



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL
CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**DISEÑO NUEVO DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA PARA MEJORAR LAS
CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA SUBESTACIÓN CARTORAMA A 69KV**

Trabajo de titulación previo a la obtención del

Título de Ingeniero Eléctrico

AUTORES: LUIS GIOVANNI SUCUNOTA GIA
GABRIEL ALEJANDRO INTRIAGO MONSERRATE

TUTOR: ING. GARY OMAR AMPUÑO AVILÉS MSC.

Guayaquil – Ecuador

2023

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Luis Giovanni Sucunota Gia con documento de identificación No 0706686375 y Gabriel Alejandro Intriago Monserrate con documento de identificación No 0951815125 manifestamos que:

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

Guayaquil, 1 de septiembre del año 2023

Atentamente,



Luis Giovanni Sucunota Gia

0706686375



Gabriel Alejandro Intriago Monserrate

0951815125

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

Nosotros, Luis Giovanni Sucunota Gia con documento de identificación No 0706686375 y Gabriel Alejandro Intriago Monserrate con documento de identificación No 0951815125, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de lo que somos autores del: “Diseño nuevo de un sistema de puesta a tierra para mejorar las condiciones de operación de la subestación Cartorama a 69kV”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Guayaquil, 1 de septiembre del año 2023

Atentamente,



Luis Giovanni Sucunota Gia

0706686375



Gabriel Alejandro Intriago Monserrate


0951815125

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Gary Omar Ampuño Avilés con documento de identificación No 0922639752, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “Diseño nuevo de un sistema de puesta a tierra para mejorar las condiciones de operación de la subestación Cartorama a 69kV”, realizado por Luis Giovanni Sucunota Gia con documento de identificación No 0706686375 y Gabriel Alejandro Intriago Monserrate con documento de identificación No 0951815125, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Tesis que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana:

Guayaquil, 1 de septiembre del año 2023

Atentamente:



Ing. Gary Ampuño Avilés, MSc
0922639752

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTO

Antes que nada, Agradezco a Dios y a mi familia por estar siempre presentes, por creer en mí y por brindarme el apoyo emocional y económico que necesitaba para seguir adelante en este desafío. Han sido un pilar fundamental en este camino lleno de muchos retos y aprendizajes. Agradezco a mi madre Lorena Monserrate, a mi padre Javier Intriago y a mi (mamibita) Alba Escudero por todo su apoyo en esta carrera universitaria, Por haberme inculcado el estudio desde niño.

Gabriel Alejandro Intriago Monserrate

Dedicatoria: "A mis padres, por su amor inquebrantable, apoyo constante y sacrificio incansable a lo largo de mi carrera académica. Este logro es suyo tanto como mío.

"Agradecimiento: "Quiero expresar mi profunda gratitud al Ing. Gary Ampuño, cuya orientación experta, paciencia y dedicación fueron fundamentales para la realización de esta tesis. También agradezco a mis amigos y compañeros de clase por su apoyo moral y colaboración en momentos de desafío. No puedo pasar por alto el apoyo financiero proporcionado por mi hermana Jacqueline Sucunota. Sus fondos hicieron posible llevar a cabo esta investigación. Agradezco sinceramente a todos los participantes en mi estudio por su tiempo y contribuciones valiosas, sin las cuales este trabajo no sería posible. Por último, dedico este trabajo a la memoria de mi abuelo Luis Gía.

Luis Giovanni Sucunota Gia

RESUMEN

La evaluación y diseño mejorado de la malla de puesta a tierra de la subestación Cartorama C. A. con una tensión de 69 kV es esencial para garantizar la seguridad y el correcto funcionamiento de la infraestructura eléctrica. La malla de puesta a tierra consiste en un sistema de conexiones metálicas que proporciona un camino seguro para la descarga de corrientes de falla y protege tanto a las personas como a los equipos de posibles descargas eléctricas.

En el caso específico de la subestación Cartorama C. A., es necesario llevar a cabo una evaluación minuciosa y un diseño mejorado de la malla de puesta a tierra, teniendo en cuenta los requisitos de seguridad y las normativas vigentes. Esto implicó el haber realizado un análisis detallado de las características del terreno, las corrientes de falla esperadas y las condiciones de operación de la subestación.

Para el proceso de evaluación de la malla de puesta a tierra se midió la resistividad del terreno y así determinamos su resistencia eléctrica. También se calculó la resistencia de puesta a tierra necesaria para disipar la corriente de falla de forma segura. Además, se consideraron factores como la dispersión de corriente, la distribución de potencia y la protección contra sobretensiones.

Habiendo finalizado la evaluación, se realizó un nuevo diseño de la malla puesta a tierra. Para este proceso se tomó en cuenta las medidas del terreno que en este caso fueron de $81m^2$ en este diseño planteado se lograron temperaturas ambientes de $35^{\circ}C$ con una resistividad de $30\Omega * m$.

Palabras clave: Normativas, Puesta a tierra, Seguridad eléctrica, Protección, Descargas eléctricas.

ABSTRACT

The evaluation and improved design of the grounding mesh of the Cartorama C. A. substation with a voltage of 69 kV is essential to guarantee the safety and correct operation of the electrical infrastructure. The grounding mesh consists of a system of metallic connections that provides a safe path for the discharge of fault currents and protects both people and equipment from possible electric shocks.

In the specific case of the Cartorama C. A. substation, it is necessary to carry out a thorough evaluation and an improved design of the grounding grid, taking into account the safety requirements and current regulations. This implied having carried out a detailed analysis of the characteristics of the terrain, the expected fault currents and the operating conditions of the substation.

For the evaluation process of the grounding mesh, it was implied to measure the resistivity of the ground and thus we determined its electrical resistance. The grounding resistance needed to safely dissipate the fault current was also calculated. In addition, factors such as current dispersion, power distribution, and surge protection were considered.

Having completed the evaluation, a new design of the grounding mesh was made. For this process, the measurements of the terrain were taken into account, which in this case were $81m^2$ in this proposed design, ambient temperatures of $35^{\circ}C$ were achieved with a resistivity of $30\Omega * m$

Keywords: Grounding regulations, Electrical safety, Protection against electric shocks.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	II
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA	III
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	IV
DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTO	V
RESUMEN.....	VI
ABSTRACT	VII
ÍNDICE DE CONTENIDO	VIII
CAPÍTULO 1	1
1. Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Importancia y alcances	2
1.3 Delimitación	4
1.4 Objetivos	8
1.4.1 Objetivo general	8
1.4.2 Objetivos específicos	8
CAPÍTULO 2	9
2. Revisión de literatura o fundamentos teóricos	9
2.1 Tipos de tierra	11
2.2 Tierra natural o tierra física	11
2.3 Tipos de electrodos de tierra	12
2.3.1 Electrodos de varilla	12
2.3.2 Electrodos de placa	13
2.3.3 Electrodos de anillo	13
2.3.4 Electrodos de malla	14
2.3.5 Electrodos químicos	14
2.3.6 Electrodos de pozo	15
2.4 Líneas de enlace con el electrodo	15
2.5 Material de los cables	15
2.6 Tamaño y sección transversal	15

2.7 Conexiones	15
2.8 Rutas de cableado.....	15
2.9 Longitud del cableado	16
2.10 Mantenimiento.....	16
2.11 Compatibilidad con normativas	16
2.12 Funciones del electrodo a tierra	16
2.13 Descarga de corriente de falla	16
2.14 Protección contra sobretensiones	16
2.15 Mantenimiento del potencial equivalente.....	17
2.16 Mejora de la eficiencia del sistema.....	17
2.17 Cumplimiento de normativas y regulaciones	17
2.18 Protección de personas y propiedades	17
2.19 Mitigación de interferencias electromagnéticas.....	17
2.20 Varilla de tierra.....	17
2.21 Resistividad eléctrica.....	19
2.22 Variación con el material	21
2.23 Dependencia de la temperatura	21
2.24 Aplicaciones prácticas	21
2.25 Influencia en la puesta a tierra.....	21
2.26 Mediciones de resistividad	21
2.27 Normativas y regulaciones para la instalación de sistemas de puesta a tierra	21
2.27.1 Norma internacional iec 60364.....	22
2.27.2 Normas de seguridad eléctrica de ieee.....	22
2.27.3 Regulaciones y códigos eléctricos nacionales	22
2.27.4 Normas iso y nacionales	22
2.28 Evaluación del riesgo y cumplimiento local	22
CAPÍTULO 3	22
3. MARCO METODOLÓGICO	22
3.1 Técnicas de recopilación de datos	23
3.1.1 Revisión bibliográfica.....	23
3.1.2 Recopilación de datos.....	23
3.1.3 Análisis de datos.....	23
3.1.4 Metodología de la investigación	23
3.1.5 Evaluación del rendimiento actual.....	24

3.2 Definición de objetivos	24
3.3 recopilación de información	28
3.3 Planificación de pruebas	31
3.4 Mediciones de Resistencia	33
3.5 Inspección visual	35
3.6 Pruebas de integridad	36
3.7 Análisis de resultados	38
3.8 Identificación de mejoras	40
3.9 Implementación de mejoras	41
3.10 Pruebas de validación	43
3.11 Documentación	46
3.12 Diseño mejorado de la malla de puesta a tierra	48
3.13 Simulación y análisis	50
3.14 Implementación y pruebas	52
3.15 Evaluación y ajustes adicionales	54
3.16 Planificación detallada	54
CAPÍTULO 4	57
4. Diseño y cálculo de la malla de puesta a tierra	57
4.1 Mediciones de terreno	57
4.2 Situaciones actuales puesta a tierra existente	60
4.3 Configuraciones de la malla en el software	63
4.4 Configuración del suelo en base a las mediciones	65
4.5 Resultado de malla 1	66
4.6 Implementación de la propuesta	67
4.7 Visualización en 3D	68
4.8 Tierra	68
4.9 Configuraciones	69
4.10 Resultados obtenidos con la simulación propuesta	71
4.11 Datos para estudio	72
CONCLUSIONES	74
RECOMENDACIONES	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Delimitación espacial. Fuente: Autores.....	4
Tabla 2.- Valores de medición de resistividad del suelo.....	58
Tabla 3.- Parámetros actuales de la puesta a tierra.....	61
Tabla 4. Mediciones de la simulación.	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Incendio registrado en la empresa Cartorama C. A.	3
Figura 2.- Imprenta cuatro colores.	4
Figura 3.- Ubicación de la empresa Cartorama C. A.....	5
Figura 4.- Proceso de bobinas de papel.....	6
Figura 5.- Logo Cartorama C. A.....	6
Figura 6.- Subestación de la empresa Cartorama C.A.....	7
Figura 7.- Subestación de la Empresa Cartorama C. A.	7
Figura 8.- Prensa Jumbo Roll Press.....	11
Figura 9.- electrodos de varilla de cobre.	12
Figura 10.- Electrodo de placa.	13
Figura 11.- Electrodo de anillo.	14
Figura 12.- Electrodo de malla.	14
Figura 13.- Posición correcta varilla de cobre.....	18
Figura 14.- Varillas de cobre 5/8”.....	19
Figura 15.- . Resistencia eléctrica según el tipo y la forma del conductor.	20
Figura 16.- Circulación de las corrientes de toque y paso.....	26

Figura 17. Circulación de las corrientes de toque y paso.	26
Figura 18.- Inspección de los puntos de conexiones de puesta a tierra.	27
Figura 19.- Medición en campo.	29
Figura 20.- Medición de tensiones de torque y paso.	31
Figura 21.- Pinzas amperimétricas de puesta a tierra UT276A/UT278A.....	34
Figura 22.- Medición de resistencia en puntos de conexiones de puesta a tierra.	37
Figura 23.- Verificación de condiciones ambientales.....	44
Figura 24.- Comprobación de equipos de medición.....	46
Figura 25.- Inspección de cajas de paso.	47
Figura 26.- Prueba de funcionamiento de los equipos de medición.....	48
Figura 27.- Transformador reductor de 69 kW a 13.8 kW.....	58
Figura 28.- Esquema puesta a tierra actual.....	60
Figura 29.- Representación actual sistema puesta a tierra.....	62
Figura 30.- Modelado 3D puesta a tierra.....	63
Figura 31.- Configuración de diseño.....	64
Figura 32.- Configuración de diseño.....	64
Figura 33.- Esquema de suelo para mediciones.	66
Figura 34- Resultados diagrama digital.....	67
Figura 35.- Plano propuesta.....	68
Figura 36.- Plano 2 de la propuesta.	68
Figura 37.-Esquema malla puesta a tierra propuesta.....	68
Figura 38.- Configuración propuesta.....	70
Figura 39- Configuración propuesta.....	70
Figura 40.- Resultados de la simulación.....	72
Figura 41.- Configuración circuito equivalente.....	73

CAPÍTULO 1

1. Introducción

Generalmente en las subestaciones de empresas como Cartorama C. A., se busca el crecimiento de la empresa, con maquinarias nuevas y modernas. Es por esta razón que se necesita el constante mejoramiento de puesta a tierra, con el fin de prevenir diversos accidentes y fallas que pueda alterar sus funciones, estas evaluaciones ayudan a plantear mejoras, mantenimientos, entre otros. Además de cumplir con los requisitos de seguridad y las normativas vigentes, asegurando así una puesta a tierra efectiva y protegiendo tanto a las personas como a los equipos de posibles riesgos eléctricos.

Uno de estos riesgos eléctricos son las sobretensiones, estas son básicamente un aumento de voltaje con un corto tiempo de duración, usualmente sucede entre dos conductores o entre un conductor y la puesta a tierra, pueden ser causadas por condiciones atmosféricas como son los rayos o también por averías en equipos primarios como conductores, además de algún cortocircuito.

El trabajo presentado en el primer capítulo muestra los antecedentes y la problemática que presenta actualmente la malla a tierra de la subestación de 69 kV de Cartorama C. A. En el capítulo dos se muestra la teoría esencial sobre los fenómenos que ocurren en las mallas a tierra.

En el capítulo tres se muestra la metodología. En la cual se busca mejorar el sistema de puesta a tierra de sobretensiones por rayos, existe la probabilidad que se produzca sobretensiones en algún equipo por descarga eléctrica de algún rayo, porque la puesta a tierra no tiene mucha equipotencialidad.

En el capítulo cuatro se muestran los resultados y discusión. Y al final las conclusiones del trabajo.

1.1 Antecedentes

En una empresa cartonera al igual que en la mayoría de las empresas de fabricación se enfrentan muchos riesgos eléctricos significativos, motivo por el que se amerita tomar las precauciones adecuadas. En el caso de Cartorama C. A. en un análisis preliminar se detectaron valores del voltaje que excede la tolerancia de su malla actual, por el momento

se ha detectado ciertas sobretensiones provocadas por posibles cortocircuitos. En estos casos se empleaba directamente el cambio del equipo averiado. Al realizar su respectiva reparación funciona por un tiempo más, pero, esta no presenta una solución a la inminente falla que presenta debido a una configuración de puesta a tierra con falencias.

1.2 Importancia y alcances

El proyecto establecido se rige más por el ámbito industrial ya que son sectores privados y para ellos garantizar la seguridad como empresa su imagen y reputación es tomada en cuenta a nivel nacional.

Se basa en sistemas de protección, en este caso es el mallado o puesta a tierra, el cual nos brinda una correcta distribución de la corriente eléctrica y reducir fallas en el sistema eléctrico. La importancia de este punto reside en varios ejes como los presentados a continuación.

- La seguridad de personas y equipos ante descargas eléctricas y riesgo de electrocución en caso de fallas o mal funcionamiento.
- La Protección contra sobretensiones para disipar los picos de voltaje, evitando daños a los equipos y asegurando un funcionamiento estable de los sistemas eléctricos y electrónicos. Esto es especialmente importante en sectores donde las tormentas eléctricas son comunes.
- El Cumplimiento de regulaciones y normativas industriales que exigen sistemas de puesta a tierra adecuados para garantizar la seguridad y el buen funcionamiento de equipos y sistemas. Cumplir con estas normativas es esencial para evitar multas y problemas legales.
- La prevención de incendios por la ausencia de una conexión a tierra óptima que pueden dar lugar a calentamiento excesivo y chispas en equipos eléctricos y electrónicos; si esto ocurre cerca de la materia prima de esta empresa que es de fácil combustión puede comenzar un conato de incendio. Como el incendio que se registró en la empresa Cartorama C. A. en 2012 Figura 1.



Figura 1.- Incendio registrado en la empresa Cartorama C. A.

- El mantenimiento adecuado proporciona una referencia estable para medir y diagnosticar problemas en los equipos a corto plazo. Esto ayuda a localizar y solucionar fallos de manera más eficiente.
- Prevención de daños a la electrónica sensibles como dispositivos médicos, equipos de laboratorio y sistemas de telecomunicaciones, que son susceptibles a daños por descargas electrostáticas y fluctuaciones de voltaje. Un sistema puesto a tierra óptimo minimiza estos riesgos. En la figura 2 se muestra uno de los equipos de Cartorama C. A. que puede verse afectado en su electrónica por deficiencias en las mallas a tierra.
-



Figura 2.- Imprenta cuatro colores.

