

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA,
INFORMÁTICA Y MECÁNICA**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



TESIS

**PROPUESTA PARA MEJORAR LOS NIVELES DE RESISTENCIA DE
PUSTA A TIERRA APLICANDO CONTRAPESOS HORIZONTALES EN
PARALELO, EN LA LINEA DE MEDIA TENSIÓN MAZUKO 02-MADRE DE
DIOS**

PRESENTADO POR:

Br. MOISES CHOQUE PALOMINO
Br. PERCY EUGENIO HUAMAN BEJARANO

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO ELECTRICISTA**

ASESOR:

M.Sc. WILBERT JULIO LOAIZA CUBA

**CUSCO – PERÚ
2026**



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el **Asesor** BASILIO SALAS ALAGON
..... quien aplica el software de detección de similitud al
trabajo de investigación/tesis titulada: PROPUESTA PARA MEJORAR LOS
..... NIVELES DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA APLICANDO
..... CONTRAPESOS HORIZONTALES EN PARALELO, EN LA LINEA DE MEDIA
..... TENSION MAZUKO 02 - MADRE DE DIOS

Presentado por: PERCY EUGENIO HUAMAN DEJARANO DNI N° 41718249 ;
presentado por: MOISES CHOQUE PALOMINO DNI N°: 41293799
Para optar el título Profesional/Grado Académico de INGENIERO ELECTRICISTA

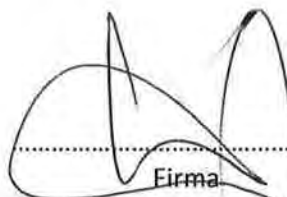
Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 02 veces, mediante el Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de Similitud en la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 05 %.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	☒
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	☐
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	☐

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto** las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 25 de AGOSTO de 2026


Firma

Post firma Basilio Salas Alagon

Nro. de DNI 23821494

ORCID del Asesor 000-0002-9995-8455

Se adjunta:

- Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
- Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: **oid:** 27259: 615 809 409

TESIS FINAL PERCY-MOISES.docx

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:615809409

Fecha de entrega

20 ago 2026, 4:55 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

20 ago 2026, 5:15 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

TESIS FINAL PERCY-MOISES.docx

Tamaño del archivo

20.8 MB

202 páginas

34.861 palabras

190.669 caracteres

5% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado

Fuentes principales

- 4%  Fuentes de Internet
- 3%  Publicaciones
- 5%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

INTRODUCCIÓN

La adecuada puesta a tierra es fundamental para la seguridad y el funcionamiento eficaz de los sistemas eléctricos de media tensión. La línea de media tensión Mazuko 02, ubicada en Madre de Dios, enfrenta desafíos específicos relacionados con la resistencia de su sistema de puesta a tierra debido a las variadas condiciones del terreno. La resistividad del suelo y la configuración del sistema de puesta a tierra influyen directamente en la efectividad de la protección contra descargas eléctricas y en la estabilidad operativa del sistema.

La presente tesis, intitulada “Propuesta para mejorar los niveles de resistencia de puesta a tierra aplicando contrapesos horizontales en paralelo en la línea de media tensión Mazuko 02-Madre de Dios”, tiene como objetivo evaluar y proponer una mejora en el sistema de puesta a tierra actual de la línea MZ 02. A través de un estudio de la resistividad del terreno y la evaluación de diversas configuraciones de puesta a tierra, se busca identificar la solución más viable para optimizar los niveles de resistencia y cumplir con los estándares normativos, como los establecidos por la norma IEEE 80-2000.

Este trabajo analiza detalladamente los resultados obtenidos de la resistividad del terreno, compara diferentes configuraciones de puesta a tierra y evalúa los costos y beneficios asociados a la implementación de contrapesos horizontales en paralelo. La tesis pretende ofrecer una solución técnica y económicamente viable que no solo mejore el desempeño del sistema de puesta a tierra, sino que también garantice su conformidad con los requisitos normativos y su durabilidad a largo plazo.

RESUMEN

La tesis “Propuesta para mejorar los niveles de resistencia de puesta a tierra aplicando contrapesos horizontales en paralelo en la línea de media tensión Mazuko 02-Madre de Dios” aborda la problemática de resistencia en el sistema de puesta a tierra de la línea MZ 02, dada la variabilidad en la resistividad del terreno. Se realizó un estudio de la resistividad del terreno a lo largo de la línea para identificar las áreas con mayores necesidades de mejora.

El análisis comparativo de diversas configuraciones de puesta a tierra mostró que los sistemas de contrapesos horizontales en paralelo ofrecen una solución más efectiva para mejorar los niveles de resistencia en comparación con las configuraciones tradicionales. A pesar del costo inicial más alto asociado con esta solución, que representa una diferencia significativa de S/. 34,158.60 frente a los sistemas de disposición vertical, la evaluación económica demuestra que los beneficios a largo plazo justifican la inversión adicional. Los contrapesos horizontales en paralelo no solo optimizan los niveles de resistencia, sino que también cumplen con las normativas requeridas, ofreciendo una mayor estabilidad y durabilidad para el sistema de puesta a tierra.

En conclusión, la tesis ofrece una propuesta viable para mejorar el sistema de puesta a tierra de la línea MZ 02, proporcionando tanto un análisis técnico como económico que respalda la implementación de contrapesos horizontales en paralelo como una solución efectiva para los desafíos identificados.

Palabras Claves: Puesta a tierra, Niveles de resistencia, Resistividad del terreno, Análisis técnico.

ABSTRACT

Monthly average insulation incidents on a horizontal surface the thesis “Proposal to improve grounding resistance levels by applying parallel horizontal counterweights on the Mazuko 02-Madre de Dios medium voltage line” addresses the resistance problem in the grounding system of the MZ 02 line, given the variability in the resistivity of the ground. A study of the resistivity of the ground was carried out along the line to identify the areas with the greatest need for improvement.

The comparative analysis of various grounding configurations showed that parallel horizontal counterweight systems offer a more effective solution to improve resistance levels compared to traditional configurations. Despite the higher initial cost associated with this solution, which represents a significant difference of S/. 34,158.60 compared to vertically arranged systems, the economic evaluation shows that the long-term benefits justify the additional investment. Parallel horizontal counterweights not only optimize strength levels, but also comply with required regulations, offering greater stability and durability for the grounding system.

In conclusion, the thesis offers a viable proposal to improve the grounding system of the MZ 02 line, providing both a technical and economic analysis supporting the implementation of parallel horizontal counterweights as an effective solution to the identified challenges.

Keywords: Grounding, Resistance levels, Soil resistivity, Technical analysis.

INDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	ii
RESUMEN	iii
ABSTRACT.....	iv
CAPÍTULO I	1
1. ASPECTOS GENERALES	1
1.1. Introducción	1
1.2. Ámbito Geográfico	1
1.3. Planteamiento del Problema	4
1.4. Formulación del Problema.....	6
1.4.1. Problema General.....	6
1.4.2. Problemas Específicos	6
1.5. Objetivos.....	7
1.5.1. Objetivo General.....	7
1.5.2. Objetivos Específicos.....	7
1.6. Justificación del Trabajo	7
1.7. Alcances y Limitaciones	8
1.7.1. Alcances del proyecto	8
1.7.2. Limitaciones del proyecto.....	9
1.8. Hipótesis	9
1.8.1. Hipótesis General.....	9
1.8.2. Hipótesis Específicas.	10
1.9. Operacionalización de Variables	11
1.9.1. Variable Dependiente.....	11

1.9.2. Variable Independiente	11
1.10. Metodología	12
1.10.1. Tipo de Estudio.....	12
1.10.2. Nivel de Estudio.....	12
1.10.3. Enfoque del Estudio.....	12
1.10.4. Población.....	12
1.10.5. Muestra	12
1.10.6. Técnicas de Recolección de Datos.....	13
1.10.7. Procesamiento de Datos	13
1.11. Matriz de consistencia	13
CAPÍTULO II	15
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	15
2.1. Introducción	15
2.2. Antecedentes	15
2.2.1. Antecedentes nacionales	15
2.2.2. Antecedentes Internacionales.....	17
2.3. Bases Teóricas	19
2.3.1. Instalaciones de Puesta a Tierra.....	19
2.3.2. Resistividad del Terreno	19
2.3.3. Métodos de Medición de Resistividad del Terreno	21
2.3.4. Factores que Afectan las Mediciones	23
2.3.5. Resistividad Superficial del Terreno.....	24
2.3.6. Factores que Influyen en la Resistividad del Terreno.....	24
2.3.7. Criterios de Diseño de Puesta a Tierra.....	25
2.3.8. Fundamentos Matemáticos del Sistema de Puesta a Tierra	26

2.3.9. Análisis de Potenciales en Sistemas de Puesta a Tierra.....	28
2.3.10. Tensiones de Paso y Contacto.....	29
2.3.11. Métodos de Cálculo y Diseño de SPAT	31
2.3.12. Estudios de Sistemas de Puesta a Tierra	33
2.3.13. Resistencia de Puesta a Tierra.....	34
2.3.14. Cables de Contrapeso.....	35
2.3.15. Varillas de Contrapeso	36
2.3.16. Combinación de Cables y Varillas de Contrapeso.....	37
2.3.17. Métodos de Instalación de Puestas a Tierra	37
2.3.18. Los Suelos	40
2.4. Bases Conceptuales.....	44
2.4.1. Resistencia De Puesta A Tierra.....	44
2.4.2. Alimentador de una Red de Distribución.....	44
2.4.3. Configuración tipo Radial en Sistemas de Distribución	45
2.4.4. Contrapesos Horizontales	45
2.4.5. Topología de una Red	45
2.4.6. Línea Aérea	45
2.4.7. Conductor.....	45
2.5. Bases Normativas	46
CAPÍTULO III.....	49
3. ESTUDIO Y DETERMINACION DEL TERRENO A LO LARGO DEL ALIMENTADOR DE MEDIA TENSIÓN MZ 02.....	49
3.1. Introducción	49
3.2. Descripción de la SET Mazuko	49
3.2.1. Características Técnicas la SET Mazuko.....	50

3.2.2. Líneas De Transmisión Comprendidas En El Área De Estudio	50
3.2.3. Transformador de Potencia Mazuko	53
3.3. Descripción del alimentador MZ 01	54
3.4. Descripción del alimentador MZ 02	55
3.5. Características técnicas del alimentador MZ 02	56
3.5.1. Líneas Primarias y Redes Primarias Del Alimentador MZ-02	57
3.5.2. Redes Secundarias Del Alimentador MZ-02	58
3.5.3. Descripción Técnica de las Estructuras del alimentador MZ - 02	60
3.6. Características físicas y eléctricas del terreno	62
3.7. Análisis De La Resistividad Del Terreno	67
3.8. Análisis del Perfil de Resistividad del Suelo por Nodo - Alimentador MZ-02	77
3.9. Análisis del Potencial, Tensión de Paso y Tensión de Contacto	80
3.9.1. Fundamentos Normativos	80
3.9.2. Generalidades para el Cálculo	80
3.10. Conclusiones del capítulo	83
CAPÍTULO IV.....	85
4. ANÁLISIS DE LAS DIFERENTES CONFIGURACIONES PARA SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA	85
4.1. Introducción	85
4.2. Análisis De Requisitos Y Parámetros Iniciales	85
4.2.1. Requisitos Normativos.....	85
4.2.2. Parámetros del Sistema	86
4.3. Valores De La Resistencia Según Normativa Y Requerimientos.....	87
4.4. Electrodo En Disposición Vertical	89
4.5. Contrapeso Lineal Sin Tratamiento	94

