la malla ante diversas condiciones de falla y validar su eficacia en la protección del sistema eléctrico en INDAMI CIA. LTDA.

Figura 41 Caso de estudio para la malla de puesta a tierra

El cual arroja los datos mostrados a continuación:



Figura 42 Resultados en ETAP

El resultado de los datos sugiere a que la implementación de la malla propuesta en este trabajo es adecuada para la empresa INDAMI CIA. LTDA y permitirá preservar estructuras, maquinarias y al personal contra sobretensiones.

Tensión de toque	65,58%
Tensión de paso	19,41%

Figura 43 Resultado de los voltajes de paso y de toque

Los valores de voltaje de toque y tensión de paso son tolerables

El uso del software ETAP ha facilitado el diseño y la evaluación de la malla de puesta a tierra de manera efectiva. Las visualizaciones en 3D, la consideración de datos de terreno y los casos de estudio han permitido asegurar que la malla propuesta es una solución adecuada para las necesidades de la empresa INDAMI CIA. LTDA, garantizando la seguridad y el correcto funcionamiento de su sistema eléctrico.

4.9 Tabla de Resultados de comparación con respecto a la corriente de cortocircuito

GRD1 Corriente de cortocircuito 5269 Apm.	Voltaje Tolerable	Voltaje calculado	GPR Voltios	RG ohm Resistencia de la malla
Toque	1270.8	1262	11075	2.023
Paso	4417.2	1684		
GRD2 Corriente de cortocircuito 5469 Apm.	Voltaje Tolerable	Voltaje calculado	GPR Voltios	RG ohm Resistencia de la malla
Toque	1270.8	780.1	6846.2	2.023
Paso	4417.2	1041		
GRD3 Corriente de cortocircuito 2500 Apm.	Voltaje Tolerable	Voltaje calculado	GPR Voltios	RG ohm Resistencia de la malla
Toque	1270.8	594.3	5215.9	2.023
Paso	4417.2	793.4		

Figura 44 Tabla de Resultados

GRD Analysis Alert View for GRD1

Summary and Alert

Result Summary

	Calculated Volts	Tolerable Volts
Touch	1262	1270.8
Step	1684.6	4417.2

GPR 11075 Volts Rg 2.023 Ohm

Alarm & Warnings

Close Help

GRD Analysis Alert View for GRD2

Summary and Alert

Result Summary

	Calculated Volts	Tolerable Volts
Touch	780.1	1270.8
Step	1041.4	4417.2

GPR 6846.2 Volts Rg 2.023 Ohm

Alarm & Warnings

Close Help

	Calculated Volts	Tolerable Volts
Touch	594.3	1270.8
Step	793.4	4417.2

GPR 5215.9 Volts Rg 2.023 Ohm

Los resultados basados en la norma IEEE 80-200 en la cual hemos realizados tres diferentes análisis para ver el comportamiento del diseño de malla a Tierra en la cual logramos demostrar los parámetros, tales como tensión de contacto y de paso y resistencia, son suficientes para el diseño con efectividad de la malla a tierra.

CONCLUSIONES

La adquisición de los datos de diseño a partir de las características de demanda de la fábrica ha permitido construir una base sólida de información. La elaboración detallada de una tabla con estos datos proporciona una visión general de las necesidades eléctricas de la instalación. Este proceso ha sido esencial para definir de manera precisa los parámetros de diseño y garantizar que la estrategia de puesta a tierra se adapte de manera efectiva a las demandas de la fábrica.

La realización del cálculo de la malla de puesta a tierra ha resultado en la determinación de un modelo sólido y adecuado para la instalación. La evaluación de diferentes configuraciones y tipos de modelos ha permitido seleccionar la opción óptima que cumple con los requisitos operacionales y normativas vigentes. Y esto se ha traducido en la creación de una solución de puesta a tierra robusta y eficaz que proporciona una conexión segura y confiable a tierra, garantizando la protección de personas y equipos eléctricos.

