



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE ELECTRICIDAD

**“PROPUESTA PARA OPTIMIZACIÓN SISTEMAS DE MALLA DE
PUESTA A TIERRA DE LAS ÁREAS DE PRODUCCIÓN DE UCEM -
PLANTA GUAPÁN”**

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

AUTORES: JOHN FABRICIO BARBECHO JIMBO
CARLOS ANDRÉS PÉREZ QUIÑÓNEZ
TUTOR: ING. HERNÁN PATRICIO GUILLÉN COELLO

Cuenca - Ecuador

2022

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, John Fabricio Barbecho Jimbo con documento de identificación N° 0107678963 y Carlos Andrés Pérez Quiñónez con documento de identificación N° 1900396530; manifestamos que:

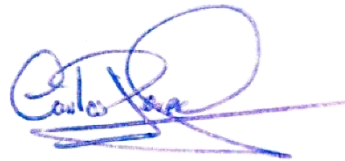
Somos autores y responsables del presente trabajo técnico con enfoque investigativo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 16 de diciembre del 2022.

Atentamente,



John Fabricio Barbecho Jimbo
0107678963



Carlos Andrés Pérez Quiñónez
1900396530

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

Nosotros, John Fabricio Barbecho Jimbo con documento de identificación N° 0107678963 y Carlos Andrés Pérez Quiñónez con documento de identificación N° 1900396530, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto técnico con enfoque investigativo: “Propuesta para optimización sistemas de malla de puesta a tierra de las áreas de producción de UCEM - Planta Guapán”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

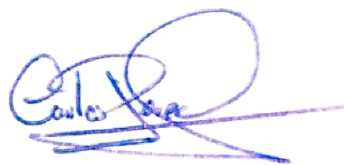
En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 16 de diciembre del 2022.

Atentamente,



John Fabricio Barbecho Jimbo
0107678963



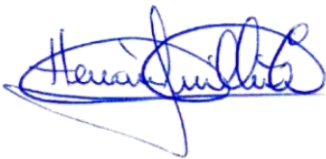
Carlos Andrés Pérez Quiñónez
1900396530

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Hernán Patricio Guillén Coello con documento de identificación N° 0102063120, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: "PROPUESTA PARA OPTIMIZACIÓN SISTEMAS DE MALLA DE PUESTA A TIERRA DE LAS ÁREAS DE PRODUCCIÓN DE UCEM - PLANTA GUAPÁN", realizado por John Fabricio Barbecho Jimbo con documento de identificación N° 0107678963 y por Carlos Andrés Pérez Quiñónez con documento de identificación N° 1900396530, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto técnico con enfoque investigativo que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 16 de diciembre del 2022.

Atentamente,



Ing. Hernán Patricio Guillén Coello
0102063120

RESUMEN

El presente trabajo investigativo se desarrolló con el objetivo de evaluar el sistema de puesta a tierra existente en la planta Industrias Guapán y generar una propuesta de optimización para el mismo. Para ejecutar las mediciones de resistencia y resistividad se aplica el método clamp-on y método de Wenner respectivamente. Los equipos utilizados son el medidor de resistencia y resistividad Amprobe GP-2 Geotest y la pinza de medición de resistencia HT-T2000. Adicionalmente, se realiza el cálculo de los actuales emplazamientos y la proyección del nuevo sistema de puesta a tierra con las ecuaciones de Schwarz y Sverak. Las normativas aplicadas son IEEE std.80: IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding y CPE INEN 19: 2001 Código eléctrico nacional.

ABSTRACT

The present investigative work was developed with the objective of evaluating the existing grounding system in the Industrias Guapán plant and generating an optimization proposal for it. To measure the resistance and resistivity values, the clamp-on method and the Wenner method were applied, respectively. The equipment used in this project is the Amprobe GP-2 Geotest ground resistance and resistivity tester and the HT-T2000 resistance measurement clamp. In addition, Schwarz and Sverak equations are performed for the calculation of the current locations and the projection of the new grounding system. The IEEE std.80: IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding and CPE INEN 19: 2001 Código Eléctrico Nacional are mainly used for this purpose.

PALABRAS CLAVES TEMÁTICAS

Resistencia
Resistividad
Optimización
Puesta a tierra
Guapán
Wenner
Clamp-on
Schwarz
Sverak
IEEE
INEN

Agradecimientos.

John Barbecho.

A todas las personas que han sido parte de mi formación profesional, a mi tutor de tesis, a mis docentes que han moldeado mis conocimientos durante mi etapa universitaria para convertirme con un profesional íntegro.

Carlos A. Pérez.

A mi familia, amigos, compañeros, docentes y colaboradores de la Universidad Politécnica Salesiana y Unión Cementera Nacional por su aporte durante todo el tiempo de formación integral, contribución indispensable para la consecución de un perfil profesional y humano coherente con las exigencias que demanda la sociedad.

Dedicatorias.

John Barbecho.

A mi honorable familia especialmente a mi hermano Adrián por el apoyo incondicional que me brindó para mi desarrollo académico.

Carlos Pérez.

Al mundo.

Índice general

1. Sistemas de puesta a tierra.	22
1.1. Introducción.	22
1.2. Elementos de un sistema de puesta a tierra.	23
1.2.1. El terreno.	23
1.2.2. Electrodo de puesta a tierra (EPT).	25
1.2.3. Línea de enlace con tierra (LET).	26
1.2.4. Conductor a tierra (CAT).	27
1.2.5. Punto de puesta a tierra (PPT).	27
1.3. Resistividad del terreno.	27
1.3.1. Tipos de suelo según sus capas.	27
1.3.1.1. Suelo uniforme.	27
1.3.1.2. Suelo de dos capas.	27
1.3.1.3. Suelo multicapas.	28
1.3.2. Métodos utilizados para la medición de la resistividad del terreno.	28
1.3.2.1. Método de Wenner (MDW).	28
1.3.2.2. Método de Schlumberger - Palmer (MDSP).	29
1.4. Métodos utilizados para la medición de puesta a tierra existente.	30
1.4.1. Método de los tres puntos (MTP).	30
1.4.2. Método de caída de potencial (MCP).	31
1.4.3. Método de clamp-on (MCO).	33
1.5. Evaluación de sistemas de puesta a tierra.	35
1.5.1. Cálculos.	36
1.5.1.1. Ecuación de Schwarz.	36
1.5.1.2. Ecuación de Sverak.	39
1.5.1.3. Ecuación de Sankosha Corp.	40
2. Normativas en relación con sistemas de puesta a tierra.	41
2.1. IEEE Std. 80-2013: IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding.	41
2.2. IEEE Std. 81-2012: IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems.	43
2.3. NFPA 70: National Electrical Code - NEC.	43
2.4. Reglamento técnico de instalaciones eléctricas (RETIE).	47

2.5. CPE INEN 19: 2001 Código eléctrico nacional.	49
3. Mediciones de resistividad y resistencia de puesta a tierra.	52
3.1. Aspectos generales.	52
3.2. Mediciones de la resistividad del terreno.	55
3.3. Mediciones de resistencia de mallas de puesta a tierra.	57
3.3.1. Área B.	57
3.3.2. Área C.	58
3.3.3. Área D.	58
3.3.4. Área E.	59
3.3.5. Área F.	60
3.3.6. Área G.	60
3.3.7. Área H.	61
3.3.8. Subestación.	62
3.3.9. Cuarto eléctrico 2-3.	63
4. Análisis de mallas existentes.	65
4.1. Análisis por área.	67
4.1.1. Área B.	68
4.1.2. Área C.	69
4.1.3. Área D.	71
4.1.4. Área E.	72
4.1.5. Área F.	74
4.1.6. Área G.	80
4.1.7. Área H.	82
4.1.8. Área K.	88
4.1.9. Cuarto eléctrico 2-3.	90
4.1.10. Subestación.	92
4.1.11. Bombas de agua.	94
4.1.12. Grupo diésel.	95
4.2. Resumen de la resistencia de mallas de puesta a tierra calculadas.	97
5. Propuestas de optimización MPT UCEM-Guapán.	99
5.1. Primera propuesta MPT UCEM - Planta Industrias Guapán.	99
5.1.1. Resultados del primer caso del estudio.	102
5.2. Segunda propuesta MPT UCEM - Planta Industrias Guapán.	104
5.2.1. Resultados del segundo caso del estudio	107
6. Conclusiones y recomendaciones.	111
6.1. Conclusiones.	111
6.2. Recomendaciones.	112
Bibliografía	112

7. Anexos	115
7.1. Mediciones de resistividad del terreno.	115
7.2. Mediciones de resistencia de las mallas de puesta a tierra.	118

Índice de figuras

1.1. Estructura de un sistema de puesta a tierra SPT [1].	23
1.2. Efecto de la humedad, temperatura y sal en la resistividad del suelo [2].	25
1.3. Variación de la resistividad del terreno para distintas profundidades y capas [1].	26
1.4. Método de Wenner [3].	29
1.5. Medición de la resistividad del suelo por el método de Wenner [1]. . . .	29
1.6. Método de Schlumberger - Palmer [3].	30
1.7. Método de los tres puntos [4].	31
1.8. Método caída de potencial [3]	32
1.9. Curva de resistencia bajo el método de caída de potencial [3].	33
1.10. Método de medición de resistencia clamp-on [3].	34
1.11. Aplicación correcta del método clamp-on en un SPT multiaterrizado [3].	34
1.12. Medición INCORRECTA por el método clamp-on en un SPT de una torre celular [3].	35
1.13. Coeficiente K_1 [2].	38
1.14. Coeficiente K_2 [2].	39
1.15. Conductor horizontal como EPT [5].	40
2.1. Sistemas de puesta a tierra interconectados [6].	48
2.2. ERROR: Una sola puesta a tierra para todas las necesidades [6]. . . .	48
2.3. ERROR: Puestas a tierra independientes [6].	49
3.1. Amprobe GP-2.	53
3.2. HT T2000.	53
3.3. Plano Planta Industrias Guapán.	54
3.4. Puntos de medición de resistividad.	55
4.1. MPTs existentes área B, área C y cuarto eléctrico.	65
4.2. MPTs existentes subestación y áreas D, E, F, K.	66
4.3. MPTs existentes área H, bombas de agua, TICs.	66
4.4. MPTs existentes área G y grupos diésel.	67
4.5. MPTs existente área administrativa.	67
4.6. Malla existente en el área B.	68
4.7. Malla existente en el área C.	70

4.8. Malla existente en el área D.	71
4.9. Malla existente en el área E	73
4.10. Parte 1 de la malla existente en el área F.	75
4.11. Parte 2 de la malla existente en el área F.	75
4.12. Parte 3 de la malla existente en el área F.	76
4.13. Malla existente en el área G.	81
4.14. Parte 1 de la malla existente en el área H.	83
4.15. Parte 2 de la malla existente en el área H.	84
4.16. Malla de báscula existente en el área H.	84
4.17. Malla existente en el área K	89
4.18. Malla existente en el cuarto eléctrico 2-3.	91
4.19. Malla existente en el área de la subestación.	93
4.20. Malla existente en el área de bombas de agua.	94
4.21. Malla existente en el área del grupo diésel	96
5.1. Propuesta 1 MPT UCEM-Guapán.	101
5.2. Propuesta 2 MPT UCEM-Guapán.	106
7.1. Medición 1 de la resistividad del terreno en la subestación M1	115
7.2. Medición 2 de la resistividad del terreno en la subestación M1.	116
7.3. Medición de la resistividad del terreno en el área K.	116
7.4. Medición de la resistividad del terreno en el área de depósito de combustible	117
7.5. Medición de resistencia de malla puesta a tierra en derivación a canastillas de conductores eléctricos	118
7.6. Medición de resistencia de derivación de varilla Copperweld en caja de distribución	119
7.7. Medición de resistencia de malla puesta a tierra en derivación a generadores diésel	119
7.8. Medición de resistencia de malla puesta a tierra en derivación a variador de frecuencia	120
7.9. Medición de resistencia de malla puesta a tierra en derivación a tablero de distribución.	121
7.10. Medición de resistencia de derivación de varilla Copperweld.	122
7.11. Medición de resistencia de malla puesta a tierra en derivación a transformador	123
7.12. Medición de resistencia de malla puesta a tierra en derivación a motores de bombas de agua.	124
7.13. Medición de resistencia de malla puesta a tierra en derivación al grupo diésel.	125

Índice de tablas

1.1. Resistividades de varios tipos de suelos [2, 1].	24
2.1. Puesta a tierra para sistemas particulares en NEC [7]	44
2.2. Distribución de la PT en el CPE 19:2001[7]	49
3.1. Mediciones de resistividad del terreno.	56
3.2. Medición de resistencia en derivaciones MPT área B.	58
3.3. Medición de resistencia en derivaciones MPT área C.	58
3.4. Medición de resistencia en derivaciones MPT área D.	59
3.5. Medición de resistencia en derivaciones MPT área E.	59
3.6. Medición de resistencia en derivaciones MPT área F.	60
3.7. Medición de resistencia en derivaciones MPT área G.	61
3.8. Medición de resistencia en derivaciones de MPT área H.	62
3.9. Medición de resistencia en derivaciones MPT subestación.	63
3.10. Medición de resistencia en derivaciones MPT cuarto eléctrico 2-3.	63
4.1. Datos MPT área B.	69
4.2. Datos MPT área C.	70
4.3. Datos MPT área D.	72
4.4. Datos MPT área E	74
4.5. Datos MPT área F1.	77
4.6. Datos MPT área F2.	78
4.7. Datos MPT área F3.	79
4.8. Datos MPT área F.	80
4.9. Datos MPT área G.	82
4.10. Datos MPT área H1.	85
4.11. Datos MPT área H2.	86
4.12. Datos MPT área H.	87
4.13. Datos MPT báscula área H	88
4.14. MPT área K.	90
4.15. Datos MPT cuarto eléctrico 2-3.	92
4.16. Datos MPT subestación.	94
4.17. Datos MPT área de bombas de agua.	95
4.18. Datos MPT grupo diésel	97

4.19. Resumen de mallas de puesta a tierra existentes.	98
5.1. Propuesta 1 - Área nueva SPT UCEM-Guapán.	102
5.2. Resumen enlaces proyectados - Propuesta 1.	103
5.3. Cálculo de resistencia de MPT propuesta 1	104
5.4. Resumen enlaces proyectados - Propuesta 1	107
5.5. Resistencia propuesta 2.1 (Área materia prima)	108
5.6. Resistencia propuesta 2.2 (Áreas producción)	109
5.7. Resistencia propuesta 2.3 (Área Administrativas)	110

Introducción.

Los sistemas de puesta a tierra tienen como finalidad disipar a tierra las corrientes eléctricas no deseadas presentes en un emplazamiento de tipo residencial, industrial y comercial. Su función es proteger los equipos y personas de las alteraciones eléctricas que puedan presentarse debido a perturbaciones en la red o fenómenos eléctricos. Los sistemas de puesta a tierra constituyen el principal mecanismo de prevención y protección para las personas y equipos contra los efectos de las sobretensiones y corrientes no deseadas, mismas que pueden resultar peligrosas para la integridad personal y buen funcionamiento de los artefactos.

El trabajo investigativo aquí expuesto realiza una evaluación para determinar las características del actual sistema de puesta a tierra de la planta Industrias Guapán y, con base a los resultados de la evaluación, se ejecuta una propuesta para optimizar el sistema de puesta a tierra.

El capítulo 1 describe toda la base teórica en la cual se fundamentan los sistemas de puesta a tierra. Se detallan conceptos, se explican métodos, se detallan ecuaciones y se adjunta la información científica disponible y relevante que se utilizará en el proyecto.

La normativa vigente referente a sistemas de puesta a tierra es descrita en el capítulo 2. Se emplea aquella expedida por organismos nacionales e internacionales cuyo campo aplicación esté acorde al propósito de la investigación.

El capítulo 3 contiene los resultados de las mediciones de resistencia del sistema de puesta a tierra existente y de la resistividad del suelo de la planta. Se especifican los métodos y el equipo utilizado para este fin.

El capítulo 4 presenta el cálculo de la resistencia de las mallas de puesta a tierra existentes bajo el fundamento teórico descrito en el capítulo 1. Se realiza un análisis de los resultados obtenidos bajo los criterios de la normativa contenida en el capítulo 2.

Con base a los resultados obtenidos, en el capítulo 5 se realiza la propuesta de optimización para el sistema de puesta a tierra, bajo los fundamentos teóricos relacionados, normativa vigente, condiciones de la planta, proyectos antecedentes relacionados, etc.

Finalmente se redactan las conclusiones y recomendaciones para este proyecto y se adjunta toda la documentación de respaldo en anexos.

Glosario.

<i>SPT</i>	Sistema de puesta a tierra.
<i>MPT</i>	Malla de puesta a tierra.
<i>RPT</i>	Resistencia de puesta a tierra.
<i>EPT</i>	Electrodo de puesta a tierra.
<i>LET</i>	Línea de enlace con tierra.
<i>CAT</i>	Conductor a tierra.
<i>PPT</i>	Punto de puesta a tierra.
<i>UCEM</i>	Unión Cementera Nacional S.A.
<i>IEEE</i>	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.
<i>INEN</i>	Instituto Ecuatoriano de Normalización.
<i>NFPA</i>	Asociación Nacional de Protección Contra el Fuego.
<i>RETIE</i>	Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas.
<i>NEC</i>	Código Eléctrico Nacional de la NFPA.
<i>CPE – 19 : 2001</i>	Código Eléctrico Nacional del INEN
<i>AWG</i>	American Wire Gauge.
<i>MDW</i>	Método de Wenner.
<i>MDSP</i>	Método de Schlumberger-Palmer.
<i>MTP</i>	Método de los tres puntos.
<i>MCP</i>	Método de caída de potencial.
<i>MCO</i>	Método clamp-on.
<i>PT</i>	Puesta a tierra.
<i>AC</i>	Corriente Alterna.
L_1	Lado menor de la MPT en m.
L_2	Lado mayor de la MPT en m.
A	Área de la MPT en m^2 .
B	Longitud del conductor horizontal de la MPT en m.
a	Radio del conductor horizontal de la MPT en m.
S	Profundidad de enterramiento del EPT o MPT en m.
n	Cantidad de varilla Copperweld del SPT.
L	Longitud de varilla EPT en m.
r	Radio de varilla EPT.
ρ	Resistividad del terreno en Ωm .
K_1	Coefficiente de Schwarz K_1 .

K_2	Coficiente de Schwarz K_2 .
R_1	Resistencia de conductores horizontales del SPT en Ω .
R_2	Resistencia de varillas del SPT en Ω .
R_m	Resistencia mutua entre R_1 y R_2 en Ω .
R_g	Resistencia del SPT.
CP	Pica de corriente.
PP	Pica de potencial.
G	Electrodo de tierra.
X	Distancia entre PP y G.

Antecedentes.

Los SPTs se definen como un conjunto de medidas a implementarse para conectar un elemento conductor a tierra con la finalidad de disipar las corrientes eléctricas sin exceder el límite de operación de la red y los equipos [8]. Su importancia radica en la necesidad de brindar protección a los equipos y personas contra las corrientes que puedan presentarse debido a perturbaciones en la red o fenómenos eléctricos.

El uso de la tierra como elemento de potencial eléctrico cero fue descubierto por la industria telegráfica en los albores del siglo XIX, cuando se detectó que el sistema teleográfico de dos hilos podía ser sustituido por un sistema monoconductor ya que la tierra servía como elemento de retorno de la señal, haciendo innecesario un conductor metálico para ese fin [9]. Históricamente los primeros sistemas de puesta a tierra fueron elaborados como métodos de seguridad para la prevención de incendios, causados principalmente por una incipiente e incomprendida industria eléctrica [10].

La evolución y la necesidad de contar con un SPT ha dado origen a normativas como la IEEE std. 80: “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding” e IEEE std. 142: “IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems” a nivel internacional; en el ámbito local existe la CPE INEN 19: 2001 código eléctrico nacional que junto a las enlistadas anteriormente describen los parámetros a considerarse para el diseño y construcción de los sistemas mencionados. Complementan lo enunciado los reglamentos locales de las empresas eléctricas que determinan condiciones adicionales para los SPTs en su área de concesión.

Actualmente toda edificación de tipo industrial debe contar con un sistema de puesta a tierra para sus instalaciones, como es el caso de UCEM - planta Industrias Guapán. La empresa lleva más de cincuenta años en el mercado cementero nacional y durante este lapso ha experimentado nuevas construcciones y modificaciones a su infraestructura y maquinaria inicial. Dado este antecedente, resulta indispensable mantener actualizada la información referente a los SPTs de la planta para operar bajo estándares de seguridad adecuados y aprovechar la información vigente para realizar sus planificaciones apoyadas en datos precisos.

Justificación.

Con la finalidad de disipar las corrientes eléctricas a tierra presentes en un emplazamiento de tipo residencial, industrial y comercial surgen los SPTs. Desde sus inicios han servido como mecanismo de prevención y protección para las personas y equipos contra los efectos de las sobretensiones y corrientes no deseadas.

Un SPT correctamente diseñado y construido permite mantener la integridad de las instalaciones y garantizar la salud de las personas que allí se encuentren. Su naturaleza preventiva y correctiva permiten ahorrar en gastos de mantenimiento, reparaciones, sustituciones y salida de operación de maquinaria por fenómenos que se presentan en la red, además de servir para garantizar la integridad física y salud de quienes laboran en este emplazamiento.

UCEM - planta Industrias Guapán cuenta con un SPT en funcionamiento, pero requiere una actualización de la información del mismo dado el constante dinamismo en las modificaciones de la planta desde sus inicios. Mantener un pleno conocimiento del SPT existente permitirá tener un adecuado sistema preventivo de accidentes por fallas eléctricas, ejecutar una planificación de sus operaciones y expansiones, realizar tareas de mantenimiento, etc. Por tal razón, a través de este trabajo técnico investigativo se busca suplir las necesidades de la empresa descritas anteriormente y, según los resultados obtenidos, formular recomendaciones para la optimización del actual SPT de la empresa.

Grupo Objetivo.

El presente proyecto técnico investigativo tendrá como beneficiaria directa a la empresa Unión Cementera Nacional UCEM – Planta Industrias Guapán, la cual dispondrá de información detallada y actualizada sobre el estado de su SPT, datos necesarios para su operación, planificación y expansión de sus instalaciones. Este proyecto también servirá como referencia para futuros trabajos de investigación, tesis de grado o similares para la comunidad académica de la Universidad Politécnica Salesiana y demás instituciones de educación superior. Se incluyen también a empresas y organismos públicos o privados y personas en general con interés en los SPTs.

Objetivos.

Objetivo general.

Determinar las características de las mallas existentes de puesta a tierra en las áreas de producción de UCEM - planta Industrias Guapán y el cumplimiento de las normativas correspondientes.

Objetivos específicos.

- Identificar y medir valores de resistividad en las mallas y el terreno de cada zona de producción en UCEM - planta Industrias Guapán.
- Determinar el estado actual del sistema de malla de puesta a tierra de UCEM - planta Industrias Guapán.
- Realizar recomendaciones para la optimización y mejoras del sistema de puesta a tierra de UCEM - planta Industrias Guapán.

Capítulo 1

Sistemas de puesta a tierra.

1.1. Introducción.

Un sistema de puesta a tierra SPT consiste en una agrupación continua e ininterrumpida de elementos que permiten conectar equipos eléctricos o componentes no eléctricos con el terreno o una masa metálica que posee enlace con tierra física [6]. Comprende la puesta a tierra ¹ y la red equipotencial ² de cables que normalmente no conducen corriente [6]. Se establecen como objetivos principales de un SPT los siguientes:

- Proporcionar los medios para disipar corrientes eléctricas a tierra en condiciones normales y de falla ³sin exceder los límites de operación de los equipos o afectar de manera adversa la continuidad del servicio [2].
- Asegurar que las personas dentro un emplazamiento y en sus inmediaciones no estén expuestas al peligro de una descarga eléctrica [2].