4.6. Contrapeso Lineal Con Cemento Conductivo	98
4.7. Contrapesos Paralelos Sin Tratamiento	103
4.8. Contrapesos Paralelos Con Cemento Conductivo	108
4.9. Análisis de Potencial y Seguridad del Sistema (IEEE Std 80)	113
4.9.1. Cálculo del Potencial de Malla (GPR).....	113
4.9.2. Cálculo de las Tensiones Tolerables.....	116
4.9.3. Cálculo de las Tensiones Generadas durante una Falla	116
4.10. Conclusiones del capítulo	122
CAPÍTULO V	124
EVALUACIÓN ECONÓMICA Y BENEFICIOS DEL USO DE CONTRAPESOS HORIZONTALES EN PARALELO EN SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA	124
5.1 Introducción	124
5.2 Análisis Comparativo Electrodo Con Disposición Vertical Y Contrapesos Horizontales En Paralelo	124
5.3 Análisis Comparativo Del Uso De Contrapesos Horizontales En Paralelo Con Y Sin Cemento Conductivo	127
5.4 Mejora De Los Niveles De Puesta A Tierra	128
5.5 Viabilidad técnica de la Solución Propuesta.....	130
5.5.1. Desempeño eléctrico	130
5.5.2. Consistencia en distintos tipos de terreno.....	130
5.5.3. Ventajas estructurales y de instalación	131
5.5.4. Mejora significativa frente a otras alternativas.....	131
5.6. Detalles y Especificaciones de los Materiales para el Sistema de Puesta a Tierra.	131
5.6.1. Materiales utilizados	132
5.6.2. Disposiciones geométricas adoptadas.....	132

5.6.3. Especificaciones para ejecución en campo	133
5.7. Evaluación económica	133
5.7.1. Análisis de Precios Unitarios	134
5.7.2. Inversión SPAT Con Disposición Vertical	135
5.7.3. Inversión SPAT Con Contrapesos Horizontales En Paralelo	137
5.7.4. Parámetros de Evaluación Económica del Proyecto.....	139
5.7.5. Costos del Proyecto.....	141
5.7.6. Beneficios del Proyecto	141
5.7.7. Flujo de Caja del Proyecto	144
5.7.8. Cálculo de los Indicadores Financieros	145
5.8. Estrategia de Financiamiento Propuesta	152
5.9. Mantenimiento y Durabilidad de Contrapesos Horizontales	153
5.10. Conclusiones del capítulo	155
CONCLUSIONES	156
SUGERENCIAS	157
BIBLIOGRAFÍA	158
ANEXOS	161

Índice De Tablas

<i>Tabla 1-1 Características del alimentador en media tensión Mazuko 02</i>	<i>3</i>
<i>Tabla 1-2 Sistema de protección alimentador en media tensión Mazuko 02</i>	<i>4</i>
<i>Tabla 1-3 Valores de resistividad del terreno y resistencia para un sistema de puesta a tierra vertical en el alimentador MZ 02.....</i>	<i>5</i>
<i>Tabla 1-4 Variables e indicadores Dependientes.....</i>	<i>11</i>
<i>Tabla 1-5 Variable Independiente</i>	<i>11</i>
<i>Tabla 2-1 Tabla de Resistividades Referenciales de Suelos Naturales Genéricos.....</i>	<i>20</i>
<i>Tabla 3-1 Las características del alimentador MZ-01</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 3-2 Las características del alimentador MZ-02</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 3-3 Las características de las redes secundarias del alimentador MZ-02.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 3-4 Diámetro de Base.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 3-5 Resistencia del Concreto.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 3-6 Resistencia del Concreto.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 3-7 Tipo de estructuras en el alimentador MZ-02.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 3-8 Componentes de las estructuras del alimentador MZ-02</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 3-9 Componentes de las estructuras del alimentador MZ-02</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 3-10 Resumen de las Condiciones físicas del Terreno – Alimentador MZ 02</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 3-11 Resultado de las mediciones realizadas a lo largo del alimentador MZ-02.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 3-12 Resumen de la resistividad del terreno para los 30 nodos MT del alimentador MZ-02.....</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 3-13 Clasificación de Nodos según Rangos de Resistividad Promedio ($\Omega \cdot m$).....</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 3-14 Cálculo de Tensiones de Contacto (V_c) y Paso (V_p) por Nodo</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 4-1 Valores de la resistencia para una configuración de Electrodo en disposición vertical</i>	<i>91</i>

<i>Tabla 4-2 Valores de la resistencia para una configuración para un Contrapeso lineal sin tratamiento.....</i>	<i>95</i>
<i>Tabla 4-3 Valores de la resistencia para una configuración para un Contrapeso Lineal Con Cemento Conductivo.....</i>	<i>100</i>
<i>Tabla 4-4 Valores de la resistencia para una configuración para Contrapesos paralelos sin tratamiento.....</i>	<i>105</i>
<i>Tabla 4-5 Contrapesos paralelos con cemento conductivo.....</i>	<i>110</i>
<i>Tabla 4-6 Cálculo del Potencial (GPR) para todas las configuraciones.....</i>	<i>114</i>
<i>Tabla 4-7 Cálculo de Tensiones de Contacto y Paso por Nudo.....</i>	<i>118</i>
<i>Tabla 4-8 Comparación de Resistencias entre electrodo en disposición vertical y contrapesos horizontales en paralelo con cemento conductivo.....</i>	<i>125</i>
<i>Tabla 4-9 Comparación de Resistencias entre Contrapesos Horizontales En Paralelo Con Y Sin Cemento Conductivo.....</i>	<i>127</i>
<i>Tabla 4-10 Especificaciones técnicas de los materiales del sistema de puesta a tierra</i>	<i>132</i>
<i>Tabla 4-11 Disposición geométrica y aplicación según tipo de estructura</i>	<i>132</i>
<i>Tabla 4-12 Especificaciones para la ejecución en campo.....</i>	<i>133</i>
<i>Tabla 4-13 análisis de precios unitarios– sistema de puesta a tierra</i>	<i>134</i>
<i>Tabla 4-14 Inversión para el sistema de puesta a tierra con disposición vertical.....</i>	<i>137</i>
<i>Tabla 4-15 Inversión para el sistema de puesta a tierra con contrapesos horizontales en paralelo.....</i>	<i>138</i>
<i>Tabla 4-16 Parámetros de Evaluación Económica del Proyecto.....</i>	<i>140</i>
<i>Tabla 4-17 Costos de Operación y Mantenimiento del Sistema de Contrapesos Horizontales</i>	<i>141</i>
<i>Tabla 4-18 Beneficio por Eliminación de Multas con Contrapesos Horizontales</i>	<i>142</i>
<i>Tabla 4-19 Beneficios Operativos del Sistema de Contrapesos Horizontales</i>	<i>143</i>

<i>Tabla 4-20 Ventajas por Vida Útil del Sistema de Contrapesos Horizontales.....</i>	<i>143</i>
<i>Tabla 4-21 Resumen de Beneficios Anuales del Sistema.....</i>	<i>144</i>
<i>Tabla 4-22 Flujo de Caja del Sistema de Contrapesos Horizontales (10 años)</i>	<i>144</i>
<i>Tabla 4-23 Periodo de Recuperación.</i>	<i>148</i>

Índice De Figuras

Figura 1-1	<i>Diagrama unifilar subestación de transformación Mazuko</i>	1
Figura 1-2	<i>Diagrama unifilar alimentador MZ 02</i>	2
Figura 1-3	<i>Distribución del alimentador MZ 02</i>	3
Figura 2-1	<i>Tensión de Paso y de Contacto</i>	29
Figura 2-2	<i>Variación de la impedancia transitoria y efecto del número de contrapesos</i>	35
Figura 2-3	<i>Arreglos de cable de contrapeso</i>	36
Figura 2-4	<i>Propiedades de los geotextiles</i>	41
Figura 2-5	<i>Compactación por vibración</i>	42
Figura 2-6	<i>Tipos de Suelos</i>	43
Figura 2-7	<i>Suelo Orgánico</i>	44
Figura 3-1	<i>Ubicación del Sistema Eléctrico Mazuko</i>	50
Figura 3-2	<i>Fotografía placa Transformador de Potencia Mazuko</i>	54
Figura 3-3	<i>Sistema de distribución existente Alimentador MZ-02</i>	55
Figura 3-4	<i>Diagrama unifilar de la Subestación Mazuko, año 2023</i>	57
Figura 3-5	<i>Telurómetro digital MTD20KWE</i>	68
Figura 3-6	<i>Esquema de instalación para la medición con el Telurómetro</i>	69
Figura 3-7	<i>Instalación de los electrodos para la medición con el Telurómetro</i>	69
Figura 3-8	<i>Perfil de resistividad del suelo por nodo alimentador MZ 02</i>	78
Figura 3-9	<i>Relación entre la resistividad del terreno y la tensión de paso</i>	82
Figura 4-1	<i>Valores máximos de resistencia puesta a tierra permitidos por las Normas</i>	88
Figura 4-2	<i>Puesta a tierra con electrodo en disposición vertical</i>	89
Figura 4-3	<i>Contrapeso horizontal</i>	98
Figura 4-4	<i>Dos Contrapesos horizontales en paralelo</i>	108
Figura 4-5	<i>Relación entre Tensiones de paso y contacto vs Resistividad del suelo</i>	120

Figura 4-6 <i>Análisis de márgenes de seguridad por nodo</i>	121
Figura 4-7 <i>Mejora del sistema de puesta a tierra con el uso de contrapesos horizontales en paralelo</i>	129

GLOSARIO DE ABREVIATURAS

Término	Significado
SPAT	Sistema de Puesta a Tierra
PAT	Puesta a Tierra
DGE	Dirección General de Electricidad
CNE	Código Nacional de Electricidad
NTCSE	Norma Técnica de Calidad de Suministro Eléctrico
MT	Media Tensión
BT	Baja Tensión
SET	Subestación Transformadora
MZ	Alimentador de la Subestación de Transformación Mazuko
SED	Subestación de Distribución
ELSE	Electro Sur Este S.A.A.
GIS	Sistema de Información Geográfica
CAD	Diseño Asistido por Computadora
IEEE	Instituto de Ingenieros Eléctricos Y Electrónicos
kV	Kilovoltios
Ω	Ohm, Unidad de medida de resistencia eléctrica
Hz	Hertz, Unidad de medida de la frecuencia
RES	Resistencia Eléctrica del Suelo
NTP	Norma Técnica Peruana
PMT	Poste de Media Tensión
MAX.	Valor más alto registrado en un conjunto de datos
MIN.	Valor más bajo registrado en un conjunto de datos
PROM.	Valor promedio registrado en un conjunto de datos