La simulación detallada del sistema a tierra en el software ETAP ha brindado una visión completa de su funcionamiento. La capacidad de simular diferentes escenarios operativos y de falla ha proporcionado información valiosa sobre cómo la malla responderá en diversas situaciones. La simulación ha confirmado la efectividad y eficiencia de la estrategia de puesta a tierra diseñada, asegurando la adecuación de la malla para mantener la seguridad eléctrica y la operatividad en la fábrica. La visualización en 3D y los resultados cuantitativos obtenidos de la simulación han brindado una confianza adicional en la solución implementada.

RECOMENDACIONES

Para adquirir los datos de diseño de manera efectiva, se recomienda realizar una colaboración estrecha con los departamentos de la fábrica, como ingeniería eléctrica y operaciones. Esto asegurará la obtención de datos precisos y actualizados sobre la demanda eléctrica de la instalación. Además, es importante establecer un proceso de recopilación y documentación de datos, lo que facilitará la creación de una tabla de información coherente y confiable.

Considerar diferentes escenarios de falla y variaciones en las condiciones de operación. Esto permitirá identificar posibles puntos críticos en la malla y ajustar la configuración de acuerdo con las necesidades. Además, se sugiere consultar las normativas y estándares vigentes en profundidad para asegurarse de que la malla cumple con los requisitos de seguridad y operacionales establecidos.

Utilizar datos detallados y precisos de resistividad del terreno. Realizar simulaciones en diferentes condiciones operativas, como variaciones de carga y fallas, proporcionará una visión más completa de cómo el sistema responderá en situaciones reales. Es importante asegurarse de que los parámetros de simulación se ajusten a la realidad y reflejen con precisión las características del sistema de puesta a tierra.

REFERENCIAS

- [1] G. V. Chicaiza Casa y H. F. Pérez Cañizares, «Evaluación y rediseño de instalaciones eléctricas del campus de la Universidad Central del Ecuador considerando criterios de eficiencia energética y generación fotovoltaica para autoabastecimiento», jun. 2020, Accedido: 1 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20984>
- [2] J. F. Correa Lagos y 21131513459, «Análisis y diseño de sistemas de puesta a tierra y sistema integrado de protección contra rayos para subestación de 34,5 kV del Municipio de Guacamayas.», *instname: Universidad Antonio Nariño*, n.º February, pp. 1-226, 2022, doi: 10.1109/IEEESTD.2015.7109078.
- [3] C. Gutiérrez, «Análisis de los efectos de las corrientes de falla en sistemas de puesta a tierra del operador de red en usuarios cercanos de las redes de distribución de la empresa centrales eléctricas de Norte de Santander S.A. E.S.P. Ubicados en el barrio los caracole», Universidad de Pamplona, Cúcuta, 2020.
- [4] C. De *et al.*, «Dimensionamiento de la malla de puesta a tierra para los laboratorios de alto voltaje de la universidad técnica de Cotopaxi.», 2019, Accedido: 1 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/5591>
- [5] C. J. Changoluisa Chacha y D. P. Monga Sánchez, «Análisis del sistema de puesta a tierra y apantallamiento eléctrico, mediante modelamiento en software para garantizar el funcionamiento y desempeño de las instalaciones, considerando una futura expansión en la central de generación “GASGREEN S.A.”, ubicada en el relleno sanitario del Distrito Metropolitano de Quito.», 2021, Accedido: 1 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/7798>
- [6] R. Salazar, D. Monga, C. Changoluisa, D. Jiménez, y X. Proaño, «Determinación de los parámetros de un sistema de puesta a tierra y apantallamiento eléctrico planteando un caso de expansión en una central de generación distribuida», *Revista Técnica «energía»*, vol. 19, n.º 1, pp. 34-41, jul. 2022, doi: 10.37116/REVISTAENERGIA.V19.N1.2022.514.