Fuente: Cartorama C. A.

1.3 Delimitación

El proyecto se enfoca en la revisión de la infraestructura existente en la subestación de la empresa Cartorama C. A. Con la evaluación de campo realizaron e identificaron las deficiencias; y con esto, gestiono las mejoras correspondientes, con el fin de asegurar el cumplimiento de los estándares de seguridad óptimos para su funcionamiento. Estas regulaciones pueden variar debido a las necesidades de la empresa.

La información de la empresa en donde realizo las investigaciones y las pruebas de los sistemas de puesta a tierra se detallan en la tabla 1. En la figura 3 es presentada la ubicación de la empresa y en la figura 4 es representado el proceso de la fabricación de cartón. En las figuras 6 y 7 de los autores presentan las instalaciones de la subestación de la empresa Cartorama C. A.

Nombre de la empresa	Cartorama C. A.
Dirección de la empresa	Km. 14 Vía a Daule, Calle 27 No &, Guayaquil - Ecuador 090707
Ocupación de la empresa	Fabricación de productos de derivados forestales y de papel.

Tabla 1.- Delimitación espacial. Fuente: Autores

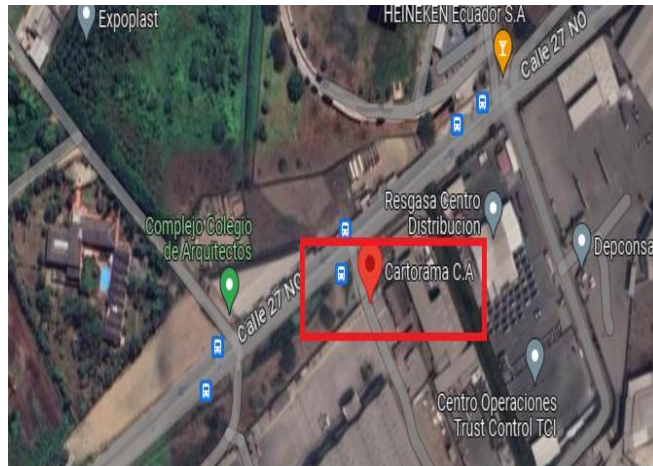
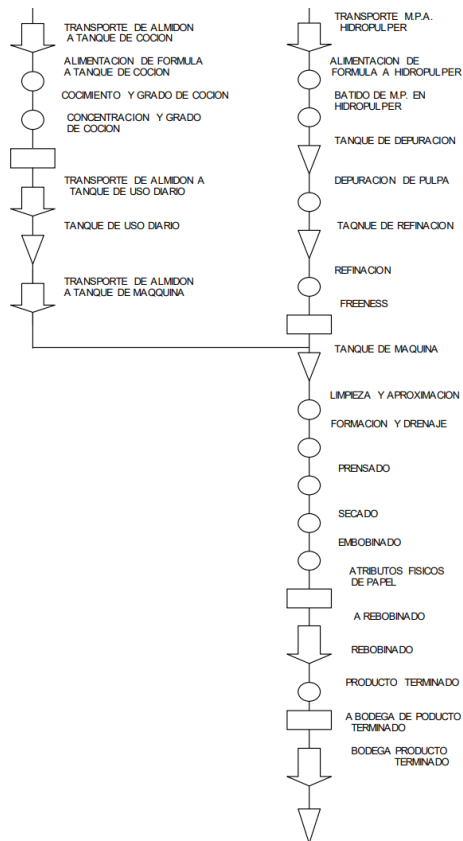


Figura 3.- Ubicación de la empresa Cartorama C. A.

Fuente: Google Maps





Materia prima; Izquierda (DKL); Derecha (OCC)



Figura 4.- Proceso de bobinas de papel



Figura 5.- Logo Cartorama C. A.

Fuente: Cartorama.com.ec [1]



Figura 6.- Subestación de la empresa Cartorama C.A.

Fuente: Cartorama.com.ec [1]



Figura 7.- Subestación de la Empresa Cartorama C. A.

Fuente: Cartorama.com.ec [1]

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Diseñar un nuevo mallado a tierra de la subestación de la empresa CARTORAMA C. A. mediante un estudio de campo usando un telurómetro (Megger) para garantizar la seguridad de las personas como también de los equipos.

1.4.2 Objetivos específicos

- Analizar detalladamente la resistividad del suelo en la zona de la subestación Cartorama C. A. utilizando técnicas de medición adecuadas, con el fin de determinar la idoneidad de la malla de puesta a tierra existente e identificamos áreas de posible mejora.
- Evaluar el rendimiento actual de la malla de puesta a tierra de la subestación Cartorama C. A. mediante mediciones de resistencia de tierra y potenciales de paso y toque, a fin de identificamos deficiencias en el sistema y determinar la necesidad de modificaciones o mejoras.
- Sugerir una solución mejorada para la malla de puesta a tierra de la subestación Cartorama C. A., considerando factores como la resistividad del suelo, la corriente de falla esperada y los requisitos de seguridad eléctrica

CAPÍTULO 2

2. Revisión de literatura o fundamentos teóricos

El diseño y evaluación de la malla de puesta a tierra en subestaciones eléctricas son áreas extensas de investigación que se encuentran en constante desarrollo y evolución, por lo tanto, es un área que estará evolucionando con el paso del tiempo. A continuación, se presentan algunos aspectos clave y tendencias identificadas en la literatura de los últimos años.

Castro Maco, Luis Antonio en el 2020 [2] realizó una investigación con el título “Diseño de un sistema de puesta a tierra para mejorar las condiciones de operación del área de Cancha de Materiales, PSAA.”. Enfocando las opiniones del autor de esta investigación se realizó una comparativa con el fin de señalar las cualidades importantes de ambos panoramas ya que ambos temas se centran en la evaluación y diseño de sistemas de puesta a tierra con el objetivo de mejorar las condiciones de operación y garantizar la seguridad eléctrica en áreas específicas.

En el caso del tema, el enfoque está en la creación de un sistema de puesta a tierra efectivo para un área específica, como una cancha de materiales. Aquí, el objetivo puede ser minimizar los riesgos eléctricos asociados con la manipulación de materiales y equipos eléctricos en ese espacio, así como proporcionar un entorno seguro para los trabajadores y los equipos.

Por otro lado, nuestro tema, se basa en la evaluación y mejora del sistema de puesta a tierra de una subestación eléctrica específica. El objetivo es garantizar un rendimiento óptimo del sistema de puesta a tierra, minimizar los riesgos de descargas eléctricas y asegurar la confiabilidad de la subestación.

Ambos temas comparten la preocupación por la seguridad eléctrica y la optimización de los sistemas de puesta a tierra, aunque se enfocan en diferentes contextos y entornos. En última instancia, el diseño y la evaluación efectiva de los sistemas de puesta a tierra son fundamentales para garantizar una operación segura y confiable de las instalaciones eléctricas en cualquier entorno, ya sea una subestación de alta tensión o un área específica dentro de una instalación.

Néstor S. Mamani Villca en el año 2021 [3] socializó el título “diseño y evaluación de sistemas de puesta a tierra” en donde plantea que: la instalación de sistemas de tierra en repetidoras y terminales de telecomunicaciones. En los últimos años ha generado la necesidad de abordar aspectos que a primera vista parecen difíciles de cuantificar. Para diseñar sistemas de puesta a tierra efectivos, es esencial contar con herramientas matemáticas adecuadas para asegurar la protección de los equipos ante las descargas atmosféricas, especialmente en regiones de nuestro país con un alto número de tormentas eléctricas al año.

Collaguazo Chipantasi Pedro en el año 2020 [4] investigó sobre el “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”. De los autores Néstor S. Mamani Villca y Collaguazo Chipantasi Pedro, realizaron una comparativa con nuestro tema donde el primer tema se centra en el análisis del sistema eléctrico en baja tensión de un campus universitario específico, utilizando la captura de datos en campo para identificaron áreas de mejora y aumentar la eficiencia energética. Aquí, el objetivo es analizar el consumo de energía, identificaron ineficiencias y proponer soluciones para optimizar la utilización de la energía eléctrica en el campus universitario.

Por otro lado, nuestro tema se centra en la evaluación y diseño mejorado de la malla de puesta a tierra de una subestación eléctrica específica, con el objetivo de garantizar un funcionamiento seguro y confiable del sistema eléctrico.

Ambos temas están relacionados con la eficiencia y seguridad del sistema eléctrico. Aunque el primero se centra en el análisis y mejora del sistema eléctrico en baja tensión de un campus universitario, y el segundo en la evaluación y diseño de la malla de puesta a tierra de una subestación, ambos comparten la preocupación por la eficiencia energética y la garantía de un funcionamiento seguro del sistema eléctrico en sus respectivos contextos.

Estos sistemas de puesta a tierra no solo salvaguardan los equipos, sino que también brindan protección al personal que trabaja en estos entornos, minimizando las tensiones de paso y contacto que podrían afectar al cuerpo humano. Como se ve en la figura 8 donde se aprecia uno de los equipos en los que Cartorama C. A. en 2022 invirtió y es la prensa

Jumbo Roll Press.



Figura 8.- Prensa Jumbo Roll Press.

Fuente Cartorama C. A.

Para una mejor comprensión a continuación se describen varios principios que se encuentran en las mallas a tierra.

2.1 Tipos de tierra

Las empresas pueden requerir diferentes tipos de sistemas de puesta a tierra según sus características y necesidades específicas. La elección del tipo de tierra depende de factores como el entorno, la ubicación geográfica, el tipo de suelo y las condiciones locales [5].

2.2 Tierra natural o tierra física

En algunas empresas, especialmente en áreas con suelo de buena conductividad, se puede usar la propia tierra como electrodo de tierra. Se instalan electrodos de tierra adicionales para mejorar la eficiencia de la puesta a tierra. La tierra natural se establece mediante electrodos de puesta a tierra, como varillas o placas, que se conectan a sistemas eléctricos y se entierran en el suelo. La resistividad del suelo y la cantidad de electrodos utilizados afectarán la eficiencia y la resistencia del sistema de puesta a tierra

2.3 Tipos de electrodos de tierra

Los electrodos de tierra son elementos conductores que se utilizan para establecer una conexión eléctrica segura entre un sistema eléctrico y la tierra. Estos electrodos se entierran en el suelo y proporcionan un camino de baja resistencia para que la corriente fluya hacia la tierra en caso de una falla o sobrecarga. Los electrodos de tierra son una parte fundamental de los sistemas de puesta a tierra y desempeñan un papel crucial en la seguridad y el rendimiento de las instalaciones eléctricas. Los más comunes son:

2.3.1 Electrodos de varilla

Los electrodos de varilla, en el contexto de sistemas de puesta a tierra eléctrica, son elementos metálicos alargados y generalmente cilíndricos que se insertan en el suelo para establecer una conexión eléctrica entre un sistema o equipo y la tierra. Estos electrodos se utilizan para crear una vía de baja resistencia para la corriente eléctrica hacia el suelo, asegurando una referencia segura y estable de voltaje y proporcionando protección contra sobretensiones y descargas eléctricas. Las varillas de tierra, hechas de materiales conductores como el cobre o el acero galvanizado, se entierran verticalmente en el suelo. Son adecuadas para áreas con suelo de resistividad moderada [6] y en la figura 9 se muestra cómo es su apariencia con terminación en punta.



Figura 9.- electrodos de varilla de cobre.

Fuente: [6]

2.3.2 Electrodo de placa

Los electrodos de placa, en el contexto de sistemas de puesta a tierra eléctrica, son elementos planos y generalmente metálicos que se entierran en el suelo para establecer una conexión eléctrica eficiente entre un sistema o equipo y la tierra. Estos electrodos se utilizan para crear una vía de baja resistencia para la corriente eléctrica hacia el suelo, asegurando una referencia segura y estable de voltaje y proporcionando protección contra sobretensiones y descargas eléctricas (Ver figura 10). Las placas de tierra, que pueden ser planchas de cobre o acero, se entierran horizontalmente en el suelo. Son efectivas en suelos con resistividad relativamente alta [7].

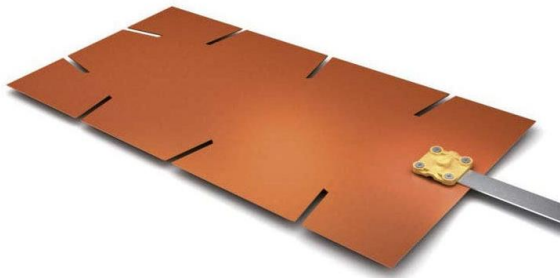


Figura 10.- Electrodo de placa.

Fuente: [7]

2.3.3 Electrodo de anillo

Los electrodos de anillo, en el contexto de sistemas de puesta a tierra eléctrica, son elementos metálicos que se colocan alrededor de estructuras o equipos para establecer una conexión eléctrica eficaz entre el sistema y la tierra. Estos electrodos se utilizan para crear una vía de baja resistencia para la corriente eléctrica hacia el suelo, garantizando una referencia segura y estable de voltaje y proporcionando protección contra sobretensiones y descargas eléctricas. Los electrodos de anillo consisten en un anillo conductor enterrado alrededor de la central eléctrica o una subestación. Proporcionan una mayor área de contacto con el suelo y son útiles en sistemas más grandes como se presenta en la Figura 11 [8].



Figura 11.- Electrodo de anillo.

Fuente: [8]

2.3.4 Electrodo de malla

Los electrodos de malla constan de una red de cables conductores enterrados en el suelo. Proporcionan una distribución uniforme de la corriente y son ideales para sistemas grandes y áreas con variaciones de resistividad en el suelo [9]. En la figura 12 se muestra una representación 3D de la malla.

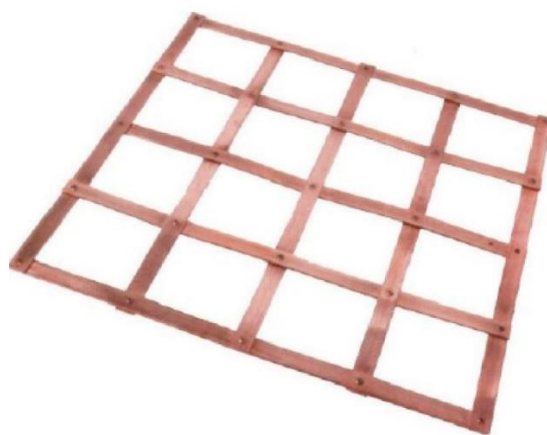


Figura 12.- Electrodo de malla.

Fuente: [9]

2.3.5 Electrodo químico

En áreas con suelo de alta resistividad, se pueden utilizar electrodos químicos que involucran sustancias químicas para mejorar la conductividad del suelo. Ejemplos incluyen electrodos de sal y electrodos de electrolito líquido.

2.3.6 Electrodo de pozo

Los pozos de tierra son excavaciones profundas llenas de material conductor, como sal o carbón, para mejorar la conductividad del suelo.

2.4 Líneas de enlace con el electrodo

Las líneas de enlace con el electrodo son componentes importantes en un sistema de puesta a tierra. Estas líneas de enlace son cables conductores que conectan las partes conductoras de un sistema eléctrico, como equipos, estructuras o sistemas de distribución, al electrodo de tierra. Su objetivo principal es proporcionar un camino de baja resistencia para que la corriente fluya hacia la tierra en caso de una falla o sobrecarga, asegurando la seguridad y la eficiencia del sistema eléctrico. A continuación, se describen algunos puntos clave sobre las líneas de enlace con el electrodo.

2.5 Material de los cables

Las líneas de enlace suelen estar hechas de materiales altamente conductores, como cobre o aluminio. Estos materiales tienen una baja resistencia eléctrica, lo que ayuda a garantizar la eficacia del enlace a tierra.

2.6 Tamaño y sección transversal

El tamaño y la sección transversal de los cables de enlace dependen de la cantidad de corriente que se espera que fluya a través de ellos durante una falla. Cuanto mayor sea la corriente, mayor deberá ser la sección transversal del cable para evitar sobrecalentamientos y pérdidas significativas.

2.7 Conexiones

Las conexiones entre los cables de enlace y las partes conductoras deben ser sólidas y seguras para garantizar una baja resistencia eléctrica en el enlace. Se utilizan técnicas como soldadura, abrazaderas o conectores mecánicos para lograr conexiones robustas.

2.8 Rutas de cableado

Las líneas de enlace deben seguir rutas seguras y protegidas para evitar daños físicos, corrosión o interferencias electromagnéticas. En aplicaciones exteriores, los cables a menudo se entierran o se instalan en canalizaciones protectoras.