CAPÍTULO I

1. ASPECTOS GENERALES

1.1. Introducción

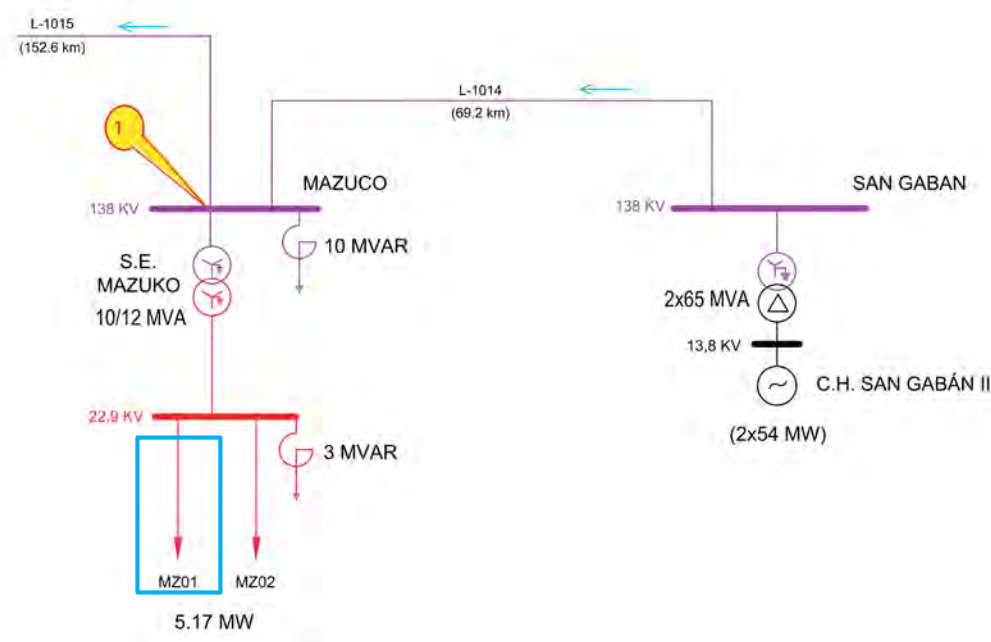
El presente trabajo se enfoca en la mejora de los niveles de resistencia de puesta a tierra en la línea de media tensión Mazuko 02, ubicada en el departamento de Madre de Dios, mediante la aplicación de contrapesos horizontales en paralelo. La relevancia de este estudio radica en la necesidad de optimizar las condiciones de seguridad y operatividad de las instalaciones eléctricas, un factor crítico en zonas como Madre de Dios, donde las condiciones geográficas y climáticas pueden influir negativamente en los sistemas de puesta a tierra.

1.2. Ámbito Geográfico

El desarrollo del presente temario de tesis se enfoca en los sistemas de puesta a tierra localizados en las estructuras comprendidas en el alimentador MZ-02 proveniente de la SET Mazuko de la empresa concesionaria Electro Sur Este Madre de Dios S.A.A, de acuerdo al siguiente diagrama unifilar.

Figura 1-1

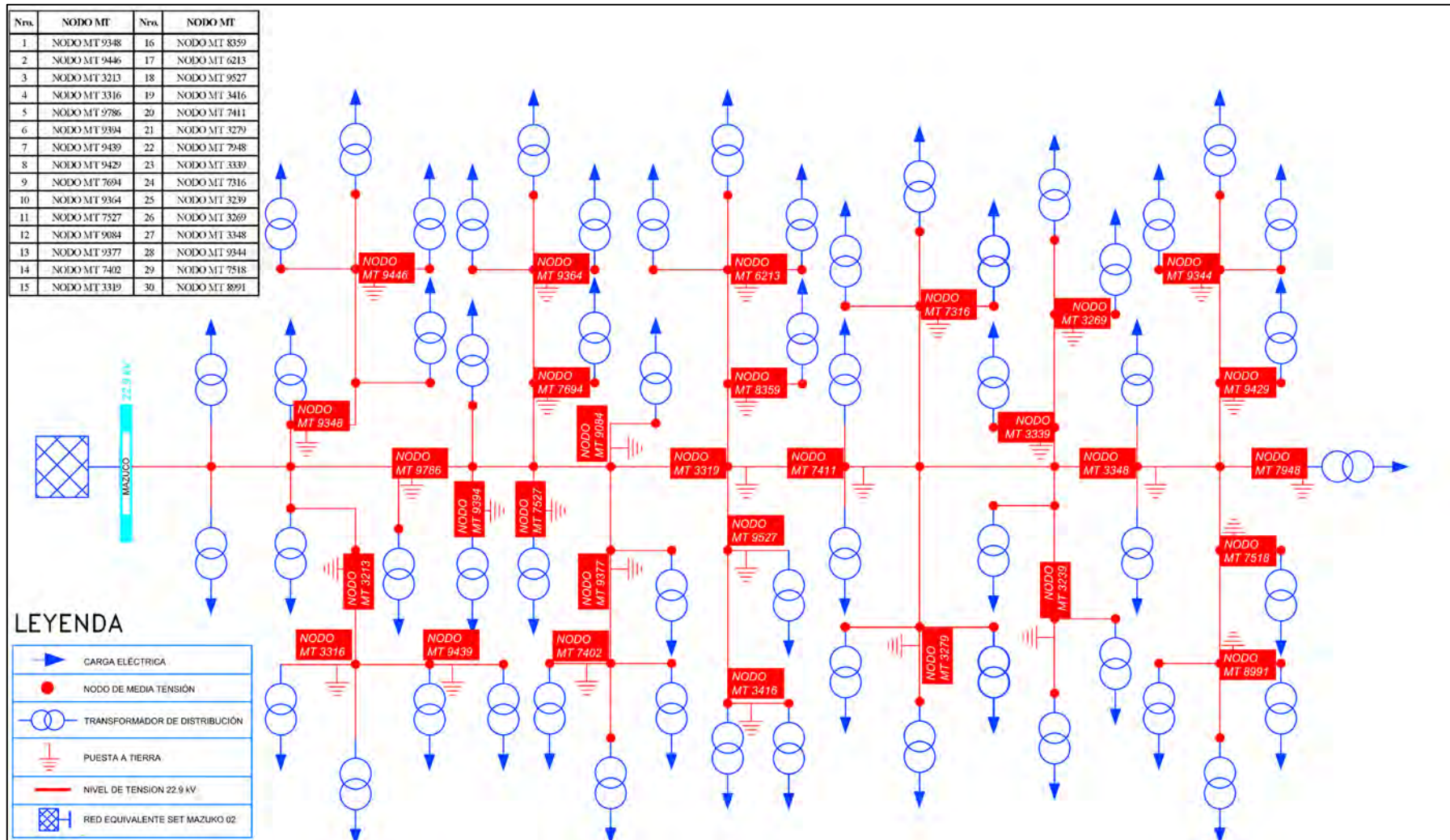
Diagrama unifilar subestación de transformación Mazuko



Nota. Área de operaciones ELSE.

Figura 1-2

Diagrama unifilar alimentador MZ 02

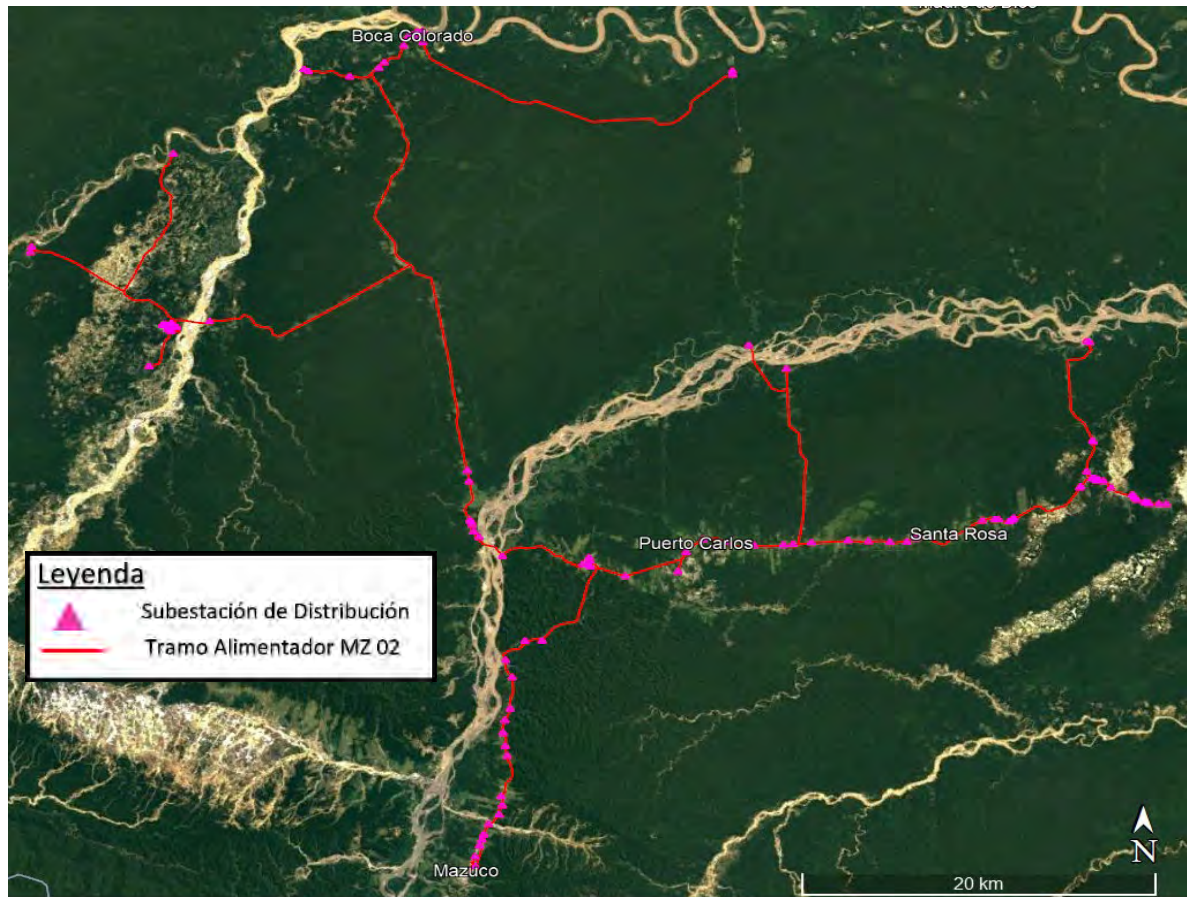


Nota. Elaboración propia en base a los datos del Área de operaciones ELSE.

Las redes y subestaciones del alimentador MZ 02 se distribuyen por Boca Colorado, Puerto Carlos y Santa Rosa, tal como se aprecia en la siguiente figura.

Figura 1-3

Distribución del alimentador MZ 02



Nota. Base de Datos GIS ELSE, 2022.

Cuyas características y sistema de protección actual se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 1-1

Características del alimentador en media tensión Mazuko 02

Descripción	Unidad
Nivel de tensión	22.9 kV
Tensión máxima del sistema	25 kV
Tipo de sistema	Trifásico
Frecuencia nominal	60 Hz
Número de nodos en media tensión	1419
Longitud real	225 km
Nro. de Subestaciones	123
Tipo de topología	Radial

Nota. Sistema de información geográfica ELSE.