- [7] A. E. Del Sistema Eléctrico Baja Tensión, «Análisis del sistema eléctrico en baja tensión (BT) de la Universidad Politécnica Salesiana Campus Sur usando la captura de datos en campo para mejorar la eficiencia energética», 2020, Accedido: 1 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/19249>
- [8] G. Quendi Magaly Milena, «Reconfiguración del sistema de puesta a tierra del edificio de carrera de electricidad», oct. 2021, Accedido: 1 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/11565>
- [9] N. R. Hercilla Huapaya, «Diseño Asistido Por Software En Un Sistema Puesta A Tierra Para Una Subestación En Pachacamac De 10000 Kva», 2021, Accedido: 1 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.untels.edu.pe/jspui/handle/123456789/605>
- [10] L. A. Castro Maco, «Diseño de un sistema de puesta a tierra para mejorar las condiciones de operación del área de Cancha de Materiales, CPSAA», *Repositorio Institucional - UCV*, 2020, Accedido: 1 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/56705>
- [11] P. S. Garay Córdova y C. M. Toledo Illescas, «Análisis de normativa de puesta a tierra para sistemas fotovoltaicos», 2023. Accedido: 1 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/24679>
- [12] J. Samuel y R. Castaño, «SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA: Diseñado con IEEE-80 y evaluado con MEF», 2010.
- [13] «¿Cuál es el objetivo de un sistema de puesta a tierra? – Cable Norte Bolivia SRL». <https://cablenortesrl.com/cual-es-el-objetivo-de-un-sistema-de-puesta-a-tierra/> (accedido 1 de septiembre de 2023).
- [14] «Mantenimiento de Puesta a Tierra». <https://www.gpgenergia.com/mantenimiento-de-puesta-a-tierra/> (accedido 1 de septiembre de 2023).
- [15] B. Abdelkader, Z. Boubakeur, S. Tahar, y S. Yahia, «Implementation and design of grounding systems using COMSOL multiphysics», *CCSSP 2020 - 1st International Conference on Communications, Control Systems and Signal Processing*, pp. 513-517, may 2020, doi: 10.1109/CCSSP49278.2020.9151798.

- [16] D. R. Hincapie, J. Alejandro, y Á. Palomino, «Diseño e instalación de redes internas, iluminación, sistemas de puesta a tierra y apantallamiento en instalaciones eléctricas de media y baja tensión», 2023, Accedido: 1 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/34809>
- [17] D. Pezo López y J. C. Paredes Tananta, «Influencia del sistema de puesta a tierra en la descarga eléctrica de la Institución Educativa Juanita del Carmen Sánchez Rojas de Tarapoto, 2019», *Universidad César Vallejo*, 2019, Accedido: 1 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/2961979>
- [18] C. Hernández, R. Pineda, y O. Valencia, «Diseño de subsistemas de transmisión y puesta a tierra de una estación de radiodifusión comunitaria y simulación de su área de cobertura», 2019, Accedido: 1 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.uca.edu.sv/jspui/handle/11674/6087>
- [19] N. R. Hercilla Huapaya, «Diseño Asistido Por Software En Un Sistema Puesta A Tierra Para Una Subestación En Pachacamac De 10000 Kva», 2021, Accedido: 24 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.untels.edu.pe/jspui/handle/123456789/605>
- [20] R. DE Del Sistema Puesta A Tierra Del Edificio De Carrera De Electricidad y G. Quendi Magaly Milena, «Reconfiguración del sistema de puesta a tierra del edificio de carrera de electricidad», oct. 2021, Accedido: 24 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/11565>
- [21] A. Díaz Martínez, «Diseño de sistema de puesta a tierra para la nave de fundición de una empresa siderúrgica con hornos de arco eléctrico trifásico», *Exploraciones, intercambios y relaciones entre el diseño y la tecnología*, pp. 57-79, 2022, doi: 10.16/CSS/JQUERY.DATATABLES.MIN.CSS.
- [22] «Mallas a Tierra». <https://knexpress.cl/2019/02/06/mallas-a-tierra/> (accedido 24 de mayo de 2023).
- [23] Rodríguez-Serna, Johnatan M, W. M. Villa-Acevedo, J. A. Valencia, y Á. Jaramillo, «Cálculo de los parámetros del modelo del suelo de dos capas para sistemas de puesta a tierra utilizando Python Calculation of the Two-Layer Soil Parameters for