2.9 Longitud del cableado

La longitud de los cables de enlace también es importante. Mientras más largo sea el cable, mayor será la resistencia eléctrica, lo que puede afectar la eficacia del sistema de puesta a tierra. Por lo tanto, se debe minimizar la longitud de los cables siempre que sea posible.

2.10 Mantenimiento

Los cables de enlace deben inspeccionarse y mantenerse regularmente para asegurarse de que estén en buenas condiciones y sin daños. La corrosión, el desgaste o las conexiones sueltas pueden afectar la calidad del enlace a tierra.

2.11 Compatibilidad con normativas IEEE-80

Las líneas de enlace y el sistema de puesta a tierra en general deben cumplir con las normativas y regulaciones eléctricas locales. Las especificaciones sobre el tipo de cable, su instalación y otros aspectos técnicos se definen en códigos eléctricos y normas aplicables.

2.12 Funciones del electrodo a tierra

Los electrodos de tierra cumplen varias funciones importantes en un sistema de puesta a tierra. Estas funciones están diseñadas para garantizar la seguridad de las personas, la protección de equipos y la eficacia del sistema eléctrico en general.

2.13 Descarga de corriente de falla

Uno de los roles más críticos de los electrodos de tierra es proporcionar un camino de baja resistencia para que la corriente fluya hacia la tierra en caso de una falla o un cortocircuito en el sistema eléctrico. Esto ayuda a evitar acumulación de voltajes peligrosos en las partes conductoras y reduce el riesgo de descargas eléctricas.

2.14 Protección contra sobretensiones

Los electrodos de tierra también ayudan a disipar las sobretensiones causadas por rayos o maniobras en la red eléctrica. Al proporcionar un camino de descarga para estas sobretensiones, se protege el equipo eléctrico y electrónico de posibles daños.

2.15 Mantenimiento del potencial equivalente

Los electrodos de tierra contribuyen a mantener partes conductoras de un sistema a un mismo potencial eléctrico. Esto reduce la posibilidad de diferencia de potencial entre distintas partes del sistema, lo que podría dar lugar a chispas o descargas eléctricas peligrosas.

2.16 Mejora de la eficiencia del sistema

Al proporcionar un camino de baja resistencia para la corriente de falla, los electrodos de tierra contribuyen a una respuesta más rápida de los dispositivos de protección, como los interruptores automáticos. Esto mejora la eficiencia de la desconexión en caso de falla y reduce el tiempo de inactividad.

2.17 Cumplimiento de normativas y regulaciones

En muchos países, la instalación de sistemas de puesta a tierra cumple con normativas y códigos eléctricos. Los electrodos de tierra desempeñan un papel crucial en el cumplimiento de estos estándares de seguridad y de funcionamiento de los sistemas eléctricos.

2.18 Protección de personas y propiedades

Al proporcionar una ruta segura para que la corriente fluya hacia la tierra, los electrodos de tierra reducen el riesgo de descargas eléctricas que podrían causar lesiones a personas o daños a la propiedad.

2.19 Mitigación de interferencias electromagnéticas

Los sistemas de puesta a tierra adecuados también pueden ayudar a mitigar las interferencias electromagnéticas, lo que puede mejorar el rendimiento de los sistemas electrónicos y de comunicación.

2.20 Varilla de tierra

Las varillas de tierra son electrodos comunes en sistemas de puesta a tierra. Estas varillas, delgadas y largas, se colocan verticalmente en el suelo para permitir que la corriente fluya hacia la tierra en situaciones de fallo eléctrico. Están hechas de materiales conductores como cobre o acero galvanizado y su forma y tamaño varían. Se entierran a una profundidad adecuada, y su parte superior se conecta al sistema eléctrico. A menudo se

utilizan varias varillas según la resistividad del suelo y se deben inspeccionar regularmente para asegurar su buen estado [10]. Cumplen con regulaciones eléctricas y son ampliamente elegidas debido a su eficacia y facilidad de instalación. Las varillas de puesta a tierra son componentes esenciales en los sistemas eléctricos para garantizar una adecuada dispersión de la corriente al suelo, previniendo así situaciones peligrosas como sobretensiones y descargas. Existen diversos tipos de varillas de puesta a tierra, cada uno diseñado para cumplir con requisitos específicos según las condiciones y necesidades particulares de la instalación.



Figura13.- Posición correcta varilla de cobre.

Fuente: [10]

Las varillas de cobre son ampliamente utilizadas en aplicaciones de puesta a tierra debido a la excelente conductividad eléctrica del cobre. Estas varillas son altamente eficientes para dispersar corrientes y minimizar la resistencia. Vienen en diferentes diámetros y longitudes para adaptarse a distintos tipos de suelo y requerimientos de diseño.



Figura 14.- Varillas de cobre 5/8".

Fuente: [10]

Las Varillas de acero galvanizado estas varillas están recubiertas con zinc para evitar la corrosión y prolongar su vida útil. Aunque no son tan conductoras como el cobre, son una opción costo-efectiva y duradera para aplicaciones en diversos entornos.

Las Varillas de acero inoxidable ofrecen una resistencia superior a la corrosión y son ideales para ambientes agresivos como zonas costeras o industriales. Aunque pueden ser más costosas, su durabilidad las convierte en una elección viable a largo plazo.

Las Varillas de cobre revestido de acero combinan la alta conductividad del cobre con la resistencia a la corrosión del acero galvanizado. Son una opción equilibrada para aplicaciones donde se busca una buena conductividad y protección contra la oxidación.

Las varillas de grafito son ligeras, resistentes a la corrosión y adecuadas para suelos con alta resistividad. Son una opción conveniente en lugares donde las condiciones del suelo dificultan el uso de otras varillas.

Las varillas de cobre recubiertas de cobre cuentan con una capa adicional de cobre en su superficie, lo que mejora aún más su conductividad y eficacia en la dispersión de corriente.

2.21 Resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica, también conocida como resistividad específica, es una propiedad intrínseca de un material que midieron su capacidad para resistir el flujo de corriente

eléctrica a través de este [11] En la figura 15 es presentada la definición de Resistencia eléctrica según el tipo y la forma del conductor.

La resistividad está relacionada con la resistencia eléctrica y las dimensiones del material a través de la siguiente fórmula:

$$\text{Resistencia (R)} = \text{Resistividad } (\rho) \times (\text{Longitud} / \text{Área})$$

Donde:

- Resistividad (ρ) es la resistividad eléctrica del material en ($\Omega \cdot m$).
- Longitud es la longitud del conductor (m).
- Área es el área transversal del conductor (m^2).

MATERIAL	RESISTIVIDAD (Ω) EN (Ωm)
METALES	
PLATA	$1,59 \times 10^{-8}$
COBRE	$1,67 \times 10^{-8}$
ORO	$2,35 \times 10^{-8}$
ALUMINIO	$2,66 \times 10^{-8}$
WOLFRAMIO	$5,65 \times 10^{-8}$
NÍQUEL	$6,84 \times 10^{-8}$
HIERRO	$9,71 \times 10^{-8}$
PLATINO	$10,6 \times 10^{-8}$
PLOMO	$20,65 \times 10^{-8}$
SEMICONDUCTORES	
SILICIO	$4,3 \times 10^3$
GERMANIO	0,46
 AISLANTES	
VIDRIO	1×10^{10} a 1×10^{14}
CUARZO	$7,5 \times 10^{17}$
AZUFRE	1×10^{15}
TEFLÓN	1×10^{13}
CAUCHO	1×10^{13} a 1×10^{16}
MADERA	1×10^8 a 1×10^{11}
CARBÓN (DIAMANTE)	1×10^{11}

Figura 15.- . Resistencia eléctrica según el tipo y la forma del conductor.

Fuente: [11]

Algunos puntos clave sobre la resistividad eléctrica incluyen las siguientes descripciones.

2.22 Variación con el material

La resistividad varía según el tipo de material. Los materiales conductores, como los metales, tienen baja resistividad, lo que significa que conducen bien la corriente eléctrica. Por otro lado, los materiales aislantes, como plásticos y cerámicas, tienen una alta resistividad, lo que dificulta el flujo de corriente.

2.23 Dependencia de la temperatura

La resistividad de un material generalmente aumenta con la temperatura. Esto significa que la conductividad de un material puede variar con los cambios de temperatura.

2.24 Aplicaciones prácticas

La resistividad eléctrica es un factor crítico en el diseño de sistemas eléctricos y electrónicos. Los materiales con baja resistividad se utilizan para cables y conexiones eléctricas, mientras que los materiales con alta resistividad se utilizan en aplicaciones aislantes, como los revestimientos de cables.

2.25 Influencia en la puesta a tierra

La resistividad del suelo es un factor importante en la puesta a tierra. Los suelos con baja resistividad permiten una mejor dispersión de la corriente a tierra y son preferibles en la instalación de sistemas de puesta a tierra efectivos.

2.26 Mediciones de resistividad

La resistividad se puede medir mediante pruebas específicas de laboratorio o campo, como la prueba de Wenner o la prueba de cuatro electrodos. Estas pruebas permiten determinar la resistividad del suelo u otros materiales.

2.27 Normativas y regulaciones para la instalación de sistemas de puesta a tierra

Es fundamental que los profesionales de la electricidad y la construcción estén al tanto de las normativas y regulaciones aplicables en su área. Cumplir con estas normativas garantiza la seguridad, la confiabilidad y el cumplimiento legal de los sistemas eléctricos y de puesta a tierra.

2.27.1 Norma internacional IEC 60364

Esta norma, desarrollada por la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), establece requisitos para la instalación eléctrica de edificios y estructuras. La sección 41 de esta norma trata específicamente sobre sistemas de puesta a tierra.

2.27.2 Normas de seguridad eléctrica de IEEE-80

El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) tiene varias normas relacionadas con la puesta a tierra, como la IEEE 142 "Prácticas recomendadas para sistemas de puesta a tierra en subestaciones" y la IEEE 80 "Guía para sistemas de puesta a tierra para subestaciones de energía".

2.27.3 Regulaciones y códigos eléctricos nacionales

Cada país suele tener su propio conjunto de regulaciones y códigos eléctricos que establecen los requisitos para la instalación eléctrica, incluyendo los sistemas de puesta a tierra como el National Electrical Code (NEC).

2.27.4 Normas iso y nacionales

Las organizaciones nacionales de normalización, como el Instituto Nacional de Normalización (ISO) en cada país, también pueden establecer estándares y regulaciones para la instalación de sistemas de puesta a tierra.

2.28 Evaluación del riesgo y cumplimiento local

Además de los estándares y códigos, las regulaciones pueden estar influenciadas por la evaluación de riesgos y condiciones locales. Los factores como el tipo de suelo, el clima y la ubicación pueden afectar los requisitos específicos para la puesta a tierra.

CAPÍTULO 3

3. MARCO METODOLÓGICO

Tomando en cuenta que toda investigación requiere de un análisis de datos del cual dependerá la estructura de esta, además de brindar una mayor efectividad al momento de estructurar la propuesta. De entre las técnicas de análisis de información tenemos los siguientes criterios.

3.1 Técnicas de recopilación de datos

3.1.1 Revisión bibliográfica

Se realizó una revisión exhaustiva de la literatura existente sobre sistemas de puesta a tierra, normativas y estándares relacionados con subestaciones de alta tensión y estudios de casos similares. Nos permitió establecer una base sólida de conocimientos y comprender las mejores prácticas en el campo.

3.1.2 Recopilación de datos

Se realizó mediciones en campo para recopilar datos relevantes sobre la subestación Cartorama C. A. Esto incluye mediciones de resistividad del suelo, mediciones de corrientes de falla, mediciones de potencia y otras variables eléctricas relevantes. Para obtener resultados fiables, utilizaron equipos de medición adecuados y sigue los procedimientos y protocolos establecidos.

3.1.3 Análisis de datos

Se utilizaron técnicas estadísticas y herramientas de análisis para procesar y analizar los datos recopilados. Esto puede incluir el cálculo de resistencias de puesta a tierra, la evaluación de la eficiencia de la malla de puesta a tierra existente, el análisis de corrientes de falla y otros parámetros relevantes. Utiliza software especializado si es necesario.

3.1.4 Metodología de la investigación

La presente investigación tiene un carácter descriptivo, esta especifica el rendimiento actual del sistema de puesta a tierra de Cartorama C. A. con base a los parámetros variables que afectan al sistema de puesta a tierra actual de la empresa y al apantallamiento de esta. con estos resultados se describirán las alternativas de solución y mitigación de los riesgos a los problemas que se vayan a encontrar.

Para el diseño de la propuesta se plantea un método experimental en donde nos basamos en mediciones y análisis de los esquemas eléctricos de Cartorama C. A. desde estos esquemas se Realizaron las primeras simulaciones con el fin de determinar parámetros del sistema de puesta a tierra y determinar si se cumplen con las distintas normativas existentes.

3.1.5 Evaluación del rendimiento actual

Se evaluó el rendimiento actual de la malla de puesta a tierra de la subestación Cartorama C. A. en función de los resultados obtenidos en el análisis de datos. se Identificó deficiencias y áreas de mejora en el sistema de puesta a tierra existente. Generalmente para una evaluación de rendimiento se siguen ciertos parámetros como son:

3.2 Definición de objetivos

Para continuar se definieron claramente los objetivos de la evaluación, como verificar la eficiencia actual de la malla, identificaron áreas de mejora o comparar mediciones actuales con mediciones anteriores [12]. Para este proceso nos basamos en los siguientes estándares:

- **Medición de resistividad del suelo:** Se evaluó la resistividad del suelo en las áreas donde se encuentra la malla de puesta a tierra para asegurar que sea adecuada para disipar corrientes de falla y garantizar un buen retorno a tierra.
- **Análisis de geometría de la malla:** Se evaluó la configuración de la malla de puesta a tierra en términos de su diseño y distribución, considerando la efectividad en la disipación de corrientes y minimización de potenciales peligrosos.
- **Medición de corrientes de falla:** Se realizó mediciones para determinar las corrientes de falla que podrían ocurrir en caso de un cortocircuito o falla en el sistema eléctrico, asegurando que la malla pueda manejar estas corrientes de manera segura.



- **Verificación de equipotencialidad:** Se evaluó la uniformidad de los potenciales en toda la malla para evitar diferencias significativas de potencial que puedan resultar en riesgos para las personas y los equipos.
- **Análisis de conexiones y soldaduras:** Se inspeccionó las conexiones y soldaduras de la malla para asegurarse de que estén bien instaladas y en buen estado, ya que estas conexiones afectan directamente la eficacia de la puesta a tierra.
- **Estudio de tensiones de paso y toque:** Se evaluó las tensiones de paso y toque que podrían ocurrir en el entorno cercano a la malla de puesta a tierra para garantizar que estén dentro de los límites de seguridad.

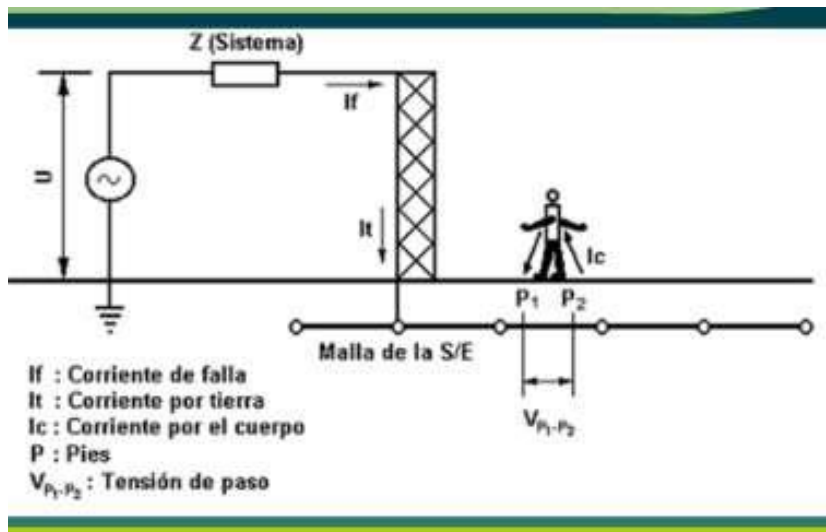


Figura 16.- Circulación de las corrientes de toque y paso.