Tabla 1-2*Sistema de protección alimentador en media tensión Mazuko 02*

Descripción	Unidad
Nivel de aislamiento a la frecuencia industrial	27 kV
Tensión de sostenimiento al impulso	75kV
Tensión disruptiva bajo la lluvia	225 km
Línea de fuga	381.45 mm
Seccionadores CUT-OUT	27 kV
Pararrayos Polimérico de Oxido Metálico	21 kV
Pararrayos de Línea	21 kV

Nota. Sistema de información geográfica ELSE.

1.3. Planteamiento del Problema

La empresa concesionaria Electro Sur Este tiene como objetivo principal dedicarse a las actividades propias de la distribución con la finalidad de garantizar el suministro y la continuidad del servicio de energía eléctrica en las regiones de Cusco, Apurímac y Madre de Dios. La continuidad del servicio de energía se ve afectada por fenómenos transitorios que ocurren cerca o sobre una instalación eléctrica, ocasionando interrupciones del suministro de energía. Uno de los problemas que originan estas interrupciones son los niveles altos de puesta a tierra, los cuales tienen la función de disipar las corrientes de cualquier naturaleza al terreno, y así proteger las instalaciones eléctricas.

Para que el sistema de puesta a tierra trabaje correctamente, esta debe diseñarse con valores pequeños de resistencia para lograr sobretensiones controlables al nivel de aislamiento y así reducir las interrupciones del servicio de energía.

Existen diferentes sistemas de puesta a tierra con diversas técnicas de instalación, sin embargo, muchas veces se aplican criterios prácticos e intuitivos basados en la experiencia del personal encargado, e inclusive haciendo caso omiso a la normativa. A pesar de que estas técnicas pueden ofrecer resultados confiables, surgen numerosos inconvenientes en el momento de su instalación.

Es tal el caso que se presenta en el alimentador Mazuko 02, en el cual no se ha realizado un estudio adecuado para la instalación de sus sistemas de puesta a tierra debido a la variedad de suelos ya que, en algunos casos, resulta difícil alcanzar los valores de resistencia requeridos tal como se aprecia en la siguiente tabla, por lo que es necesario realizar un rediseño apropiado para cada punto.

Tabla 1-3

Valores de resistividad del terreno y resistencia para un sistema de puesta a tierra vertical en el alimentador MZ 02

Nro.	NODO	VALOR DE RESISTENCIA (Ω)	Coordenadas UTM	
			Este	Norte
1	NODO MT 9348	83.219	348730	8604688
2	NODO MT 9446	51.455	334773	8585316
3	NODO MT 3213	80.747	352252	8552106
4	NODO MT 3316	69.253	355073	8565855
5	NODO MT 9786	103.408	349278	8604146
6	NODO MT 9394	77.439	332110	8587949
7	NODO MT 9439	105.355	334978	8586086
8	NODO MT 9429	66.379	326859	8590558
9	NODO MT 7694	52.922	358808	8570738
10	NODO MT 9364	66.06	348344	8604465
11	NODO MT 7527	75.291	344969	8601928
12	NODO MT 9084	89.892	342664	8602304
13	NODO MT 9377	91.494	334944	8586145
14	NODO MT 7402	96.327	337010	8586020
15	NODO MT 3319	79.779	355892	8566050
16	NODO MT 8359	71.614	349176	8604828
17	NODO MT 6213	111.556	387502	8578565
18	NODO MT 9527	113.561	367210	8602211
19	NODO MT 3416	101.756	370569	8572053
20	NODO MT 7411	65.381	335194	8585372
21	NODO MT 3279	88.626	353896	8560952
22	NODO MT 7948	97.261	363971	8571107
23	NODO MT 3339	105.775	359177	8570528
24	NODO MT 7316	28.722	348508	8589737
25	NODO MT 3239	92.036	353003	8554537
26	NODO MT 3269	79.632	353939	8559264
27	NODO MT 3348	110.276	360340	8570141
28	NODO MT 9344	100.959	348738	8604416
29	NODO MT 7518	42.009	346249	8602077
30	NODO MT 8991	100.608	370104	8581851

Nota. Resultados obtenidos por la empresa ejecutora, julio 2022.

Las mediciones realizadas en los sistemas de puesta a tierra reflejan valores superiores a lo estipulado en la norma ANSI/IEEE 80, la cual establece un límite máximo permitido de $10\ \Omega$. En la tabla anterior se aprecia que el valor más alto registrado es de $113.561\ \Omega$, mientras que el más bajo es de $28.722\ \Omega$.

Tener valores altos implicaría que el sistema de protección no actuaría correctamente contra las sobretensiones transitorias y contra los contactos directos (protección del personal de mantenimiento).

Por otra parte, Electro Sur Este dentro de sus expedientes de licitación, propone en sus detalles de armados una sola configuración de puesta a tierra de tipo varilla de cobre vertical de longitud 2.40m y 19mm de diámetro (Ver Anexos), pero que en la práctica y según lo visto en la tabla anterior, que lamentablemente no funciona.

Por lo mencionado anteriormente existe la necesidad de realizar un estudio para mejorar estos niveles de puesta a tierra.

1.4. Formulación del Problema

1.4.1. Problema General

¿De qué manera se pueden reducir los niveles de resistencia de puesta a tierra en el alimentador de media tensión Mazuko 02 para cumplir con los estándares normativos y garantizar la seguridad del sistema eléctrico?

1.4.2. Problemas Específicos

- 1) ¿Cuáles son los valores de resistividad del terreno a lo largo del alimentador MZ 02 y cómo influyen en la resistencia de puesta a tierra?
- 2) ¿Qué configuraciones de sistemas de puesta a tierra son más efectivas para reducir los niveles de resistencia en diferentes tipos de suelo?
- 3) ¿Cuál es la relación costo-beneficio de implementar contrapesos horizontales en paralelo en comparación con otros métodos de mejora de puesta a tierra?

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Determinar mediante análisis técnico-económico la efectividad de los contrapesos horizontales en paralelo como método para reducir los niveles de resistencia de puesta a tierra en el alimentador de media tensión Mazuko 02.

1.5.2. Objetivos Específicos

- 1) Determinar los valores de resistividad del terreno en los nodos del alimentador Mazuko 02 mediante mediciones de campo.
- 2) Evaluar comparativamente diferentes configuraciones de sistemas de puesta a tierra y su eficiencia para reducir los niveles de resistencia según las características del suelo.
- 3) Determinar la viabilidad técnica y económica de la implementación de contrapesos horizontales en paralelo como solución óptima para el alimentador MZ 02.

1.6. Justificación del Trabajo

Contar con niveles de resistencia pequeños es importante para tener un diseño óptimo de sistema de puesta a tierra, que permita la protección de sobretensiones transitorias disipando en el terreno, las intensidades de corriente de cualquier naturaleza ya sea de origen interno o externo, como por ejemplo corrientes debido a las descargas atmosféricas. Por esta razón es necesario realizar un estudio que implique mejorar los niveles de resistencia de puesta a tierra, en especial en suelos cuya resistividad del terreno es alta, y así garantizar la protección de las instalaciones eléctricas y también de las personas.

La importancia del trabajo desde los diferentes puntos de vista es:

- a) Justificación técnica. – Mantener el nivel de tensión de la línea implica que el sistema de protección trabaje correctamente, así también se dará mayor seguridad al personal que trabaje en el mantenimiento de las líneas.

- b) Justificación académica. – La implementación de los contrapesos horizontales sería una manera de incentivar a los estudiantes a buscar otro tipo de configuraciones de sistemas de puesta a tierra, según las necesidades que se requiera.
- c) Justificación social. – Con valores de resistencia de puesta a tierra dentro de lo correcto, los sistemas de protección trabajarán correctamente, lo cual permitirá menores cortes del fluido eléctrico, permitiendo que los usuarios realicen sus actividades.
- d) Justificación económica. – Con relación a lo anterior, el corte del suministro de energía eléctrica genera también pérdidas económicas para la empresa concesionaria.
- e) Justificación ambiental. – Al configurar las puestas a tierra con contrapesos horizontales en paralelo no se optaría por la implementación de distintos aditivos que existen en el mercado, que ocasionalmente pueden ser perjudiciales contaminando los suelos.

1.7. Alcances y Limitaciones

1.7.1. Alcances del proyecto

- Analizar la resistividad del terreno en 30 nodos del alimentador MZ 02 mediante mediciones con el método de Wenner a profundidades de 2m, 4m, 8m, 10m, 12m y 14m.
- Diseñar configuraciones de contrapesos horizontales en paralelo basadas en las características específicas de cada tipo de suelo identificado.
- Realizar simulaciones para validar la efectividad de las configuraciones propuestas.

- Evaluar económicamente las alternativas de mejoramiento propuestas considerando costos de materiales, instalación y mantenimiento.
- Establecer criterios técnicos para la selección e implementación de sistemas de puesta a tierra en suelos de alta resistividad.

1.7.2. Limitaciones del proyecto

- El estudio se centra únicamente a los 30 nodos de media tensión del alimentador MZ 02, excluyendo las instalaciones de baja tensión debido a la extensión y complejidad del sistema.
- Las mediciones de resistividad se realizarán hasta una profundidad máxima de 14 metros, limitada por las características técnicas del equipo de medición disponible.
- No se considera la implementación física de las soluciones propuestas, limitándose al diseño teórico y análisis de viabilidad.
- El análisis económico se basa en precios de mercado vigentes al momento del estudio, sin considerar fluctuaciones futuras.
- Las condiciones climáticas estacionales pueden afectar las mediciones, por lo que se recomienda realizar las mediciones en época seca para obtener valores conservadores.

1.8. Hipótesis

1.8.1. Hipótesis General

Los altos niveles de resistencia de puesta a tierra en el alimentador MZ 02 se deben principalmente a las características de resistividad del terreno, y pueden ser reducidos significativamente mediante la implementación de contrapesos horizontales en paralelo hasta alcanzar valores inferiores a 25 Ω .

1.8.2. Hipótesis Específicas.

- 1) La resistividad del terreno en el alimentador MZ 02 presenta variaciones significativas debido a la composición del suelo y factores geográficos.
- 2) La configuración de contrapesos horizontales en paralelo presenta mayor eficiencia para reducir la resistencia de puesta a tierra comparada con sistemas convencionales utilizados.
- 3) La implementación de contrapesos horizontales en paralelo en el alimentador MZ 02 es técnica y económicamente viable, presentando una relación costo-beneficio favorable frente a otras alternativas de mejoramiento.

1.9. Operacionalización de Variables

1.9.1. Variable Dependiente

Tabla 1-4

Variables e indicadores Dependientes

Variable Dependiente	Definición Conceptual	Definición Operacional	Indicador	Unidad
Resistencia de puesta a tierra en los nodos del alimentador	“La resistencia de puesta a tierra es causada por la corriente que fluye en el circuito y la tensión medida en el sistema de tierra probado” (www.sonel.pl, 2023).	Medición de la resistencia eléctrica entre el sistema de puesta a tierra y el terreno.	Resistencia de PAT	[Ω]

Nota. Elaboración propia.