- Grounding systems using Python», Accedido: 1 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.revistaespacios.com>
- [24] «Granulometría, consistencia y sedimentación – ¿qué se necesita conocer para obtener los mejores resultados en la compactación? » Dynapac - Blog Dynapac». http://dynapac.blog/latinoamerica/manual_compactador-pavimentacion-fresado/granulometria-consistencia-y-sedimentacion-que-se-necesita-conocer-para-obtener-los-mejores-resultados-en-la-compactacion/?lang=ar (accedido 1 de septiembre de 2023).
- [25] «DET4TC2, DET4TCR2, DET4TD2 y DET4TR2 | Comprobadores Digitales de Resistencia de Tierras». <https://csa.megger.com/comprobadores-digitales-de-resistencia-de-tierras-det4tc2,-det4tcr2,-det4td2-y-det4tr2> (accedido 1 de septiembre de 2023).
- [26] «Medición de puesta a tierra ¿Cómo se realiza? - Para Rayos». <https://www.para-rayos.com/medicion-de-puesta-a-tierra/> (accedido 24 de mayo de 2023).
- [27] «Métodos de comprobación de puesta a tierra con Fluke». <https://www.risoul.com.mx/blog/metodos-de-comprobacion-de-puesta-a-tierra-con-fluke> (accedido 24 de mayo de 2023).
- [28] «Datasheet for Fluke 1623-2-KIT». <https://www.onlinecomponents.com/en/datasheet/16232kit-46963006/> (accedido 28 de mayo de 2023).
- [29] «Kit del comprobador de puesta a tierra 1623-2 GEO de Fluke | Fluke». <https://www.fluke.com/es-mx/producto/comprobacion-electrica/conexion-a-tierra/fluke-1623-2-kit> (accedido 28 de mayo de 2023).
- [30] J. F. Correa Lagos y 21131513459, «Análisis y diseño de sistemas de puesta a tierra y sistema integrado de protección contra rayos para subestación de 34,5 kV del Municipio de Guacamayas.», *instname:Universidad Antonio Nariño*, n.º February, pp. 1-226, 2022, doi: 10.1109/IEEESTD.2015.7109078.
- [31] «ETAP | Software de Modelado, Análisis y Optimización de Sistemas de Potencia». <https://etap.com/es> (accedido 24 de mayo de 2023).

- [32] M. C. Fernández, M. V. Llanes, Y. G. Benitez, y Y. R. González, «Puesta a tierra en viviendas con sistema solar fotovoltaico como alternativa de generación de electricidad: Grounding of homes with solar photovoltaic system as an alternative for electricity generation», *Ingeniería Energética*, vol. 44, n.º 2, p. 10, jul. 2023, Accedido: 1 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/article/view/856>

ANEXOS

Sección Transversal	Temperatura nominal del conductor						Calibre
	60°C	75°C	90°C	60°C	75°C	90°C	
	Tipo S, TW, UF	Tipos FEPW*, RH*, RHW*, THHW*, THW*, THWN*, XHHW*, USE*, ZW*	Tipos TBS, SA, SIS, FEP*, FEPB*, MI, RHH*, RHW-2, THHN*, THHW*, THW-2*, THWN-2*, USE-E, XHH, XHHW*, XHHW-2, ZW-2	Tipos TW*, UF*	Tipos RH*, RHW*, THHW*, THW*, THWN*, XHHW*, USE*	Tipos TBS, SA, SIS, THHN*, THW-2, RHH*, RHW-2, USE-2, XHH, XHHW, XHHW-2, ZW-2	
mm2	COBRE			ALUMINIO O ALUMINIO RECUBIERTO DE COBRE			AWG o kcmils
0,82	....	....	14	....	....	....	18
1,31	....	....	18	....	....	....	16
2,08	20*	20*	25	....	....	....	14
3,3	25*	25*	30*	20*	20*	25*	12
5,25	30	35*	40*	25	30*	35*	10
8,36	40	50	55	30	40	45	8
13,29	55	65	75	40	50	60	6
21,14	70	85	95	55	65	75	4
26,66	85	100	110	65	75	85	3
33,62	95	115	130	75	90	100	2
42,2	110	130	150	85	100	115	1
53,5	125	150	170	100	120	135	1/0
67,44	145	175	195	115	135	150	2/0
85,02	165	200	225	130	155	175	3/0
107,21	195	230	260	150	180	205	4/0
126,67	215	255	290	170	205	230	250
152,01	240	285	320	190	2530	255	300
177,34	260	310	350	210	250	280	350
202,68	280	335	380	225	270	305	400
253,35	320	380	430	260	310	350	500