Fuente [12]

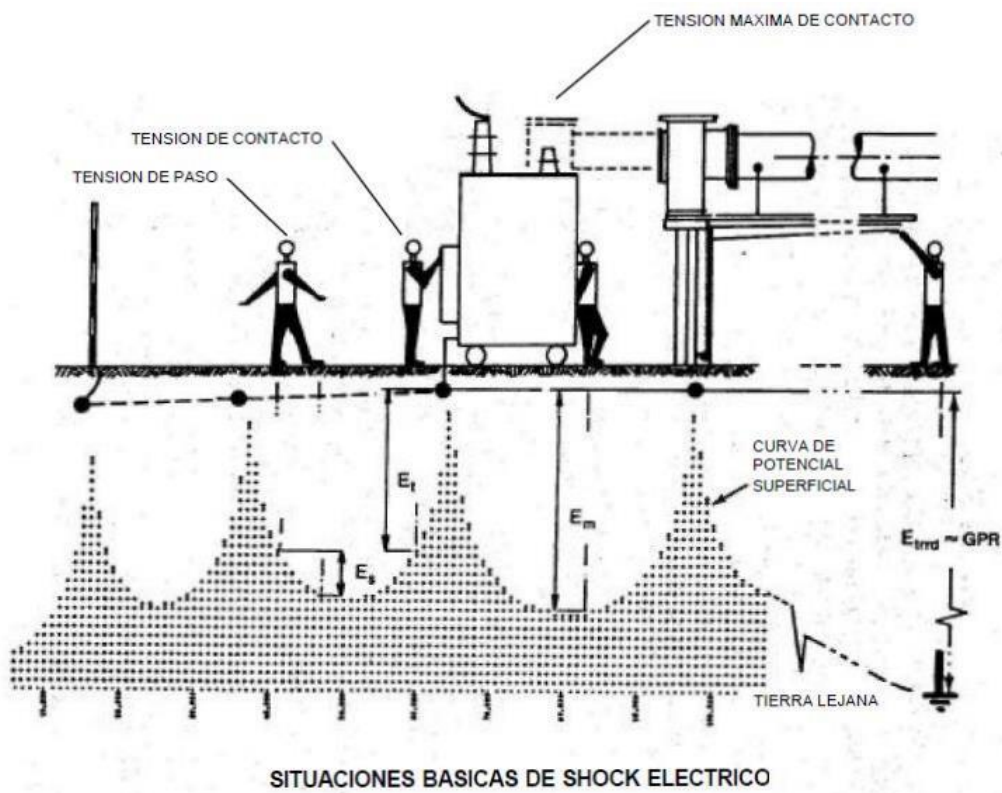


Figura 17. Circulación de las corrientes de toque y paso.

Fuente: [12]

- **Inspección de electrodos y conductores:** Se analizó los electrodos de puesta a tierra y los conductores para detectar posibles daños, corrosión o deterioro que puedan afectar la conductividad. Como se aprecia en la figura 18 debajo de la estructura metálica se encuentra un punto de conexión con tornillos y es necesario agregar a este tipo de conexión a un mantenimiento periódico.

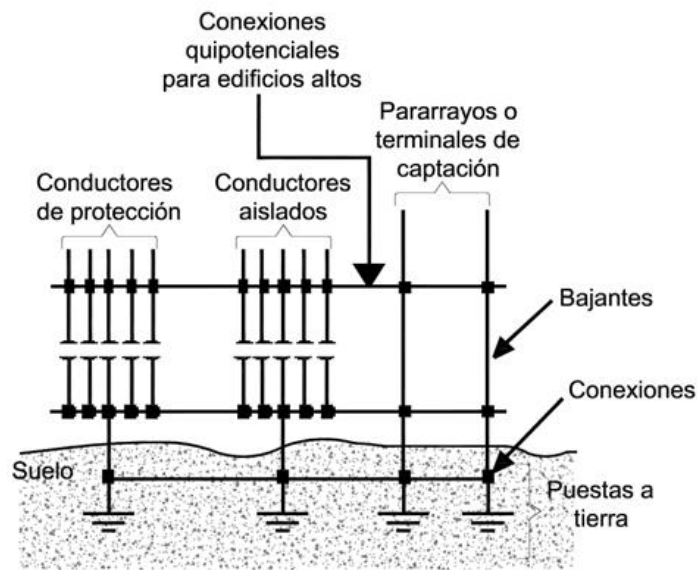


Figura 18.- Inspección de los puntos de conexiones de puesta a tierra.

Fuente: Los Autores

Teniendo en cuenta también, los siguientes puntos para mejora:

- **Optimización de diseño:** Realizaron modificaciones en la configuración de la malla para mejorar su eficacia en la disipación de corrientes y minimización de potenciales peligrosos.
- **Mejora de conexiones:** Se identificó y reemplazó conexiones y soldaduras defectuosas o en mal estado para asegurar una conducción eléctrica adecuada.
- **Actualización de electrodos:** Se consideró la instalación de nuevos electrodos de puesta a tierra o la mejora de los existentes para garantizar una conexión confiable con la tierra.

- **Implementación de recubrimientos:** Se evaluó la posibilidad de aplicar recubrimientos protectores en la malla para prevenir la corrosión y extender su vida útil.
- **Seguimiento continuo:** Se estableció un programa de monitoreo y mantenimiento regular para asegurarse de que la malla de puesta a tierra se mantenga en óptimas condiciones con el tiempo.
- **Capacitación y concienciación:** Se brindó capacitación a los empleados sobre la importancia de la puesta a tierra adecuada y cómo reportar cualquier problema que observen.
- **Cumplimiento normativo:** Una vez que se completó el proceso, se realizó una nueva revisión con el fin de que todas las mejoras propuestas cumplan con las regulaciones y estándares de seguridad eléctrica pertinentes.

3.3 Recopilación de información

La recopilación de información relevante sobre el sistema de puesta a tierra, incluyendo el diseño, la disposición de los electrodos [13], el tipo de suelo y las mediciones anteriores.

- **Mediciones de resistividad del suelo:** Se utilizó un medidor de resistividad del suelo para determinar la resistividad eléctrica del terreno en distintas áreas cercanas a la malla.
- **Mediciones de corriente de falla:** Realizaron mediciones de corriente de falla simuladas o reales en puntos críticos del sistema eléctrico para entender cómo la malla manejaría situaciones de cortocircuito.
- **Mediciones de potencial:** Utilizaron voltímetros y equipos de medición de potencial para evaluar la uniformidad de los potenciales en diferentes áreas de la malla y cercanas a ella.



Figura 19.- Medición en campo.

Fuente: Los Autores

- **Software de simulación electromagnética:** En este proyecto se utilizaron herramientas de simulación electromagnética, como software de elementos finitos (FEM), para modelar el sistema y prever cómo se distribuirán los potenciales y las corrientes en diferentes escenarios.
- **Termografía infrarroja:** Emplearon cámaras termográficas para identificar puntos calientes o problemas de conexión que puedan generar un aumento de temperatura en la malla.
- **Análisis de corriente y tensión:** Utilizaron pinzas de corriente y voltímetros para medir las corrientes y tensiones presentes en diferentes partes de la malla y compáralas con los valores esperados.

- **Documentación y planos:** Se revisaron los planos de diseño y documentación técnica de la malla para asegurar que se ha implementado correctamente y de acuerdo con las especificaciones.
- **Entrevistas y consultas:** Hablaron con el personal de mantenimiento, ingenieros eléctricos y otros profesionales involucrados en la operación y mantenimiento del sistema para obtener información sobre problemas pasados, desafíos y posibles mejoras.
- **Análisis de normativas:** Revisaron las normativas y estándares relevantes en seguridad eléctrica para asegurarte de que el sistema cumple con los requisitos establecidos.
- **Mediciones de tensiones de paso y torque:** Utilizaron equipos específicos para medir tensiones de paso y toque en áreas cercanas a la malla para verificar que estén dentro de los límites seguros.



Figura 20.- Medición de tensiones de torque y paso.

Fuente: Los Autores

- **Pruebas de continuidad:** Realizaron pruebas de continuidad para asegurarte de que las conexiones estén funcionando correctamente y que no haya interrupciones en la malla.

3.3 Planificación de pruebas

Se diseñaron un plan de pruebas que abarque diferentes aspectos de la malla, como la resistencia de tierra, la continuidad de los conductores y las conexiones, y la distribución de corriente.

- **Prueba de continuidad:** Verificaron la continuidad eléctrica de los conductores de la malla y las conexiones utilizando un ohmímetro o un probador de

continuidad. Esto nos asegurará que todos los componentes estén conectados de manera adecuada.

- **Prueba de resistividad del suelo:** Utilizaron un medidor de resistividad del suelo para determinar la resistividad eléctrica del terreno en diferentes ubicaciones alrededor de la malla.
- **Prueba de tensión de paso:** Se midió las tensiones de paso en áreas cercanas a la malla para asegurarte de que estén dentro de los límites seguros establecidos por las normativas.
- **Prueba de potencial:** Utilizaron voltímetros y equipos de medición de potencial para evaluar la uniformidad de los potenciales en diferentes puntos de la malla y áreas cercanas a ella.
- **Prueba de corriente de falla:** Por medio de simulaciones midieron la corriente de falla en puntos críticos del sistema eléctrico para evaluar cómo la malla manejaría situaciones de cortocircuito.
- **Prueba de conexiones y soldaduras:** Inspeccionaron visualmente y Realizaron pruebas específicas para identificar conexiones y soldaduras defectuosas, dañadas o corroídas que puedan afectar la conductividad.
- **Prueba de potencial de falla:** Evaluaron el potencial de falla en diferentes puntos de la malla en caso de una corriente de falla, para asegurarte de que no se generen tensiones peligrosas.
- **Prueba de corrosión:** Se evaluó la corrosión de los electrodos y otros componentes de la malla, ya que esto puede afectar negativamente su eficacia.
- **Prueba de equipotencialidad:** Verificaron si los elementos metálicos en el área tienen potenciales similares y no generan diferencias significativas.
- **Pruebas de campo eléctrico:** Se hizo uso de sondas y equipos de medición para evaluar el campo eléctrico en diferentes áreas y verificar que esté dentro de los límites seguros.

- **Prueba de durabilidad:** Evaluaron la durabilidad y resistencia mecánica de los componentes de la malla, asegurándose de que puedan soportar condiciones climáticas y ambientales adversas.
- **Prueba de descarga en tierra:** Realizaron pruebas de descarga controlada para verificar la capacidad de la malla de disipar cargas eléctricas.

3.4 Mediciones de Resistencia

Utilizaron un telurómetro para medir la resistencia de tierra en varios puntos de la malla. Registrar estas mediciones de manera precisa. [14]

- **Telurómetro o Terrómetro:** Esta es una herramienta específicamente diseñada para medir la resistencia de puesta a tierra. Puede medir la resistencia de tierra en forma de un electrodo simple o en forma de malla. Los telurómetros modernos a menudo tienen funciones adicionales para medir la resistividad del suelo y la resistencia de tierra en diferentes configuraciones.
- **Pinza Amperimétrica con Función de Resistencia:** Algunas pinzas amperimétricas avanzadas tienen la capacidad de medir resistencia, lo que puede ser útil para medir la resistencia de bucles de tierra o elementos de la malla. Como la Pinzas amperimétricas de puesta a tierra UT276A/UT278A (Figura 21) que puede medir de forma rápida y segura el sistema de puesta a tierra sin desconectar las líneas de tierra del circuito ni la necesidad de electrodos auxiliares. Puede medir resistencias de $0,01\Omega$ con una resolución de $0,001\Omega$.



Figura 21.- Pinzas amperimétricas de puesta a tierra UT276A/UT278A.

Fuente: Los Autores

- **Megóhmetro:** Aunque principalmente es utilizado para medir la resistencia de aislamiento, un megóhmetro (también conocido como Megger) puede ser utilizado para medir la resistencia de tierra. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que su rango de medición suele ser mayor que el necesario para la mayoría de las aplicaciones de puesta a tierra.
- **Multímetro avanzado:** Algunos multímetros avanzados tienen la función de medir resistencia de baja resistividad, lo que podría ser útil para mediciones en sistemas de puesta a tierra.
- **Medidores de resistencia de tierra estáticos (ers):** Estos dispositivos están diseñados específicamente para medir la resistividad y la resistencia de tierra en entornos industriales y de construcción.
- **Software de medición de resistencia:** Algunos fabricantes ofrecen sistemas de medición de resistencia en línea que utilizan métodos de inyección de corriente para evaluar la resistencia de tierra y proporcionar informes detallados.

- **Dispositivos de medición de resistividad del suelo:** Si bien no midieron directamente la resistencia de tierra, estos dispositivos son útiles para determinar la resistividad del suelo en diferentes áreas alrededor de la malla, lo que puede influir en la efectividad de la puesta a tierra.

De manera general siempre se tiene que validar la calibración del equipo para el uso de este además de investigaron si el equipo escogido es apto para este tipo de mediciones en la malla puesta a tierra. [15] Además, es necesario seguir las instrucciones del fabricante y las mejores prácticas para obtener mediciones precisas y confiables. Siempre es recomendable contar con un profesional capacitado para llevar a cabo mediciones y evaluaciones de sistemas de puesta a tierra de manera segura y precisa.

3.5 Inspección visual

Antes de plantear una simulación se realizó una inspección visual minuciosa de los electrodos, los conductores y las conexiones. Buscar signos de corrosión, daños o conexiones sueltas.

- **Conexiones y soldaduras:** Examinaron todas las conexiones y soldaduras en la malla para asegurarnos de que estén bien Realizadas y en buen estado. Buscaron signos de corrosión, suelta o daño en las conexiones.
- **Electrodos:** Al inspeccionar los electrodos de puesta a tierra para verificar su estado. Optaron por buscar corrosión, daños físicos o cualquier signo de deterioro que pueda afectar su conductividad.
- **Cables y conductores:** Revisaron los cables y conductores que forman parte de la malla. Asegúrate de que estén en buen estado, sin cortes, daños ni signos de desgaste.
- **Aislantes y protecciones:** Verificaron la integridad de cualquier aislante o protección utilizada en la malla. Aseguraron de que no estén agrietados, deteriorados o faltantes.
- **Distribución de la malla:** Observaron la disposición y distribución de la malla en relación con los equipos eléctricos, las estructuras y otros elementos relevantes.

- **Uniformidad de potencial:** Comprobaron si hay diferencias significativas de potencial entre diferentes partes de la malla. Si encontraron discrepancias, podría indicar problemas de conexiones o resistividad del suelo.
- **Elementos externos:** Cualquier elemento externo que pueda afectar al funcionamiento de los equipos debe ser removido con el fin de asegurar un correcto funcionamiento, por esta razón se observó de manera minuciosa con el fin de que no hubiera objetos extraños o elementos no relacionados con la malla que puedan afectar su funcionamiento, como vegetación enredada, basura o cables sueltos.
- **Etiquetado:** Nos cercioraron si los componentes de la malla estaban correctamente etiquetados y documentados para simplificar futuras tareas de mantenimiento y facilitar su identificación
- **Cumplimiento normativo:** Nos cercioraron de que la malla cumplía con las normativas y regulaciones de seguridad eléctrica aplicables en mi área.
- **Registro foto figura:** Se tomaron fotografías detalladas de los componentes y áreas inspeccionados para documentar el estado actual y para futuras referencias.
- **Entorno:** Tuvieron en cuenta los entornos circundantes, como factores climáticos y condiciones ambientales, que pudieron haber afectado la durabilidad y el funcionamiento de las mallas.

3.6 Pruebas de integridad

Realizaron pruebas de integridad inyectando una corriente conocida en los sistemas de puesta a tierra y midieron las tensiones resultantes. Esto ayudó a identificar posibles problemas en las conexiones. Las pruebas de integridad en los sistemas de malla de puesta a tierra fueron esenciales para asegurarnos de que todos los componentes estuvieran correctamente conectados y en buen estado. Aquí hay algunos puntos importantes que consideraron al llevar a cabo las pruebas de integridad en los sistemas de malla de puesta a tierra:

- **Desconexión de corrientes:** Antes de comenzar cualquier prueba, nos aseguraron de desconectar cualquier corriente eléctrica que pudiera estar fluyendo a través de los sistemas de puesta a tierra para garantizar la seguridad del personal involucrado.
- **Inspección visual preliminar:** Realizaron una inspección visual inicial para identificar conexiones sueltas, cables dañados, corrosión u otros problemas evidentes.
- **Preparación de equipos:** Nos aseguraron de que los equipos de medición estuvieran calibrados y en buen estado de funcionamiento antes de iniciar la prueba.
- **Medición de resistencia:** Utilizaron un telurómetro, para evaluar la resistencia entre los componentes de la malla. Esto incluyó medir las resistencias individuales de los electrodos, conexiones y tramos de cables como se aprecia en la figura 22.



Figura 22.- Medición de resistencia en puntos de conexiones de puesta a tierra.

Fuente: Los Autores

- **Establece puntos de medición:** Se determinaron los puntos de medición adecuados en diferentes partes del sistema, incluyendo los puntos de conexión a tierra, conexiones intermedias y puntos críticos.