1.9.2. Variable Independiente

Tabla 1-5

Variable Independiente

Variable Independiente	Definición Conceptual	Definición Operacional	Indicador	Unidad
Sistema de puesta a tierra con contrapesos horizontales	“Un sistema de puesta a tierra consiste en la conexión de equipos eléctricos y electrónicos a tierra, para evitar que se dañen nuestros equipos en caso de una corriente transitoria peligrosa” (www.sonel.pl, 2023).	Implementación de conductores horizontales de cobre en paralelo conectados al sistema vertical existente	Longitud de contrapesos	[m]
			Número de contrapesos	[Und.]
			Profundidad de instalación	[m]
			Resistividad del terreno	[Ω -m]

Nota. Elaboración propia.

1.10. Metodología

1.10.1. Tipo de Estudio.

Investigación **Aplicada** de tipo tecnológico, orientada a resolver un problema específico del sector eléctrico mediante la aplicación de conocimientos de ingeniería eléctrica y métodos científicos para el diseño y optimización de sistemas de puesta a tierra.

1.10.2. Nivel de Estudio

Descriptivo-Correlacional, porque describe las características específicas del terreno y establece relaciones entre la resistividad del suelo y la resistencia de puesta a tierra, correlacionando variables para determinar la configuración óptima del sistema.

1.10.3. Enfoque del Estudio

Cuantitativo, basado en la medición numérica de parámetros eléctricos (resistencia y resistividad), procesamiento estadístico de datos y análisis comparativo de diferentes configuraciones mediante indicadores cuantificables.

1.10.4. Población

La población del presente estudio está constituida por todos los sistemas de puesta a tierra asociados a los nodos de media tensión del alimentador Mazuko 02, perteneciente a la Subestación de Transformación Mazuko, dentro del área de concesión de la empresa Electro Sur Este S.A.A. Esta población incluye la totalidad de puntos donde se han instalado electrodos de puesta a tierra que forman parte de la infraestructura operativa del sistema eléctrico en la región de Madre de Dios.

1.10.5. Muestra

La muestra considerada en este estudio está conformada por 30 nodos de media tensión distribuidos a lo largo del alimentador Mazuko 02. La selección de estos nodos se realizó en función de los registros de medición de resistencia de puesta a tierra, priorizando aquellos

cuyos valores superan el límite normativo de 25 ohmios establecido por el Código Nacional de Electricidad – Suministro 2023. Esta muestra es representativa del comportamiento del sistema de puesta a tierra en el alimentador y permite un análisis detallado de la efectividad de los métodos alternativos de mejora, como los contrapesos horizontales en paralelo.

1.10.6. Técnicas de Recolección de Datos

La técnica para la recolección de datos será de observación directa, mediante el registro de datos, medición de las resistividades de puesta a tierra, siempre y cuando se realice mediante un proceso sistematizado y controlado, especialmente en el comportamiento de las resistividades del terreno.

1.10.7. Procesamiento de Datos

El procesamiento y la evaluación de datos se realizará con la ayuda de programas computacionales como:

- Hoja de cálculo de Microsoft Office Excel
- Microsoft Word
- ArcGIS
- Google Earth Pro
- AutoCAD

1.11. Matriz de consistencia

La matriz de consistencia se muestra en la siguiente página

.

TITULO: “PROPUESTA PARA MEJORAR LOS NIVELES DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA, APLICANDO LOS CONTRAPESOS HORIZONTALES EN PARALELO, EN LA LINEA DE MEDIA TENSIÓN MAZUKO 02-MADRE DE DIOS”					
PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	METODOLOGÍA
General: ¿De qué manera se pueden reducir los niveles de resistencia de puesta a tierra en el alimentador de media tensión Mazuko 02 para cumplir con los estándares normativos y garantizar la seguridad del sistema eléctrico?	General: Determinar mediante análisis técnico-económico la efectividad de los contrapesos horizontales en paralelo como método para reducir los niveles de resistencia de puesta a tierra en el alimentador de media tensión Mazuko 02.	General: Los altos niveles de resistencia de puesta a tierra en el alimentador MZ 02 se deben principalmente a las características de resistividad del terreno, y pueden ser reducidos significativamente mediante la implementación de contrapesos horizontales en paralelo hasta alcanzar valores inferiores a 25 Ω.	1.Variable Independiente Sistema de puesta a tierra con contrapesos horizontales 2.Variable Dependiente Resistencia de puesta a tierra en los nodos del alimentador	1.Indicadores de variables Independientes -Longitud de contrapesos [m] -Número de contrapesos [Und.] - Profundidad de instalación [m] 2.Indicadores de variables Dependientes - Resistencia de PAT (Ω).	El estudio es de tipo aplicado y tecnológico, orientado a resolver un problema específico del sistema eléctrico mediante el uso de conocimientos de ingeniería. Tiene un nivel descriptivo-correlacional, ya que describe las características del terreno y establece relaciones entre la resistividad del suelo y la resistencia de puesta a tierra. Su enfoque es cuantitativo, basado en mediciones eléctricas, análisis estadístico y comparación de distintas configuraciones técnicas.
Específicos: 1. ¿Cuáles son los valores de resistividad del terreno a lo largo del alimentador MZ 02 y cómo influyen en la resistencia de puesta a tierra? 2. ¿Qué configuraciones de sistemas de puesta a tierra son más efectivas para reducir los niveles de resistencia en diferentes tipos de suelo? 3. ¿Cuál es la relación costo-beneficio de implementar contrapesos horizontales en paralelo en comparación con otros métodos de mejora de puesta a tierra?	Específicos: 1. Determinar los valores de resistividad del terreno en los nodos del alimentador Mazuko 02 mediante mediciones de campo. 2. Evaluar comparativamente diferentes configuraciones de sistemas de puesta a tierra y su eficiencia para reducir los niveles de resistencia según las características del suelo. 3. Determinar la viabilidad técnica y económica de la implementación de contrapesos horizontales en paralelo como solución óptima para el alimentador MZ 02.	Específicos: 1. La resistividad del terreno en el alimentador MZ 02 presenta variaciones significativas debido a la composición del suelo y factores geográficos. 2. La configuración de contrapesos horizontales en paralelo presenta mayor eficiencia para reducir la resistencia de puesta a tierra comparada con sistemas convencionales utilizados. 3. La implementación de contrapesos horizontales en paralelo en el alimentador MZ 02 es técnica y económicamente viable, presentando una relación costo-beneficio favorable frente a otras alternativas de mejoramiento.			

CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Introducción

El presente capítulo expone los fundamentos teóricos y conceptuales que sustentan el trabajo. Inicialmente, se revisarán los antecedentes tanto a nivel nacional como internacional, proporcionando un análisis de estudios previos relacionados con la mejora de sistemas de puesta a tierra. Estos antecedentes permiten contextualizar el problema y ofrecer soluciones implementadas en contextos similares, aportando un marco comparativo para la investigación.

Posteriormente, se desarrollarán las bases teóricas, que incluyen temas esenciales como las instalaciones de puesta a tierra, la resistividad del terreno y los criterios de diseño para dichos sistemas. Estos conceptos son clave para comprender los principios que rigen la instalación de sistemas eléctricos seguros y eficientes. Se examinan, además, las características de los cables y varillas de contrapeso, así como su combinación, ya que son elementos fundamentales en la optimización de la resistencia de puesta a tierra. Finalmente, se explorarán los métodos de instalación de los sistemas de puesta a tierra, como barras, electrodos horizontales y conexiones, lo que permitirá profundizar en las técnicas aplicadas y su efectividad.

El capítulo cierra con las bases normativas y conceptuales que sustentan el estudio, abarcando aspectos como la configuración de redes de distribución, el uso de contrapesos horizontales, y la normativa que regula la instalación y operación de estos sistemas, garantizando su seguridad.

2.2. Antecedentes

2.2.1. Antecedentes nacionales

Se toma en consideración el trabajo de investigación **“MEJORAMIENTO DE LA PUESTA A TIERRA EN ESTRUCTURAS ARRIOSTRADAS TIPO VSL DE LA LÍNEA**

DE TRANSMISIÓN 500 KV L-5032 CHILCA – POROMA”, desarrollado por **Richard Ernesto León Chaupín**, Lima 2021. Dentro de sus principales aportaciones se detallan a continuación:

- ✓ “Obtener los valores de resistencia de Puesta a tierra menores a 25 Ohms en estructuras de una línea de transmisión, brindan mayor seguridad al sistema ante posibles perturbaciones, y también garantiza la protección al personal ante trabajos de mantenimiento a realizarse” (León Chaupín, 2021).
- ✓ “La corrosión, desconexión de los componentes PAT pueden alterar los valores medidos de resistencia” (León Chaupín, 2021).
- ✓ “Realizar redistribución de contrapesos en estructuras arriostradas mejoran notablemente, por lo menos en un 61.8% el valor de resistencia del sistema PAT” (León Chaupín, 2021).

Así también se toma en consideración el trabajo de investigación **“INFLUENCIA DE UN SISTEMA DE ATERRAMIENTO POR CONTRAPESOS HORIZONTALES EN LA OPTIMIZACIÓN DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA DE LAS TORRES DE TRANSMISIÓN DE LA LÍNEA DE 33 KV PERTENECIENTES A ELECTROPERU S. A.”**, elaborado por Richard Alberth Poma Gómez, Huancayo 2020. Cuyas aportaciones se muestran a continuación:

- ✓ “Se concluye, según la prueba de t de Student para muestras relacionadas, que el sistema de aterramiento por contrapesos horizontales influye significativamente en la optimización de la resistencia de puesta a tierra de torres de transmisión de la línea L3 de 33 kV pertenecientes a Electroperú S.A., de hecho, las mediciones de resistencia de puesta a tierra bajaron en promedio de 46.30 Ohm a 15.03 Ohm después de la optimización mediante la metodología de contrapesos horizontales.

Estos datos son validados por los protocolos de medición de resistencia de puesta a tierra antes y después de la optimización” (Poma Gómez, 2020).

- ✓ “Los resultados de la medición de resistencia de puesta a tierra de las torres de transmisión de la línea L3 de 33 kV pertenecientes a Electroperú S. A., antes de la optimización, no cumplían con lo establecido por el CNE, estando en su totalidad con una resistencia de puesta a tierra mayor a 25 Ohm en cada una de las estructuras evaluadas, esto a causa de presencia de corrosión, alambres bañados en cobre, conductores rotos, mal dimensionamiento de sistemas de puesta a tierra, entre otros” (Poma Gómez, 2020).
- ✓ “Teniendo en cuenta el valor de la resistividad homogénea, se calculó mediante un software básico, los valores de la resistencia de puesta a tierra; así mismo, se determinó la longitud y el tipo de metodología de contrapeso horizontal, longitud para contrapesos horizontales para cada una de las torres de transmisión, posteriormente se procedió a realizar la instalación del sistema de puesta a tierra” (Poma Gómez, 2020).