ANEXO 1 Parámetros para la selección del conductor



ANEXO 2 Mediciones de resistividad del terreno



ANEXO 3 Medicion de exploración con el electrodo



ANEXO 4 Mediciones en diferentes puntos del terreno

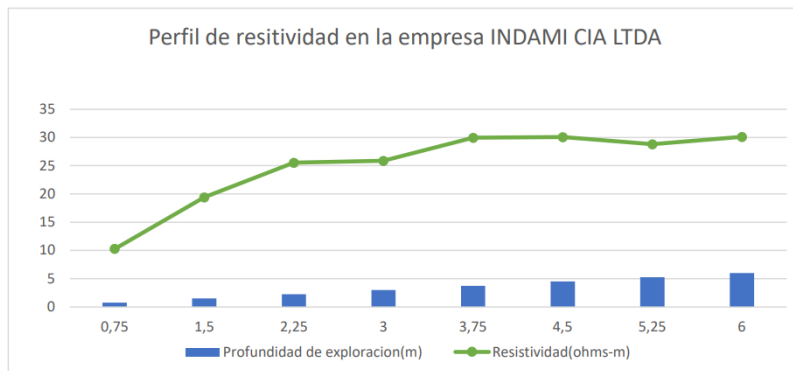
Universidad politecnica salesiana	formato fot 0.14
Integrantes:	
Elder luna	
Franklin beltran	
Empresa: INDAMI CIA LTDA	

Equipo:
1625-2 GEO de FLUKE
Temperatura: 35°C

Sentido de la medicion	Profundidad de exploracion(m)	Separacion de los electrodos(m)	Corriente de prueba(mA)	Escala de medicion(ohms)	Resistencia medida(ohms)	Resistividad(ohms-m)
	0,75	1	2	20	16,38	10,2918816
	1,5	2	2	20	15,45	19,415088
	2,25	3	2	20	13,54	25,5223584
N-S	3	4	2	20	10,3	25,886784
	3,75	5	2	20	9,53	29,939448
	4,5	6	2	20	7,974	30,06134208
	5,25	7	2	20	6,55	28,808472
	6	8	2	20	5,99	30,1090944

Sentido de la medicion	Profundidad de exploracion(m)	Separacion de los electrodos(m)	Corriente de prueba(mA)	Escala de medicion(ohms)	Resistencia medida(ohms)	Resistividad(ohms-m)
	0,75	1	2	20	18,21	11,4417072
	1,5	2	2	20	16,25	20,4204
	2,25	3	2	20	13,66	25,7485536
E-S	3	4	2	20	10,43	26,2135104
	3,75	5	2	20	9,62	30,222192
	4,5	6	2	20	8,66	32,6475072
	5,25	7	2	20	7,59	33,3826416
	6	8	2	20	5,99	30,1090944

Valores promedio	
profundidad de exploracion	ohms *mts
0,75	10,8667944
1,5	19,917744
2,25	25,635456
3	26,0501472
3,75	30,08082
4,5	31,35442464
5,25	31,0955568
6	30,1090944



ANEXO 5 Perfil de resistividad en la empresa INDAMICIA LTDA