Se muestra la composición de un SPT en la ilustración 1.1.

¹Grupo de elementos conductores equipotenciales, en contacto eléctrico con el suelo o una masa metálica de referencia común, que distribuye las corrientes eléctricas de falla en el suelo o en la masa. Comprende electrodos, conexiones y cables enterrados[6].

²Conjunto de conductores del sistema de puesta a tierra que no están en contacto con el suelo o terreno y que conectan sistemas eléctricos, equipos o instalaciones con la puesta a tierra [6].

³Estado bajo el cual un equipo,sistema o componente no ejecuta de manera óptima las funciones para las que fue diseñado [6].

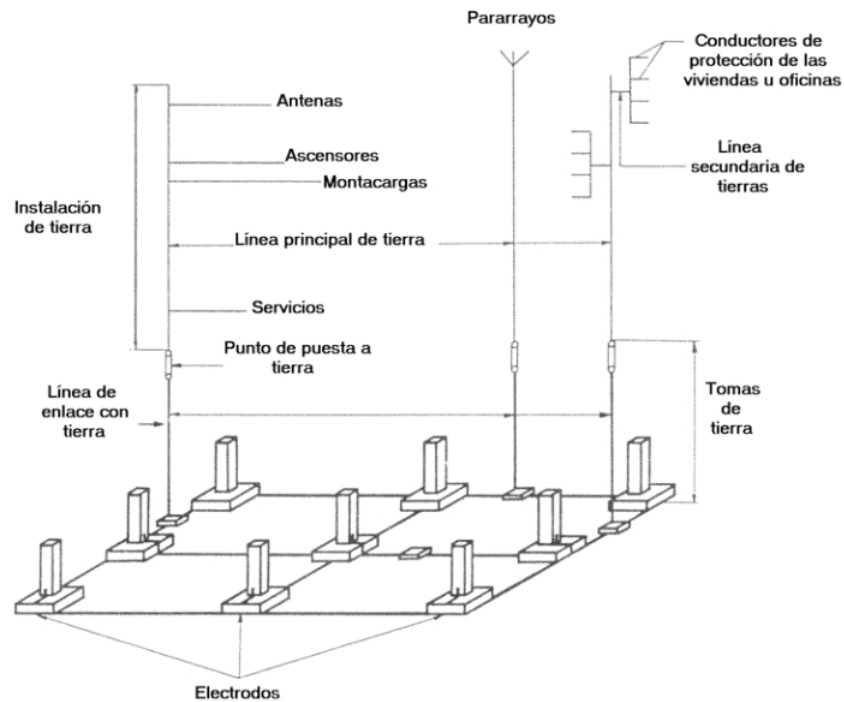


Figura 1.1: Estructura de un sistema de puesta a tierra SPT [1].

1.2. Elementos de un sistema de puesta a tierra.

Los principales elementos que forman parte de un SPT son:

1.2.1. El terreno.

Parte fundamental del SPT, es a donde se descargan y disipan las corrientes que en el ingresan [1]. Su característica más importante como parte de un SPT es su resistividad eléctrica⁴, medida en Ωm y se representa con ρ . Un valor de resistividad alto indica que el material se comporta como aislante y un valor menor corresponde a una naturaleza conductora.

⁴Comportamiento de un material al paso de corriente. Se denomina también resistencia específica.

Tabla 1.1: Resistividades de varios tipos de suelos [2, 1].

Tipo de terreno	Resistividad en Ωm
Terrenos pantanosos	30
Limo	20 a 100
Humus	10 a 150
Turba húmeda	5 a 100
Arcilla plástica	50
Margas y arcillas compactas	100 a 200
Arena arcillosa	50 a 500
Arena silíceas	200 a 3000
Suelo pedregoso cubierto de césped	300 a 500
Suelo pedregoso desnudo	1500 a 3000
Calizas blandas	100 a 300
Calizas compactas	1000 a 5000
Calizas agrietadas	500 a 1000
Pizarras	50 a 300
Rocas de mica y cuarzo	800
Granitos y gres procedentes de alteración	1500 a 10000
Granitos y gres muy alterados	100 a 600
Hormigón	2000 a 3000
Grava	2000 a 5000

La resistividad se ve afectada por factores como la humedad, temperatura y composición química del suelo. La humedad influye sobre la resistividad provocando un incremento abrupto de este valor siempre y cuando no supere el 15% del peso del suelo, adicionalmente influyen la compacidad y tamaño de los granos que componen el suelo. Cuando se supera el punto de congelamiento del agua (0 °C) la temperatura no influye mayormente sobre la resistividad, pero por debajo del cero su valor aumenta rápidamente [2].

El comportamiento del suelo en función de la humedad, temperatura y composición salina se presenta en la gráfica 1.2.

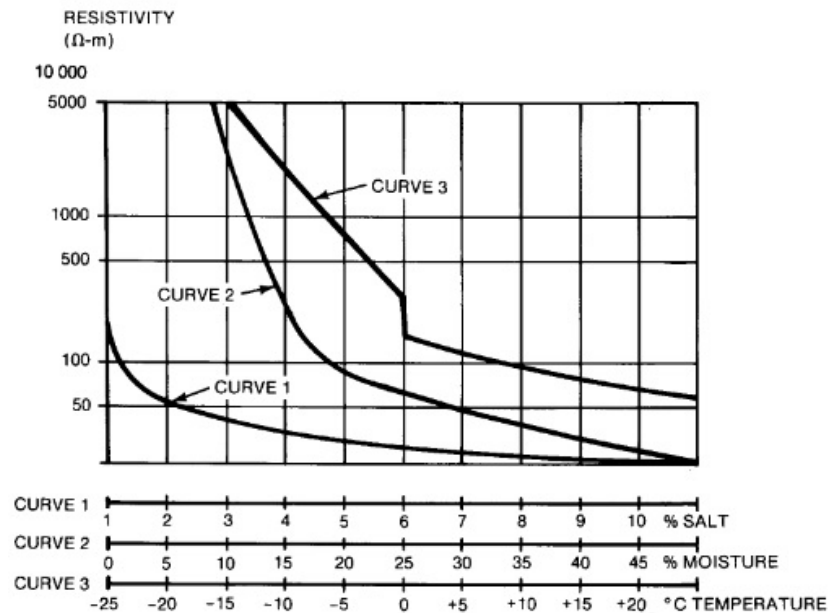


Figura 1.2: Efecto de la humedad, temperatura y sal en la resistividad del suelo [2].

Además de su composición, el terreno también varía en su resistividad según la profundidad y las capas presentes. Se ilustra este comportamiento en la figura 1.3.

De acuerdo con lo expuesto en la tabla 1.1, y en las figuras 1.2 y 1.3 se puede concluir que [2, 1, 11]:

- La cantidad de humedad en el terreno es inversamente proporcional al valor de su resistividad.
- Los suelos con presencia de sales provocan una disminución en el valor de resistividad.
- En la mayoría de terrenos la resistividad disminuye conforme aumenta la profundidad.
- Los suelos con temperaturas bajas tienen resistividades altas.
- Deben evitarse terrenos pedregosos pantanos, zonas de residuos, basureros, etc.

1.2.2. Electrodo de puesta a tierra (EPT).

Es el conductor o conjunto de conductores, enterrados en el suelo que sirven para realizar la conexión a tierra. Pueden ser conductores, varillas, mallas, placas, pilares o

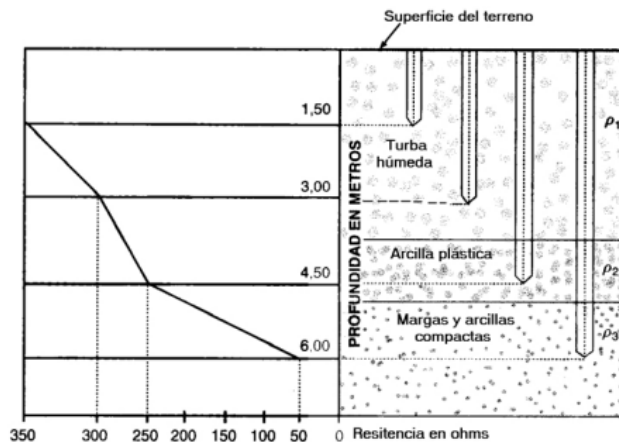


Figura 1.3: Variación de la resistividad del terreno para distintas profundidades y capas [1].

estructuras metálicas en contacto directo con el terreno [6, 11]. Una malla de puesta a tierra MPT, como se indica anteriormente, también es un EPT que puede contener varillas EPT que forman parte de un solo EPT integral (MPT). Para fines prácticos se denominará como varilla EPT o MPT al tipo de arreglo metálico usado en el SPT para evitar confusiones.

1.2.3. Línea de enlace con tierra (LET).

Cable de cobre con recubrimiento o desnudo que une al EPT o MPT con el barraje principal de tierra ⁵ [6] o punto de puesta a tierra PPT. Debe extenderse en contacto directo con el suelo, evitando discurrir por tuberías o conductos aislantes. En el caso de que el EPT sea una malla, la LET y el EPT (varilla) forman un EPT integral (MPT).

⁵Pieza metálica, generalmente de cobre, usada como elemento de conexión entre la LET y CAT.

1.2.4. Conductor a tierra (CAT).

Utilizado para enlazar el circuito o equipo a proteger con el punto de puesta a tierra PPT.

1.2.5. Punto de puesta a tierra (PPT).

Espacio donde convergen la LET y el CAT. Se trata de una barra o estructura metálica de similar funcionalidad ubicada dentro un tablero o en punto visible de fácil acceso.

1.3. Resistividad del terreno.

Con base a lo expresado en la sección 1.2.1 la resistividad del terreno es la característica más importante en un SPT. Las condiciones del terreno en el cual se va a emplazar un SPT deben conocerse a detalle como requisito indispensable a cualquier diseño. Para la resistividad del terreno no es recomendable basarse únicamente en la clase de suelo ni en su nivel de resistividad aproximado, sino que deben realizarse las respectivas mediciones para un correcto diseño del SPT.

Como ya se había mencionado previamente, la resistividad del suelo varía debido a factores como la profundidad, composición del terreno, concentración de sales, humedad, granulometría⁶, la estratigrafía⁷, la compactación y la temperatura[11].

1.3.1. Tipos de suelo según sus capas.

1.3.1.1. Suelo uniforme.

Se habla de un suelo uniforme cuando al ejecutar las mediciones del terreno se obtiene una variación mínima o moderada en los valores de resistividad.

1.3.1.2. Suelo de dos capas.

Un terreno con una capa superior de grosor finito con una resistividad distinta a la capa inferior de espesor infinito.

⁶Distribución de los diferentes tamaños de partículas del suelo.

⁷Estudio de características y la distribución de las rocas sedimentarias y los estratos.

1.3.1.3. Suelo multicapas.

Presencia de varios estratos en el terreno.

1.3.2. Métodos utilizados para la medición de la resistividad del terreno.

La medición de resistividad del terreno se lleva a cabo con el objetivo de determinar si su valor se mantiene relativamente constante o varía. Las mediciones deben realizarse en varios puntos del terreno y a diversas distancias de las picas (electrodos) para asegurar datos precisos. Para mejorar la precisión se recomienda repetir la medición de un punto realizando una rotación de 90° , es decir ejecutar las medidas en sentido horizontal y vertical. El método más utilizado para este fin es el de los cuatro puntos, el cual presenta a su vez dos variaciones que son:

1.3.2.1. Método de Wenner (MDW).

Se dispone de cuatro picas metálicas enlazadas al medidor de resistividad (telurómetro) por cuatro conductores. Se colocan las cuatro picas en línea recta, enterradas en el suelo una profundidad b y con una separación equidistante a entre picas adyacentes. Una corriente de prueba I pasa entre los dos electrodos exteriores a la vez que el potencial V actúa en las dos picas interiores [3]. Bajo el principio de la ley de Ohm se obtiene la resistencia del suelo para luego calcular la resistividad por medio de la expresión:

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

[3]

En la práctica, las picas no superan una profundidad de enterramiento de $0,1a$, por lo que en 1.1 se puede asumir un valor $b=0$ y 1.1 se convierte en:

$$\rho = 2\pi aR \quad (1.2)$$

[3]

Las expresiones 1.1 y 1.2 nos proveen el valor de resistividad ρ a una profundidad a , es decir que la distancia de separación de los electrodos determina a que profundidad se está realizando la medición de ρ .

Las gráficas 1.4 y 1.5 muestran el esquema y forma de medición por el método de Wenner.

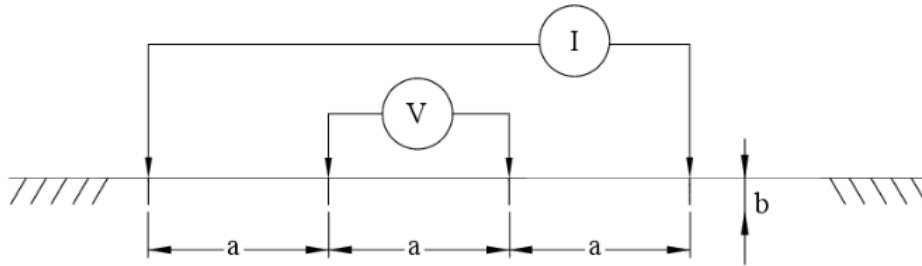


Figura 1.4: Método de Wenner [3].

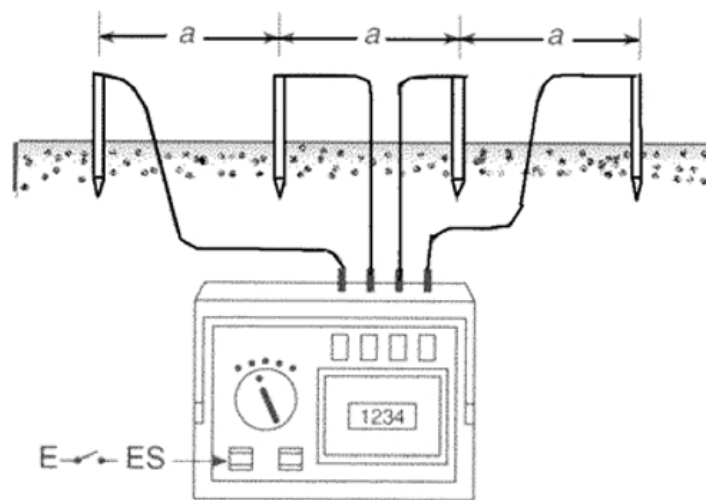


Figura 1.5: Medición de la resistividad del suelo por el método de Wenner [1].

1.3.2.2. Método de Schlumberger - Palmer (MDSP).

Difiere del método de Wenner en que la separación entre los electrodos centrales se mantiene constante y las mediciones se realizan cambiando la distancia de las picas exteriores con respecto a las interiores. Es un método más rápido ya que no se deben mover todas las picas a la vez. Si la profundidad del enterramiento de las picas b es pequeño con respecto a las distancias c y d , y además $c > 2d$, entonces la resistividad medida a una profundidad $(2c + d)/2$ se obtiene bajo la siguiente expresión [3]:

$$\rho = \pi c(c+d)R/d \quad (1.3)$$

[3]

La figura 1.6 muestra cómo se realiza la medición bajo el método de Schlumberger:

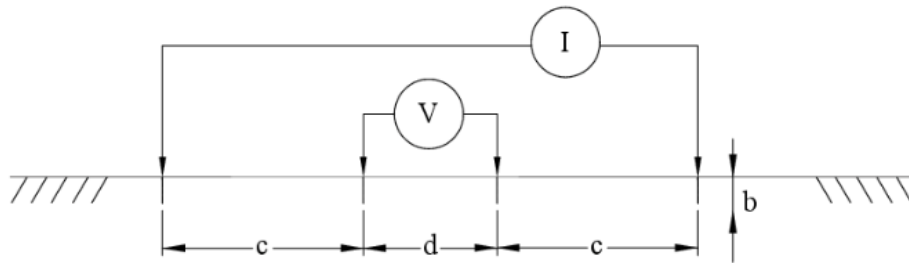


Figura 1.6: Método de Schlumberger - Palmer [3].

1.4. Métodos utilizados para la medición de puesta a tierra existente.

Para la medición de la resistencia de SPTs ya instalados se emplean mayormente los siguientes métodos:

1.4.1. Método de los tres puntos (MTP).

Este método implica el uso de dos electrodos de medición auxiliares r_2 y r_3 . EPT a evaluar (o MPT) se designa con r_1 . La resistencia mutua entre electrodos de medición se denotan por r_{12} , r_{13} y r_{23} donde $r_{12} = r_1 + r_2$ y así sucesivamente [2, 3, 12].

Resolviendo las ecuaciones anteriores se tiene:

$$r_1 = \frac{r_{12} - r_{23} + r_{13}}{2} \quad (1.4)$$

[2, 3]

Los electrodos deben estar separados el menos tres veces la medida de la profundidad a la que está enterrada el EPT para evitar las interferencias mutuas. Así mismo los electrodos auxiliares deben enterrarse a una profundidad no mayor a la hondura del EPT a medir y su resistividad individual tiene que ser menor en comparación con el elemento sometido a evaluación.

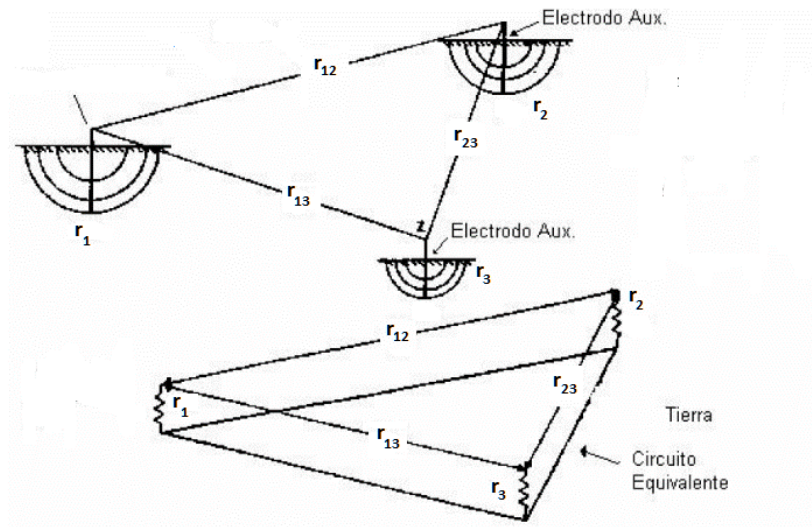


Figura 1.7: Método de los tres puntos [4].

1.4.2. Método de caída de potencial (MCP).

Este método presenta algunas variables, se presenta el esquematizado en la figura 1.8.

Se emplean dos picas auxiliares denominadas pica de corriente (CP) y pica de potencial (PP), las cuales se colocan en la misma dirección. Una corriente constante fluye entre un electrodo de tierra (G) y el electrodo CP. El voltaje o caída de potencial se mide entre G y PP. Se ilustra lo descrito en 1.8. PP normalmente está orientada en la misma dirección que CP, aunque también puede colocarse en la dirección opuesta [2, 3, 12].

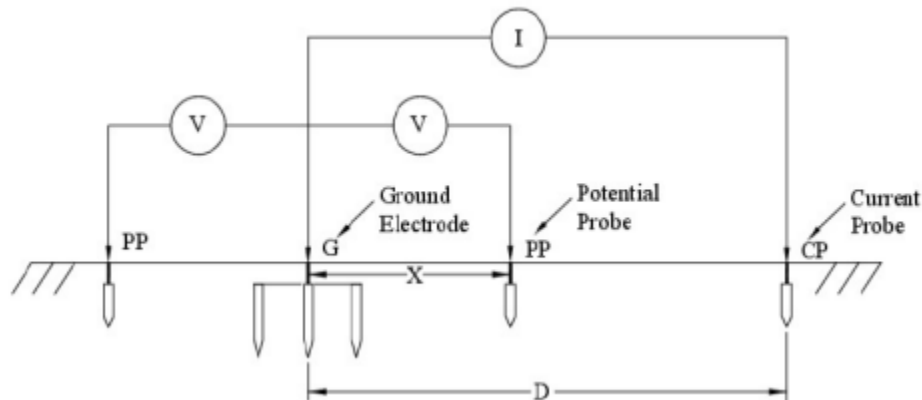


Figura 1.8: Método caída de potencial [3]

La resistencia mutua interfiere en este método, así es que para disminuir o anular su efecto se deben colocar G y CP a una distancia mutua (D) de al menos cinco veces la longitud del EPT a medir, o su equivalente de cinco veces la diagonal máxima de la MPT. En la práctica la distancia X entre PP y G es el 62 % de la distancia D cuando están en la misma dirección (regla del 62 %). Son condiciones indispensables para este método tener un piso relativamente nivelado y que el EPT o MPT no deben presentar conexiones externas [2, 3, 12].

Este método es susceptible a presentar errores en la medición si existen corrientes dispersas en el terreno a la misma frecuencia del instrumento de medición (telurómetro) o debido a la presencia de elementos metálicos en el suelo que interfieran con los resultados. Para salvar estos inconvenientes se recomienda como mínimo realizar tres mediciones moviendo PP entre el EPT y CP. Dos o tres mediciones consecutivas de resistencia que sean constantes o con una variación pequeña pueden considerarse como el valor de resistencia real [2, 3, 12].

La gráfica 1.9 muestra el comportamiento de las mediciones bajo este método. La sección más plana de la curva indica una pendiente mínima (variación más pequeña en los valores de resistencia medidos), por consiguiente este es el valor de resistencia del SPT. La línea continua representa los valores obtenidos con las picas auxiliares CP y PP en la misma dirección, mientras que la línea discontinua muestra los resultados con estos elementos situados en direcciones contrarias.

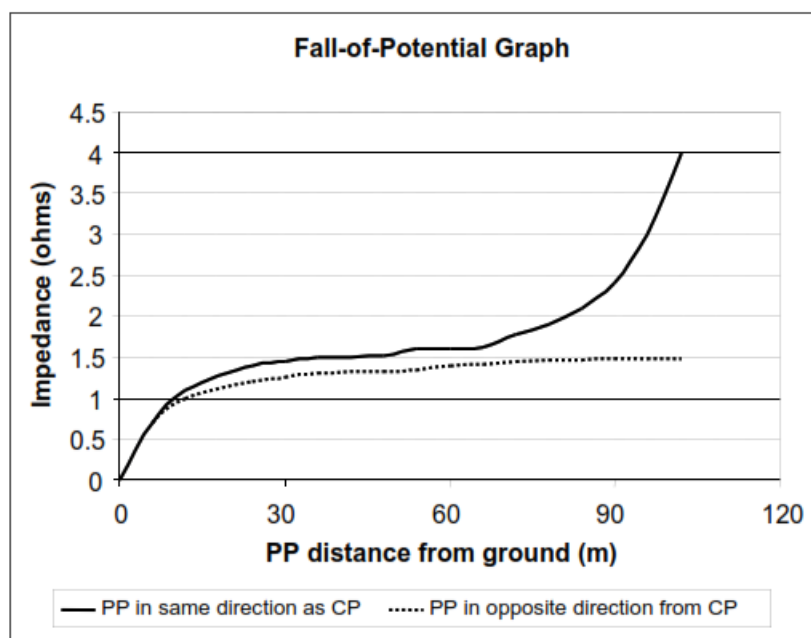


Figura 1.9: Curva de resistencia bajo el método de caída de potencial [3].