2.2.2. Antecedentes Internacionales

Se considera el trabajo **“ESTUDIO DE LOS MÉTODOS UTILIZADOS EN EL DISEÑO DE PUESTA A TIERRA EN LAS SUBESTACIONES ELÉCTRICAS Y LÍNEAS DE TRANSMISIÓN PARA LOS NIVELES DE Tensión DE 400KV, 230KV, 115KV Y 34.5KV EN CADAFE”**, elaborado por Luis Alberto Cedeño Lucart, Venezuela. cuyas aportaciones se muestran a continuación:

- ✓ “Un valor de 20 ohm para la puesta a tierra de las torres de transmisión pudiera no ser adecuado para todos los niveles de tensión, ya que para niveles de tensiones elevadas igualmente será su nivel de aislamiento, por consiguiente, para niveles menos bajos de tensión, existen menos niveles de aislamiento, que por

consecuencia al momento de una falla es más fácil sobrepasar esos niveles y dañar los equipos y elementos del sistema” (Cedeño Lucart, 2019).

- ✓ “Al variar los espaciamientos entre conductores de las mallas, se observó que los valores de resistividad varían en un porcentaje bastante bajo, resaltando así que la influencia del espaciamiento entre conductores de una malla es bastante bajo en la variación de los valores de resistividad” (Cedeño Lucart, 2019).
- ✓ “La profundidad de enterramiento tiene una influencia significativa sobre los voltajes de toque y paso. Para aumentos moderados de la profundidad, el valor del voltaje de toque disminuye, debido a la reducción de la resistencia de la malla y a la reducción correspondiente en el aumento de potencial de la malla. Sin embargo, para incrementos grandes de profundidad el voltaje de toque puede aumentar significativamente” (Cedeño Lucart, 2019).

2.3. Bases Teóricas

2.3.1. Instalaciones de Puesta a Tierra

“Una instalación de puesta a tierra es aquella instalación eléctrica que tiene como misión derivar corriente hacia la tierra, o bien, establecer contacto con ella; las corrientes involucradas pueden ser de naturaleza estacionaria, casi estacionaria, de alta frecuencia o electromagnética en forma de impulsos, corrientes que pueden ser originadas durante el funcionamiento de un sistema técnico hecho por el hombre o causado por un fenómeno natural. Se demuestra, por otra parte, que la puesta a tierra más elemental satisface los requisitos para considerársele sistema; por lo tanto, se establece que una instalación de puesta a tierra es realmente un sistema de puesta a tierra” (Camarena Camayoc, 2009).

2.3.2. Resistividad del Terreno

“La resistividad o resistencia específica de un material es la resistencia en corriente continua entre las caras paralelas opuestas de una porción de material de longitud unitaria y sección unitaria uniforme. En un medio conductor homogéneo, isotrópico, el valor de la resistividad es igual en cualquier punto y dirección del medio. En el caso real de un terreno en cualquier parte del mundo es muy difícil, si no imposible, considerar éste homogéneo. La naturaleza propia de su constitución y por estar sometido a los efectos climáticos hacen, que aun en el caso de tener un terreno constituido por un solo material existan variaciones de su resistividad respecto a la profundidad, principalmente por la variación del nivel freático y del grado de compactación del material” (Camarena Camayoc, 2009).

- Tipo de suelo
- La composición química
- La compactación del terreno
- La temperatura

- Estratificación del suelo
- Composición química y concentración de las sales disueltas en la humedad del suelo.

“El tipo de suelo, composición química, estratificación y compactación del material son propiedades inherentes de la formación geológica del suelo en un sitio determinado; aunque no permanecen constantes su variación depende de cambios a largo plazo, por lo tanto, pueden asumirse como constantes a la hora de diseñar un SPT. Por el contrario, el porcentaje de humedad, la temperatura, la composición química de las sales disueltas y su concentración son factores variables a la hora de considerar el diseño de un SPT. En general, en la medición de resistividad de suelos en el sitio se utiliza corriente alterna o corriente continua conmutada de baja frecuencia, para evitar problemas de polarización que aparecen con corriente continua de baja tensión. La medición con corriente alterna de hasta unos 200 Hz no acarrea errores importantes por efectos capacitivos o inductivos” (Camarena Camayoc, 2009).

“Existen muchas tablas de Resistividades típicas del suelo según su composición geológica; por lo cual se recomienda usar estos valores sólo como una aproximación teórica inicial, requiriéndose siempre de mediciones en campo, que en la práctica pueden dar resultados muy diferentes a los valores de resistividades referenciales proporcionados por las tablas” (www.edpproyectos.com, 2022).

Las unidades de la resistividad son el Ω -metro y sus valores típicos de Resistividad son:

Tabla 2-1

Tabla de Resistividades Referenciales de Suelos Naturales Genéricos

TIPO DE SUELO	ρ (Ohm-m)
Limos, Arcillas, Suelo Vegetal y de Cultivo	10 – 100
Tierra Fina, Turbas, Fangos, Suelos Finos y Concretos Húmedos	100 – 300
Tierra Aluvial, Arenas firmes, Suelos secos y Cimientos de concreto	300 – 800

Arena Eólica, Lecho de Río, Cascajo, Areniscas secas/td>	800 – 3,000
Rocas Estratificadas, Fracturadas, Volcánicas	3,000 – 10,000
Suelos de Feldespatos, micas, cuarzos, Roca Monolítica	5,000 – 30,000
Concreto Ciclópeo Estructural Aéreo (Seco)	10,000 a más

Nota. Mediciones de resistividad de terreno - www.edpproyectos.com.

2.3.3. Métodos de Medición de Resistividad del Terreno

2.3.3.1. Generalidades

“La resistividad del terreno es uno de los parámetros fundamentales para el diseño de sistemas de puesta a tierra, ya que determina la capacidad del suelo para conducir la corriente eléctrica. La medición precisa de este parámetro es esencial para calcular la resistencia de puesta a tierra y evaluar la seguridad del sistema” (IEEE Std 81, 2012).

La resistividad del terreno (ρ) se define como la resistencia específica de un volumen unitario de suelo, expresada en ohm-metro (Ω -m). Matemáticamente se expresa como:

$$\rho = R \times \left(\frac{A}{L}\right) \quad (2-1)$$

Donde:

ρ = Resistividad del terreno (Ω -m)

R = Resistencia medida (Ω)

A = Área de la sección transversal (m^2)

L = Longitud del conductor (m)

2.3.3.2. Método de Wenner

“El método de Wenner, desarrollado por Frank Wenner en 1915, es el método más ampliamente utilizado para la medición de resistividad del terreno debido a su simplicidad y confiabilidad. Este método se basa en la inyección de corriente continua a través de dos

electrodos exteriores y la medición del potencial resultante entre dos electrodos interiores” (IEEE Std 81, 2012).

La configuración consiste en cuatro electrodos metálicos linealmente espaciados a una distancia igual "a", enterrados a una profundidad "b" en el suelo, donde $b \ll a$ (típicamente $b \leq a/20$). Los electrodos se denominan C1, P1, P2 y C2, donde:

- C1 y C2: Electrodos de corriente (exteriores)
- P1 y P2: Electrodos de potencial (interiores)

Para el método de Wenner en un terreno homogéneo, la resistividad se calcula mediante:

$$\rho = 2\pi a R \quad (2-2)$$

Donde:

ρ = Resistividad aparente del terreno (Ω -m)

a = Espaciamiento entre electrodos (m)

R = Resistencia medida (V/I) (Ω)

2.3.3.3. Método de Schlumberger

El método de Schlumberger, desarrollado por Conrad Schlumberger, utiliza una configuración similar al método de Wenner pero con espaciamientos variables entre los electrodos de corriente y potencial. Este método es especialmente útil para investigaciones profundas y permite una mayor resolución vertical.

La configuración consiste en cuatro electrodos colineales donde:

- Los electrodos de corriente C1 y C2 están separados por una distancia 2L
- Los electrodos de potencial P1 y P2 están separados por una distancia 2l
- La relación típica es $L/l \geq 3$

Para el método de Schlumberger, la resistividad se calcula mediante:

$$\rho = \pi \times (L^2 - l^2) \times R / (2l) \quad (2-3)$$

Donde:

ρ = Resistividad aparente del terreno (Ω -m)

L = Semidistancia entre electrodos de corriente (m)

l = Semidistancia entre electrodos de potencial (m)

R = Resistencia medida (Ω)

2.3.3.4. Método de Dipolo-Dipolo

“El método dipolo-dipolo utiliza dos dipolos separados, uno para la inyección de corriente y otro por la medición de potencial. Este método es especialmente efectivo para detectar variaciones laterales en la resistividad del terreno (Sharma, 2011).

2.3.4. Factores que Afectan las Mediciones

2.3.4.1. Factores Ambientales

Humedad del suelo: Afecta significativamente la resistividad

- Suelo seco: Resistividad alta
- Suelo húmedo: Resistividad baja

Temperatura: Influye en la movilidad iónica

- Temperatura alta: Menor resistividad
- Temperatura baja: Mayor resistividad

Contenido de sales: Las sales disueltas reducen la resistividad

2.3.4.2. Factores Técnicos

- **Contacto eléctrico:** Debe ser óptimo entre electrodos y terreno
- **Corrientes vagabundas:** Pueden interferir con las mediciones
- **Espaciamiento de electrodos:** Debe ser preciso y uniforme
- **Profundidad de enterramiento:** Debe ser consistente y pequeña

2.3.5. Resistividad Superficial del Terreno

La resistividad superficial del terreno es una propiedad física que cuantifica la capacidad de un material terrestre para oponerse al flujo de corriente eléctrica en su superficie. Se define como la resistencia eléctrica que presenta un cubo unitario de material del suelo cuando la corriente eléctrica fluye a través de él en dirección perpendicular a una de sus caras (Zhdanov, 2009).

2.3.5.1. Superficie Con Capa Superficial de Espesor Finito

$$\rho_s = \rho_1 + (\rho_2 - \rho_1) \times e^{(-0.09/hs)} \quad (2-4)$$

Donde:

ρ_1 : Resistividad de la capa superficial ($\Omega \cdot m$)

ρ_2 : Resistividad del terreno profundo ($\Omega \cdot m$)

hs : Espesor de la capa superficial (m)

2.3.5.2. Superficie Sin Capa Superficial:

$$\rho_s = \rho \quad (2-5)$$

Donde:

ρ : Resistividad del terreno ($\Omega \cdot m$)

2.3.6. Factores que Influyen en la Resistividad del Terreno

2.3.6.1. Composición del Suelo

La resistividad varía significativamente según la composición mineralógica del terreno:

- **Rocas ígneas:** Generalmente presentan alta resistividad ($10^3 - 10^6 \Omega \cdot m$)
- **Rocas sedimentarias:** Resistividad variable según porosidad y contenido de agua
- **Suelos arcillosos:** Baja resistividad debido a su capacidad de retener agua
- **Suelos arenosos:** Alta resistividad en condiciones secas
- **Suelos orgánicos:** Resistividad moderada a baja

2.3.6.2. Contenido de Humedad

El agua es un factor crítico que reduce drásticamente la resistividad del terreno.