- **Medición de continuidad:** Realizaron pruebas de continuidad para asegurar de que todos los conductores y conexiones estén correctamente conectados. Esto puede hacerse con un multímetro u otra herramienta similar.
- **Registro de resultados:** Documentaron cuidadosamente los resultados de las mediciones en un registro detallado.
- **Comparación con estándares:** Compararon los resultados de las mediciones con los estándares de resistencia de tierra y continuidad establecidos por regulaciones o normativas pertinentes.
- **Identificación de problemas:** Cuando se encontraron valores de resistencia inusualmente altos o discontinuidades en la malla, identificaron y documentaron los problemas específicos que causaban estas anomalías.
- **Análisis de tendencias:** Se han Realizaron pruebas anteriores en el sistema, compara los resultados actuales con mediciones anteriores para identificar cambios significativos que puedan indicar deterioro o problemas emergentes.
- **Acciones correctivas:** Cuando encontraron algún problema, se tomaron las medidas correctivas para solucionarlos. Esto podría implicar el reemplazo de cables, la mejora de conexiones, la limpieza de corrosión, entre otras acciones necesarias.
- **Verificación posterior:** Después realizaron las correcciones, se repitieron las mediciones de resistencia y continuidad para verificar que los problemas se hayan resuelto y que la integridad de la malla se haya restaurado.

3.7 Análisis de resultados

Al evaluar los resultados de las mediciones y las pruebas. Compararon las mediciones actuales con mediciones anteriores. Identificaron áreas donde la resistencia sea alta, las conexiones sean débiles o la distribución de corriente sea desigual.

- **Revisión de datos:** Comenzaron por revisar y organizar los datos recopilados durante el análisis del sistema de malla de puesta a tierra. Verificando que exista

el acceso a todas las mediciones, inspecciones y cualquier documentación relevante.

- **Comparación con estándares:** Compararon los resultados de las mediciones y las observaciones con los estándares de resistencia, continuidad y otros parámetros establecidos por normativas, regulaciones o mejores prácticas de seguridad eléctrica.
- **Identificación de anomalías:** Se buscó cualquier resultado que esté fuera de los rangos aceptables. Esto podría incluir valores de resistencia altos, discontinuidades en la continuidad, corrosión severa, conexiones defectuosas o cualquier otro problema evidente.
- **Priorización de problemas:** Se reconocieron múltiples problemas, por lo que se tuvo que priorizar aquellos que presentan el mayor riesgo para la seguridad y el rendimiento del sistema. Por ejemplo, problemas que afectan directamente la integridad de la puesta a tierra o que podrían causar riesgos eléctricos.
- **Análisis de causas:** Para cada problema identificaron y realizaron un análisis detallado de las posibles causas. Esto incluyen la calidad de las conexiones, la influencia de la resistividad del suelo, la corrosión, entre otros factores.
- **Evaluación de impacto:** Evaluaron el impacto potencial de cada problema en la seguridad, la eficiencia y el rendimiento general del sistema y determinaron como cada problema podría afectar a las personas, los equipos y la continuidad del servicio eléctrico.
- **Acciones correctivas:** Basándose en el análisis de las causas y el impacto, desarrollan planes de acción correctiva para abordar cada problema identificado. Establecieron pasos claros y plazos para la implementación de estas acciones.
- **Planificación de mejoras:** Además de las acciones correctivas, identificaron oportunidades para mejorar el sistema de puesta a tierra. Esto incluyó la optimización del diseño, la actualización de componentes, la implementación de prácticas de mantenimiento regulares.

- **Documentación detallada:** Se realizó una documentación cuidadosamente detallada mostrando los resultados de los análisis, incluyendo los problemas identificados, las causas, los impactos y las acciones propuestas. Esto servirá como referencia futura y para demostrar la diligencia debida.
- **Comunicación y responsabilidades:** Se comunicó los resultados y las acciones propuestas a todas las partes interesadas relevantes, como el personal de mantenimiento, ingenieros eléctricos, gerentes y otros involucrados en la operación del sistema.
- **Seguimiento y verificación:** Después de implementar las acciones correctivas y las mejoras, realizaron un seguimiento para verificar que los problemas se hayan resuelto y que el sistema esté funcionando según lo esperado.
- **Reevaluación periódica:** Establecieron un plan para evaluaciones periódicas del sistema de malla de puesta a tierra.

3.8 Identificación de mejoras

Basados en los resultados, identificaron áreas de mejora. Esto incluye la adición de electrodos, el reemplazo de conexiones dañadas, la limpieza de puntos de contacto o incluso la reubicación de electrodos.

- **Análisis de datos existentes:** Revisaron las mediciones y resultados anteriores de resistencia, continuidad y otros parámetros. Identificaron tendencias, patrones anómalos o problemas recurrentes en los datos.
- **Pruebas y mediciones:** Realizaron mediciones actuales de resistencia de tierra y continuidad para evaluar la eficacia actual del sistema. Midieron las tensiones de paso y toque en áreas cercanas para verificar su cumplimiento con los estándares de seguridad.
- **Evaluación de normativas y estándares:** Revisaron las normativas y estándares de seguridad eléctrica pertinentes para asegurarse de que el sistema cumple con los requisitos actuales.

- **Análisis de riesgos:** Evaluaron los riesgos asociados con el sistema de malla de puesta a tierra. Prioriza las mejoras que mitigarían los riesgos más críticos.
- **Benchmarking:** Investigaron cómo se manejan sistemas de puesta a tierra en otras empresas o instalaciones similares. Esto puede proporcionar ideas para mejoras.
- **Análisis costo-beneficio:** Evaluaron los costos asociados con la implementación de cada mejora frente a los beneficios esperados en términos de seguridad, rendimiento y cumplimiento normativo.
- **Priorización:** Clasificaron las mejoras identificadas según su urgencia y el impacto en la seguridad y el rendimiento del sistema. Identificaron cuáles de estas mejoras tienen un alto potencial de mejorar la eficiencia y la seguridad.
- **Desarrollo de planes de mejora:** Elaboraron planes detallados para cada mejora, incluyendo los pasos específicos a seguir, los recursos necesarios y los plazos estimados.
- **Implementación y seguimiento:** Implementaron las mejoras en función de los planes establecidos. Realizaron un seguimiento de los cambios y verifica que hayan tenido el efecto esperado en el sistema.
- **Reevaluación continua:** Establecieron un proceso para evaluar regularmente el sistema de malla de puesta a tierra y realizaron ajustes en función de cambios en el entorno o nuevas necesidades.

3.9 Implementación de mejoras

Llevaron a cabo las mejoras identificadas de acuerdo con las prácticas de ingeniería y los estándares de seguridad.

- **Se definió objetivos claros:** Establecieron metas y objetivos claros para cada mejora que planearon implementar y ya sabían lo que esperaban lograr con cada cambio.

- **Realizaron una planificación detallada:** Crearon un plan detallado para la implementación de cada mejora que incluyó los pasos específicos, los recursos necesarios, los plazos y las responsabilidades, y ya lo han ejecutado.
- **Asignaron responsabilidades:** Designaron a individuos o equipos responsables de llevar a cabo cada etapa de la implementación, y cada persona ya sabe claramente cuál es su papel.
- **Contaron con recursos y presupuesto:** Nos aseguraron de tener los recursos necesarios, incluyendo materiales, herramientas y presupuesto, para llevar a cabo las mejoras, y ya tener disponibles.
- **Comunicaron internamente:** Informaron a todo el personal relevante sobre las mejoras que implementaron y cómo podrían afectar sus actividades, y ya se habían realizado la comunicación.
- **Proporcionaron formación y capacitación:** Si las mejoras requerían nuevos conocimientos o habilidades, proporcionaron la formación necesaria al personal que llevará a cabo la implementación, y ya se les había capacitado.
- **Realizaron pruebas en pequeña escala:** Realizaron pruebas preliminares en un entorno controlado antes de implementar las mejoras en todo el sistema, y ya habían completado esta etapa.
- **Implementaron paso a paso:** Siguió el plan detallado implementando cada mejora paso a paso, y nos aseguraron de que cada paso se completara antes de avanzar al siguiente.
- **Supervisaron y siguieron de cerca la implementación:** Supervisaron de cerca la implementación para asegurar de que se estuvieran siguiendo los pasos y de que no surgieran problemas inesperados, y ya habían finalizado este proceso.
- **Pruebas y verificación:** Realizaron pruebas y mediciones para asegurarte de que las mejoras se hayan implementado correctamente y que estén teniendo el efecto deseado.

- **Resolvieron problemas:** Si surgieron problemas durante la implementación, los abordaron de manera oportuna y encontraron soluciones efectivas.
- **Documentaron detalladamente:** Documentaron cada etapa de la implementación, incluyendo los cambios realizados, los resultados de las pruebas y cualquier problema encontrado.
- **Comunicaron externamente:** Si fue necesario, comunicaron a las partes externas involucradas en el sistema de malla de puesta a tierra sobre las mejoras implementadas.
- **Obtuvieron aprobación y validación:** Si fue requerido, obtuvieron la aprobación y validación necesarias de supervisores, gerentes o autoridades reguladoras.
- **Evaluaron el impacto el impacto post - implementación:** Después de la implementación, evaluaron el impacto de las mejoras en el sistema y aseguraron que se hayan logrado los objetivos establecidos.
- **Monitorearon continuamente:** Continuaron monitoreando el sistema de malla de puesta a tierra y realizaron ajustes según sea necesario, ya que la mejora continua es clave en nuestro enfoque de trabajo conjunto.

3.10 Pruebas de validación

Después de realizar las mejoras, repitieron las pruebas y mediciones para validar la efectividad de las mejoras y asegurarnos de que se haya logrado una reducción en la resistencia y una mejora en el rendimiento general. Trabajaron en conjunto para llevar a cabo estas acciones.

- **Tuvieron conocimiento previo:** Nos aseguraron de entender completamente cómo funcionaba nuestro sistema de malla de puesta a tierra y cómo se conectaba con otros equipos y sistemas eléctricos.
- **Conocieron las normativas y estándares:** Nos familiarizaron con las normativas y estándares relevantes de seguridad eléctrica que se aplicaban a las pruebas de sistemas de puesta a tierra en nuestra área y aseguraron su cumplimiento.

- **Realizaron una planificación detallada:** Crearon un plan detallado para las pruebas de validación, definiendo los objetivos, los métodos de prueba, los puntos de medición, el equipo necesario y los procedimientos a seguir.
- **Nos aseguraron de tener los recursos y el equipo necesarios:** Accedieron a los recursos necesarios, incluyendo equipos de medición calibrados y herramientas de seguridad adecuadas.
- **Garantizaron la seguridad personal:** Proporcionando el equipo de protección personal necesario, como guantes aislantes, gafas de seguridad y ropa protectora, para el personal que llevó a cabo las pruebas.
- **Des energizaron adecuadamente:** Antes de realizar cualquier prueba, se aseguraron de des energizar adecuadamente los equipos y sistemas eléctricos conectados al sistema de malla de puesta a tierra para evitar riesgos eléctricos.
- **Verificaron las condiciones ambientales:** Verificaron las condiciones ambientales, como la climatología, que podrían afectar la seguridad de las pruebas y evitaron realizar pruebas durante condiciones climáticas adversas.



Figura 23.- Verificación de condiciones ambientales.

Fuente: Los Autores

- **Comunicaron y notificaron:** Comunicaron a todo el personal relevante y a los equipos involucrados en la operación del sistema de malla de puesta a tierra sobre las pruebas que se llevarían a cabo y las áreas que podrían estar fuera de servicio temporalmente.
- **Establecieron protocolos de emergencia:** Establecieron protocolos de emergencia en caso de que surgieran problemas durante las pruebas, como cortocircuitos o situaciones peligrosas.
- **Documentaron y registraron:** Prepararon formularios de registro detallados para documentar las mediciones, los resultados y cualquier observación importante durante las pruebas.
- **Realizaron mediciones de referencia:** Realizaron mediciones de referencia antes de realizar las pruebas de validación para tener una base de comparación y evaluar cualquier cambio.
- **Verificaron el funcionamiento del equipo de medición:** Antes de las pruebas de validación, verificaron que los equipos de medición estuvieran funcionando correctamente y calibrados adecuadamente.

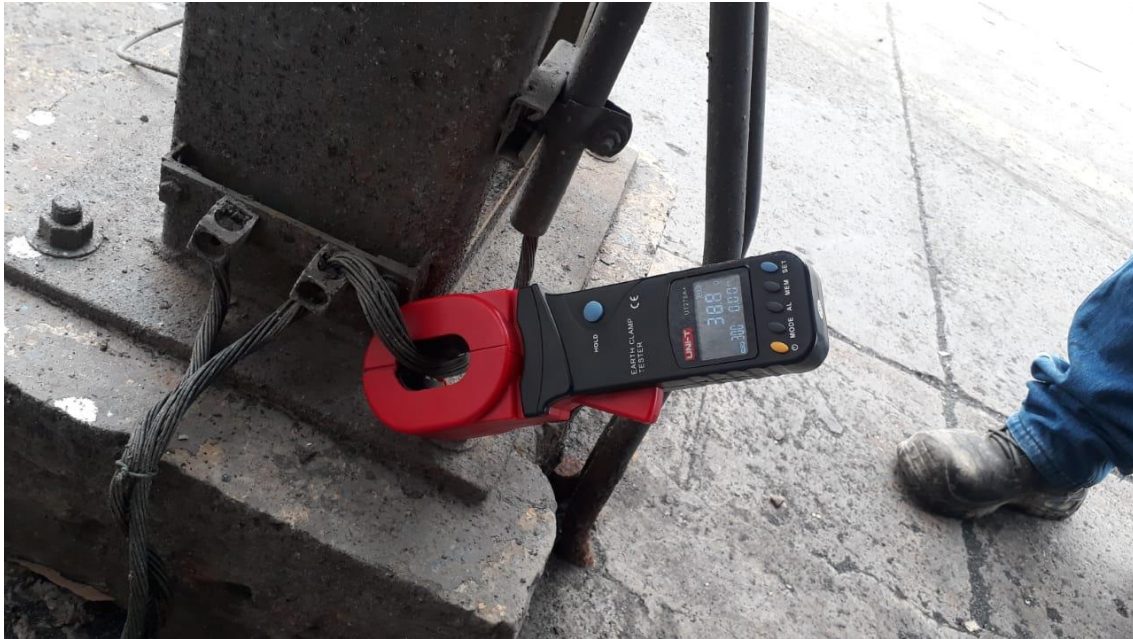


Figura 24.- Comprobación de equipos de medición.

Fuente: Los Autores

- **Prepararon un plan de contingencia:** Prepararon un plan de contingencia en caso de que las pruebas no se desarrollaran como se esperaba o si surgían problemas inesperados.
- **Coordinaron con otros equipos:** Coordinaron con otros equipos o departamentos que podrían estar involucrados en el proceso de pruebas para evitar conflictos o interrupciones.
- **Obtuvieron aprobaciones y permisos:** Nos aseguraron de obtener las aprobaciones necesarias de supervisores, gerentes u otras partes interesadas antes de realizar las pruebas.
- **Garantizaron la seguridad en el acceso:** Nos aseguraron de que solo el personal autorizado y capacitado tuviera acceso a las áreas donde se realizaron las pruebas.

3.11 Documentación

Registraron todos los resultados, mediciones, pruebas realizadas y mejoras implementadas en un informe detallado. Esto nos sirvió como referencia para futuras

evaluaciones y para mantener un registro del sistema de puesta a tierra. Trabajaron juntos en la realización de estas tareas.



Figura 25.- Inspección de cajas de paso.

Fuente: Los Autores

- **Registraron mediciones actuales:** Documentaron las mediciones actuales de resistencia de tierra, continuidad y otros parámetros relevantes antes de la actualización.
- **Archivaron pruebas de validación:** Mantuvieron una documentación detallada de las pruebas de validación realizadas después de la actualización, incluyendo mediciones de resistencia, continuidad y otras pruebas realizadas.
- **Capturaron fotografías antes y después:** Tomaron fotografías de alta calidad que mostraron el estado anterior y posterior de la malla de puesta a tierra, proporcionando evidencia visual de los cambios realizados.
- **Generaron un manual de mantenimiento:** Crearon un manual que incluyó instrucciones detalladas para el mantenimiento y la gestión continua del sistema de malla de puesta a tierra actualizado.

- **Archivaron certificados y documentación de componentes:** Guardaron copias de los certificados y documentación de los componentes utilizados en la actualización, como electrodos, cables, conectores.
- **Mantuvieron registros de capacitación:** Si proporcionaron capacitación al personal para operar y mantener el sistema actualizado, mantuvieron registros de la capacitación realizada.



Figura 26.- Prueba de funcionamiento de los equipos de medición.

Fuente: Los Autores

3.12 Diseño mejorado de la malla de puesta a tierra

Utilizaron los resultados de la evaluación y los conocimientos obtenidos de la revisión bibliográfica para proponer un diseño mejorado de la malla de puesta a tierra. Ambos trabajaron en conjunto para llevar a cabo estas acciones.