1.4.3. Método de clamp-on (MCO).

Denominado también método de pinza, método de lazo o método sin picas. Se emplea una pinza para enlazar al cable de derivación del SPT. La pinza induce un voltaje de frecuencia definida (1 kHz a 3 kHz generalmente) en el sistema de tierra que contiene al EPT bajo prueba. Este voltaje inducido produce una corriente (I -prueba) a través del SPT que es medido por la pinza. Bajo el principio de la ley de Ohm la pinza muestra la relación voltaje-corriente del SPT (resistencia de PT) [2, 3, 12].

El procedimiento asume que la resistencia de puesta a tierra del neutro multiate-rizado, excluyendo el EPT bajo prueba, es significativamente menor en comparación con la resistencia de este EPT medido, consecuentemente el valor medido corresponde al EPT. Además, la reactancia inductiva⁸ del circuito debe ser muy pequeña en comparación con la resistencia del EPT a prueba; las altas frecuencias con las que trabaja la pinza provocan un aumento significativo en el valor de la reactancia lo que distorsiona de manera notable el valor de medición del EPT [2, 3, 12].

⁸Componente imaginaria positiva de la impedancia eléctrica. Para fines prácticos, en los SPT se asume una reactancia muy pequeña, de manera que los términos impedancia y resistencia se asumen como iguales.

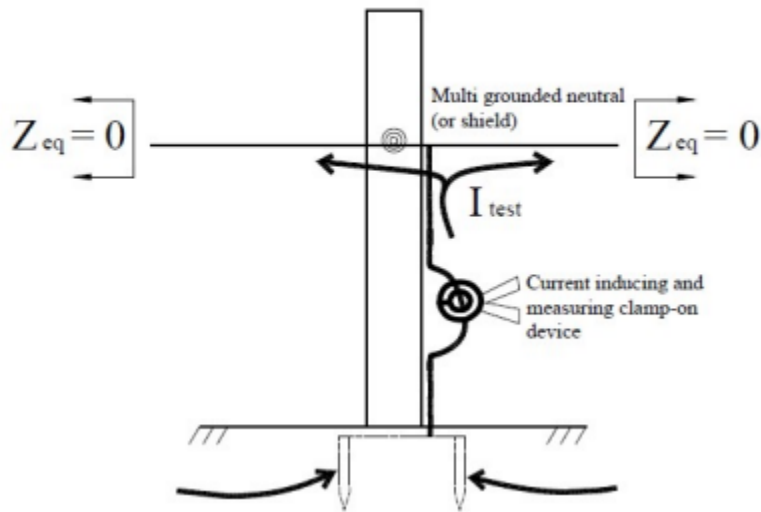


Figura 1.10: Método de medición de resistencia clamp-on [3].

El método presenta una ventaja sobre los demás al ser más rápido, no requerir electrodos de medición adicionales y el EPT a medir no necesita estar desconectado del SPT.

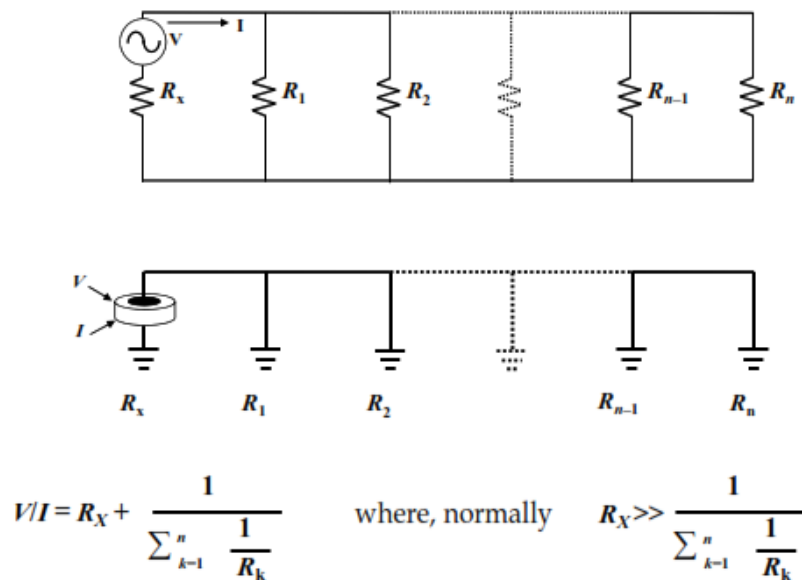


Figura 1.11: Aplicación correcta del método clamp-on en un SPT multiaterrizado [3].

Las desventajas del procedimiento son que no se puede usar para medir un SPT con conexiones múltiples, ni es aplicable en SPT aislados entre sí donde no existe una ruta

de retorno. Tampoco es útil si existe una ruta de retorno alternativa en el suelo, como es el caso de torres celulares o subestaciones. [2, 3, 12].

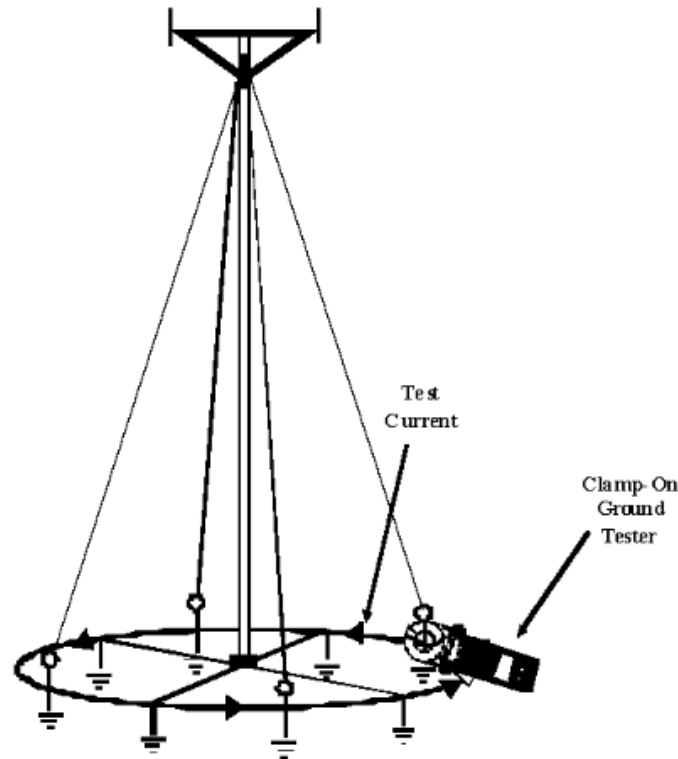


Figura 1.12: Medición INCORRECTA por el método clamp-on en un SPT de una torre celular [3].

La aplicación correcta e incorrecta del MCO se ilustran en las figuras 1.11 y 1.12 respectivamente.

1.5. Evaluación de sistemas de puesta a tierra.

Un buen SPT provee un valor mínimo de resistencia, situado preferentemente por debajo de 1Ω para subestaciones y líneas de transmisión grandes [2]. Para estructuras más pequeñas son aceptables valores entre 1Ω y 5Ω como por ejemplo subestaciones en plantas industriales o edificios comerciales grandes [12].

Por su parte, cuando el SPT está formado por un solo EPT como por ejemplo una varilla Copperweld, las normativas NEC y CPE-19:2001 establecen que su resistencia debe ser menor a 25Ω y pueden disminuirse incluyendo más electrodos en el SPT.

Estos valores únicamente son aplicables en entornos domésticos (casas o pequeñas construcciones) con equipos eléctricos pequeños o básicos y de ninguna manera garantizan seguridad en el SPT [7, 13, 12].

1.5.1. Cálculos.

Varios autores han desarrollado ecuaciones para estimar el valor de resistencia de un EPT según las condiciones del terreno y materiales utilizados para su construcción. En esta publicación se utiliza un modelo de suelo uniforme, conductor de cobre desnudo y varillas de cobre como principales elementos del EPT. A continuación se detallan las ecuaciones utilizadas para obtener el valor de resistencia de un SPT:

1.5.1.1. Ecuación de Schwarz.

Schwarz introduce cuatro expresiones para calcular el valor de resistencia de una malla horizontal con electrodos verticales (varillas), es decir una MPT. Emplearemos este método para un terreno uniforme, siendo las cuatro expresiones:

R_1 Resistencia de los conductores horizontales de la malla en Ω .

R_2 Resistencia de todas las varillas de la malla en Ω .

R_m Resistencia mutua entre R_1 y R_2 en Ω .

R_g Resistencia del SPT en Ω .

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi B} \left[\ln \left(\frac{2B}{\sqrt{2aS}} \right) + \frac{K_1 B}{\sqrt{A}} - K_2 \right] \quad (1.5)$$

[2, 8, 14]

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi nL} \left[\ln \left(\frac{4L}{r} \right) - 1 + \frac{2K_1 L}{\sqrt{A}} (\sqrt{n} - 1)^2 \right] \quad (1.6)$$

[2, 8, 14]

$$R_m = \frac{\rho}{\pi B} \left[\ln \left(\frac{2B}{L} \right) + \frac{K_1 B}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right] \quad (1.7)$$

[2, 8, 14]

$$R_g = \left[\frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m} \right] \quad (1.8)$$

[2, 8, 14]

Donde:

- L_1 Lado menor de la MPT en m.
- L_2 Lado mayor de la MPT en m.
- A Área de la MPT en m^2 .
- B Longitud del conductor horizontal de la MPT en m.
- a Radio del conductor horizontal de la MPT en m.
- S Profundidad de enterramiento del EPT o MPT en m.
- n Cantidad de varilla Copperweld del SPT.
- L Longitud de varilla EPT en m.
- r Radio de varilla EPT en m.
- ρ Resistividad del terreno en Ωm .
- R_1 Resistencia de conductores horizontales del SPT en Ω
- R_2 Resistencia de varillas del SPT en Ω .
- R_m Resistencia mutua entre R_1 y R_2 en Ω .
- R_g Resistencia del SPT Ω .
- K_1 Coeficiente de Schwarz K_1 .
- K_2 Coeficiente de Schwarz K_2 .

Los coeficientes K_1 y K_2 se obtienen mediante el cociente entre la longitud del lado menor L_1 y el lado mayor L_2 de la MPT, además de la profundidad de enterramiento S de la malla [2, 8, 14].

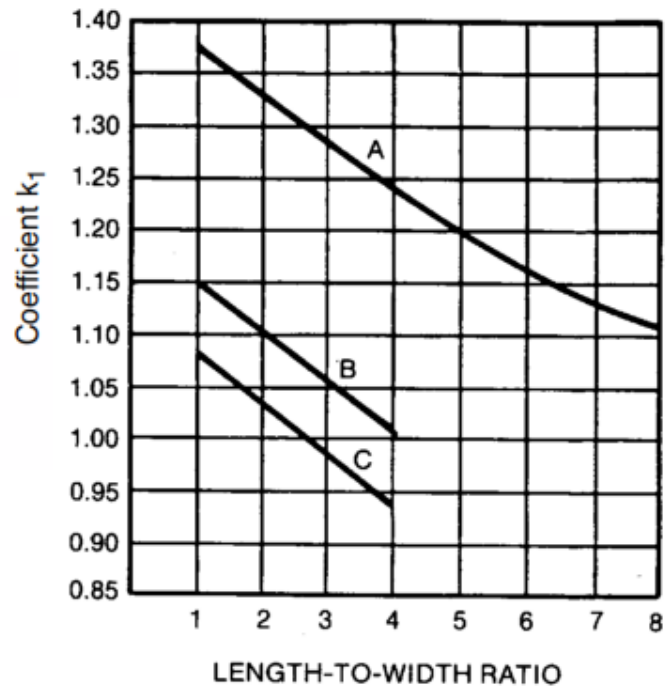
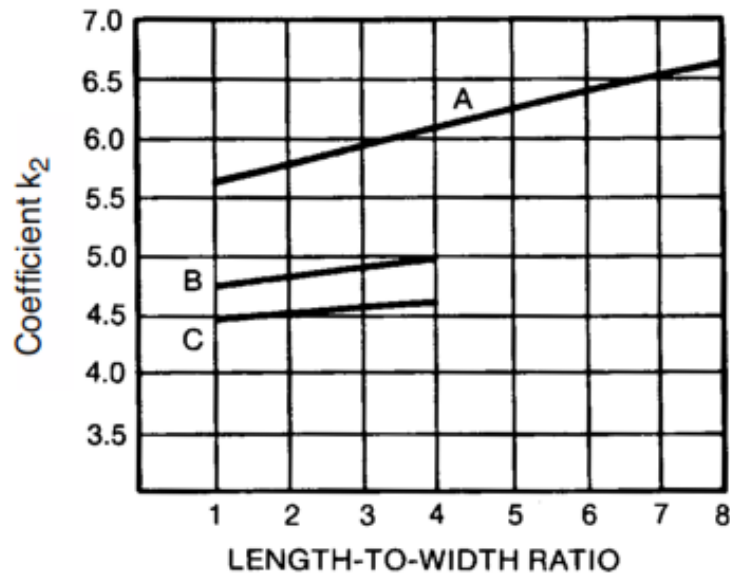


Figura 1.13: Coeficiente K_1 [2].

Para uma profundidade $S \leq 0,1\sqrt{A}$ se usa a curva B y se tiene:

$$K_1 = -0,05 \frac{L_1}{L_2} + 1,2 \quad (1.9)$$

[2, 14]

Figura 1.14: Coeficiente K_2 [2].

Para una profundidad $S \leq 0,1\sqrt{A}m$ se emplea la curva B y se tiene:

$$K_2 = 0,1\frac{L_1}{L_2} + 4,68 \quad (1.10)$$

[2, 14]

Las ecuación de Schwarz puede aplicarse para MPTs de forma regular, ya sean cuadradas o rectangulares.

1.5.1.2. Ecuación de Sverak.

La ecuación de Sverak es aplicable preferentemente para una MPT de forma irregular. Tiene un uso recomendado especialmente en subestaciones, siendo válida para mallas con o sin electrodos verticales (varillas) [2, 8]. Produce resultados muy similares a la ecuación de Schwarz, con la ventaja de poder utilizarse tanto en mallas con geometría regular como irregular (ni cuadrada, ni rectangular), pero que encierran siempre un área definida.

Para una profundidad $0,25m \leq S \leq 2,5m$ se tiene:

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{B} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + S\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (1.11)$$

[2, 14]

Donde:

- A Área de la MPT en m^2 .
- B Longitud del conductor de la MPT (cable y varillas) en m.
- S Profundidad de enterramiento del EPT o MPT en m.
- ρ Resistividad del terreno en Ωm .
- R_g Resistencia del SPT Ω .

1.5.1.3. Ecuación de Sankosha Corp.

Se emplea esta ecuación cuando se tiene como EPT a un conductor horizontal enterrado una profundidad S en un terreno de resistividad ρ .

$$R_g = \frac{\rho}{2,73B} \log \left(\frac{B^2}{2Sa} \right) \quad (1.12)$$

[14, 5]

Donde:

- B Longitud del conductor de la MPT (cable y varillas) en m.
- S Profundidad de enterramiento del EPT en m.
- a Radio del conductor EPT en m.
- ρ Resistividad del terreno en Ωm .
- R_g Resistencia del SPT Ω .

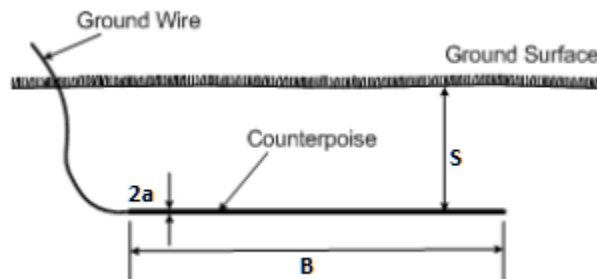


Figura 1.15: Conductor horizontal como EPT [5].

Capítulo 2

Normativas en relación con sistemas de puesta a tierra.

Con la finalidad de verificar el SPT actual y diseñar bajo condiciones óptimas una nueva estructura es necesario tomar como referencia normativas, reglamentos y demás bibliografía actualizada, los mismos que deben que gocen de credibilidad y rijan procedimientos técnicos aceptados a nivel local e internacional. Si bien las normativas son extensas y detalladas deben ser interpretadas y aplicadas por personal con vasto conocimiento y experiencia en el sector eléctrico.

Con base a lo expuesto se ha considerado como principales referencias las siguientes publicaciones:

- IEEE Std. 80-2013: IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding.
- IEEE Std. 81-2007: IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems.
- NFPA 70: National Electrical Code - NEC.
- Ministerio de Minas y Energía de Colombia: Reglamento técnico de instalaciones eléctricas (RETIE).
- Instituto Ecuatoriano de Normalización: CPE INEN 19: 2001 Código eléctrico nacional.

Se adjuntan como documentos anexos las normativas expuestas anteriormente: Se incluye también toda la información de las fuentes bibliográfica en la sección correspondiente.

2.1. IEEE Std. 80-2013: IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding.

La norma IEEE Std. 80-2013 es una guía detallada sobre los SPTs, con enfoque en las subestaciones de corriente alterna. Su naturaleza especializada en subestaciones

no limita su alcance e influencia sobre los demás sistemas o equipos eléctricos en AC, ya que cuenta con información básica que comprende desde bases conceptuales hasta la descripción pormenorizada de los SPTs con la óptica mencionada y abarca las formulaciones y métodos necesarios para realizar los cálculos y mediciones de un SPT. A continuación se reseña parte del contenido del estándar mencionado que se ha aplicado para este trabajo investigativo:

En su sección *1.2 Propósito*, la norma señala cuatro aspectos que son:

- a. Establecer, como base para el diseño, los límites seguros de las diferencias de potencial que puedan existir en una subestación en condiciones de falla, entre los puntos que pueden entrar en contacto con el ser humano.*
- b. Revisar las prácticas de aterrizaje de subestaciones y sistemas eléctricos con referencia especial a la seguridad y desarrollar criterios para el diseño seguro.*
- c. Dar un procedimiento para el diseño de sistemas prácticos de aterrizaje basados en esos criterios.*
- d. Desarrollar métodos analíticos como ayuda para el entendimiento y solución de los problemas típicos de gradientes [2] .*

En el apartado *9. Principales consideraciones para el diseño* se detalla:

- 9.1 Definiciones. Conceptos de términos relacionados con los SPTs.*
- 9.2 Concepto general. Definición integral de un SPT.*
- 9.3 Electrodo de tierra principal y auxiliar. Un SPT incluye generalmente dos tipos de electrodos de tierra. Los principales son aquellos diseñados con el propósito de servir exclusivamente para el aterrizaje y en el segundo tipo se incluyen estructuras metálicas subterráneas instaladas para otros propósitos que no sea aterrizaje, pero que pueden utilizarse para este fin.*
- 9.4 Aspectos básicos del diseño de la malla. Análisis de las condiciones del emplazamiento y aspectos para el diseño de una MPT. Abarca temas como conductores y su disposición, electrodos, área de la MPT, distanciamientos, etc.*
- 9.5 Diseño en condiciones difíciles. Recomendaciones para el diseño en condiciones de espacio limitado o alta resistividad del suelo [2] .*

El capítulo 11. *Selección de conductores y conexiones* incluye información acerca de la conductividad, resistencia mecánica, materiales, tamaños, tipos de conexiones, etc.

Las secciones 12 y 13 señalan lo referente al suelo como elemento de un SPT. Se analizan campos como estructura, composición, resistividad, etc.

La división 14. *Evaluación de resistencia a tierra* explica los requisitos principales de un SPT. Se describen las ecuaciones de Schwarz y Sverak para el cálculo de una MPT y se detallan procedimientos para disminuir la resistividad del suelo.

El apartado 19 se describe de manera general los métodos para la medición de SPT ya instalados.

Finalmente se incluye esta normativa completa en la sección 7. Anexos.

2.2. IEEE Std. 81-2012: IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems.

La normativa IEEE. Std. 81-2007 complementa a la IEEE Std. 80-2013. Trata con detenimiento métodos y técnicas para medir las características eléctricas de los SPTs. Incluye campos como medición de resistencia y resistividad de SPTs, seguridad, equipos de medición, etc [3].

El capítulo 5 describe medidas de seguridad a tomar para la evaluación de SPTs (mediciones).

La sección 7 describe con detenimiento los métodos para la medición de la resistividad del terreno. Destacan el MDW y el MSP.

El apartado 8 abarca las técnicas para evaluar la resistencia de los SPTs ya instalados. Se describen métodos como el MTP, MCP y MCP.

Finalmente en su sección de anexos se incluye uno dedicado a los equipos de medición de resistencia y resistividad. Se indica su principio de funcionamiento, características y consideraciones a tomar en cuenta al momento de ejecutar las mediciones dadas las particularidades de los equipos.

Se incluye esta normativa en la sección de anexos.

2.3. NFPA 70: National Electrical Code - NEC.

Denominado comúnmente NEC, establece los últimos requisitos referentes a diseño, instalación e inspección de sistemas eléctricos. Incluye en su publicación contenido dedicado íntegramente a la protección contra sobrecorriente y conexión a tierra en la sección 250 «Puestas a Tierra».

El alcance de este código, según el apartado 250.1 es:

- *Sistemas, circuitos y equipos exigidos, permitidos o no permitidos para ser puestos a tierra.*

- *Conductor del circuito a ser puesto a tierra en sistemas puestos a tierra.*
- *Ubicación de las conexiones de puesta a tierra.*
- *Tipos y tamaños de los conductores y electrodos de puesta a tierra y unión.*
- *Métodos de puesta a tierra y unión.*
- *Condiciones bajo las cuales los resguardos, la separación o el aislamiento eléctrico pueden ser reemplazados por la puesta a tierra [7] .*

Aunque la sección 250 está dedicada a la puesta a tierra, durante todo el contenido se analiza la PT específica para cada capítulo que se aborda en este código, tal es así que se establecen lineamientos para sistemas particulares como se describe en la siguiente tabla:

Tabla 2.1: Puesta a tierra para sistemas particulares en NEC [7] .