La relación entre humedad y resistividad es inversamente proporcional:

- Terreno seco: Resistividad muy alta ($10^4 - 10^6 \Omega \cdot m$)
- Terreno húmedo: Resistividad moderada ($10^2 - 10^4 \Omega m$)
- Terreno saturado: Resistividad baja ($10^1 - 10^2 \Omega \cdot m$)

2.3.6.3. Concentración de Sales Disueltas

La presencia de sales y minerales disueltos en el agua intersticial del suelo reduce significativamente la resistividad debido al aumento de la conductividad iónica.

2.3.6.4. Temperatura

La resistividad del terreno presenta una relación inversamente proporcional con la temperatura. A temperaturas más altas, aumenta la movilidad iónica, reduciendo la resistividad.

2.3.6.5. Compactación y Porosidad

La densidad del suelo y su estructura porosa influyen en la resistividad:

- Mayor compactación → menor resistividad
- Mayor porosidad → mayor resistividad (en condiciones secas)

2.3.7. Criterios de Diseño de Puesta a Tierra

Los principales factores técnicos a tenerse en cuenta para el diseño de una PAT son:

- Efecto de las descargas atmosféricas sobre el aislamiento de la línea.
- Efecto de fallas a tierra sobre personas; tensión de toque y tensión de paso.

“En zonas donde el nivel isocerámico es alto, el efecto de las descargas atmosféricas prácticamente define el sistema y el dimensionamiento de la puesta a tierra. Cuando se presenta una falla de fase a tierra, la corriente de falla se propaga en el terreno, motivando

una distribución de potencial, de acuerdo a la resistividad del terreno. Considerando que la falla ocurre en la estructura y que la corriente circula a través del sistema de puesta a tierra bifurcándose por el terreno, se determinarán los niveles de tensión de toque y de paso, que se explican más adelante” (Camarena Camayoc, 2009).

2.3.8. Fundamentos Matemáticos del Sistema de Puesta a Tierra

El diseño de sistemas de puesta a tierra requiere modelos matemáticos para calcular la resistencia de dispersión, distribución de potenciales y eficiencia del sistema. A continuación, se presentan los fundamentos matemáticos esenciales:

2.3.8.1. Resistencia de un Electrodo Simple

La resistencia de un electrodo vertical (varilla) se calcula mediante la fórmula de Dwight (IEEE Std. 80, 2013):

$$R_{varilla} = (\rho/2\pi L) \times [\ln(4L/d) - 1] \quad (2-6)$$

Factor de Resistividad: $\rho/2\pi L$

ρ : Resistividad específica del terreno ($\Omega \cdot m$)

$2\pi L$: Factor geométrico que considera la superficie cilíndrica de dispersión

Esta relación establece que la resistencia es inversamente proporcional a la longitud.

Factor Logarítmico: $\ln(4L/d) - 1$

$4L/d$: Relación de aspecto (longitud/diámetro)

$\ln$: Logaritmo natural que modela la distribución no uniforme de la corriente

-1: Factor de corrección que ajusta por efectos de borde y distribución real

Efecto de los Parámetros

- Duplicar la longitud reduce la resistencia aproximadamente a la mitad
- Efecto más pronunciado en terrenos de alta resistividad
- Ley de rendimientos decrecientes: cada metro adicional aporta menos reducción

- Efecto logarítmico: aumentar el diámetro 10 veces solo reduce la resistencia en $\sim \ln(10) = 2.3$ veces
- Principalmente importante para consideraciones mecánicas y de corrosión

2.3.8.2. Resistencia de Contrapesos Horizontales

Para un conductor horizontal enterrado a profundidad h , se utiliza la fórmula de Sunde (Pacheco Guambaña y Jiménez Zhigui, 2013):

$$R_{horizontal} = (\rho/2\pi L) \times [\ln(2L^2/ah) + K] \quad (2-7)$$

Donde:

ρ : Resistividad del terreno ($\Omega \cdot m$)

L : Longitud del conductor horizontal (m)

a : Radio del conductor (m)

h : Profundidad de enterramiento (m)

K : Constante de corrección (típicamente -1 a -2)

Donde K es un factor de corrección que depende de la configuración del sistema.

2.3.8.3. Modelo de Mallas de Tierra

En sistemas complejos (subestaciones), se emplea la ecuación de Laurent-Nicholson (IEEE Std. 80, 2013):

$$R_{malla} = 4\rho/A\pi + \rho/LT \quad (2-8)$$

Donde:

ρ : Resistividad del terreno ($\Omega \cdot m$)

A : Área ocupada por la malla (m^2)

LT : Longitud total de conductores (m)

Esta fórmula consta de dos términos:

$4\rho/A\pi$: Resistencia por dispersión superficial de la malla

ρ/LT : Resistencia por longitud total de conductores

2.3.9. Análisis de Potenciales en Sistemas de Puesta a Tierra

2.3.9.1. Potencial de Tierra - Modelo Teórico Completo

El Ground Potential Rise (GPR) según IEEE Std 80 se define como "el máximo potencial eléctrico que una malla de puesta a tierra de subestación puede alcanzar con respecto a un punto de tierra distante asumido a potencial de tierra remota". El GPR ocurre cuando una corriente grande fluye a tierra a través de la impedancia de la malla de tierra, siendo máximo en el punto donde la corriente entra al suelo y declinando con la distancia.

El GPR se calcula mediante la ecuación fundamental:

$$GPR = I_f \times R_g \quad (2-9)$$

Donde:

I_f: Corriente de falla a tierra (A)

R_g: Resistencia de la malla de puesta a tierra (Ω)

Para un electrodo puntual en terreno homogéneo, el potencial en función de la distancia se expresa como:

$$V(r) = (\rho \times I)/(2\pi \times r) \quad (2-10)$$

Donde:

ρ : Resistividad del terreno ($\Omega \cdot m$)

I: Corriente inyectada (A)

r: Distancia radial desde el punto de inyección (m)

La magnitud del GPR depende de factores como la resistividad del terreno, la geometría del sistema de puesta a tierra, y la magnitud de la corriente de falla. Para sistemas de subestaciones, se sugiere como límite máximo admisible de GPR el valor de 200/k kV cuando la tensión de aguante mínima de las aislaciones de sistemas secundarios es mayor a 2 kV (IEEE Standards, 2015).

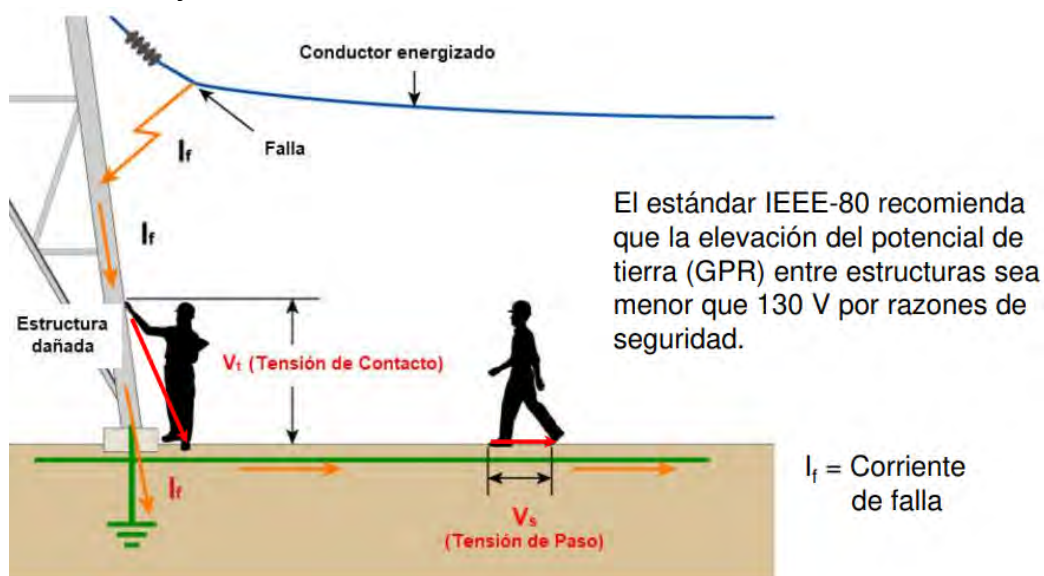
2.3.10. Tensiones de Paso y Contacto

Es la diferencia de potencial que se establece entre dos puntos de la superficie del suelo, separados por una distancia de aproximadamente un metro (la longitud de un paso humano), y sin que ninguno de ellos esté en contacto con un elemento energizado. Cuando una corriente de falla se disipa en el suelo a través de un sistema de puesta a tierra, se genera un gradiente de potencial. Si una persona camina cerca de este punto, sus pies estarán en puntos con diferentes potenciales, creando una tensión entre ellos que puede causar una descarga eléctrica a través de su cuerpo.

El diseño de un sistema de puesta a tierra eficaz busca minimizar estas tensiones a niveles seguros para evitar lesiones o fatalidades. Normativas internacionales y nacionales (como IEEE Std 80 o IEC 61936-1) establecen los límites de tensión de paso y contacto permisibles, considerando factores como la resistividad del suelo, el tiempo de duración de la falla y el peso corporal de la persona.

Figura 2-1

Tensión de Paso y de Contacto



Nota. IEEE Std 80-2013: IEEE Guía de seguridad para la conexión a tierra de subestaciones de CA.

2.3.10.1. Tensión de Paso (Step Voltage)

La tensión de paso es la diferencia de potencial que puede existir entre los pies de una persona que se encuentra de pie sobre la superficie del terreno en las proximidades de instalaciones puestas a tierra. Se define como la diferencia de voltaje entre dos puntos ubicados a diferentes distancias de un electrodo energizado, típicamente separados por una distancia de 1 metro (IEEE 80-2013).

$$V_{sp} = t116 \times (0.116 + 1000\rho_s) \quad (2-11)$$

Donde:

Ki: Factor de irregularidad para tensión de paso

Km: Factor de irregularidad para tensión de contacto

ρ : Resistividad del terreno ($\Omega \cdot m$)

IG: Corriente total que entra al sistema de puesta a tierra (A)

Ls: Longitud efectiva del conductor para tensión de paso (m)

Lc: Longitud efectiva del conductor para tensión de contacto (m)

2.3.10.2. Tensión de Contacto (Touch Voltage)

La tensión de contacto es la diferencia de potencial que puede aparecer entre una estructura metálica puesta a tierra y un punto de la superficie del terreno a una distancia igual al alcance normal de una persona. Representa el voltaje al que podría estar expuesta una persona que simultáneamente toca una estructura metálica y mantiene sus pies en contacto con el suelo.

$$V_{sc} = 116/\sqrt{t} \quad (2-12)$$

Donde:

V_{sc} = Tensión de contacto segura (V)

t = Tiempo de despeje de la falla (segundos)

116 = Constante de seguridad

2.3.10.3. Factores de Irregularidad (Ki y Km)

Factor de Irregularidad para Tensión de Paso (Ki):

$$Ki = 1 / (2\pi) \times [1/2h + 1/(D + h) + 1/D \times (1 - 0.5^{(n-2)})] \quad (2-13)$$

$$Km = 1 / (2\pi) \times [\ln(D^2/16hd + (D + 2h)^2/8Dd) - \ln(2n - 1)] \quad (2-14)$$

Donde:

h: Profundidad de enterramiento de la malla (m)

D: Espaciamiento entre conductores paralelos (m)

d: Diámetro del conductor (m)

n: Número de conductores paralelos en una dirección

2.3.10.4. Longitudes Efectivas

Longitud Efectiva para Tensión de Contacto (Lc):

$$Lc = LR + Lr \quad (2-15)$$

Longitud Efectiva para Tensión de Paso (Ls):

$$Ls = 0.75 \times LR + 0.85 \times Lr \quad (2-16)$$

Donde:

LR: Longitud total de conductores horizontales de la malla (m)

Lr: Longitud total de varillas verticales (m)

2.3.11. Métodos de Cálculo y Diseño de SPAT

Los sistemas de puesta a tierra (SPAT) constituyen un elemento fundamental en la infraestructura eléctrica, proporcionando un camino de baja impedancia para las corrientes de falla hacia tierra, garantizando la seguridad del personal y la protección de equipos. El diseño y cálculo de estos sistemas requiere de metodologías precisas y normativas técnicas específicas que han evolucionado significativamente en los últimos años.