- **Consideraron la resistividad del suelo:** Evaluaron la resistividad del suelo en el área donde se implementaría la malla y seleccionaron electrodos y dimensiones de malla adecuados para lograr valores de resistencia de tierra aceptables.
- **Garantizaron una distribución uniforme:** Aseguraron una distribución uniforme de la corriente a través de la malla para evitar gradientes de potencial peligrosos en el suelo.
- **Seleccionaron electrodos y conexiones adecuados:** Eligieron electrodos adecuados según las condiciones locales y la resistividad del suelo, y garantizaron conexiones sólidas y de alta calidad entre los electrodos, cables y equipos.
- **Dimensionaron la malla adecuadamente:** Ajustaron las dimensiones de la malla para abarcar el área a proteger y alcanzar valores de resistencia de tierra aceptables, considerando la resistividad del suelo y la corriente esperada.
- **Mantuvieron la continuidad eléctrica:** Utilizaron cables de conexión apropiados, conexiones soldadas o abrazaderas mecánicas para mantener la integridad eléctrica en toda la malla.
- **Conectaron equipos de manera segura:** Garantizaron conexiones seguras y eficientes de equipos eléctricos y electrónicos a la malla, evitando la formación de lazos de corriente peligrosos.
- **Diseñaron para reducir riesgos:** Consideraron la seguridad eléctrica y diseñaron la malla para minimizar riesgos como choques eléctricos, arcos eléctricos y daños a los equipos.
- **Establecieron la resistencia de tierra objetivo:** Definieron la resistencia de tierra objetivo de acuerdo con las normativas y estándares aplicables, asegurando el cumplimiento de estos requisitos.
- **Tuvieron en cuenta la corriente de falla:** Consideraron la corriente de falla máxima posible en el sistema al diseñar la malla para garantizar su manejo seguro en caso de fallas.

- **Evaluaron tensiones inducidas:** Evaluaron posibles tensiones inducidas en tuberías y estructuras cercanas debido a la corriente de falla y diseñaron la malla para minimizar este riesgo.
- **Diseñaron para mantenimiento y acceso:** Consideraron el acceso para mantenimiento y pruebas regulares, asegurando que los electrodos y conexiones sean accesibles para el monitoreo y posible sustitución.
- **Garantizaron la compatibilidad con otros sistemas:** Aseguraron que el diseño de la malla de puesta a tierra sea compatible con otros sistemas eléctricos y electrónicos presentes en la instalación.
- **Evaluaron potenciales de toque y paso:** Analizaron los potenciales de toque y paso en áreas cercanas a la malla y garantizaron que cumplan con los límites de seguridad establecidos.
- **Cumplieron con normativas:** Diseñaron la malla de acuerdo con las normativas y estándares locales e internacionales relevantes en sistemas de puesta a tierra y seguridad eléctrica.
- **Documentaron detalladamente:** Documentaron el diseño en detalle, incluyendo planos, especificaciones y cálculos, para futuras evaluaciones y referencias.

Siguiendo lo especificado se realizó el respectivo trabajo de campo con el fin de obtener datos congruentes para nuestra simulación, por medio de este trabajo de campo se logró encontrar puntos específicos en donde se producían los errores.

3.13 Simulación y análisis

Utilizaron herramientas de simulación computacional para evaluar el rendimiento del diseño propuesto de la malla de puesta a tierra. Ambos trabajaron en conjunto en estas tareas.

- **Seleccionaron software de simulación:** Eligieron el software de simulación ETAP, que nos permitió modelar el sistema de malla de puesta a tierra y realizar análisis precisos.

- **Recopilaron datos del sistema:** Reunieron datos precisos del sistema de malla de puesta a tierra, incluyendo dimensiones de la malla, resistividad del suelo, electrodos utilizados y configuración de conexiones.
- **Modelaron el sistema:** Ingresaron los datos recopilados en el software de simulación y crearon un modelo tridimensional del sistema de malla de puesta a tierra, incluyendo la ubicación de electrodos, conexiones y otros componentes relevantes.
- **Definieron condiciones de simulación:** Establecieron condiciones de simulación, como corriente de falla, frecuencias de interés y condiciones ambientales relevantes.
- **Realizaron simulaciones:** Ejecutaron las simulaciones en el software para analizar la distribución del potencial eléctrico y las corrientes en la malla de puesta a tierra en diferentes escenarios.
- **Analizaron resultados:** Examinaron los resultados de las simulaciones para identificar posibles puntos débiles en el sistema, áreas con gradientes de potencial peligrosos y evaluaron si la resistencia de tierra cumple con los objetivos establecidos.
- **Optimizaron el diseño:** Si los resultados de las simulaciones revelaban áreas de mejora, ajustaban el diseño de la malla, dimensiones de electrodos o conexiones para mejorar el rendimiento.
- **Validaron con mediciones reales:** Compararon los resultados de las simulaciones con mediciones reales realizadas en el sistema de malla de puesta a tierra para verificar la precisión de las simulaciones.
- **Documentaron resultados:** Registraron los resultados de las simulaciones, observaciones y acciones tomadas en un informe detallado, que sería útil para futuras evaluaciones y referencias.

- **Iteraron y ajustaron:** Si era necesario, repitieron las simulaciones con diferentes parámetros o escenarios para obtener una comprensión completa del comportamiento del sistema.
- **Validaron con normativas:** Nos aseguraron de que los resultados de las simulaciones cumplieran con las normativas y estándares aplicables para sistemas de puesta a tierra.
- **Planificaron mejoras:** Utilizaron los resultados de las simulaciones para identificar áreas específicas que necesitaban mejoras y desarrollaron un plan detallado para implementar estas mejoras.

3.14 Implementación y pruebas

Implementaron el diseño mejorado de la malla de puesta a tierra en la subestación Cartorama C. A. y llevaron a cabo pruebas y mediciones en campo para evaluar su rendimiento, comparando los resultados con las mediciones previas a la implementación.

- **Planificación y diseño detallado:** Comenzaron con la elaboración de un diseño minucioso del sistema de mallas de puesta a tierra, teniendo en cuenta aspectos como la resistividad del suelo, el tamaño de la instalación y los requisitos de seguridad.
- **Selección de materiales y componentes:** Seleccionaron cuidadosamente los electrodos, cables, conectores y otros componentes necesarios según las especificaciones del diseño.
- **Preparación del sitio:** Prepararon el sitio de instalación eliminando cualquier obstáculo y asegurándose de que el área esté lista para recibir los electrodos y las conexiones.
- **Instalación de electrodos:** Excavaron agujeros adecuados para los electrodos y los posicionaron siguiendo las indicaciones del diseño. Luego, realizaron las conexiones entre los electrodos utilizando cables conductores.
- **Conexiones y cableado precisos:** Realizaron conexiones adecuadas y aseguraron que todos los componentes estén firmemente conectados y seguros.

- **Verificación de continuidad:** Llevaron a cabo pruebas de continuidad para asegurarnos de que todas las conexiones estén completas y sin interrupciones.
- **Pruebas preliminares:** Antes de energizar el sistema, realizaron pruebas preliminares para confirmar la correcta conexión de los componentes y verificar la ausencia de cortocircuitos o problemas de continuidad.
- **Medición de resistencia de tierra:** Utilizaron un medidor de resistencia de tierra para medir la resistencia de la malla de puesta a tierra y compararon los resultados con los valores objetivo-definidos en el diseño.
- **Evaluación de tensiones:** Midieron las tensiones de paso y de toque en áreas cercanas a la malla para garantizar que cumplan con los estándares de seguridad.
- **Medición de corriente de falla:** Simularon una falla de corriente y midieron las corrientes de falla para verificar la capacidad del sistema para gestionarlas de manera segura.
- **Mediciones de potenciales:** Midieron los potenciales eléctricos en puntos estratégicos dentro y alrededor de la malla para evaluar la distribución de potencial.
- **Pruebas de continuidad adicionales:** Realizaron pruebas de continuidad adicionales para identificar posibles puntos débiles o conexiones sueltas.
- **Pruebas de integridad:** Realizaron pruebas que simulan condiciones extremas, como descargas eléctricas, para verificar la integridad del sistema.
- **Cumplimiento normativo:** Garantizaron que los resultados de las pruebas cumplan con las normativas y estándares locales e internacionales.
- **Documentación exhaustiva:** Documentaron detalladamente los resultados de todas las pruebas realizadas, incluyendo mediciones, observaciones y acciones tomadas.

- **Aprobación y certificación:** Si es necesario, obtuvieron la aprobación y certificación de las autoridades competentes una vez que se superan todas las pruebas.
- **Capacitación y plan de mantenimiento:** Impartieron capacitación al personal encargado de operar y mantener el sistema de mallas de puesta a tierra y establecieron un plan de mantenimiento regular.

3.15 Evaluación y ajustes adicionales

Han evaluado los resultados de las pruebas y realizados ajustes adicionales en el diseño según sea necesario. Esto nos ha permitido optimizar el rendimiento de la malla de puesta a tierra y garantizar su eficiencia y seguridad.

3.16 Planificación detallada

Con base en los resultados de la evaluación, han elaborado un plan detallado que aborda cada problema y mejora identificados. Han definido los pasos específicos, los recursos necesarios y los plazos para cada cambio.

- **Priorización:** Han clasificado los cambios por prioridad y abordado primero los problemas que representaban mayores riesgos para la seguridad o que tenían un impacto significativo en el sistema.
- **Asignación de responsabilidades:** Han designado a personas responsables de la implementación de cada cambio, asegurándonos de que quede claro quién es el encargado de llevar a cabo cada tarea y quién supervisa el proceso.
- **Recursos y presupuesto:** Nos han asegurado de contar con los recursos necesarios, ya sean materiales, herramientas, mano de obra o presupuesto, para implementar los cambios de manera efectiva.
- **Comunicación interna:** Han informado a todo el personal relevante sobre los cambios que se implementarían, incluyendo al personal de mantenimiento, ingenieros eléctricos, gerentes y otros involucrados en la operación del sistema.

- **Formación:** En caso de que los cambios requieran nuevas habilidades o conocimientos, han proporcionado la formación necesaria al personal encargado de la implementación.
- **Ejecución paso a paso:** Han llevado a cabo la implementación siguiendo el plan detallado, realizando cada paso en orden y verificando que se haya completado correctamente antes de avanzar al siguiente.
- **Pruebas y verificación:** Después de implementar cada cambio, han realizado pruebas para asegurarnos de que el problema se haya resuelto y que el sistema esté funcionando según lo esperado, incluyendo mediciones de resistencia y pruebas de continuidad, entre otros.
- **Registro documentado:** Han documentado todas las acciones tomadas durante la implementación de los cambios como registro de los pasos tomados y referencia futura.
- **Comunicación externa:** En caso necesario, han comunicado a las autoridades reguladoras o a terceros involucrados en el sistema de puesta a tierra sobre las mejoras implementadas, especialmente si había cambios que afectaban la seguridad o el rendimiento.
- **Seguimiento continuo:** Una vez que los cambios han sido implementados, han realizado un seguimiento regular para asegurarnos de que sigan funcionando correctamente con el tiempo, lo que incluye inspecciones periódicas y mediciones recurrentes.
- **Reevaluación periódica:** Han establecido un plan para reevaluar el sistema de malla de puesta a tierra en intervalos regulares para asegurarnos de que se mantenga en buen estado y de que cualquier nuevo problema se aborde de manera oportuna.
- **Mejora continua:** Han utilizado los resultados de la implementación y los datos recopilados para mejorar constantemente el sistema de puesta a tierra,

aprendiendo de las experiencias pasadas y buscando formas de optimizar aún más la eficiencia y la seguridad.

CAPÍTULO 4

4. Diseño y cálculo de la malla de puesta a tierra

4.1 Mediciones de terreno

En la dinámica empresarial moderna, es esencial llevar a cabo procesos de mejora continua para garantizar la eficiencia y la calidad en todas las áreas de operación. Un ejemplo de este compromiso con la excelencia es el caso de la empresa Cartorama C. A., donde se ha implementado un proceso innovador para evaluar y mejorar las condiciones del terreno en el que se desarrollan sus actividades.

La empresa Cartorama C. A. ha reconocido la importancia de comprender las características del terreno en el que opera, ya que esto puede tener un impacto significativo en diversos aspectos de su funcionamiento. Para lograr este objetivo, se ha realizado un proceso exhaustivo de mediciones de terreno utilizando un avanzado sistema de puesta a tierra. Este sistema ha permitido obtener datos precisos y detallados sobre la resistividad del suelo en ohmios por metro, lo que proporciona información crucial sobre la conductividad eléctrica y las propiedades del terreno.

Un componente clave de este proceso es la tabla 2, que recoge la información fundamental derivada de estas mediciones. La tabla presenta una serie de valores de resistividad del suelo, cada uno asociado con la profundidad en la que se insertó el electrodo correspondiente a la medición. Estos valores ofrecen una visión detallada de cómo cambia la resistividad a medida que se profundiza en el suelo, lo que puede tener implicaciones importantes en la distribución de corriente eléctrica y en la seguridad de las instalaciones.

La aplicación de este sistema de puesta a tierra y la recopilación sistemática de datos en la tabla 2 reflejan el compromiso de Cartorama C. A. con la mejora continua y la toma de decisiones basada en datos. Al analizar estos datos, la empresa puede identificar patrones y tendencias que podrían influir en la eficiencia de sus operaciones y en la implementación de medidas preventivas y correctivas. Además, esta información puede ser valiosa para la planificación y el diseño de futuras expansiones o proyectos en el mismo terreno.

Profundidad de exploración con el electrodo	Resistividad
--	---------------------

0,6 m	5,21 Ω *m
1,5 m	15,95 Ω *m
2,5 m	27,32 Ω *m
3 m	30,03 Ω *m

Tabla 2.- Valores de medición de resistividad del suelo.

Fuente: Los Autores

En el contexto de llevar a cabo análisis y verificaciones cruciales para asegurar la integridad del sistema de puesta a tierra, surge la necesidad de llevar a cabo cálculos precisos de corrientes de falla. En aras de este objetivo, se ha desplegado un enfoque ingenieril meticuloso en la empresa, dando lugar al diseño de un diagrama unifilar equivalente que representa con fidelidad las complejas interconexiones en juego.

Este diagrama unifilar, concebido como una herramienta visual de crucial importancia, actúa como un mapa detallado que ilustra las interrelaciones entre los diversos componentes del sistema. Entre los elementos protagonistas de este panorama destaca un transformador reductor, cuya función es de vital relevancia. Su cometido radica en reducir la potencia suministrada, transformando los valores de manera precisa de una capacidad de 69 kW a una potencia reducida de 13.8 kW (Ver Figura 27).



Figura 27.- Transformador reductor de 69 kW a 13.8 kW.

Este transformador no solo desempeña un papel fundamental en la adecuación de la potencia, sino que también demuestra su robustez al asumir la responsabilidad de enfrentar una variedad de cargas eléctricas que se presentan en el entorno operativo. Dado que la empresa se encuentra expuesta a distintas demandas de carga eléctrica, la capacidad del transformador para afrontar tales variabilidades se convierte en un rasgo esencial para garantizar la estabilidad y confiabilidad del sistema.

En consecuencia, esta integración de elementos en el sistema de puesta a tierra subraya la actitud proactiva de la empresa en asegurar un rendimiento óptimo. El análisis de corriente de falla y la implementación del diagrama unifilar no solo representan un enfoque técnico preciso, sino también una estrategia preventiva que se erige como salvaguarda ante posibles anomalías eléctricas.

En última instancia, este proceso demuestra el compromiso inquebrantable de la empresa con la seguridad y la eficiencia. A través de la cuidadosa planificación, la implementación de un sistema de transformación efectivo y la adaptabilidad ante diversas cargas, la empresa se posiciona como una entidad que valora tanto la innovación técnica como la funcionalidad práctica. El resultado es un sistema de puesta a tierra que no solo cumple con los estándares, sino que los supera, proyectando una imagen de excelencia en su enfoque operativo como se aprecia en la figura 28.