<i>Conductor / Equipo</i>	<i>Artículo</i>	<i>Sección</i>
<i>Acometidas</i>	<i>230</i>	
<i>Anuncios eléctricos e iluminación de contorno</i>	<i>600</i>	
<i>Bandejas portacables</i>	<i>392</i>	<i>392.3(C), 392.7</i>
<i>Bucle cerrado y distribución programada de potencia</i>		<i>780.3</i>
<i>Cajas de salida, de dispositivos, de jalado y de empalmes, cuerpos de conduit y herrajes</i>		<i>314.4, 314.25</i>
<i>Casas móviles y estacionamientos para casas móviles</i>	<i>550</i>	
<i>Celdas electrolíticas</i>	<i>668</i>	
<i>Circuitos de comunicaciones</i>	<i>800</i>	
<i>Circuitos ramales</i>		<i>210.5, 210.6, 406.3</i>
<i>Circuitos y equipos que operan a menos de 50 voltios</i>	<i>720</i>	
<i>Condensadores</i>		<i>460.10, 460.27</i>
<i>Conductores para alambrado general</i>	<i>310</i>	
<i>Cordones y cables flexibles</i>		<i>400.22, 400.23</i>
<i>Cuerpos de agua naturales y artificiales</i>	<i>682</i>	<i>682.30, 682.31, 682.32, 682.33</i>

<i>Conductor / Equipo</i>	<i>Artículo</i>	<i>Sección</i>
<i>Edificios agrícolas</i>		<i>547.9 y 547.10</i>
<i>Edificios flotantes</i>	<i>553.8, 553.10, 553.11</i>	
<i>Elevadores, montaplatos, escaleras eléctricas, pasillos móviles, elevadores de sillas de ruedas y elevadores para silla de ruedas</i>	<i>620</i>	
<i>Ensamble de cables con aislamiento en gabinete metálica</i>		<i>370.9</i>
<i>Equipo de calentamiento dieléctrico y por inducción</i>	<i>665</i>	
<i>Equipo de radio y televisión</i>	<i>810</i>	
<i>Equipo de rayos X</i>	<i>660</i>	<i>517.78</i>
<i>Equipo de tecnología de la información</i>		<i>645.15</i>
<i>Equipo eléctrico exterior fijo de deshielo y fusión de nieve</i>		<i>426.27</i>
<i>Equipo fijo de calefacción eléctrica, para tuberías y recipientes</i>		<i>427.29, 427.48</i>
<i>Equipo para procesamiento, amplificación y reproducción de señales de audio</i>		<i>640.7</i>
<i>Estudios de cine y televisión y lugares similares</i>		<i>530.20, 530.64(B)</i>
<i>Grúas y montacargas</i>	<i>610</i>	
<i>Instituciones del cuidado de la salud</i>	<i>517</i>	
<i>Interruptores</i>		<i>404.12</i>
<i>Lugares (clasificados como) peligrosos</i>	<i>500-517</i>	
<i>Luminarias y equipo de iluminación</i>		<i>410.40, 410.42, 410.46, 410.155(B)</i>
<i>Luminarias, portalámparas y lámparas</i>	<i>410</i>	
<i>Maquinaria industrial</i>	<i>670</i>	
<i>Máquinas de irrigación impulsadas o controladas eléctricamente</i>		<i>675.11 (C), 675.12, 675.13, 675.14, 675.15</i>
<i>Marinas y muelles</i>		<i>555.15</i>
<i>Métodos de alambrado subterráneo para más de 600 voltios</i>		<i>300.50(B)</i>
<i>Motores, circuitos de motores y controladores</i>		<i>430</i>
<i>Órganos de tubos</i>	<i>650</i>	
<i>Paneles de distribución</i>		<i>408.4</i>
<i>Piscinas, fuentes e instalaciones similares</i>	<i>680</i>	

<i>Conductor / Equipo</i>	<i>Artículo</i>	<i>Sección</i>
<i>Receptáculos de tipo de puesta a tierra, adaptadores, conectores de cordón y clavijas de conexión</i>		<i>406.9</i>
<i>Receptáculos y conectores de cordón</i>		<i>406.3</i>
<i>Sistemas de distribución de antenas comunales de radio y televisión</i>		<i>820.93, 820.100, 820.103</i>
<i>Sistemas intrínsecamente seguros</i>		<i>504.5</i>
<i>Sistemas solares fotovoltaicos</i>		<i>690.41, 690.42, 690.43, 690.45, 690.47</i>
<i>Tableros de distribución y paneles de distribución</i>		<i>408.3(D)</i>
<i>Teatros, áreas de espectadores en estudios cinematográficos y de televisión y lugares similares</i>		<i>520.81</i>
<i>Transformadores y bóvedas de transformadores</i>		<i>450.1</i>
<i>Uso e identificación de conductores puestos a tierra</i>	<i>200</i>	
<i>Vehículos de recreo y estacionamientos para vehículos de recreo</i>	<i>551</i>	

Algunas subsecciones consultadas se enlistan a continuación:

- *250.4 Requisitos generales para la puesta a tierra y la unión.*
- *250.8 Conexión del equipo de puesta a tierra y de unión.*
- *250.20 Sistemas de corriente alterna que se deben poner a tierra.*
- *250.26 Conductor que se debe poner a tierra - Sistemas de corriente alterna.*
- *250.30 Puesta a tierra de sistemas de corriente alterna derivados separadamente.*
- *250.50 Sistema del electrodo de puesta a tierra.*
- *250-81 Sistema de electrodos de puesta a tierra.*
- *250.122 Calibre de los conductores de puesta a tierra de equipos*
- *250.130 Conexiones del conductor de puesta a tierra del equipo [7] .*

Se incluye este código como anexo.

2.4. Reglamento técnico de instalaciones eléctricas (RE-TIE).

El reglamento técnico de instalaciones eléctricas, expedido por el Ministerio de Minas y Energía de Colombia contiene un apartado dedicado a la puesta a tierra. En el capítulo 2: «Requisitos Técnicos Esenciales», artículo 15 "Puestas a Tierra" indica: *“Toda instalación eléctrica cubierta por el presente reglamento, excepto donde se indique expresamente lo contrario, debe disponer de un sistema de puesta a tierra, en tal forma que cualquier punto del interior o exterior, normalmente accesible a personas que puedan transitar o permanecer allí, no están sometidos a tensiones de paso, de contacto o transferidas, que superen los umbrales de soportabilidad cuando se presente una falla”* [6].

Dicho reglamento entre su contenido dispone y detalla aspectos como:

- *Funciones de un sistema de puesta a tierra.*
- *Márgenes de soportabilidad del cuerpo humano.*
- *Diseño de puesta a tierra.*
- *Requisitos generales.*
- *Materiales.*
- *Valores de resistencia de puesta a tierra.*
- *Medición de parámetros relacionados con la puesta a tierra.*
- *Puestas a tierra temporales* [6] .

Un apartado que suscita particular interés es el relacionado con la interconexión de varias puestas a tierra (EPT o MPT). Al respecto la RETIE en su sección *15.1 Requisitos generales del sistema de puesta a tierra*, señala:

Si por requisito de una edificación es necesario que existan varias puestas a tierra, todas ellas deben estar interconectadas eléctricamente. Este enlace puede realizarse por debajo o encima del nivel del suelo [6]. Se ilustra el diagrama de conexión en la figura 2.1.

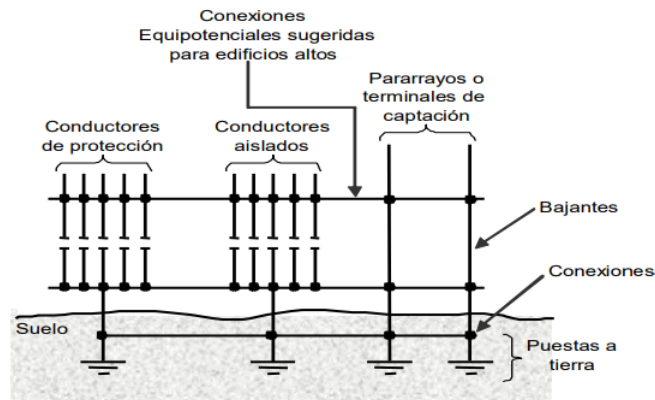


Figura 2.1: Sistemas de puesta a tierra interconectados [6].

Cada circuito del SPT debe tener su propio EPT o MPT individual y este es el que debe interconectarse con los demás circuitos del SPT como se indica en 2.2.

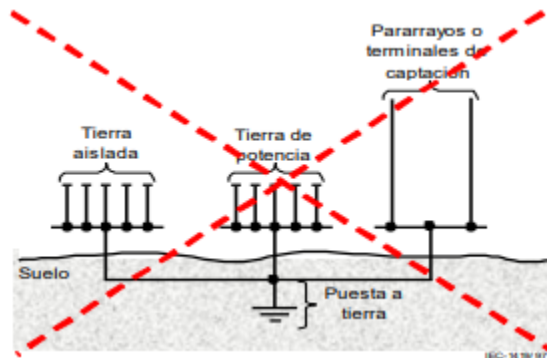


Figura 2.2: ERROR: Una sola puesta a tierra para todas las necesidades [6].

No pueden existir en un solo emplazamiento SPTs independientes sin interconexión entre ellos como se muestra en 2.3 .

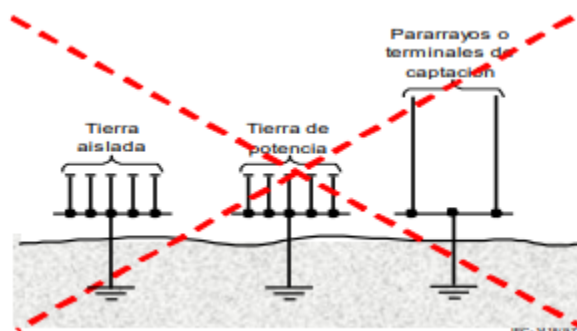


Figura 2.3: ERROR: Puestas a tierra independientes [6].

2.5. CPE INEN 19: 2001 Código eléctrico nacional.

Tal como lo describe el CPE 19:2001 en su presentación, este código está basado y es una adaptación del NEC de la NFPA, es así que esta normativa varía mínimamente de la publicación original.

Al igual que su homólogo, este reglamento dedica su sección 250 a la puesta a tierra y detalla sus aplicaciones particulares según el equipo o sistema a tratar. Se describe esta distribución en la tabla ??.

Tabla 2.2: Distribución de la PT en el CPE 19:2001[7] .

<i>Artículo</i>	<i>Sección</i>
<i>Acometidas</i>	<i>230</i>
<i>Anuncios eléctricos</i>	<i>600</i>
<i>Artefactos eléctricos</i>	<i>422-16</i>
<i>Ascensores, montacargas, escaleras y pasillos móviles; ascensores y elevadores para sillas de ruedas.</i>	<i>620</i>
<i>Bus de cables</i>	<i>365-9</i>
<i>Cajas de salida, de dispositivo, de paso y de empalme, conduletes y accesorios</i>	<i>370-4, 370-25</i>
<i>Casa flotantes</i>	<i>553-8, 553-10, 553-11</i>
<i>Casas móviles y estacionamientos de casas móviles</i>	<i>550</i>
<i>Celdas electrolíticas</i>	<i>668</i>
<i>Circuitos de Clase 1, Clase 2, Clase 3 de control remoto, de señalización y de potencia limitada</i>	<i>725-6</i>
<i>Circuitos de comunicaciones</i>	<i>800</i>

Artículo	Sección
<i>Circuitos ramales</i>	210-5, 210-6, 210-7
<i>Circuitos y equipos operando a más de 600 V, generalidades</i>	710-4b).1
<i>Circuitos y equipos que operan a menos de 50 V</i>	720
<i>Computadores/equipo de procesamiento de datos</i>	645-15
<i>Condensadores</i>	460-10, 460-27
<i>Conductores para alambrado general</i>	310
<i>Cordones y cables flexibles</i>	400-22, 400-23
<i>Cuadros de distribución y paneles de distribución</i>	384-3d), 384-11
<i>Distribución de potencia en lazo cerrado y programada</i>	780-3
<i>Edificaciones agrícolas</i>	547-8
<i>Elementos de alumbrado, portabombillas, bombillas y tomacorrientes</i>	410
<i>Elementos y equipos de alumbrado</i>	410-17, 410-18, 410-19, 410-21, 410-105b)
<i>Equipo de acometida</i>	230-63
<i>Equipo de calefacción eléctrica fija de ambiente</i>	424-14
<i>Equipo de calefacción eléctrica fija de tuberías y recipientes</i>	427-21, 427-29, 427-48
<i>Equipo de calefacción por inducción y pérdidas en el dieléctrico</i>	665
<i>Equipo de radio y televisión</i>	810
<i>Equipo eléctrico exterior fijo de deshielo y fusión de la nieve</i>	426-27
<i>Equipos de grabación de sonido y similares</i>	640-4
<i>Equipos de rayos X</i>	660, 517-67
<i>Estudios de cine y de televisión y lugares similares</i>	530-20, 530-66
<i>Grúas y elevadores</i>	610
<i>Instituciones de asistencia médica</i>	517
<i>Interruptores</i>	380-12
<i>Lugares peligrosos (clasificados)</i>	500, 517
<i>Maquinaria industrial</i>	670
<i>Maquinas de irrigación eléctricas o con mando eléctrico</i>	675-11c), 675-12, 675-13, 675-14, 675-15
<i>Motores, circuitos de motores y controladores</i>	430
<i>Órganos eléctricos de tubos</i>	650
<i>Paneles de distribución</i>	384-20
<i>Piscinas, fuentes e instalaciones similares</i>	680
<i>Puertos y embarcaderos</i>	55-7
<i>Sistemas de distribución de antena comunal de radio y</i>	820-33

<i>Artículo</i>	<i>Sección</i>
<i>Televisión</i>	<i>820-40, 820-41</i>
<i>Sistemas de seguridad intrínseca</i>	<i>504-50</i>
<i>Sistemas de señalización de protección contra incendios</i>	<i>760-6</i>
<i>Sistemas solares fotovoltaicos</i>	<i>690-41, 690-42, 690-43, 690-44</i>
<i>Teatros, zonas de espectadores en estudios cinematográficos y de televisión y lugares similares</i>	<i>520-81</i>
<i>Tomacorrientes y conectores de cordón</i>	<i>210-7</i>
<i>Tomacorrientes, adaptadores, conectores de cordón y clavijas del tipo con polo a tierra</i>	<i>410-58</i>
<i>Transformadores y bóvedas de transformadores</i>	<i>450-10</i>
<i>Uso e identificación de conductores puestos a tierra</i>	<i>200</i>
<i>Vehículos recreacionales y parques de vehículos recreacionales</i>	<i>551</i>

Para su revisión detenida se incluye este código como anexo.

Capítulo 3

Mediciones de resistividad y resistencia de puesta a tierra.

3.1. Aspectos generales.

La planta de Industrias Guapán, perteneciente a Unión Cementera Nacional se encuentra ubicada a la altura del km 1 1/2 de la vía Guapán – Azogues, cantón Azogues, provincia de Cañar, coordenadas -2.724726, -78.849302. Posee una altitud media de 2520 m.s.n.m y un área aproximada de 194439.07 m^2 .

El área de producción se encuentra distribuida en 8 divisiones, ubicadas principalmente en la zona norte de la planta. Al sur se encuentran parqueaderos, bodegas, servicios varios y área administrativa en general.

Para realizar las mediciones se utilizan los equipos suministrados por la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca:

- Telurómetro Amprobe GP-2 Geo Test, mostrado en la figura 3.1.



Figura 3.1: Amprobe GP-2.

- Pinza amperimétrica para medición de puesta a tierra HT T2000, expuesta en la figura 3.2.



Figura 3.2: HT T2000.

La figura 3.3 muestra el plano general de UCEM-planta Industrias Guapán.

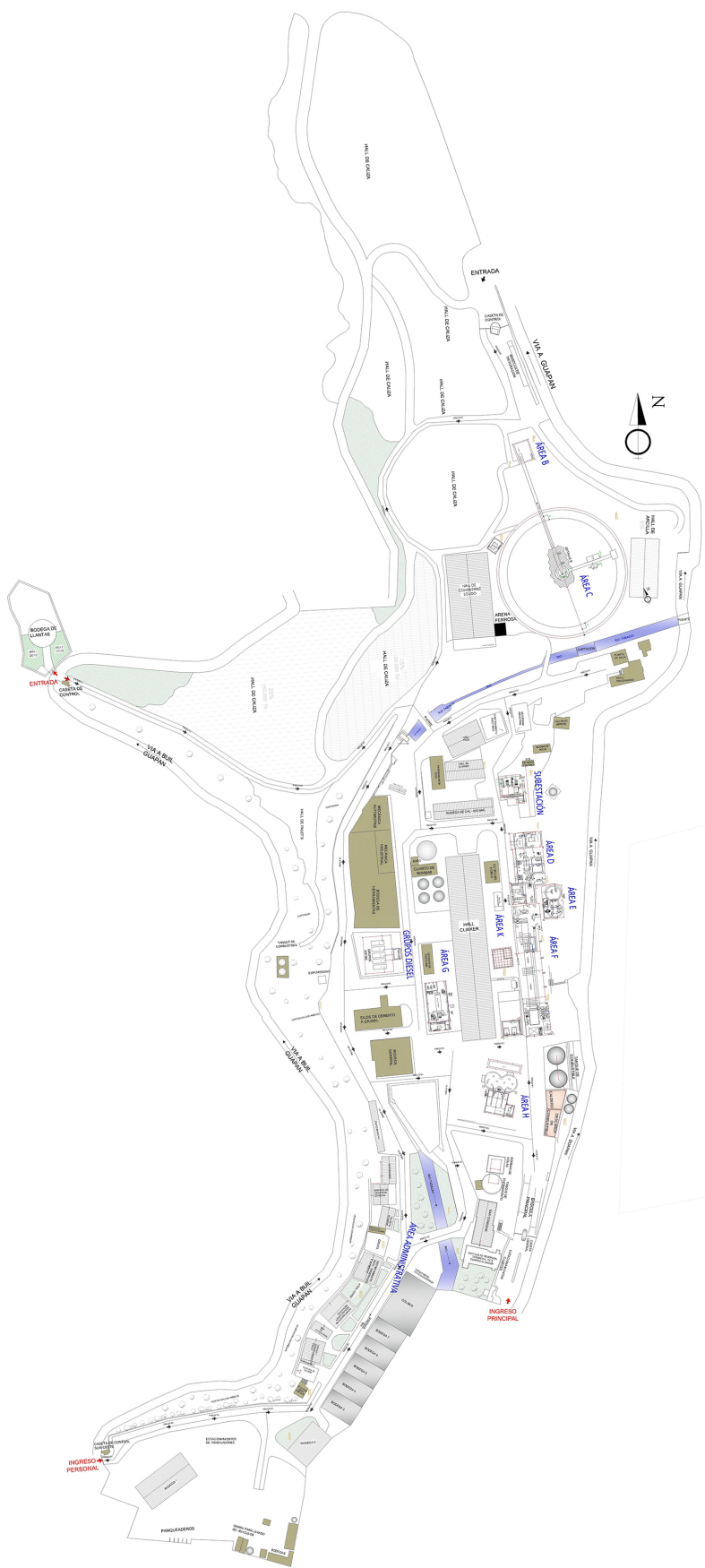


Figura 3.3: Plano Planta Industrias Guapán.

3.2. Mediciones de la resistividad del terreno.

Las mediciones se realizan con el telurómetro Amprobe GP-2 Geo Test que incluye cuatro electrodos, módulo GP-2 y cuatro conductores de 20m de largo. Este instrumento contiene la función de medir resistividad directamente, sin tener que aplicar las ecuaciones 1.1 y 1.2 del MDW.

Se ejecutan los sondeos en sitios donde el suelo está libre de asfalto o concreto, dado que el telurómetro requiere de un espacio amplio para colocar los electrodos (picas o varillas). Gran parte de la planta tiene el suelo cubierto de asfalto u hormigón, por ello se eligió los puntos numerados en la figura 3.4 .

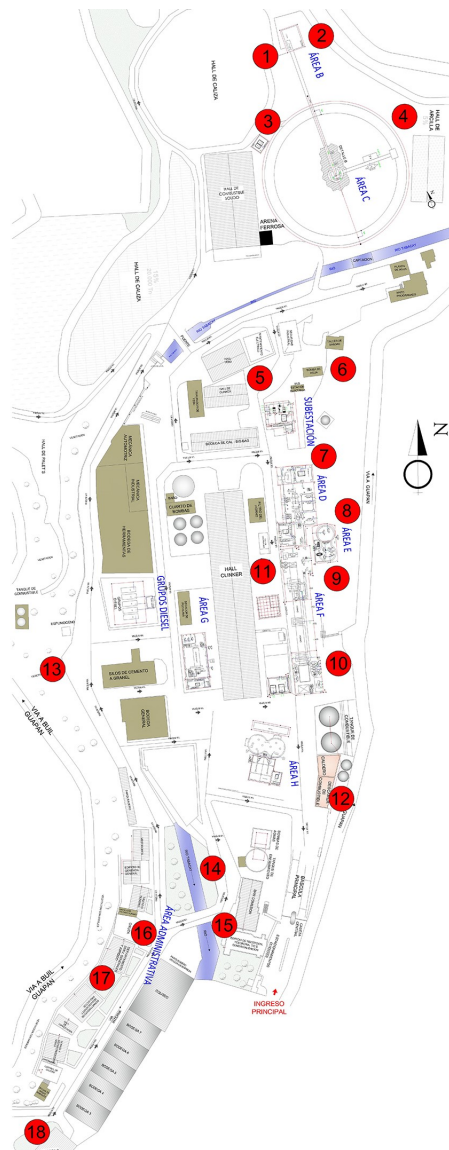


Figura 3.4: Puntos de medición de resistividad.

Se realizaron mediciones en los 18 puntos mostrados aplicando el método de Wenner. El telurómetro contiene la función de medir resistividad directamente Según lo recomienda el IEEE Std.80 e IEEE Std. 81 [2, 3] se mide en sentido norte-sur (vertical) a diferentes distancias. Se repite este proceso girando la medición 90° ahora en dirección este-oeste (horizontal), obteniéndose los resultados de la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Mediciones de resistividad del terreno.

Mediciones de resistividad del terreno (Ωm)						
Nro.	Cercano al área:	1m vertical (Ωm)	1m horizontal (Ωm)	2m vertical (Ωm)	2m horizontal (Ωm)	Valor crítico (Ωm)
1	B	25.2	14.05	23.0	29.7	29.7
2	B	20.4	13.2	12.57	12.88	20.4
3	C	25.2	21.2	18.85	17.3	25.2
4	C	18.85	17.3	19.1	23.45	23.45
5	Subestación	15.11	20.9	35.8	39.2	39.2
6	Subestación	39.1	46.8	42.4	38.3	46.8
7	D	17.5	16.5	15.2	19.10	19.10
8	E	18.1	13.74	19.76	18.85	19.76
9	F	34.06	24.7	27.05	33.2.0	34.6
10	F	23.8	27.8	21.8	29.15	29.15
11	K	29.6	23.45	36.62	32.8	36.62
12	Caldero	21.9	25.1	26.8	30.4	30.4
13	Depósito de combustible	21.3	19.6	17.9	16.4	21.3
14	Comedor	30.6	39	32.2	26.3	39.1
15	Edificio TICs	15.16	30.8	19.3	23.5	30.8
16	Gruta	27.9	41.1	38.9	30.4	41.1
17	Área verde del área administrativa	21.3	18.6	24.2	20.3	24.2
18	Bodega 2	27.6	24.3	25.7	22.9	27.6
Valor crítico general:						46.8

Los estándares [2] y [3] recomiendan que se tome como válido el promedio de todas las mediciones realizadas. Sin embargo, en este proyecto se elige el valor más alto, el número crítico que permitirá estimar el peor de los escenarios. A pesar de que el dato

resultante es $46.8 \Omega m$, esta medida es relativamente baja, considerándose al suelo como muy bueno para un SPT.

3.3. Mediciones de resistencia de mallas de puesta a tierra.

UCEM provee planos de la planta donde constan las mallas de puesta a tierra construidas. Dicha información data mayoritariamente del año 2004, ergo, se procede a realizar una inspección para corroborar la información suministrada. Se incluyen los planos de las áreas de producción en el capítulo 4 y en la sección de anexos.

En la evaluación no se logra identificar algunas derivaciones, se han añadido equipos que no constan en los planos y otros han salido de operación. Además, como previamente se mencionó, gran parte del suelo donde se emplazan las mallas está cubierto por asfalto u hormigón que imposibilitan utilizar las picas de medición. Se descarta el uso del telurómetro Amprobe GP-2 Geo Test debido a que no existe el espacio suficiente ni condiciones adecuadas para aplicar el método de los tres puntos (MTP) ni el método de caída de potencial (MCP).

A razón de lo enunciado se utiliza la pinza amperimétrica HT T2000 medir para la resistencia de puesta a tierra en los espacios donde sea posible su aplicación.

Los equipos ilustrados en los planos e identificados en las mediciones se enlistan en las tablas de medición de cada área.

3.3.1. Área B.

En el área B se obtuvieron los siguientes resultados en las derivaciones de la malla puesta a tierra:

Tabla 3.2: Medición de resistencia en derivaciones MPT área B.

Medición	Equipo	Resistencia (Ω)
1	B4A	3.5
2	B4	0.28
3	B4	0.39
4	Transformador (30 kVA)	0.68
5	B2	0.5
6	Escaleras	0.31
7	AAV B4	0.33
8	TC B	0.77
9	B10	0.78
10	BC B4	0.32
11	B4B	0.32

3.3.2. Área C.

Los siguientes resultados reflejan la resistencia de la MPT en el área C:

Tabla 3.3: Medición de resistencia en derivaciones MPT área C.

Medición	Equipo	Resistencia (Ω)
12	Tablero control III	0.057
13	C2A	0.030
14	C1	0.018
15	C1A	0.023
16	B2	0.5
17	Tablero control I	0.06
18	Tablero control II	0.022

3.3.3. Área D.

Valores medidos las derivaciones de la MPT del área D:

Tabla 3.4: Medición de resistencia en derivaciones MPT área D.

Medición	Equipo	Resistencia (Ω)
19	Tx4	0.13
20	MCC D	0.01
21	MCC D	0.23
22	SN1	0.16
23	MCC D13	0.12
24	Transformador	0.32
25	Variador	0.018
26	D32A	0.01
27	D32A	0.06
28	D18A	0.13
29	D18B	0.092
30	D17	0.18
31	TC	0.39
32	TC	0.10
33	D42F1	0.43
34	D42F2	18.1
35	AAV	0.01
36	TC D17	0.35
37	D17	0.18

3.3.4. Área E.

En el área E se obtuvieron los siguientes resultados en las derivaciones de la MPT:

Tabla 3.5: Medición de resistencia en derivaciones MPT área E.

Medición	Equipo	Resistencia (Ω)
38	E49	0.64
39	E52	0.28
40	MCC E	0.48
41	E11	0.10
42	E12A	0.44
43	E12	0.56
44	E53A	0.057
45	E50	0.046
46	E53	0.11

3.3.5. Área F.

Las mediciones en la MPT del área F reflejan los siguientes resultados:

Tabla 3.6: Medición de resistencia en derivaciones MPT área F.

Medición	Equipo	Resistencia (Ω)
47	F4A	0.01
48	F42	0.035
49	F43	0.43
50	F07	0.11
51	SN2	0.22
52	TC17	0.024
53	TC17	0.012
54	Estruc. Horno	0.23
55	F18	0.75
56	F19	0.023
57	F20	0.012
58	F21	0.01
59	F16	0.11
60	F31	0.47
61	BC	0.61
62	Tx9	0.043
63	Tx9	0.058
64	Tx10	0.034
65	Tx10	0.058
66	F42	33.2
67	F17.08	0.6
68	F18-01	0.07
69	F19.01	0.54
70	F20-01	0.042
71	F21-01	0.046
72	F22.01	0.011
73	MCC N2	0.01
74	MCC N1	0.037
75	Variador	0.030

3.3.6. Área G.

El área G muestra los siguientes valores en sus derivaciones de MPT:

Tabla 3.7: Medición de resistencia en derivaciones MPT área G.

Medición	Equipo	Resistencia (Ω)
76	G48	0.19
77	G48B	2.2
78	G49A	1.2
79	G35	0.24
80	Puente grúa	0.49
81	G89	0.78
82	G47	0.44
83	G47A	0.68
84	Consola G55	0.97
85	G35	0.18
86	G20	0.68
87	AAV G20	0.11
88	AAV G20	0.095
89	MCC G	0.01
90	MCC G1-2-3	0.05
91	G59	0.39

3.3.7. Área H.

Datos obtenidos en las derivaciones de la MPT en el área H:

Tabla 3.8: Medición de resistencia en derivaciones de MPT área H.

Medición	Equipo	Resistencia (Ω)
92	MCC H	0.23
93	MCC H1	0.01
94	H80	0.58
95	H55	0.64
96	H26	0.36
97	H26A	0.19
98	P1	0.014
99	P2	0.01
100	P3	0.01
101	P4	0.01
102	P5	0.019
103	P6	0.01
104	P7	0.01
105	P8	0.01
106	P9	0.023
107	P10	0.028

3.3.8. Subestación.

En la subestación la mayoría de los puntos de derivación en esta malla están conectados en las estructuras. Aquí se midieron los valores mostrados en la tabla siguiente:

Tabla 3.9: Medición de resistencia en derivaciones MPT subestación.

Medición	Equipo	Resistencia (Ω)
108	E0	0.19
109	E1	0.52
110	E1	0.89
111	E2	0.41
112	E3	0.52
113	E4	0.36
114	E5	0.28
115	E6	0.89
116	E7	0.74
117	E8	0.13
118	E9	0.23
119	E10	0.52
120	E11	0.57
121	E12	0.46
122	E13	0.63
123	E15	0.25
124	E23	0.23
125	C. Control	0.33

3.3.9. Cuarto eléctrico 2-3.

En el cuarto eléctrico 2-3 se obtuvieron los siguientes resultados en las derivaciones de la MPT:

Tabla 3.10: Medición de resistencia en derivaciones MPT cuarto eléctrico 2-3.

Medición	Equipo	Resistencia (Ω)
126	MCC	0.01
127	Tx3	0.14
128	Tx4	1.2
129	Tx2	0.039

En todas las mallas se observan mayoritariamente mediciones por debajo de 1Ω , lo que según la normativa [2, 3] los datos se encontrarían dentro

de los parámetros óptimos para un SPT. Sin embargo, existe una variación muy alta en los resultados de las derivaciones en cada malla, variaciones que merecen aplicar otro método para estimar el valor de resistencia de puesta a tierra que garantice seguridad en los resultados.

Capítulo 4

Análisis de mallas existentes.

Dado que diversos factores afectan un sistema de puesta a tierra, como se observó en las mediciones del capítulo 3, es conveniente verificar el valor de resistencia de las mallas existentes.

Para este fin se utilizará la información existente de las MPTs para calcular su RPT a través de las ecuaciones de Schwarz y Sverak descritas en el capítulo 1 y avaladas por los estándares IEEE 80. e IEEE 81 [2, 3]. Así mismo se emplea un modelo de suelo uniforme y se elige el valor de resistividad más alto ¹, tomado en la zona más cercana al área analizada.

A continuación en las figuras 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5 se presentan las distintas áreas con sus MPTs existentes:

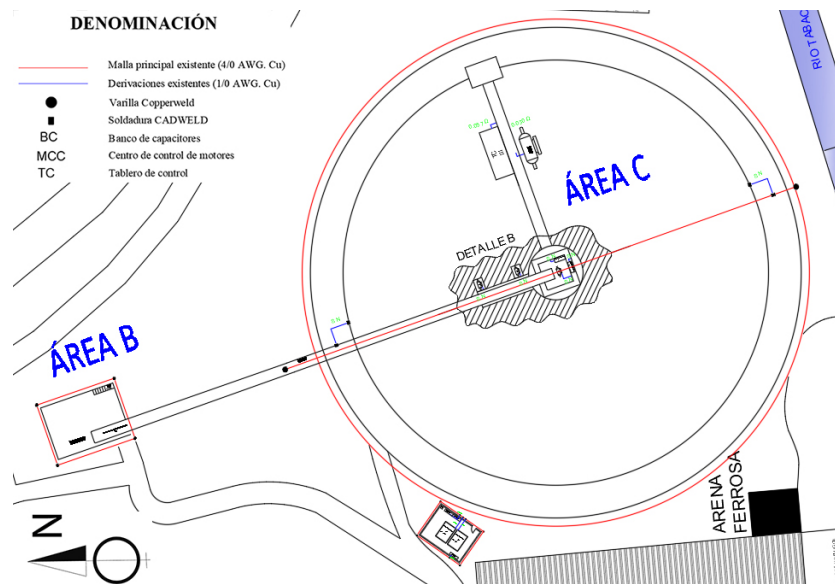


Figura 4.1: MPTs existentes área B, área C y cuarto eléctrico.

¹Se eligen estas condiciones para asegurar resultados que satisfagan al más crítico de los escenarios.

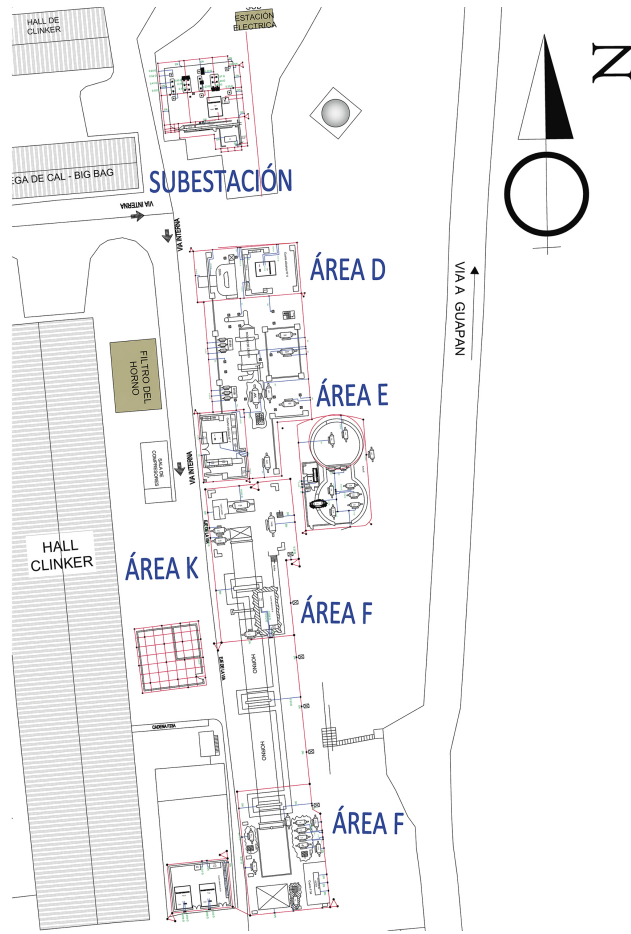


Figura 4.2: MPTs existentes subestación y áreas D, E, F, K.

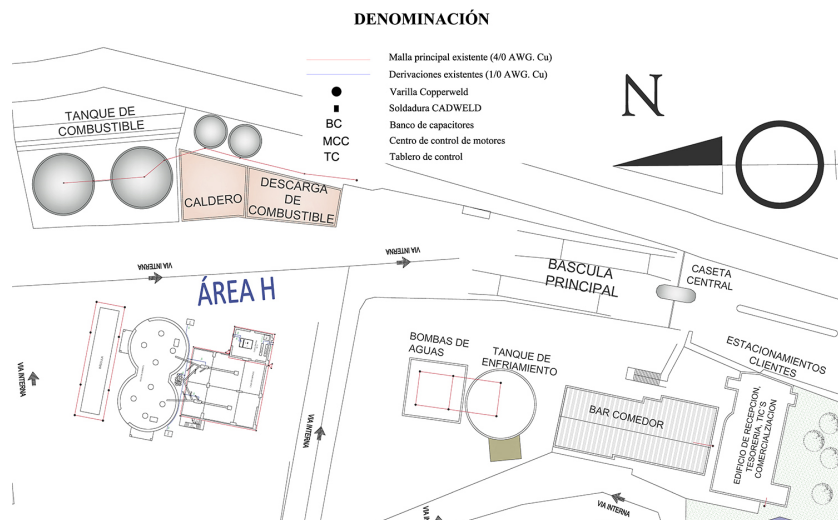


Figura 4.3: MPTs existentes área H, bombas de agua, TICs.

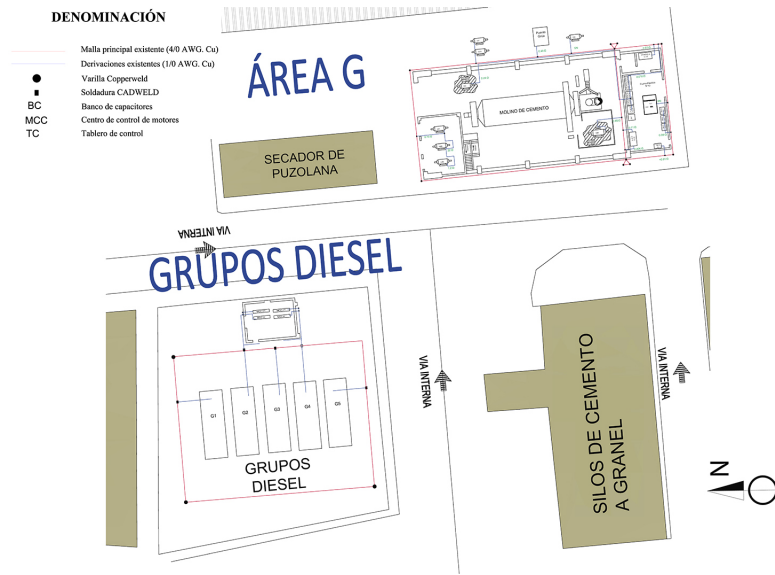


Figura 4.4: MPTs existentes área G y grupos diésel.

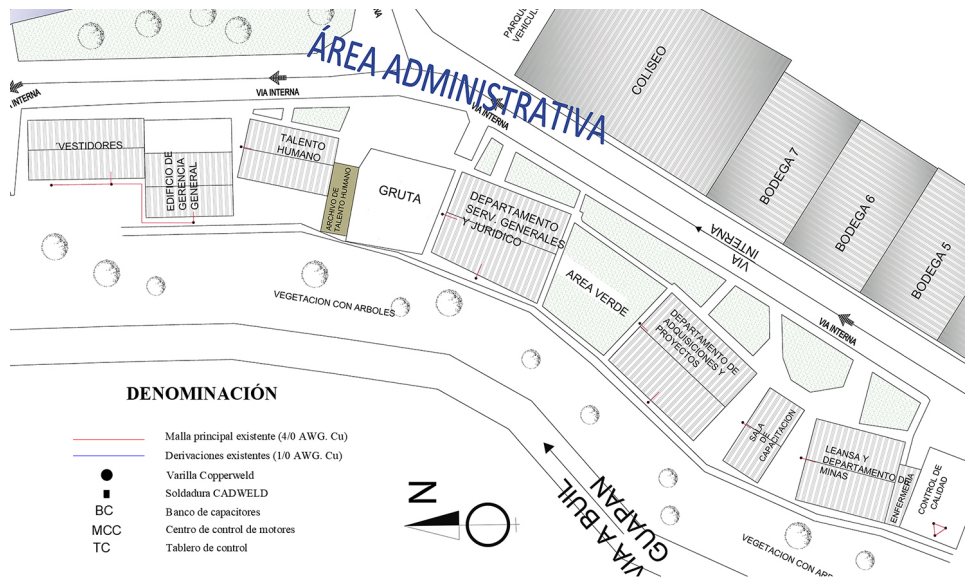


Figura 4.5: MPTs existente área administrativa.

4.1. Análisis por área.

Se disponen de los planos de cada una de las áreas de producción. Se emplea la información allí contenida para calcular la RPT de cada malla.

4.1.1. Área B.

Espacio encargado de triturar la materia prima.

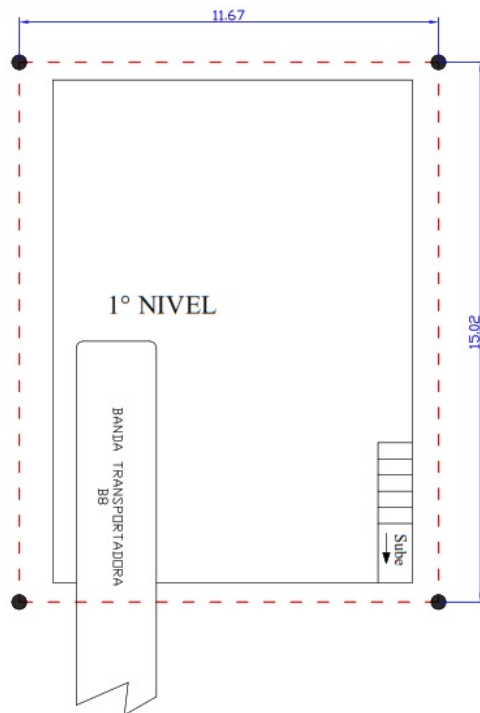


Figura 4.6: Malla existente en el área B.

Se presenta la información de la MPT del área B, se calcula su valor mediante las ecuaciones de Schwarz 1.5, 1.6, 1.7 y 1.8.

Tabla 4.1: Datos MPT área B.

MALLA DE PUESTA A TIERRA ÁREA B (SCHWARZ)		
Ítem	Valor/Descripción	Unidad
Geometría	Rectangular	-
Lado menor (L1)	11,67	m
Lado mayor (L2)	15,02	m
Área malla (A)	175,2834	m ²
Calibre conductor	4/0	AWG
Radio del conductor (a)	0,00584	m
Profundidad de la malla (S)	0,5	m
Cantidad Varilla Copperweld (n)	4	u
Longitud de varilla (L)	1,8	m
Radio de varilla (r)	0,0079	m
Longitud total varillas ($n * L$)	7,2	m
Resistividad terreno (ρ)	29,7	Ωm
Longitud conductores (B)	53,38	m
Coficiente de Schwarz K1	1,135646958	-
Coficiente de Schwarz K2	4,808706084	-
Resistencia conductores (R1)	1,241885475	Ω
Resistencia varillas (R2)	4,020343064	Ω
Resistencia mutua (Rm)	0,859465321	Ω
RESISTENCIA TOTAL (R_g)	1,20061173	Ω

La MPT posee una resistencia calculada de 1.2Ω , dentro de los parámetros adecuados según [2].

4.1.2. Área C.

Sección dedicada al depósito de materia prima, la cual es transportada por bandas a otras áreas según su requerimiento.

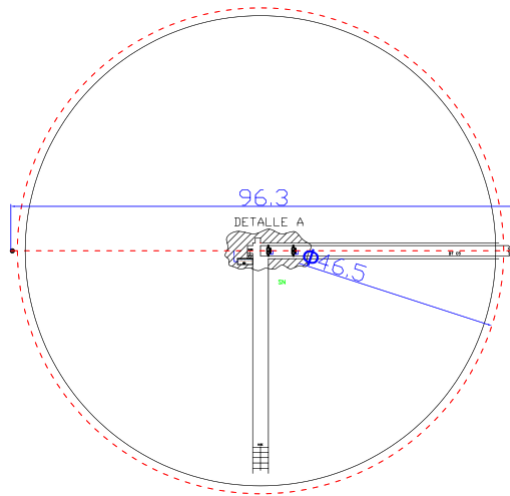


Figura 4.7: Malla existente en el área C.

Se obtiene el valor de RPT del área C bajo la ecuación de Sverak 1.11 :

Tabla 4.2: Datos MPT área C.

MALLA DE PUESTA A TIERRA ÁREA C (SVERAK)		
Ítem	Valor/Descripción	Unidad
Geometría	Circular	-
Radio malla	46,5	m
Área malla (A)	6792,908715	m ²
Calibre conductor	4/0	AWG
Radio del conductor (a)	0,00584	m
Profundidad de la malla (S)	0,5	m
Cantidad Varilla Copperweld (n)	2	u
Longitud de varilla (L)	1,8	m
Radio de varilla (r)	0,0079	m
Resistividad terreno (ρ)	25,2	Ω m
Longitud conductores (B)	388,3091168	m
Longitud total varillas ($n * L$)	3,6	m
B total ($B + n * L$)	391,9091168	m
RESISTENCIA TOTAL (R_g)	0,199232245	Ω

Se obtiene un valor de RPT de 0.1992 Ω , bastante adecuado al estar cercano a cero.

4.1.3. Área D.

En el área D se encuentra el molino de crudo, maquinaria necesaria para operar el molino y demás equipo para tareas relacionadas.

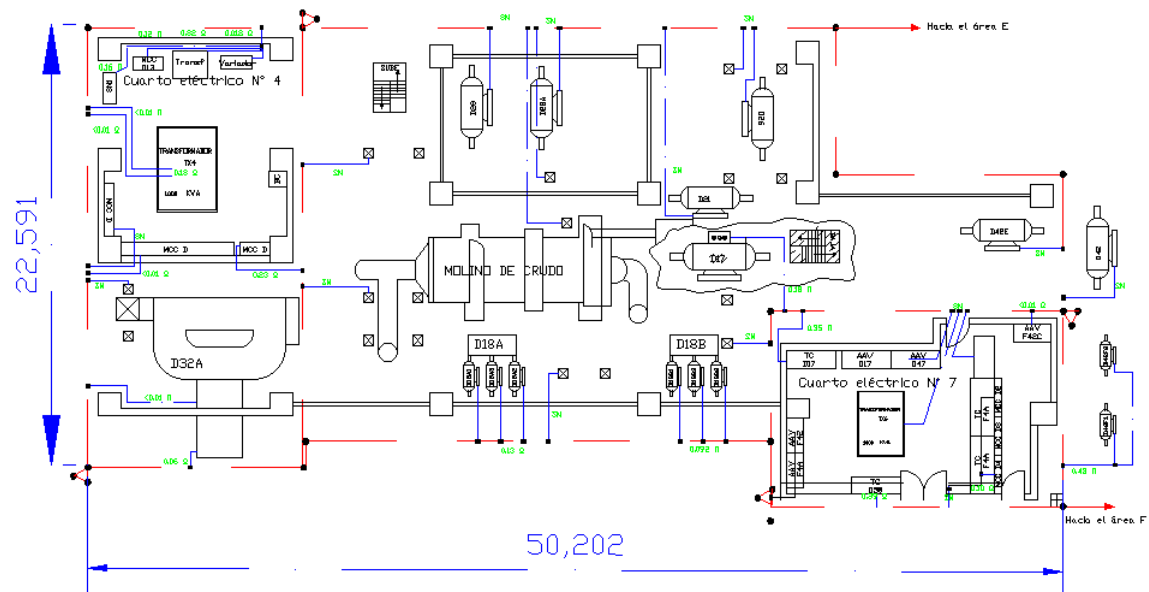


Figura 4.8: Malla existente en el área D.

El valor de RPT del área D se calcula mediante las ecuaciones de Schwarz 1.5, 1.6, 1.7 y 1.8.

Tabla 4.3: Datos MPT área D.

MALLA DE PUESTA A TIERRA ÁREA D (SCHWARZ)		
Ítem	Valor/Descripción	Unidad
Geometría	Rectangular	-
Lado menor (L1)	22,591	m
Lado mayor (L2)	50,202	m
Área malla (A)	1134,113382	m ²
Calibre conductor	4/0	AWG
Radio del conductor (a)	0,00584	m
Profundidad de la malla (S)	0,5	m
Cantidad Varilla Copperweld (n)	21	u
Longitud de varilla (L)	1,8	m
Radio de varilla (r)	0,0079	m
Longitud total varillas ($n * L$)	37,8	m
Resistividad terreno (ρ)	19,76	Ωm
Longitud conductores (B)	195,181	m
Coefficiente de Schwarz K1	1,088889381	-
Coefficiente de Schwarz K2	4,902221239	-
Resistencia conductores (R1)	0,320556331	Ω
Resistencia varillas (R2)	0,6080948	Ω
Resistencia mutua (Rm)	0,250971866	Ω
RESISTENCIA TOTAL (R_g)	0,309208982	Ω

Se calcula un valor de RPT de 0.3092 Ω , muy adecuado al estar cercano a 0 Ω .

4.1.4. Área E.

En el área E se ubican los silos de homogeneización con equipo destinado a tareas afines.