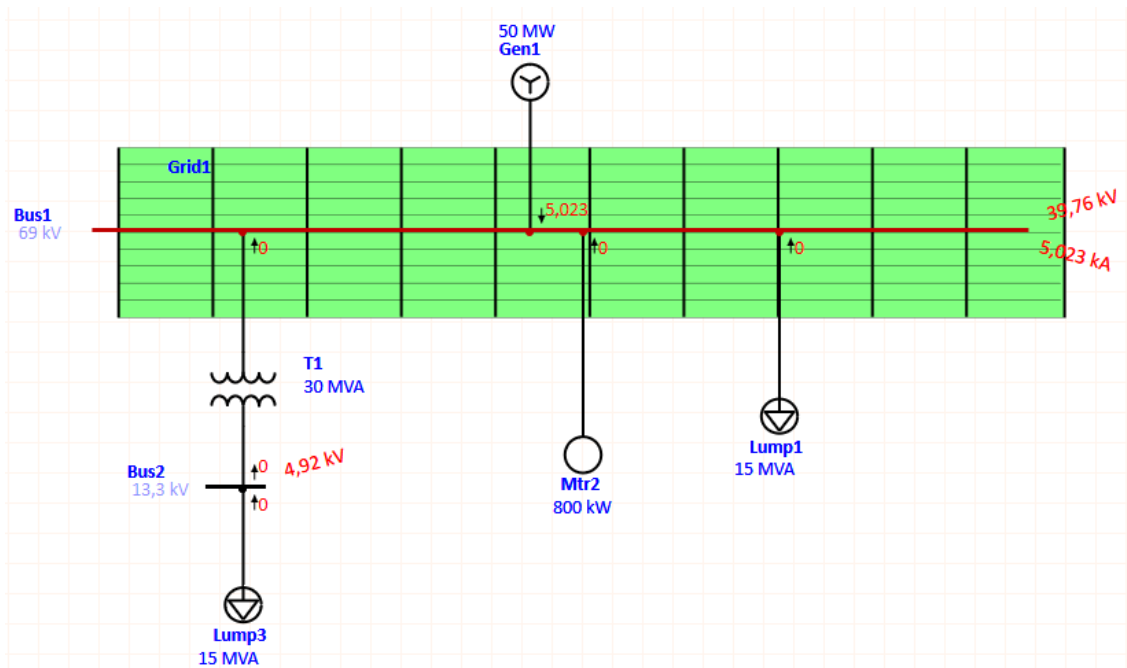


Figura 28.- Esquema puesta a tierra actual.

Fuente: Los autores

4.2 Situaciones actuales puesta a tierra existente

En relación con la evaluación y análisis de la infraestructura de puesta a tierra ya en funcionamiento, se llevaron a cabo mediciones exhaustivas para obtener una comprensión precisa de su rendimiento. Los resultados de estas mediciones, de importancia crítica para entender la eficacia del sistema, indicaron una resistividad equivalente del terreno de $30 \Omega \cdot m$. Este dato es un indicador esencial que afecta la capacidad de conducción eléctrica del terreno, influyendo directamente en la eficiencia y seguridad de las instalaciones eléctricas.

Es fundamental considerar el entorno en el que opera el sistema de puesta a tierra. La temperatura ambiente es un factor que no debe pasarse por alto, ya que puede afectar la conductividad del suelo y, por ende, el funcionamiento del sistema. En este caso, se registró una temperatura ambiente de $35^{\circ}C$ en el momento de la instalación, lo cual brinda un contexto crucial para comprender las condiciones en las que opera el sistema.

La disposición y diseño de la malla de puesta a tierra son aspectos fundamentales en su eficacia. La instalación de la malla se realizó a una profundidad de 0.4 metros en el suelo. Esta profundidad específica se eligió cuidadosamente, ya que influye en la manera en que

la malla interactúa con el terreno circundante y, en consecuencia, en la conducción de corriente eléctrica.

En cuanto a las dimensiones, la malla de puesta a tierra se extiende con un lado superior de 6 metros y un lado inferior de 9 metros, definiendo así un área específica para el flujo de corriente. Además, la disposición de los electrodos en la malla presenta una distancia de 3 metros entre cada uno, un factor que contribuye a lograr una distribución uniforme de la corriente a lo largo de la estructura.

Todas estas consideraciones confluyen en una superficie total de 69 m^2 , que sirve como plataforma para establecer la conexión con el terreno. Cada componente de esta configuración está interconectado y optimizado con el propósito de fomentar la eficacia de la puesta a tierra, en aras de mantener la seguridad y un rendimiento óptimo del sistema eléctrico en funcionamiento.

En conclusión, el análisis detallado de la puesta a tierra ya implementada desvela varios parámetros cruciales que definen su rendimiento como se aprecian en la tabla 3. Desde la resistividad del terreno hasta la temperatura ambiente, pasando por la profundidad de instalación, las dimensiones de la malla y la disposición de los electrodos, cada elemento se entrelaza para conformar un sistema completo que asegura la estabilidad eléctrica y la seguridad en el entorno operativo.

Parámetros	Resultados
Resistividad equivalente del terreno	$30 \Omega \cdot \text{m}$
Temperatura ambiente	35°C
Profundidad de la malla	0,4 m
Área de la malla	54 m^2
Lado superior de la malla	6 m
Lado inferior de la malla	9 m

Tabla 3.- Parámetros actuales de la puesta a tierra.

Fuente: Los autores

También, se realizó una simulación en el software ETAP con los datos anteriormente mencionados donde se buscaba corroborar la efectividad de diseño debido a las ampliaciones en la empresa en los últimos años. A continuación, en la figura 29, se muestra el diseño en el software.

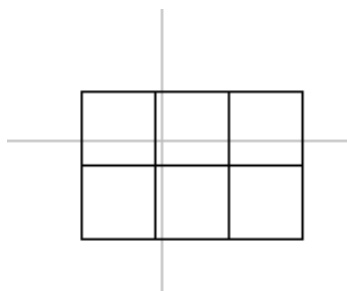


Figura 29.- Representación actual sistema puesta a tierra.

Fuente: Los autores

Adicionalmente, se llevó a cabo una representación tridimensional que proporciona una perspectiva más nítida y comprensible de la estructura de la malla, así como la posición exacta de los electrodos en el sistema. Esta visualización en 3D se presenta como un recurso valioso para apreciar con mayor claridad la configuración y distribución espacial de los componentes involucrados en la puesta a tierra.

Esta representación tridimensional, que captura la disposición precisa de la malla y la colocación estratégica de los electrodos, aporta un nivel adicional de comprensión visual. Al presentar estos elementos en un formato tridimensional, se brinda a los observadores la oportunidad de percibir la estructura desde múltiples ángulos, lo que puede resultar en una apreciación más holística de cómo se establece la conexión con el terreno circundante.

A través de esta visualización en 3D, se logra un nivel de detalle que podría no ser posible con representaciones bidimensionales convencionales. La capacidad de observar la malla y los electrodos desde diversas perspectivas contribuye a una mejor comprensión de cómo se integra esta infraestructura en el entorno circundante y cómo interactúa con los elementos a su alrededor.

En última instancia, esta visualización en tres dimensiones como la de la figura 30 se erige como un complemento esencial para la información previamente presentada. Junto con los datos sobre la resistividad del terreno, la temperatura ambiente y las dimensiones de la malla, esta representación tridimensional enriquece la percepción de la puesta a tierra, permitiendo a los involucrados comprender de manera más completa la configuración y funcionamiento del sistema en su conjunto.

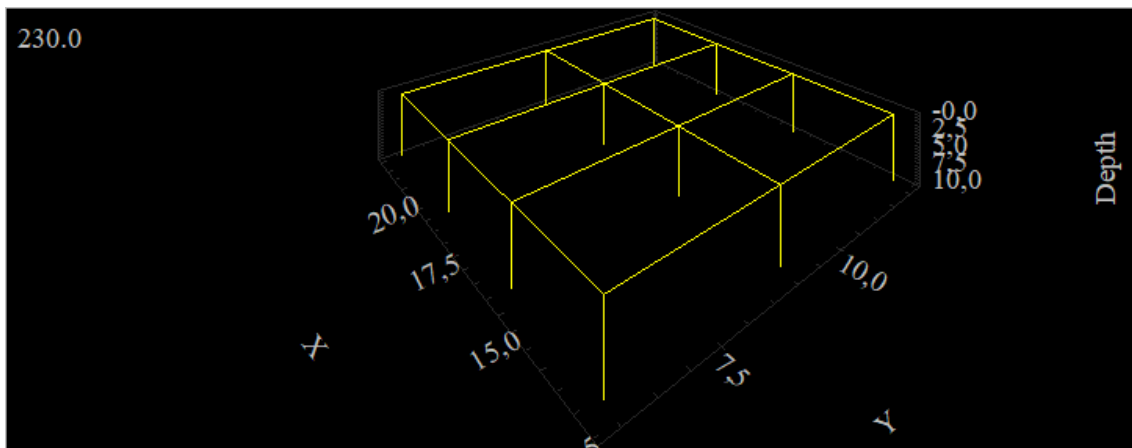


Figura 30.- Modelado 3D puesta a tierra.

Fuente: Los Autores.

4.3 Configuraciones de la malla en el software

En las figuras 31 y 32 se presenta el panel del programa utilizado y son colocados los valores reales obtenidos en campo para la simulación.

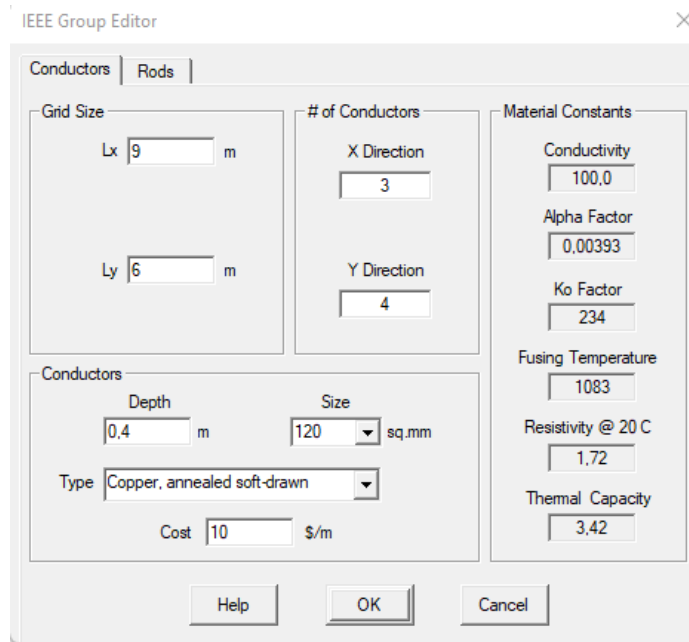


Figura 31.- Configuración de diseño.

Fuente: Los Autores

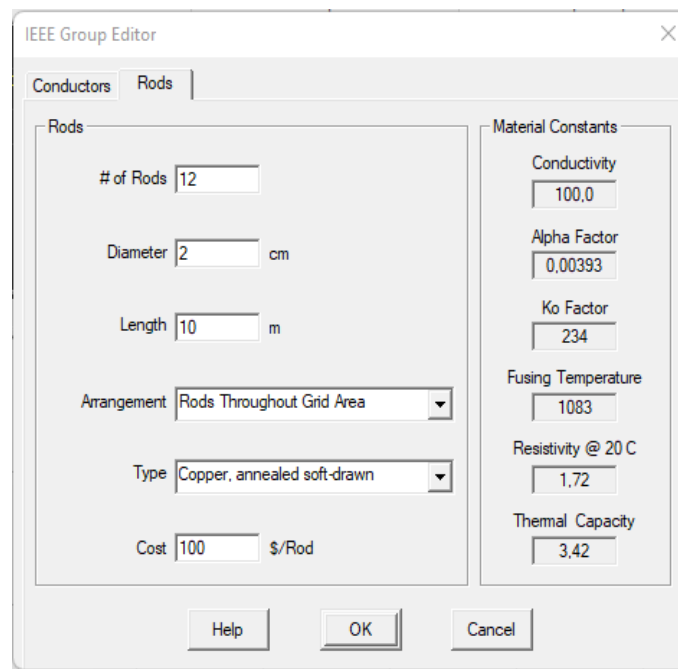


Figura 32.- Configuración de diseño.

Fuente: Los Autores

Se ha implementado una configuración básica en el programa ETAP, donde se han considerado conductores con un área de sección transversal de 120 mm². Estos conductores presentan una conductividad de 100.0 y una temperatura de fusión de 1083°C en sus materiales respectivos. Además, en la configuración, se han utilizado varillas con un diámetro de 2 cm y una longitud de 10 m. Esta disposición se ha establecido para lograr una conexión eficiente y segura en el sistema, asegurando la transmisión efectiva de corriente eléctrica y una operación óptima en condiciones específicas.

4.4 Configuración del suelo en base a las mediciones

Basándonos en las medidas proporcionadas previamente, se ha establecido una configuración del suelo que se adapta a las características específicas del entorno. La resistividad equivalente del terreno, registrada en 30 Ω *m, influye directamente en la conductividad eléctrica de la zona. Esta resistividad se ha tenido en cuenta al diseñar la disposición de la malla de puesta a tierra y la ubicación estratégica de los electrodos.

La temperatura ambiente, que se registró en 35°C al momento de la instalación, también desempeña un papel en la configuración del suelo. Esta variable afecta la conductividad del terreno y, por lo tanto, es un factor clave al considerar la efectividad del sistema de puesta a tierra.

Las dimensiones de la malla, con lados de 6 metros y 9 metros, junto con una distancia de 3 metros entre cada electrodo, se han determinado en función de la distribución óptima de la corriente. Estas medidas se alinean con el objetivo de garantizar una conexión uniforme y eficiente con el terreno circundante.

En resumen, la configuración del suelo se ha adaptado cuidadosamente a las medidas y parámetros específicos que definen la puesta a tierra. La resistividad del terreno y la temperatura ambiente influyen en cómo se establece esta conexión con el suelo, mientras que las dimensiones de la malla y la disposición de los electrodos contribuyen a una distribución efectiva de la corriente eléctrica en el sistema. En la Figura 33 se aprecia el esquema de suelo para mediciones.

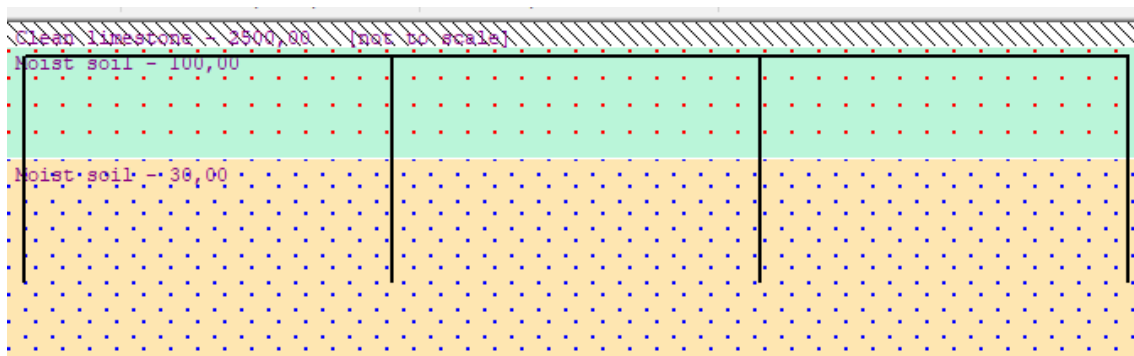


Figura 33.- Esquema de suelo para mediciones.

Fuente: Autores

4.5 Resultado de malla 1

Considerando el análisis previo, se realizó una simulación y se encuentra una tasa de voltaje que excede la tolerancia establecida, esto podría indicar un problema grave en la configuración de la puesta a tierra. Dado que la resistividad del terreno y otros parámetros se han ajustado según las medidas mencionadas, una tasa de voltaje alarmante sugiere una posible ineficiencia en la dispersión de la corriente eléctrica al suelo.

Una tasa de voltaje que supere los límites tolerables podría tener diversas causas, como una resistividad del terreno más alta de lo previsto, una configuración inadecuada de la malla o una conductividad insuficiente en los conductores y varillas. Esto podría provocar un aumento de la resistencia en el sistema de puesta a tierra y, por ende, una acumulación de voltaje no deseado en la estructura.

Para abordar este problema, plantearon ciertas mejoras en la configuración, identificaron los posibles puntos débiles y realizaron los ajustes pertinentes. Esto se logró gracias a la revisión de la resistividad del terreno, la evaluación de la conductividad de los conductores y varillas, así como la consideración de cambios en la disposición de la malla y los electrodos para mejorar la dispersión de la corriente.

Aplicando los cambios previstos debieron gozar de una tasa de voltaje que no exceda la tolerancia establecida ya que esto podría ser una señal de alarma de problemas en la configuración de la puesta a tierra. Los resultados demuestran que el sistema de malla de puesta a tierra que tenía instalada la empresa resulta en un peligro para a la maquinaria,

así como también de las personas que trabajan en las instalaciones y se debe realizar una mejora para evitar accidentes. En la figura 34 son presentados los resultados.