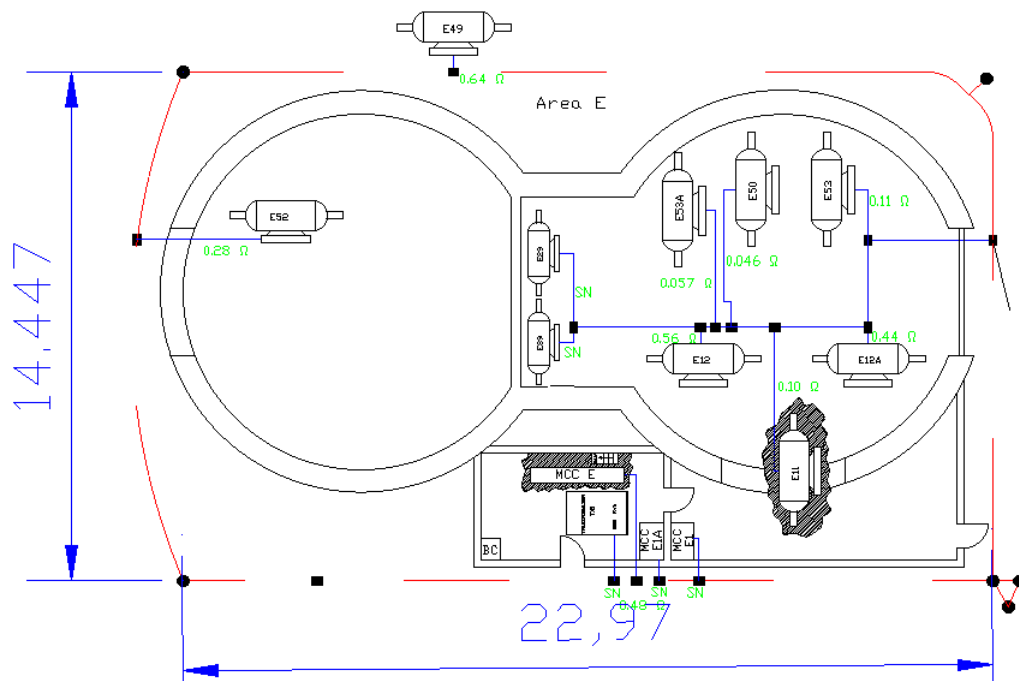


Figura 4.9: Malla existente en el área E

Se evalúa el resultado de la MPT del área E a través de las ecuaciones de Schwarz:

Tabla 4.4: Datos MPT área E

MALLA DE PUESTA A TIERRA ÁREA E (SCHWARZ)		
Ítem	Valor/Descripción	Unidad
Geometría	Rectangular	-
Lado menor (L1)	14,447	m
Lado mayor (L2)	22,97	m
Área malla (A)	331,84759	m ²
Calibre conductor	4/0	AWG
Radio del conductor (a)	0,00584	m
Profundidad de la malla (S)	0,5	m
Cantidad Varilla Copperweld (n)	6	u
Longitud de varilla (L)	1,8	m
Radio de varilla (r)	0,0079	m
Longitud total varillas ($n * L$)	10,8	m
Resistividad terreno (ρ)	34,6	Ωm
Longitud conductores (B)	74,834	m
Coficiente de Schwarz K1	1,120502526	-
Coficiente de Schwarz K2	4,838994947	-
Resistencia conductores (R1)	1,080829356	Ω
Resistencia varillas (R2)	3,202188038	Ω
Resistencia mutua (Rm)	0,763039499	Ω
RESISTENCIA TOTAL (R_g)	1,044197999	Ω

Resultado de 1.04 Ω . Dato dentro del rango recomendado por IEEE 80 e IEEE 81.

4.1.5. Área F.

Esta sección alberga al horno, equipos afines y un cuarto de transformadores. Se presenta al área en tres planos dada su amplia extensión:

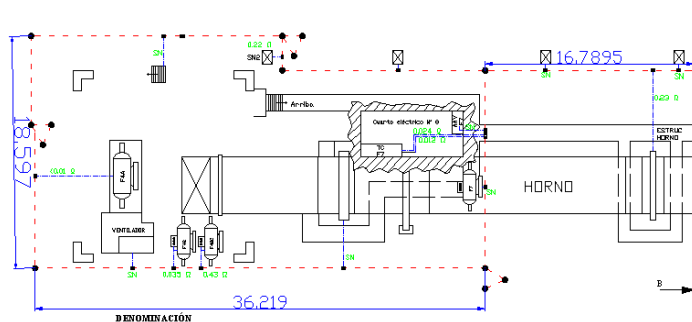


Figura 4.10: Parte 1 de la malla existente en el área F.

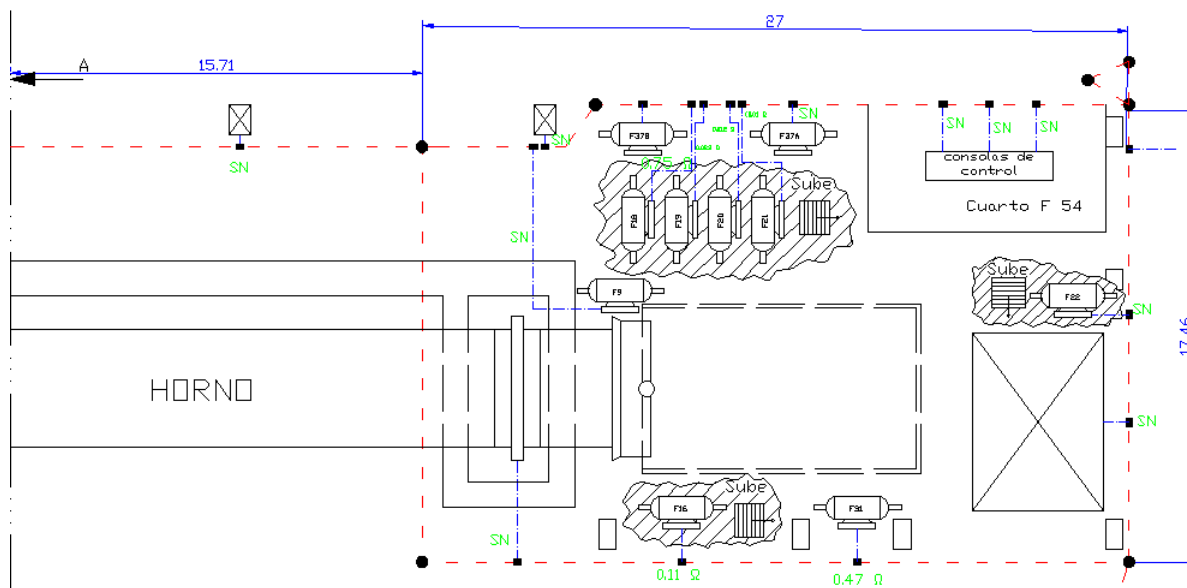


Figura 4.11: Parte 2 de la malla existente en el área F.

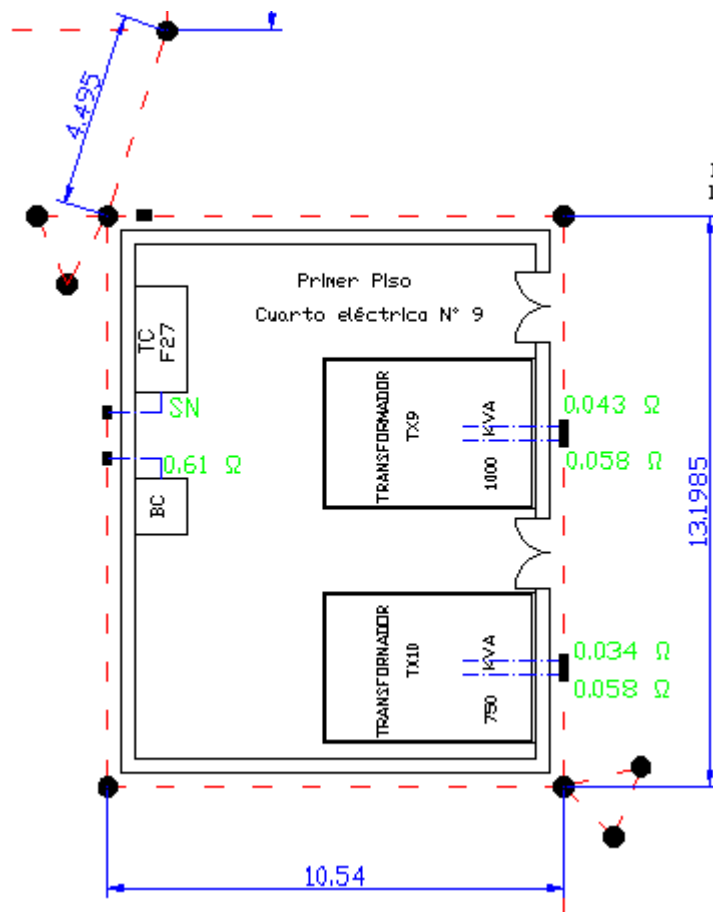


Figura 4.12: Parte 3 de la malla existente en el área F.

Evaluación de la RPT de las subáreas F1, F2, F3 y del área completa F usando las ecuaciones de Schwarz:

Tabla 4.5: Datos MPT área F1.

MALLA DE PUESTA A TIERRA ÁREA F1 (SCHWARZ)		
Ítem	Valor/Descripción	Unidad
Geometría	Rectangular	-
Lado menor (L1)	18,597	m
Lado mayor (L2)	36,219	m
Área malla (A)	673,564743	m ²
Calibre conductor	4/0	AWG
Radio del conductor (a)	0,00584	m
Profundidad de la malla (S)	0,5	m
Cantidad Varilla Copperweld (n)	13	u
Longitud de varilla (L)	1,8	m
Radio de varilla (r)	0,0079	m
Longitud total varillas ($n * L$)	23,4	m
Resistividad terreno (ρ)	34,6	Ω m
Longitud conductores (B)	126,4215	m
Coefficiente de Schwarz K1	1,102621391	-
Coefficiente de Schwarz K2	4,874757219	-
Resistencia conductores (R1)	0,74925865	Ω
Resistencia varillas (R2)	1,612801092	Ω
Resistencia mutua (Rm)	0,561145978	Ω
RESISTENCIA TOTAL (R_g)	0,720715904	Ω

Tabla 4.6: Datos MPT área F2.

MALLA DE PUESTA A TIERRA ÁREA F2 (SCHWARZ)		
Ítem	Valor/Descripción	Unidad
Geometría	Rectangular	-
Lado menor (L1)	17,46	m
Lado mayor (L2)	27	m
Área malla (A)	471,42	m ²
Calibre conductor	4/0	AWG
Radio del conductor (a)	0,00584	m
Profundidad de la malla (S)	0,5	m
Cantidad Varilla Copperweld (n)	7	u
Longitud de varilla (L)	1,8	m
Radio de varilla (r)	0,0079	m
Longitud total varillas ($n * L$)	12,6	m
Resistividad terreno (ρ)	34,6	Ω m
Longitud conductores (B)	104,63	m
Coefficiente de Schwarz K1	1,122680412	-
Coefficiente de Schwarz K2	4,834639175	-
Resistencia conductores (R1)	0,89373304	Ω
Resistencia varillas (R2)	2,761750174	Ω
Resistencia mutua (Rm)	0,666441765	Ω
RESISTENCIA TOTAL (R_g)	0,871490153	Ω

Tabla 4.7: Datos MPT área F3.

MALLA DE PUESTA A TIERRA ÁREA F3 (SCHWARZ)		
Ítem	Valor/Descripción	Unidad
Geometría	Rectangular	-
Lado menor (L1)	10,54	m
Lado mayor (L2)	13,1985	m
Área malla (A)	139,11219	m ²
Calibre conductor	4/0	AWG
Radio del conductor (a)	0,00584	m
Profundidad de la malla (S)	0,5	m
Cantidad Varilla Copperweld (n)	8	u
Longitud de varilla (L)	1,8	m
Radio de varilla (r)	0,0079	m
Longitud total varillas ($n * L$)	14,4	m
Resistividad terreno (ρ)	34,6	Ωm
Longitud conductores (B)	51,972	m
Coficiente de Schwarz K1	1,13738852	-
Coficiente de Schwarz K2	4,80522296	-
Resistencia conductores (R1)	1,572807751	Ω
Resistencia varillas (R2)	2,667558231	Ω
Resistencia mutua (Rm)	1,115225088	Ω
RESISTENCIA TOTAL (R_g)	1,468633291	Ω

Se combinan los datos obtenidos de las subáreas F1, F2 y F3 para obtener la RPT de la malla F aplicando la ecuación de Sverak.

Tabla 4.8: Datos MPT área F.

MALLA DE PUESTA A TIERRA ÁREA F (SVERAK)		
Ítem	Valor/Descripción	Unidad
Geometría	Irregular	-
Área malla (A)	1284,096933	m ²
Calibre conductor	4/0	AWG
Radio del conductor (a)	0,00584	m
Profundidad de la malla (S)	0,5	m
Cantidad Varilla Copperweld (n)	28	u
Longitud de varilla (L)	1,8	m
Radio de varilla (r)	0,0079	m
Resistividad terreno (ρ)	34,6	Ω m
Longitud conductores (B)	283,0235	m
Longitud varillas ($n * L$)	50,4	m
B total ($B + N * L$)	333,4235	m
RESISTENCIA TOTAL (R_g)	0,522900235	Ω

Dato obtenido 0.5229 Ω , considerado como adecuado al ser menor a la unidad.

4.1.6. Área G.

El molino de cemento se ubica en esta área con maquinaria para tareas afines, además de un cuarto eléctrico.

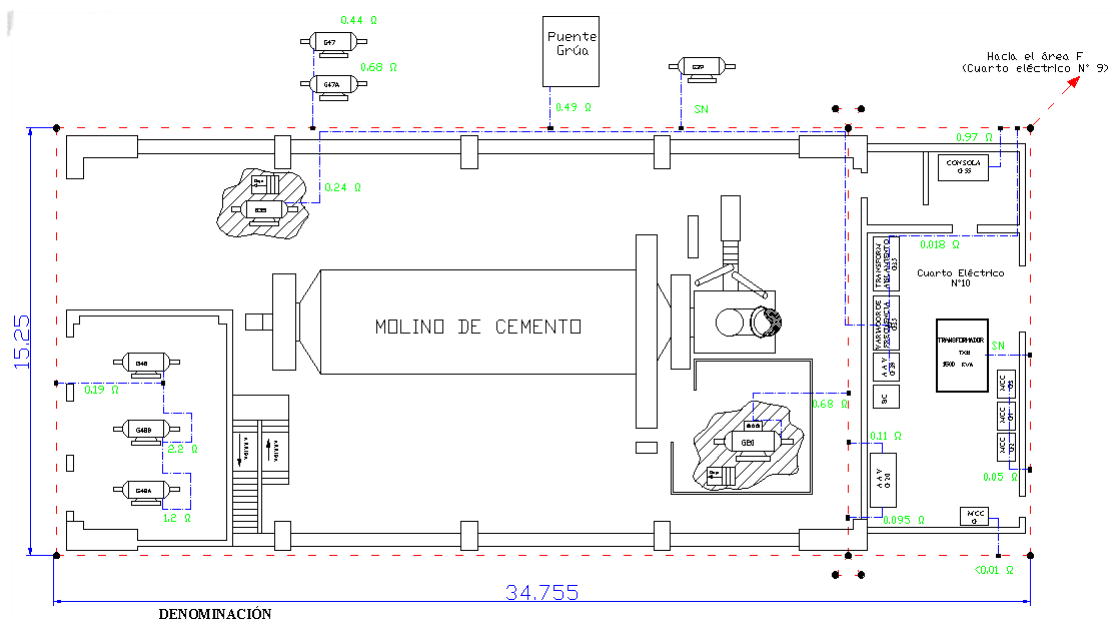


Figura 4.13: Malla existente en el área G.

Obtención de la RPT del área G empleando las ecuaciones de Schwarz:

Tabla 4.9: Datos MPT área G.

MALLA DE PUESTA A TIERRA ÁREA G (SCHWARZ)		
Ítem	Valor/Descripción	Unidad
Geometría	Rectangular	-
Lado menor (L1)	15,25	m
Lado mayor (L2)	34,755	m
Área malla (A)	530,01375	m ²
Calibre conductor	4/0	AWG
Radio del conductor (a)	0,00584	m
Profundidad de la malla (S)	0,5	m
Cantidad Varilla Copperweld (n)	10	u
Longitud de varilla (L)	1,8	m
Radio de varilla (r)	0,0079	m
Longitud total varillas ($n * L$)	18	m
Resistividad terreno (ρ)	36,62	Ωm
Longitud conductores (B)	115,26	m
Coficiente de Schwarz K1	1,08604918	-
Coficiente de Schwarz K2	4,907901639	-
Resistencia conductores (R1)	0,863797589	Ω
Resistencia varillas (R2)	2,139938454	Ω
Resistencia mutua (Rm)	0,64542274	Ω
RESISTENCIA TOTAL (R_g)	0,835957179	Ω

Valor calculado de 0.8359 Ω . Número por debajo de 1 Ω y se considera idóneo.

4.1.7. Área H.

En virtud de la extensión de la MPT se ha dividido la misma en tres partes para su análisis:

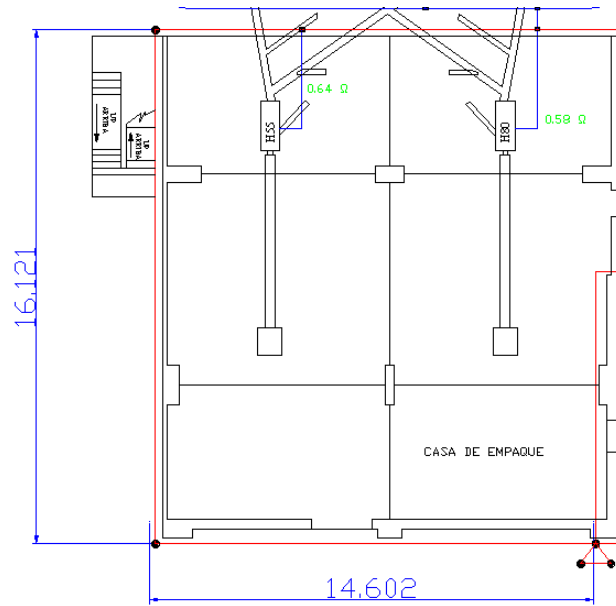


Figura 4.14: Parte 1 de la malla existente en el área H.

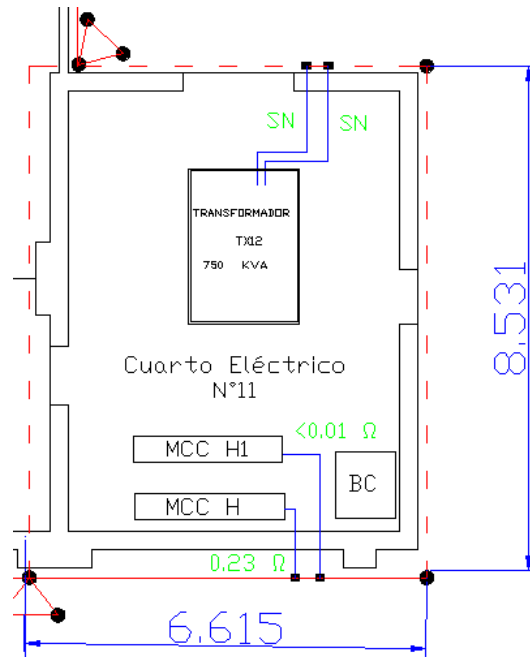


Figura 4.15: Parte 2 de la malla existente en el área H.

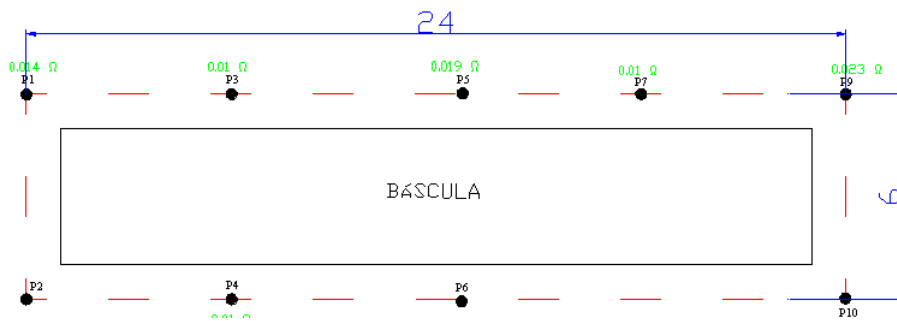


Figura 4.16: Malla de báscula existente en el área H.

La parte 1 y parte 2 del área H se encuentran enlazadas, por lo que se calcula su valor de cada malla empleando las expresiones de Schwarz:

Tabla 4.10: Datos MPT área H1.

MALLA DE PUESTA A TIERRA ÁREA H1 (SCHWARZ)		
Ítem	Valor/Descripción	Unidad
Geometría	Rectangular	-
Lado menor (L1)	14,602	m
Lado mayor (L2)	16,121	m
Área malla (A)	235,398842	m ²
Calibre conductor	4/0	AWG
Radio del conductor (a)	0,00584	m
Profundidad de la malla (S)	0,5	m
Cantidad Varilla Copperweld (n)	4	u
Longitud de varilla (L)	1,8	m
Radio de varilla (r)	0,0079	m
Longitud total varillas ($n * L$)	7,2	m
Resistividad terreno (ρ)	36,62	Ω m
Longitud conductores (B)	61,446	m
Coficiente de Schwarz K1	1,144798658	-
Coficiente de Schwarz K2	4,790402685	-
Resistencia conductores (R1)	1,361541695	Ω
Resistencia varillas (R2)	4,924541174	Ω
Resistencia mutua (Rm)	0,9519156	Ω
RESISTENCIA TOTAL (R_g)	1,323252352	Ω

Tabla 4.11: Datos MPT área H2.

MALLA DE PUESTA A TIERRA ÁREA H2 (SCHWARZ)		
Ítem	Valor/Descripción	Unidad
Geometría	Rectangular	-
Lado menor (L1)	6,615	m
Lado mayor (L2)	8,531	m
Área malla (A)	56,432565	m ²
Calibre conductor	4/0	AWG
Radio del conductor (a)	0,00584	m
Profundidad de la malla (S)	0,5	m
Cantidad Varilla Copperweld (n)	7	u
Longitud de varilla (L)	1,8	m
Radio de varilla (r)	0,0079	m
Longitud total varillas ($n * L$)	12,6	m
Resistividad terreno (ρ)	36,62	Ωm
Longitud conductores (B)	30,292	m
Coficiente de Schwarz K1	1,135517763	-
Coficiente de Schwarz K2	4,808964475	-
Resistencia conductores (R1)	2,480234388	Ω
Resistencia varillas (R2)	3,371527544	Ω
Resistencia mutua (Rm)	1,649325731	Ω
RESISTENCIA TOTAL (R_g)	2,209815539	Ω

Con los datos obtenidos previamente se obtiene el valor de la MPT del área H empleando la expresión de Sverak.

Tabla 4.12: Datos MPT área H.

MALLA DE PUESTA A TIERRA ÁREA H (SVERAK)		
Ítem	Valor/Descripción	Unidad
Geometría	Irregular	-
Área malla (A)	291,831407	m ²
Calibre conductor	4/0	AWG
Radio del conductor (a)	0,00584	m
Profundidad de la malla (S)	0,5	m
Cantidad Varilla Copperweld	11	u
Longitud de varilla (L)	1,8	m
Radio de varilla (r)	0,0079	m
Resistividad terreno(ρ)	36,62	Ωm
Longitud conductores (B1)	91,738	m
Longitud varillas (B2)	19,8	m
B total	111,538	m
RESISTENCIA TOTAL (R_g)	1,231504845	Ω

Se alcanzan 1,23 Ω de RPT. Cantidad idónea, sin embargo, es el dato más alto hasta ahora calculado. Puede mejorarse a priori, interconectando con una MPT cercana.

Tabla 4.13: Datos MPT báscula área H

MALLA DE PUESTA A TIERRA BÁSCULA ÁREA H (SCHWARZ)		
Ítem	Valor/Descripción	Unidad
Geometría	Rectangular	-
Lado menor (L1)	6	m
Lado mayor (L2)	24	m
Área malla (A)	144	m ²
Calibre conductor	4/0	AWG
Radio del conductor (a)	0,00584	m
Profundidad de la malla (S)	0,5	m
Cantidad Varilla Copperweld (n)	8	u
Longitud de varilla (L)	1,8	m
Radio de varilla (r)	0,0079	m
Longitud total varillas ($n * L$)	14,4	m
Resistividad terreno (ρ)	36,62	Ω m
Longitud conductores (B)	60	m
Coefficiente de Schwarz K1	1	-
Coefficiente de Schwarz K2	5,08	-
Resistencia conductores (R1)	1,414129473	Ω
Resistencia varillas (R2)	2,759482897	Ω
Resistencia mutua (Rm)	0,994631389	Ω
RESISTENCIA TOTAL (R_g)	1,333566068	Ω

No se dispone de información específica sobre los datos de la MPT de la báscula del área H. Mediante inspección visual y con base a las mallas construidas, se infiere en las posibles características de esta malla. Utilizando esos datos se obtiene 1.33Ω como RPT.

4.1.8. Área K.

Construcción de MPT nueva correspondiente a la cámara de transformación. Se emplea la información del constructor de la malla suministrada por UCEM - planta Industrias Guapán mediante el documento [15] .

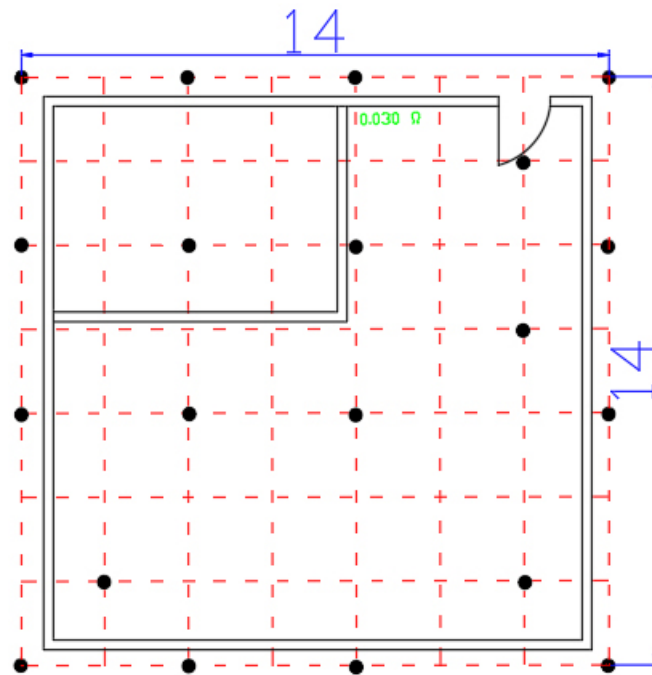


Figura 4.17: Malla existente en el área K

Se presenta los datos que tiene la malla en el área K:

Tabla 4.14: MPT área K.

MALLA DE PUESTA A TIERRA ÁREA K (SCHWARZ)		
Ítem	Valor/Descripción	Unidad
Geometría	Cuadrada	-
Lado menor (L1)	14	m
Lado mayor (L2)	14	m
Área malla (A)	196	m ²
Calibre conductor	4/0	AWG
Radio del conductor (a)	0,00584	m
Profundidad de la malla (S)	0,8	m
Cantidad Varilla Copperweld (n)	20	u
Longitud de varilla (L)	2,4	m
Radio de varilla (r)	0,0079	m
Longitud total varillas ($n * L$)	48	m
Resistividad terreno (ρ)	19,84	Ωm
Longitud conductores (B)	224	m
Coefficiente de Schwarz K1	1,15	-
Coefficiente de Schwarz K2	4,78	-
Resistencia conductores (R1)	0,621977894	Ω
Resistencia varillas (R2)	0,714155321	Ω
Resistencia mutua (Rm)	0,559615208	Ω
RESISTENCIA TOTAL (R_g)	0,604047721	Ω

El constructor de la malla declara un valor de RPT de 0.60Ω en el documento [15]. Empleando las expresiones de Schwarz, con los datos de construcción de la MPT se consigue el mismo valor, resultado que ratifica la validez de todos los cálculos efectuados para estimar la RPT de las áreas de producción de la planta.

4.1.9. Cuarto eléctrico 2-3.

En el cuarto eléctrico 2-3 se ubican principalmente transformadores.

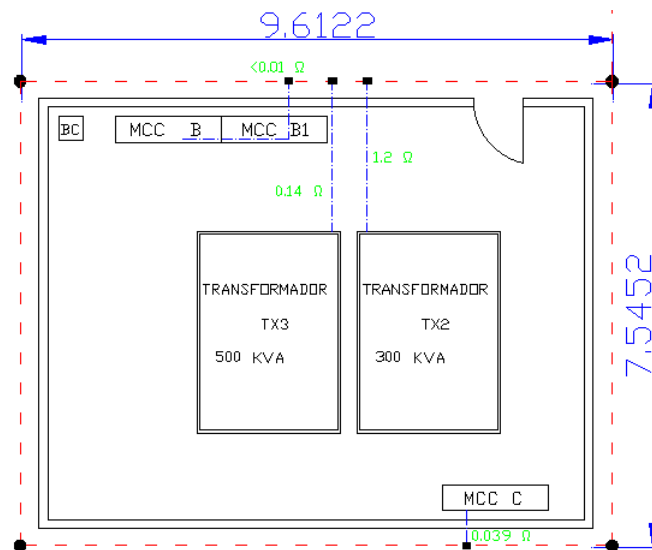


Figura 4.18: Malla existente en el cuarto eléctrico 2-3.

Estimación del valor de resistencia de la MPT empleando las ecuaciones de Schwarz:

Tabla 4.15: Datos MPT cuarto eléctrico 2-3.

MALLA DE PUESTA A TIERRA CUARTO ELÉCTRICO (SCHWARZ)		
Ítem	Valor/Descripción	Unidad
Geometría	Rectangular	-
Lado menor (L1)	7,5452	m
Lado mayor (L2)	9,6122	m
Área malla (A)	72,52597144	m ²
Calibre conductor	4/0	AWG
Radio del conductor (a)	0,00584	m
Profundidad de la malla (S)	0,5	m
Cantidad Varilla Copperweld (n)	4	u
Longitud de varilla (L)	1,8	m
Radio de varilla (r)	0,0079	m
Longitud total varillas ($n * L$)	7,2	m
Resistividad terreno (ρ)	25,2	Ω m
Longitud conductores (B)	34,3148	m
Coefficiente de Schwarz K1	1,13630255	-
Coefficiente de Schwarz K2	4,8073949	-
Resistencia conductores (R1)	1,536126639	Ω
Resistencia varillas (R2)	3,506756528	Ω
Resistencia mutua (Rm)	1,031370091	Ω
RESISTENCIA TOTAL (R_g)	1,450634374	Ω

El valor obtenido de 1.45Ω obedece al área ocupada por la MPT que, según los estándares IEEE 80 e IEEE 81 [2, 3], es uno de los factores que más influye en el resultado de la RPT (a mayor área abarcada, menor RPT obtenida). El resultado es adecuado, sin embargo, puede optimizarse enlazando esta MPT con una cercana.

4.1.10. Subestación.

Corresponde a la subestación eléctrica, la más crítica de toda la planta.

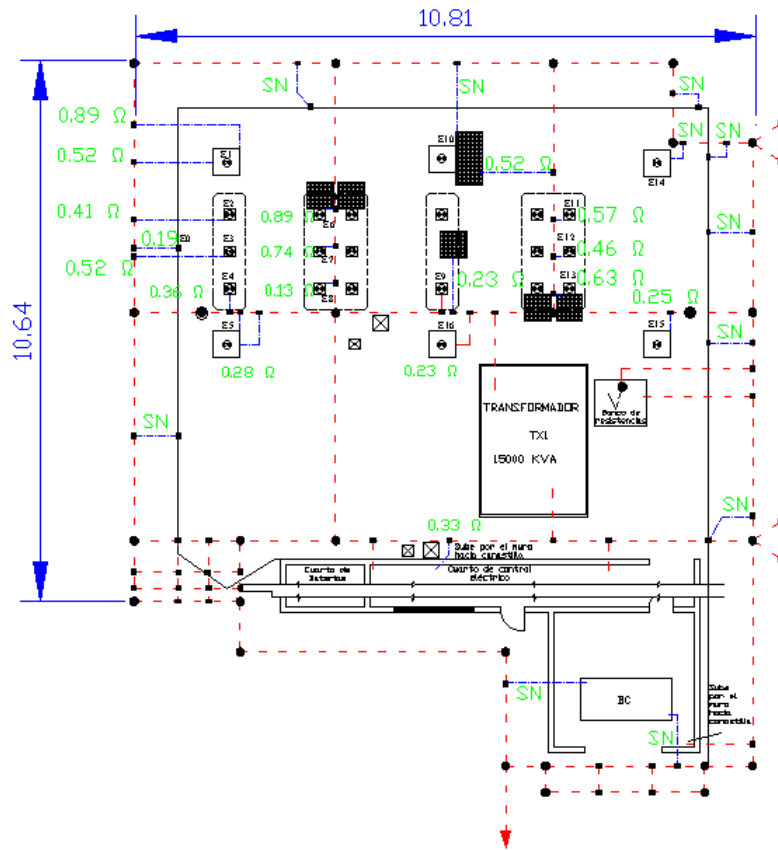


Figura 4.19: Malla existente en el área de la subestación.

Se emplea la ecuación de Sverak para obtener el valor de la MPT. Se recomienda utilizar esta ecuación para subestaciones [14].

Tabla 4.16: Datos MPT subestación.

MALLA DE PUESTA A TIERRA SUBESTACIÓN (SVERAK)		
Ítem	Valor/Descripción	Unidad
Geometría	Irregular	-
Área malla (A)	136,66	m ²
Calibre conductor	4/0	AWG
Radio del conductor (a)	0,00584	m
Profundidad de la malla (S)	0,5	m
Cantidad Varilla Copperweld	29	u
Longitud de varilla (L)	1,8	m
Radio de varilla (r)	0,0079	m
Resistividad terreno (ρ)	46,8	Ω m
Longitud conductores (B)	99,25	m
Longitud varillas ($n * L$)	52,2	m
B total ($B + n * L$)	151,45	m
RESISTENCIA TOTAL (R_g)	1,955637317	Ω

La MPT está construida con conductor de cobre 4/0 AWG (mínimo recomendado para subestaciones por IEEE 80 e IEEE 81). Los estándares utilizados [2, 3] recomiendan valores menores a 1Ω para subestaciones, pero consideran tolerables mediciones menores a 5Ω . Sin embargo, como medida de seguridad, debe procurarse reducir la RPT de la subestación por debajo de 1Ω .

4.1.11. Bombas de agua.

En el área de bombas de agua se estima, luego de la inspección visual, una MPT como la expuesta en la figura 4.20 .

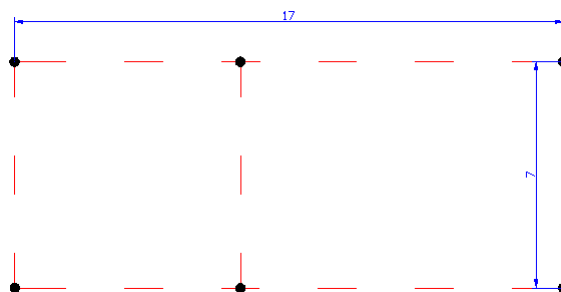


Figura 4.20: Malla existente en el área de bombas de agua.

Se presenta los datos que tiene la malla en el área de bombas de agua y se estima su resistencia bajo las expresiones de Schwarz:

Tabla 4.17: Datos MPT área de bombas de agua.

MALLA DE PUESTA A TIERRA GRUPO ELECTRÓGENO (SCHWARZ)		
Ítem	Valor/Descripción	Unidad
Geometría	Rectangular	-
Lado menor (L1)	7	m
Lado mayor (L2)	17	m
Área malla (A)	119	m ²
Calibre conductor	4/0	AWG
Radio del conductor (a)	0,00584	m
Profundidad de la malla (S)	0,5	m
Cantidad Varilla Copperweld (n)	6	u
Longitud de varilla (L)	1,8	m
Radio de varilla (r)	0,0079	m
Longitud total varillas ($n * L$)	10,8	m
Resistividad terreno (ρ)	39,1	Ω m
Longitud conductores (B)	55	m
Coefficiente de Schwarz K1	1,078571429	-
Coefficiente de Schwarz K2	4,922857143	-
Resistencia conductores (R1)	1,76214308	Ω
Resistencia varillas (R2)	3,781491654	Ω
Resistencia mutua (Rm)	1,273516644	Ω
RESISTENCIA TOTAL (R_g)	1,682467555	Ω

Esta área es susceptible a mejorar debido a que se acerca al valor de 2Ω . El enlace con una MPT cercana mejoraría su RPT.

4.1.12. Grupo diésel.

Área compuesta por 5 generadores. Se estima las características de esta malla mediante evaluación visual con el antecedente de las mallas existentes en la planta.

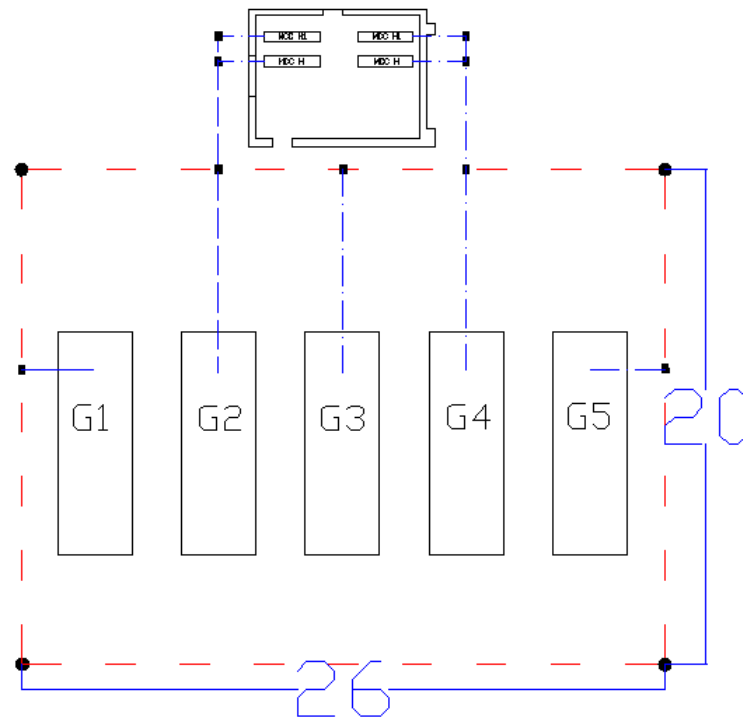


Figura 4.21: Malla existente en el área del grupo diésel

Evaluación mediante las expresiones de Schwarz:

Tabla 4.18: Datos MPT grupo diésel

MALLA DE PUESTA GRUPO DIÉSEL (SCHWARZ)		
Ítem	Valor/Descripción	Unidad
Geometría	Rectangular	-
Lado menor (L1)	20	m
Lado mayor (L2)	26	m
Área malla (A)	520	m ²
Calibre conductor	4/0	AWG
Radio del conductor (a)	0,00584	m
Profundidad de la malla (S)	0,5	m
Cantidad Varilla Copperweld (n)	4	u
Longitud de varilla (L)	1,8	m
Radio de varilla (r)	0,0079	m
Longitud total varillas ($n * L$)	7,2	m
Resistividad terreno (ρ)	21,3	Ωm
Longitud conductores (B)	92	m
Coefficiente de Schwarz K1	1,135	-
Coefficiente de Schwarz K2	4,81	-
Resistencia conductores (R1)	0,556812553	Ω
Resistencia varillas (R2)	2,822248925	Ω
Resistencia mutua (Rm)	0,397681598	Ω
RESISTENCIA TOTAL (R_g)	0,547011617	Ω

Resultado de 0.54Ω por debajo de la unidad. Se considera como un valor adecuado.

4.2. Resumen de la resistencia de mallas de puesta a tierra calculadas.

A continuación se presenta un cuadro del resumen de los datos generales en cada malla existente:

Tabla 4.19: Resumen de mallas de puesta a tierra existentes.

DATOS EXISTENTES						
NOMBRE	ÁREA (m ²)	LONG. CONDUCTOR (m)	CANT. VARILLAS	LONG. VARILLAS (m)	RESISTIVIDAD (Ωm)	RESISTENCIA MPT (Ω)
ÁREA B	175,2834	53,38	4	7,2	29,7	1,20061173
ÁREA C	6792,908715	388,3091168	2	3,6	25,2	0,199232245
ÁREA D	1134,113382	195,181	21	37,8	19,76	0,309208982
ÁREA E	331,84759	74,834	6	10,8	34,6	1,044197999
ÁREA F	1284,096933	283,0235	28	50,4	34,6	0,522900235
ÁREA G	530,01375	115,26	10	18	36,62	0,835957179
ÁREA H	291,831407	91,738	11	19,8	36,62	1,231504845
BÁSCULA ÁREA H	144	60	8	14,4	36,62	1,333566068
ÁREA K	196	224	20	48	19,84	0,604047721
CUARTO ELÉCTRICO	72,52597144	34,3148	4	7,2	25,2	1,450634374
SUBESTACIÓN	136,66	99,25	29	52,2	46,8	1,955637317
BOMBAS DE AGUA	119	55	6	10,8	39,1	1,682467555
GRUPO DIÉSEL	520	92	4	7,2	21,3	0,547011617
TOTAL	11728,28115	1766,290417	153	287,4	-	-

En la tabla 4.19 se puede apreciar que el área más crítica, con un valor de RPT que es susceptible de mejora es la subestación. Si bien se encuentra por debajo 2Ω , valor reconocido como aceptable por los estándares IEEE 80 e IEEE 81, por seguridad es necesario reducir este valor de RPT. Similar situación ocurre con el área de bombas de agua, cuarto eléctrico y demás áreas con RPT superior a 1Ω .

Entonces, con base a los resultados obtenidos de resistencia y resistividad, aplicando las normativas descritas en el capítulo 2 y bibliografía complementaria se procede a elaborar dos propuestas de optimización de actual SPT de la planta Industrias Guapán.

Capítulo 5

Propuestas de optimización MPT UCEM-Guapán.

Aplicando las normativas referentes a sistemas de puesta a tierra [2, 3, 7, 6, 13], en este capítulo se realiza el análisis de las características de las MPTs existentes para elaborar modelos de optimización para el SPT. El principio a aplicarse es enlazar las MPTs para formar un sistema equipotencial ¹, con una resistencia de puesta a tierra muy baja, por debajo de 1Ω y cercana a cero preferentemente.

Si se logra interconectar la mayor cantidad posible de mallas y a la vez cubrir un área amplia por las MPTs unidas, se conseguirán un SPT integral y equipotencial, con una RPT mínima, siendo esta condición garantía de seguridad para la integridad de las personas y la vida útil de los equipos o partes conectadas al SPT.

5.1. Primera propuesta MPT UCEM - Planta Industrias Guapán.

En este primer caso se plantea que la mejor forma de llegar a un valor de resistencia más bajo es la unión de todas las mallas existentes en la planta, disminuyendo notablemente el valor del SPT obtenido. Además, se forma una malla tipo anillo que abarca más área que la cubierta originalmente por las MPTs existentes, mejorando la RPT del sistema y abarcando más secciones de la planta, así se consigue asegurar más espacios de trabajo o circulación de personas, maquinarias o vehículos y formar un sistema conjunto equipotencial en todas las áreas de producción principalmente.

Respetando lo sugerido por las normativas, esta unión se realiza con conductor desnudo de cobre 4/0 AWG mismo que es usado en las MPTs ya construidas, respetando la uniformidad y características de los materiales utilizados. Estas conexiones pueden

¹Conexión de varios EPT, de manera que si entre ellos circula una corriente no se genera una diferencia de potencial considerable entre esos puntos.

realizarse de manera subterránea o a nivel del suelo, procurando mantener al conductor protegido de ser deteriorado o desprendido del sistema. Según se indica en la figura 5.1 se utilizarán varillas Copperweld de 1.8m de largo y 5/8" de diámetro. En los puntos de unión se recomienda usar soldadura exotérmica Cadweld o en su defecto conectores de compresión de cobre. La elección de este aspecto queda a consideración según disponibilidad o practicidad.

La figura 5.1 muestra el mapa con los enlaces que se generaron en cada malla, para obtener el SPT equipotencial. Se incluye leyenda con información de los materiales usados para este fin.

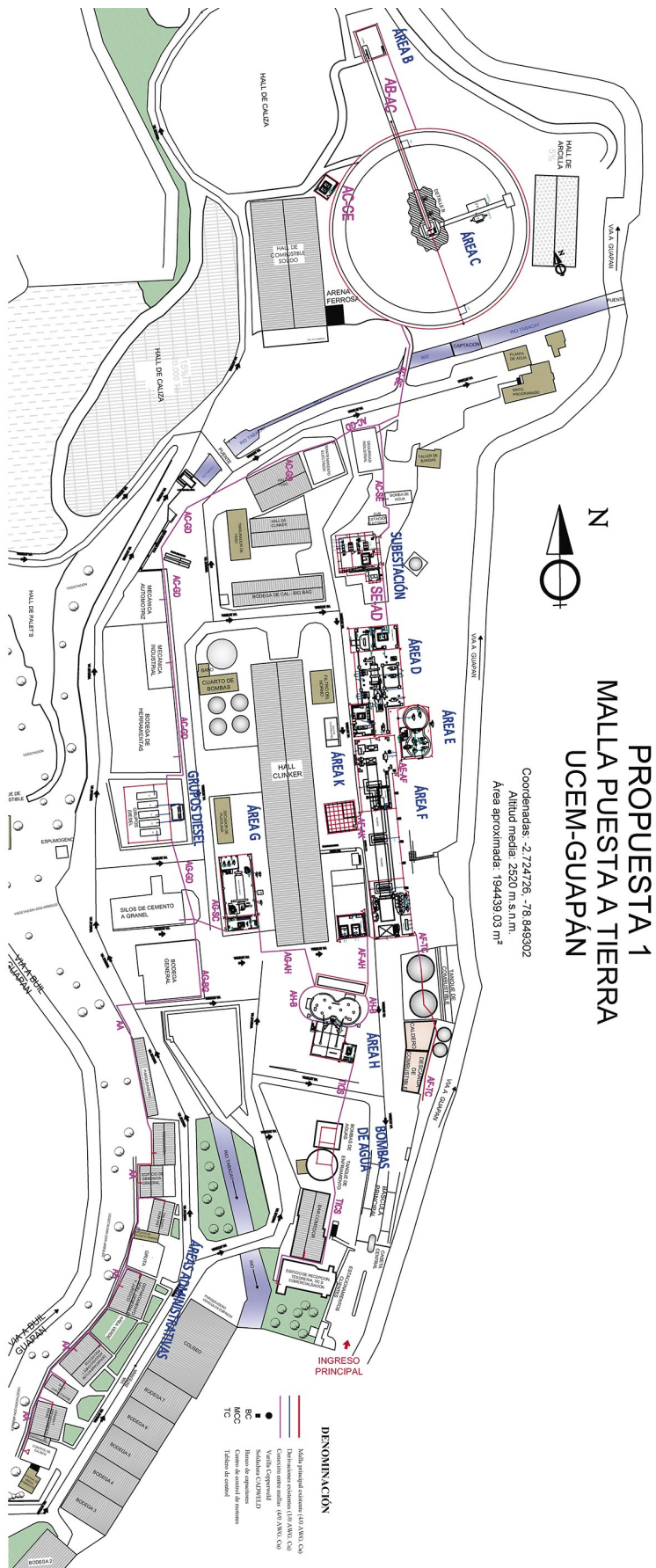


Figura 5.1: Propuesta 1 MPT UCEM-Guapán.