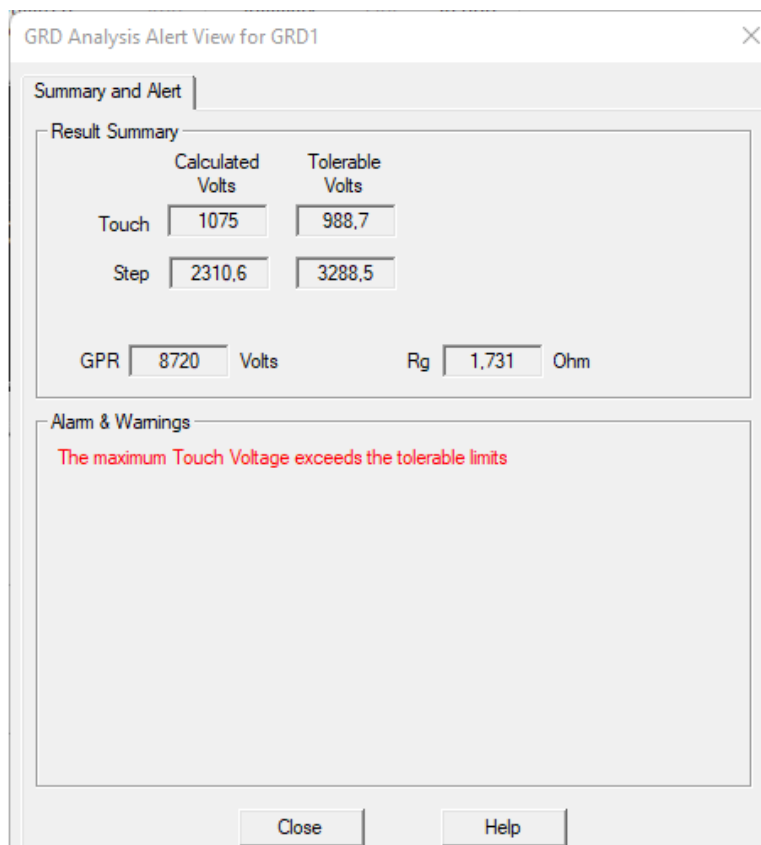


Figura 34- Resultados diagrama digital.

Fuente: Los autores

4.6 Implementación de la propuesta

Con los datos obtenidos anteriormente se plantea una mejora en el sistema de puesta a tierra donde realizaron una ampliación de la malla actual, para mostrar el resultado se usará el software ETAP.

En vista de lo orquestado gracias a las pruebas que realizaron, han dispuesto un pequeño cambio con el fin de solucionar la problemática inicial que en este caso es el voltaje que está excediendo los límites tolerables, se han realizado dos planos para la comprensión visual de esta propuesta, en el Figura 35 podemos apreciar un plano 2D y la Figura 36 un plano 3D.

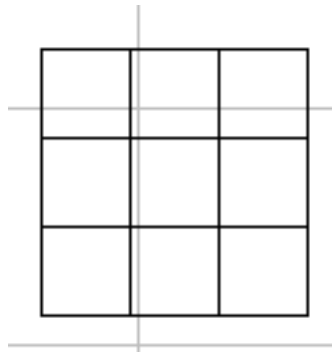


Figura 35.- Plano propuesta.

Figura: Los autores

4.7 Visualización en 3D

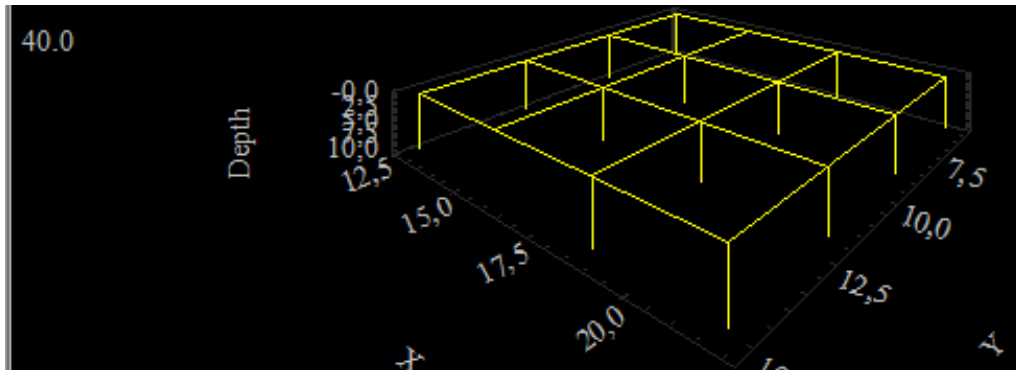


Figura 36.- Plano 2 de la propuesta.

Fuente: Los Autores

4.8 Tierra

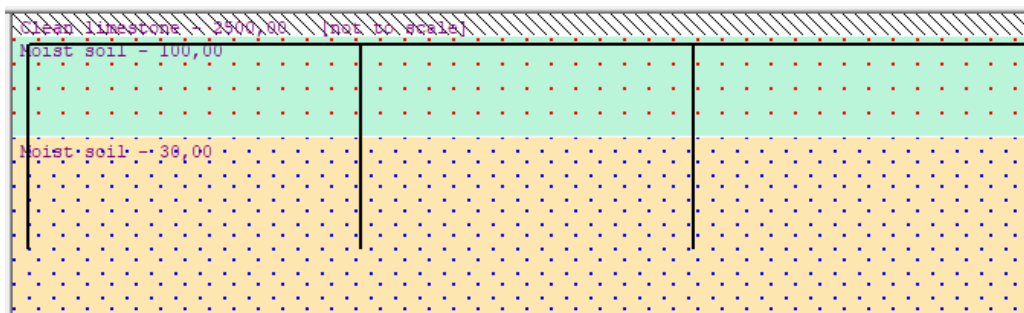


Figura 37.-Esquema malla puesta a tierra propuesta.

Fuente: Los Autores.

Cuando los electrodos simples no resultan suficientes para cumplir con los estándares de seguridad y eficiencia del sistema, es necesario recurrir a configuraciones de electrodos más complejas. En esta situación, es recomendable reforzar los esfuerzos para obtener

información adecuada, especialmente debido a la variedad de factores que influyen en el diseño.

Entre estos factores, se incluyen el modelo del suelo, la magnitud de la corriente de falla y el espacio disponible para la implementación de la malla de tierra. En esencia, el diseño de una malla de tierra debe cumplir con los siguientes parámetros:

- Garantizar que las tensiones de toque y paso generadas durante la peor condición de falla sean inferiores a los valores de tensiones considerados seguros para las personas.
- Hay que asegurar que la resistencia de puesta a tierra sea baja para permitir el flujo adecuado de corriente, necesario para el correcto funcionamiento de los sistemas de protección.

En relación con el modelo del suelo, este se basa en las propiedades naturales del área donde se implementa. El suelo puede ser modelado como uniforme, de dos capas o multicapa. Aunque los modelos multicapa ofrecen información más precisa sobre las condiciones reales, su cálculo requiere técnicas avanzadas y software especializado. Para muchas aplicaciones en subestaciones de distribución, industriales y comerciales, una modelación de dos capas brinda la precisión suficiente, lo que hace que sus resultados sean aceptables.

4.9 Configuraciones

En las figuras 38 y 39 se presenta el panel del programa utilizado y son colocados los valores reales obtenidos en campo para la simulación.

IEEE Group Editor

Conductors | Rods

Grid Size

Lx m

Ly m

of Conductors

X Direction

Y Direction

Material Constants

Conductivity

Alpha Factor

Ko Factor

Fusing Temperature

Resistivity @ 20 C

Thermal Capacity

Conductors

Depth m

Size sq.mm

Type

Cost \$/m

Help OK Cancel

Figura 38.- Configuración propuesta.

IEEE Group Editor

Conductors | Rods

Rods

of Rods

Diameter cm

Length m

Arrangement

Type

Cost \$/Rod

Material Constants

Conductivity

Alpha Factor

Ko Factor

Fusing Temperature

Resistivity @ 20 C

Thermal Capacity

Help OK Cancel

Figura 39- Configuración propuesta.

Fuente: Los Autores

Mediciones con la malla planteada.

Resistividad equivalente del terreno	30 Ω *m
Temperatura ambiente	35°C
Profundidad de la malla	0,4 m
Área de la malla	81 m ²
Lado superior de la malla	9 m
Lado inferior de la malla	9 m

Tabla 4. Mediciones de la simulación.

Fuente: Los Autores

4.10 Resultados obtenidos con la simulación propuesta

Se realizó la simulación con los mismos datos de la malla anterior y se demostró que el nuevo diseño de este proyecto es satisfactorio y resulta en una mejora de seguridad contra corriente de fallas lo que permie salvaguardar la vida humana y proteger las maquinarias.



Figura 40.- Resultados de la simulación.
Fuente: Los Autores

4.11 Datos para estudio

Para ambas mallas se utilizó el siguiente caso de estudio donde se utilizaron los datos de corriente de falla del circuito equivalente.

GRD Study Case Editor ×

Study Case

Study Case ID:

Options: Weight 50 kg 70 kg
 Ambient Temperature: °C

Method: Finite Element IEEE 80 - 2000/2013
 IEEE 80 - 1986 IEEE 665 - 1995

Reports & Plots: Auto Display Summary & Alert Report Details

Update: # of Conductors and Rods (Optimization)

Fault Durations: tf Sec tc Sec ts Sec

Ground Short-Circuit Current: User Specified ifg kA X/R
 Short-Circuit Study

Grid Current Factors: Sf % Cp %

Remarks 2nd line:

< > Help OK Cancel

Figura 41.- Configuración circuito equivalente.
 Fuente: Los Autores

CONCLUSIONES

La implementación y mantenimiento de un mallado a tierra adecuado desempeña un papel esencial en la seguridad y el funcionamiento confiable de los sistemas eléctricos y electrónicos en una amplia variedad de aplicaciones, desde la industria hasta la infraestructura y la vida cotidiana. A lo largo de esta investigación, se ha demostrado de manera concluyente que un mallado a tierra bien diseñado y mantenido no solo es esencial para disipar corrientes eléctricas no deseadas, sino que también desempeña un papel crítico en la protección de personas, equipos y la integridad de la infraestructura eléctrica. Uno de los hallazgos clave de este estudio es que un mallado a tierra adecuado proporciona una vía de baja resistencia para la disipación de corrientes de falla, lo que reduce significativamente el riesgo de descargas eléctricas y la posibilidad de daños a equipos y sistemas eléctricos. Esto se debe a que el mallado a tierra crea una red de conexiones eléctricas que permite que las corrientes fluyan de manera controlada y segura hacia la tierra, evitando así el riesgo de sobretensiones peligrosas en los sistemas. Además, se ha observado que un sistema de mallado a tierra efectivo contribuye a la estabilidad y confiabilidad de las redes eléctricas al minimizar la probabilidad de cortocircuitos y aumentar la capacidad de carga. Esto es especialmente importante en aplicaciones críticas donde la interrupción de la energía puede tener consecuencias graves, como en instalaciones médicas, centros de datos y plantas de producción. Otro aspecto destacado es la importancia de la supervisión y el mantenimiento periódico del sistema de mallado a tierra. Un monitoreo adecuado permite identificar y abordar posibles problemas de resistencia a tierra, garantizando así su eficacia a lo largo del tiempo. También se ha demostrado que el uso de materiales de alta calidad y la implementación de buenas prácticas de diseño son fundamentales para lograr un mallado a tierra confiable y duradero. En resumen, este estudio respalda de manera concluyente la importancia crítica de un mallado a tierra correcto en la protección de personas y equipos, la mejora de la confiabilidad de los sistemas eléctricos y la prevención de fallas catastróficas en las infraestructuras eléctricas. Los resultados de esta investigación subrayan la necesidad de una atención cuidadosa al diseño y mantenimiento de los sistemas de mallado a tierra en una amplia gama de aplicaciones, y destacan su papel esencial en la seguridad y la eficacia de nuestros sistemas eléctricos modernos.

RECOMENDACIONES

Se recomienda asegurarse de que el diseño y mantenimiento del sistema de mallado a tierra estén en conformidad con las normativas y buenas prácticas aplicables. Esto implica una atención constante al estado de la resistencia a tierra, el uso de materiales de alta calidad y la implementación de inspecciones y mantenimiento regulares. Además, considere la implementación de un sistema de monitoreo continuo para detectar y abordar cualquier problema de resistencia a tierra de manera proactiva, lo que contribuirá significativamente a la protección de las personas, equipos y la infraestructura eléctrica en general. Además, priorice la capacitación y la formación del personal encargado del mantenimiento del sistema de mallado a tierra para garantizar que estén equipados para llevar a cabo estas tareas críticas de manera efectiva y segura. En resumen, la clave para mantener un sistema de mallado a tierra confiable y efectivo radica en la vigilancia constante y la adhesión a estándares y prácticas recomendadas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Cartorama, «Cartorama CA,» Cartorama CA, 2022. [En línea]. Available: <http://www.cartorama.com.ec>.
- [2] L. A. Castro Maco, «Diseño de un sistema de puesta a tierra para mejorar las condiciones de operación del área de Cancha de Materiales, PSAA.,» 2020. [En línea]. Available: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/56705>. [Último acceso: 1 Septiembre 2023].
- [3] N. S. M. Vilca, «Diseño Y Evaluación De Sistemas De Puesta A Tierra,» Abril 2023. [En línea]. Available: <https://electroterrabo.com/wp-content/uploads/2023/04/Diseno-y-evaluacion-de-sistemas-de-puesta-a-tierra.pdf>. [Último acceso: 1 Septiembre 2023].
- [4] P. J. Collaguazo Chipantasi, «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. [En línea]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/19249>. [Último acceso: 1 Septiembre 2023].
- [5] N. R. Hercilla Huapaya, «Diseño Asistido Por Software En Un Sistema Puesta A Tierra Para Una Subestación En Pachacamac De 10000 Kva,» 2021. [En línea]. Available: <http://repositorio.untels.edu.pe/jspui/handle/123456789/605>. [Último acceso: 1 Septiembre 2023].
- [6] K. C. P. J. R. C. y. B. E. J. D. Ramírez, «álculo de la Distribución de Voltajes en las Cadenas de Aisladores de una Línea de Transmisión de 500 kV utilizando el Método de los Elementos Finitos,» 2020. [En línea]. Available: [10.29019/enfoqueute.v11n3.619](https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v11n3.619). [Último acceso: 24 Agosto 2023].
- [7] D. E. M. OCAMPO, «Electrodeposición de cadmio y cobre sobre electrodo modificado con polianilina: análisis experimental y modelado matemático,» 2020. [En línea]. Available: <http://riaa.uaem.mx/handle/20.500.12055/2031>. [Último acceso: 1 Septiembre 2023].
- [8] J. H. Juarez Martinez, «MEDICIÓN ELECTRÓNICA DE CORROSIÓN EN ELECTRODO DE TIERRA PARA USO INDUSTRIAL,» 2019. [En línea]. Available: <http://rinacional.tecnm.mx/handle/TecNM/3162>. [Último acceso: 1 Septiembre 2023].
- [9] R. G. Cobo Rendón, «Construcción de una Celda de Combustible de Óxido Sólido para la Producción de Electricidad, Mediante el Uso y Optimización de la Perovskita $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0.2, 0.4$) como Material Constituyente del

- Electrodo de Oxígeno.,» 2023. [En línea]. Available:
<http://repositorio.udec.cl/handle/11594/10637>. [Último acceso: 1 Septiembre 2023].
- [10] J. J. Vivar Valdivia, «Optimización de volumen del material circundante al electrodo para la reducción de costos en la construcción de un pozo de puesta a tierra vertical,» 2020. [En línea]. Available:
<https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/55645>. [Último acceso: Septiembre 2023].
- [11] J. P. Pallo Noroña y E. R. Oñate Zuñiga, «Sistema de telegestión de protección contra sobretensiones eléctricas residenciales,» Septiembre 2022. [En línea]. Available: <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/36042>. [Último acceso: Septiembre 2023].
- [12] A. D. Paguay Gualotuña, «Diseño de sistemas de puesta a tierra utilizando electrodos químicos: utilización de un modelo matemático basado en ecuaciones de varillas para la inclusión de electrodos activos en el diseño de sistemas de puesta a tierra.,» 2023. [En línea]. Available:
<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/24206>. [Último acceso: 22 Agosto 2023].
- [13] C. F. Goñy Ameri, «UNIVERSIDAD NACIONAL JOSÉ FAUSTINO SANCHEZ CARRIÓN,» 2019. [En línea]. Available:
<http://repositorio.unjfsc.edu.pe/handle/20.500.14067/3368>.
- [14] A. M. B. B. N. D. F. A. a. G. E. P. Burgos, «MÉTODOS Y TÉCNICAS EN LA INVESTIGACIÓN CUALITATIVA. ALGUNAS PRECISIONES NECESARIAS,» [En línea]. Available:
<http://conrado.ucf.edu.cu/index.php/conrado>.
- [15] P. E. F.-K. a. L. A. Medrano, «Basic Core in the Analysis of Qualitative Data: Steps, Techniques to Identify Themes, and Data Display Forms,» 2019. [En línea].

ANEXOS 1



Vía de acceso a l empresa Cartorama C. A.



Puntos de conexiones de las mallas a tierra



Vista posterior del Transformador



Vista lateral del transformador



Terminales de 69KV