En esta propuesta se enlazan todas las área de la planta, incluyendo las áreas de producción, administrativas y de mantenimiento. Se tienden conductores según el plano 5.1 para unir zonas que no cuentan con un EPT y se unifican en este SPT equipotencial integral.

5.1.1. Resultados del primer caso del estudio.

En la tabla 5.1 se muestra el área que se genera al realizar los enlaces de todas las mallas mostradas en la figura 5.1 :

Tabla 5.1: Propuesta 1 - Área nueva SPT UCEM-Guapán.

ÁREAS PROYECTADAS		
NOMBRE	VALOR	UNIDAD
AN	31777,88	m ²
TOTAL	31777,88	m²

En la tabla 5.2 se especifica los enlaces que se crearon (nombres) y las características del material utilizado para ello.

Tabla 5.2: Resumen enlaces proyectados - Propuesta 1. .

ENLACES PROYECTADOS			
NOMBRE	CANT. VARILLAS	LONG. VARILLAS (m)	LONG. CONDUCTOR (m)
AB-AC	0	0	37,26
AC-CE	0	0	0,5
AC-SE	0	0	107,77
SE-AD	0	0	21,22
AE-AF	0	0	5,7
AF-AK	0	0	2,07
AF-TC	1	1,8	84,98
AF-AH	0	0	22,18
AH-B	0	0	44,89
AG-AH	0	0	49,16
AG-SC	0	0	16,19
AG-GD	0	0	38,31
AC-GD	0	0	237,17
TICS	2	3,6	110,19
AG-BG	1	1,8	78,11
AA	14	25,2	269,41
SUBTOTAL	18	32,4	1125,11
B TOTAL		1157,51	

En la tabla 5.3 se presenta el cálculo de la resistencia de la nueva MPT que se creó en la propuesta 1. Se realiza la valoración empleando la ecuación de Sverak.

Tabla 5.3: Cálculo de resistencia de MPT propuesta 1

PROPUESTA 1 MPT UCEM - GUAPÁN		
ÍTEM	VALOR / DESCRIPCIÓN	UNIDAD
Geometría	Irregular	-
Radio malla	SN	m
Área malla (A)	31777,88	m ²
Calibre conductor	4/0	AWG
Radio del conductor (a)	0,00584	m
Profundidad de la malla (S)	0,5	m
Cantidad Varilla Copperweld	171	u
Longitud de varilla (L)	1,8	m
Radio de varilla (r)	0,0079	m
Resistividad terreno (ρ)	46,8	Ωm
Longitud conductores (B1)	2891,400417	m
Longitud Total varillas (B2)	307,8	m
B total	3199,200417	m
RESISTENCIA TOTAL	0,131309606	Ω

El valor de resistencia de la nueva MPT con esta propuesta es de $0.13 \Omega m$, valor idóneo para un SPT que abarca toda la planta y que su baja resistencia garantiza seguridad para personas y equipos. Además, el extender el área de la malla permite que sea más fácil abarcar y enlazar nuevas MPT que se construyan en un futuro.

Para consultar a detalle las características de la primera propuesta se adjuntan como anexos los planos como archivos de Autocad y la hoja de cálculo de la MPT como un archivo de Excel.

5.2. Segunda propuesta MPT UCEM - Planta Industrias Guapán.

El segundo caso plantea que se realice únicamente la unión de las mallas más cercanas entre sí. Esta distribución provoca la formación de tres zonas independientes: la primera incluye las áreas B y C y el cuarto eléctrico; la segunda comprende las áreas de mantenimiento, seguridad industrial, bodega general y de herramientas, subestación, grupo diésel, bombas de agua, comedor, edificio de TICs, tanques de combustible y las áreas desde la D a la K; y la última comprende al área administrativa.

Esta zonificación permitirá disminuir la cantidad de material y de trabajos a realizarse para conseguir un SPT mejorado. Si bien el área de cobertura disminuye, aún se

conserva un valor de RPT bajo, dentro de los parámetros óptimos. Una particularidad que presenta este modelo es que el área de seguridad disminuye en comparación con la primera propuesta.

A continuación se muestra en la figura 5.2 las uniones que se generan en cada zona para mejorar el valor de RPT.

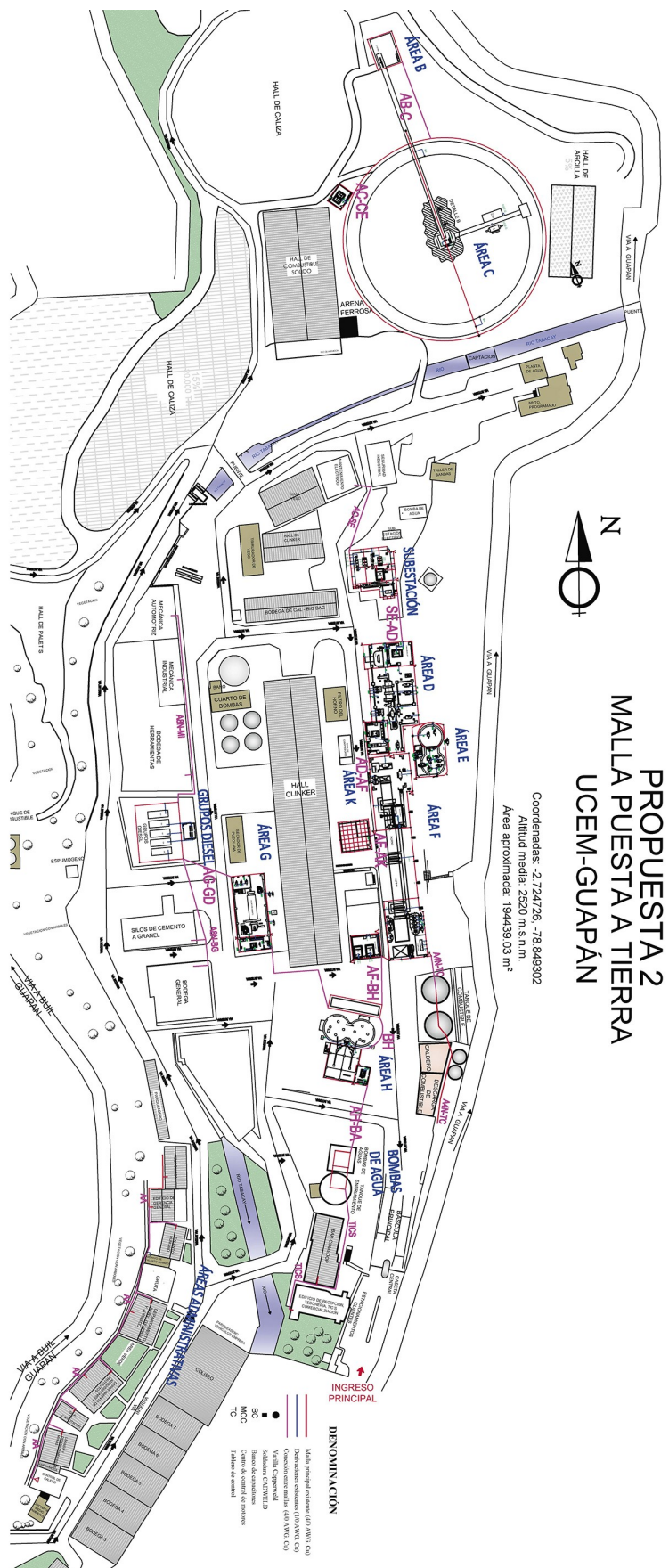


Figura 5.2: Propuesta 2 MPT UCEM-Guapán.

Análogamente al proceso de la propuesta uno, aquí se emplea el mismo conductor para enlazar y cubrir nuevas áreas, iguales varillas y se emplean de la misma forma soldadura Cadweld o conectores de compresión de cobre. El conductor se puede tender de manera subterránea o sobre el nivel del suelo según la conveniencia. La propuesta dos se expone en el plano 5.2.

5.2.1. Resultados del segundo caso del estudio

En la tabla 5.4 se especifica los enlaces creados y con la cantidad de material utilizado.

Los tramos 1 y 2 corresponden a la zona creada por el área B, área C y cuarto eléctrico; el tramo 15 corresponde al área administrativa y los tramos restantes del 3 al 14 son los que abarcan la gran zona central que incluye entre otras a las áreas de producción.

Tabla 5.4: Resumen enlaces proyectados - Propuesta 1

ENLACES PROYECTADOS				
Nro.	TRAMO	CANT. VARILLAS	LONG. TOTAL VARILLAS (m)	LONG. CONDUCTOR (m)
1	AB-AC	0	0	37,26
2	AC-CE	0	0	0,5
3	AC-SE	1	1,8	38,33
4	SE-AD	0	0	21,22
5	AD-AF	0	0	1,55
6	AF-AK	0	0	2,07
7	AF-BH	0	0	22,18
8	A4N-TC	1	1,8	84,98
9	BH	0	0	20,33
10	AH-BA	0	0	31,35
11	AG-GD	0	0	23,33
12	A8N-MI	1	1,8	93,38
13	A8N-BG	0	0	50,08
14	TICS	3	5,4	78,84
15	AA	14	25,2	202,57
SUBTOTAL		6	10,8	505,4
B TOTAL			516,2	

En la tabla 5.3 se presenta el valor de RPT de la propuesta 2.1 calculado para el

área de materia prima (área B, área C y cuarto eléctrico). -

Tabla 5.5: Resistencia propuesta 2.1 (Área materia prima)

PROPUESTA 2.1 MPT UCEM - GUAPÁN (SVERAK)		
ÍTEM	VALOR / DESCRIPCIÓN	UNIDAD
Geometría	Irregular	-
Radio malla	SN	m
Área malla (A)	7040,718087	m ²
Calibre conductor	4/0	AWG
Radio del conductor (a)	0,00584	m
Profundidad de la malla (S)	0,5	m
Cantidad varilla Copperweld (n)	10	u
Longitud de varilla (L)	1,8	m
Radio de varilla (r)	0,0079	m
Resistividad terreno (ρ)	29,7	Ωm
Longitud conductores (B)	513,7639168	m
Longitud total varillas ($n * L$)	18	m
B total ($B + n * L$)	531,7639168	m
RESISTENCIA TOTAL R_g	0,212090899	Ω

Se obtiene un valor de RPT de 0.212 Ω aplicando la ecuación de Sverak, resultado óptimo al estar cercano a cero.

En la tabla 5.6 se presenta el cálculo de la RPT de la propuesta 2.2 que incluye al área D, E, F, G, H, K, grupo diésel, bombas de agua, etc.

Tabla 5.6: Resistencia propuesta 2.2 (Áreas producción)

PROPUESTA 2.2 MPT UCEM - GUAPÁN (SVERAK)		
ÍTEM	VALOR / DESCRIPCIÓN	UNIDAD
Geometría	Irregular	-
Radio malla	SN	m
Área malla (A)	4687,563062	m ²
Calibre conductor	4/0	AWG
Radio del conductor (a)	0,00584	m
Profundidad de la malla (S)	0,5	m
Cantidad varilla Copperweld (n)	149	u
Longitud de varilla (L)	1,8	m
Radio de varilla (r)	0,0079	m
Resistividad terreno (ρ)	46,8	Ωm
Longitud conductores (B)	1757,9265	m
Longitud total varillas ($n * L$)	280,2	m
B total ($B + n * L$)	2038,1265	m
RESISTENCIA TOTAL R_g	0,323822474	Ω

Resultado obtenido favorable, muy cercano a cero en la zona más crítica de la planta al contener a la subestación y al grupo diésel.

En la tabla 5.3 muestra el valor de RPT de la propuesta 2.3 que abarca al área administrativa y de servicios en general.

Tabla 5.7: Resistencia propuesta 2.3 (Área Administrativas)

PROPUESTA 2.3 MPT UCEM - GUAPÁN (SANKOSHA)		
ÍTEM	VALOR / DESCRIPCIÓN	UNIDAD
Geometría	Lineal	-
Radio malla	SN	m
Área malla (A)	SN	m ²
Calibre conductor	4/0	AWG
Radio del conductor (a)	0,00584	m
Profundidad de la malla (S)	0,5	m
Cantidad varilla Copperweld (n)	14	u
Longitud de varilla (L)	1,8	m
Radio de varilla (r)	0,0079	m
Resistividad terreno (ρ)	41,1	Ωm
Longitud conductores (B)	202,57	m
Longitud total varillas ($n * L$)	25,2	m
B total (B)	202,57	m
RESISTENCIA TOTAL R_g	0,508847586	Ω

Para esta zona se calcula su RPT aplicando la ecuación 1.12 para EPT que es conductor enterrado. Es el valor de RPT más alto obtenido hasta ahora, pero sigue siendo optimo al estar por debajo de la unidad. Al tratarse de un área que no posee cargas especiales o equipo tan delicado como las áreas de producción, el resultado relativamente alto no debe causar preocupación.

En la sección anexos se incluye plano en formato Autocad y hoja de cálculo de Excel para consulta pormenorizada de detalles.

Capítulo 6

Conclusiones y recomendaciones.

6.1. Conclusiones.

Un valor de resistencia de puesta a tierra muy pequeño, de preferencia por debajo de 1Ω y muy cercano a cero garantiza seguridad para las personas y equipos en el emplazamiento de un SPT.

Uno de los aspectos que más influyen para obtener un valor de RPT bajo es el área que abarca la malla, por lo que maximizar este parámetro es recomendable en cualquier SPT.

Concluido el estudio para una nueva malla de puesta a tierra en UCEM-Guapán se ha podido determinar que mayoritariamente el terreno donde se encuentra emplazado tiene valores de resistividad bajos, por lo que no es necesario aplicar métodos para disminuir este campo.

Las mediciones de resistividad del terreno se realizaron en los espacios físicos que permitían el uso del telurómetro. A pesar de que se obtuvieron bajos valores de resistividad, se escogió la medición más alta para dimensionar las dos propuestas de SPT a presentadas. Tal elección obedece a obtener un sistema más seguro considerando las situaciones más críticas que puedan presentarse.

Luego del análisis del SPT existente en la planta se verificó que el mismo cumple mayoritariamente con los requisitos solicitados por las normativas aplicadas en este proyecto, pero que puede ser optimizados bajo los dos modelos propuestos.

Las MPTs contiguas deben interconectarse siempre para obtener un sistema equipotencial e incrementar el área de influencia de la malla. Esta acción provoca la obtención de un valor de RPT, consiguiendo un sistema más seguro.

EL modelo más óptimo sería la propuesta uno al abarcar prácticamente toda la planta y garantizar seguridad y utilidad para construcciones futuras.

La segunda propuesta es adecuada también, pero sacrifica área de seguridad en virtud de ahorrar recursos, sin embargo, conserva un valor de resistencia muy bajo que

es garantía de seguridad en la zona de influencia.

6.2. Recomendaciones.

Verificar periódicamente a través de estudios que la malla de puesta a tierra se encuentra en buen estado. Una revisión programada previene daños a la integridad del personal y protege a los equipos.

Al momento de construir mallas de puesta a tierra se debe establecer lugares de revisión que permitan revisar el estado del SPT y realizar mantenimiento para garantizar su efectividad.

Comprobar que los puntos de unión de todo el SPT esté fuertemente asegurados, un falso contacto puede ocasionar accidente al no permitir al SPT actuar correctamente.

Los estudios del SPT que se realicen siempre deben ejecutarse con una visión de crecimiento de la planta. Una planificación adecuada permite fácilmente nuevos enlaces o construcciones manteniendo un SPT óptimo y funcional.

De preferencia utilizar material semejante en los enlaces y expansiones de la MPT. Respetar los materiales, dimensiones, profundidad de enterramiento y demás características de una MPT. Mantener homogeneidad facilita el mantenimiento y ayuda a estimar adecuadamente las características del SPT.

Realizar toda medición, manipulación de equipos y desplazamientos siempre bajo la supervisión de personal calificado, con experiencia y conocimiento de la zona de estudio.

Bibliografía

- [1] R. M. Mujal Rosas, *Tecnología eléctrica*. 2009.
- [2] IEEE, “Ieee guide for safety in ac substation grounding,” *IEEE Std 80-2013 (Revision of IEEE Std 80-2000/ Incorporates IEEE Std 80-2013/Cor 1-2015)*, pp. 1–226, 2015.
- [3] IEEE, “Ieee guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potentials of a grounding system - redline,” *IEEE Std 81-2012 (Revision of IEEE Std 81-1983) - Redline*, pp. 1–192, 2012.
- [4] F. M. Sinchi Sinchi, “Diseño y determinación de sistemas de puesta a tierra mediante pruebas de campo con elementos comunes utilizados en la región, incluyendo gem y electrodo químico,” 2017.
- [5] Sankosha Corp., *San-Earth Technical Review - Practical Measures for Lowering Resistance to Grounding*.
- [6] MME, *Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas - RETIE*. Ministerio de minas y energía de Colombia, 2013.
- [7] NFPA, *NFPA 70: National electrical code - NEC*. National Fire Protection Association, 2020, 2020.
- [8] J. R. E. Cano, *Sistemas de puesta a tierra: Diseñado con IEEE-80 y evaluado con MEF*. Editorial Blanecolor Ltda, 2010.
- [9] E. B. Lock, Kai-Sang. ; Joffe, “Grounds for grounding: A circuit to system handbook,” *Wiley-IEEE Press*, 2010.

- [10] D. W. Zipse, "History of grounding/earthing practices in the united states," in *2017 Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC)*, pp. 231–244, 2017.
- [11] R. García Márquez, *La puesta a tierra de las instalaciones eléctricas*. 1999.
- [12] IEEE, "Ieee recommended practice for grounding of industrial and commercial power systems - redline," *IEEE Std 142-2007 (Revision of IEEE Std 142-1991) - Redline*, pp. 1–215, 2007.
- [13] INEN, *CPE INEN 19: 2001 Código eléctrico nacional*. Instituto ecuatoriano de normalización, 2001.
- [14] R. Ruelas-Gómez, "Formulario para obtener la resistencia a tierra," 2019.
- [15] "Sistema de puesta a tierra - proyecto cojitambo," tech. rep., Industria Metalmecánica Metalcar, 2018.
- [16] IEEE, "Ieee recommended practice for powering and grounding electronic equipment - redline," *IEEE Std 1100-2005 (Revision of IEEE Std 1100-1999) - Redline*, pp. 1–703, 2006.
- [17] A. A. Salme Bautista, "Homologación de la malla de puesta a tierra de la central hidroeléctrica hidroabanico - macas, morona santiago," 2022.
- [18] J. A. Bustamante Calle, "Evaluación y diagnóstico de la malla de puesta a tierra de la subestación obrapía con niveles de tensión de 69kv y 13.8kv perteneciente a la e.e.r.s.s.a. para cumplir con los parámetros establecidos por la norma ieee std. 80-2000 (guide for safety in ac substation grounding)," 2011.
- [19] HT-Instruments, *Manual de instrucciones*. HT Instruments,, 2019.
- [20] Amprobe, *GP-2 Geotest - Instruction Manual*. Amprobe.

Capítulo 7

Anexos

7.1. Mediciones de resistividad del terreno.



Figura 7.1: Medición 1 de la resistividad del terreno en la subestación M1



Figura 7.2: Medición 2 de la resistividad del terreno en la subestación M1.



Figura 7.3: Medición de la resistividad del terreno en el área K.

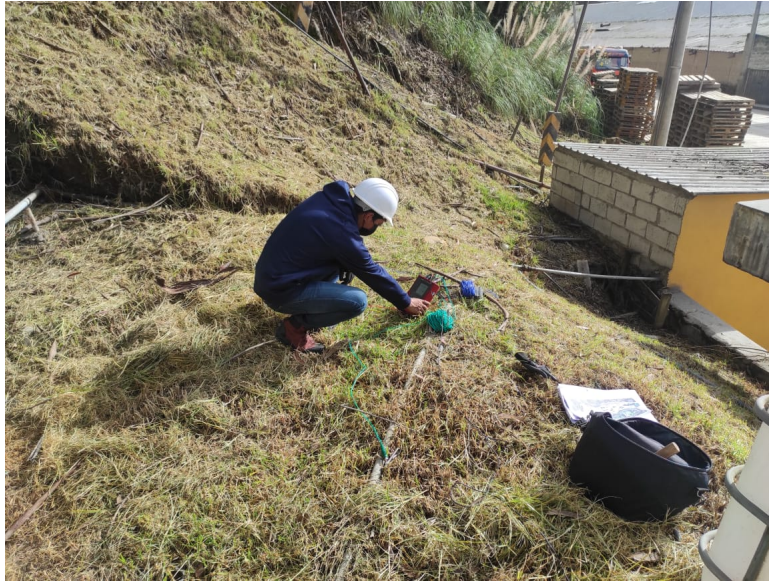


Figura 7.4: Medición de la resistividad del terreno en el área de depósito de combustible

7.2. Mediciones de resistencia de las mallas de puesta a tierra.



Figura 7.5: Medición de resistencia de malla puesta a tierra en derivación a canastillas de conductores eléctricos

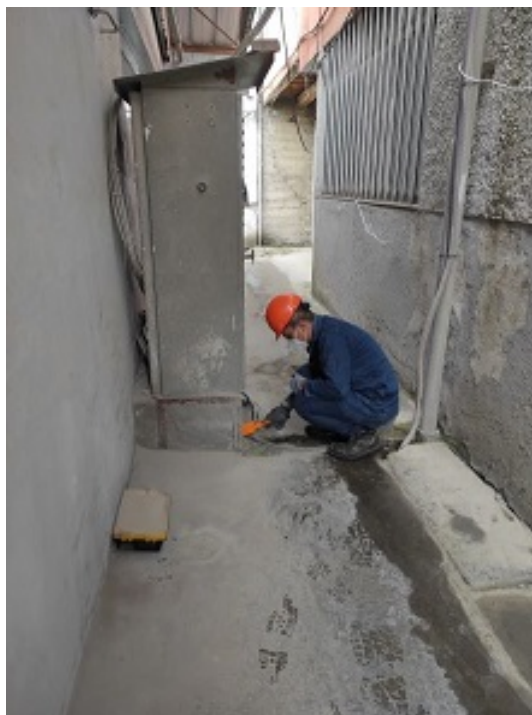


Figura 7.6: Medición de resistencia de derivación de varilla Copperweld en caja de distribución



Figura 7.7: Medición de resistencia de malla puesta a tierra en derivación a generadores diésel



Figura 7.8: Medición de resistencia de malla puesta a tierra en derivación a variador de frecuencia



Figura 7.9: Medición de resistencia de malla puesta a tierra en derivación a tablero de distribución.



Figura 7.10: Medición de resistencia de derivación de varilla Copperweld.



Figura 7.11: Medición de resistencia de malla puesta a tierra en derivación a transformador



Figura 7.12: Medición de resistencia de malla puesta a tierra en derivación a motores de bombas de agua.



Figura 7.13: Medición de resistencia de malla puesta a tierra en derivación al grupo diésel.