2.3.11.1. Método Tradicional basado en IEEE 80-2013

La norma IEEE 80-2013 representa el estándar más reconocido a nivel mundial para el diseño de mallas de tierra en subestaciones eléctricas. Este método se fundamenta en el cálculo de parámetros críticos como:

- Resistividad del suelo: Determinada mediante métodos como Wenner, Schlumberger o Palmer, siendo fundamental para caracterizar las propiedades eléctricas del terreno donde se instalará el sistema.
- Resistencia de puesta a tierra: Calculada en función de la geometría del sistema, la resistividad del suelo y las dimensiones de los conductores empleados.
- Tensiones de paso y contacto: Parámetros de seguridad que determinan los niveles máximos permisibles de voltaje que puede soportar el cuerpo humano.

2.3.11.2. Métodos Computacionales Avanzados

“Los métodos modernos incluyen el uso de software especializado que considera modelos de elementos finitos basados en una discretización tridimensional del terreno” (Sepúlveda, 2015). Estos permiten:

- Modelado preciso de terrenos heterogéneos
- Análisis de distribución de corrientes de falla
- Simulación de diferentes configuraciones de malla
- Optimización del diseño considerando restricciones económicas y técnicas

2.3.11.3. Métodos Simplificados

“Para aplicaciones menos complejas, se utilizan métodos simplificados que emplean ecuaciones analíticas y planillas de cálculo basadas en las fórmulas de la IEEE 80-2013. Estos métodos son apropiados para instalaciones de menor envergadura donde no se requiere un análisis detallado del comportamiento electromagnético”.

2.3.12. Estudios de Sistemas de Puesta a Tierra

Los estudios de sistemas de puesta a tierra constituyen un área de investigación fundamental en la ingeniería eléctrica, enfocándose en el análisis, diseño y optimización de sistemas que conectan equipos eléctricos con la tierra para garantizar la seguridad y el funcionamiento adecuado de las instalaciones eléctricas.

2.3.12.1. *Fundamentación Teórica*

“Un sistema de puesta a tierra es el conjunto de elementos diseñados para conectar partes metálicas de una instalación eléctrica con el terreno, cuyo objetivo principal es garantizar la seguridad eléctrica, proteger equipos y personas contra sobretensiones y fallas eléctricas” (KLK, 2025).

Los estudios en este campo han evolucionado significativamente durante las últimas décadas, incorporando métodos de análisis más sofisticados y considerando factores ambientales y de seguridad cada vez más rigurosos.

2.3.12.2. *Metodologías de Análisis*

Los estudios contemporáneos de sistemas de puesta a tierra utilizan metodologías generales que representan la tierra como una región semiinfinita de dos capas. Se desarrollan modelos de circuitos equivalentes de electrodos enterrados en suelo conductivo mediante la solución numérica de las ecuaciones de Laplace. Este modelo de circuito equivalente, junto con la red del sistema de energía eléctrica, representa una red a gran escala que se resuelve mediante el método de análisis nodal modificado (IEEE, 2019).

2.3.12.3. *Aplicaciones y Campos de Estudio*

Los estudios de sistemas de puesta a tierra abarcan diversas aplicaciones, incluyendo subestaciones, patios de maniobras, sitios de generación, instalaciones de comunicaciones y facilities industriales. El estándar IEEE 80 constituye la guía principal

para la seguridad en la puesta a tierra de subestaciones de corriente alterna, estableciendo los parámetros fundamentales para el análisis y diseño de estos sistemas (EasyPower, 2025).

2.3.13. Resistencia de Puesta a Tierra

“La resistencia de puesta a tierra está directamente relacionada con la composición natural del suelo, (características físicas y químicas), es decir, que el suelo será de resistencia baja cuando sea altamente húmedo, con composición arcillosa y con un alto contenido de minerales conductores. Al contrario, se presentará una alta resistencia de puesta a tierra cuando el suelo sea de composición seca y altamente rocosa, lo que implica que la resistencia de puesta a tierra puede variar con la época del año” (Camarena Camayoc, 2009).

“Lo anterior tiene lógica, pues la corriente asociada con la descarga atmosférica al llegar a la base de la estructura encuentra o no, según la composición del suelo un medio propicio para disipar la energía del rayo. Cuando una línea de transmisión tiene continuas salidas debido a flameos inversos por altas resistencias de puesta a tierra en las estructuras, se debe buscar mejorar (bajar) la resistencia que la corriente asociada al rayo encuentra al llegar al suelo. Sabiendo el nivel cerámico de la zona por donde cruza la línea de transmisión, podemos por medio de una gráfica probabilística de distribución de rayos, calcular el valor de la corriente de rayo que aceptaremos nos produzca flameo inverso (la anterior decisión, se toma dependiendo del grado de confiabilidad que pretendemos dar a la línea de transmisión); con dicha corriente y con el voltaje de flameo de la cadena de aisladores podemos buscar el valor necesario de resistencia de puesta a tierra” (Camarena Camayoc, 2009).

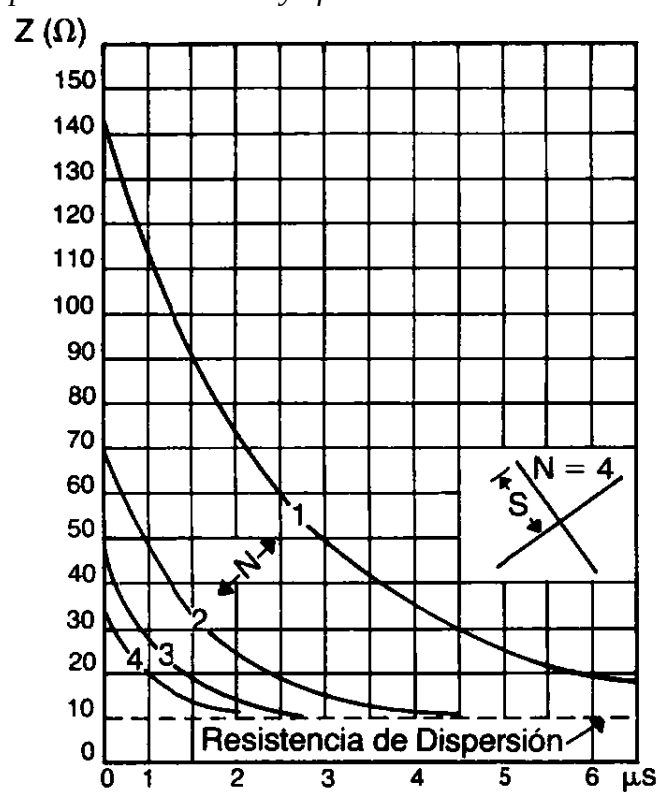
2.3.14. Cables de Contrapeso

“La utilización de cables de contrapeso es de práctica común y consiste en enterrar horizontalmente cables conductores pegados a las estructuras de las torres, la resistencia disminuirá con el aumento de la longitud y con aumento del diámetro del contrapeso enterrado (hasta cierto punto). El sistema de puesta a tierra se comporta como una impedancia transitoria, variando desde su valor inicial hasta el valor de resistencia de dispersión” (Camarena Camayoc, 2009).

En la Figura siguiente se indican las curvas que muestran la variación de la impedancia con respecto al tiempo para una determinada configuración de contrapesos.

Figura 2-2

Variación de la impedancia transitoria y efecto del número de contrapesos



Nota. Camarena Camayoc, 2009.

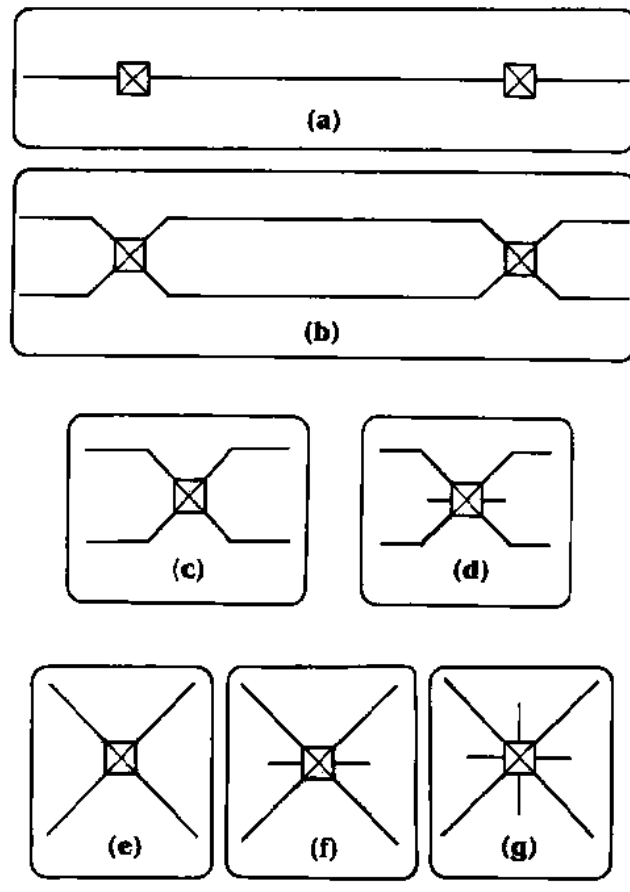
De la figura anterior podemos observar que:

“Un cable de contrapeso tiene una impedancia inicial de impulso, dependiendo de las condiciones del suelo, normalmente de 150 a 200 ohmios. Con la propagación de la onda de corriente a través del contrapeso, esta impedancia de impulso es reducida a su resistencia de dispersión en un período de tiempo dependiendo de la longitud del cable y de la velocidad de propagación de impulso” (Camarena Camayoc, 2009).

Así también, algunos tipos de configuraciones de contrapesos utilizados para el mejoramiento de SPAT en estructuras son mostradas en la figura siguiente:

Figura 2-3

Arreglos de cable de contrapeso



Nota. Camarena Camayoc, 2009.

2.3.15. Varillas de Contrapeso

“La utilización de varillas de contrapeso en nuestro medio se hace principalmente para aterrizar pararrayos (copperweld) y consiste en enterar verticalmente varillas conductoras pegadas a las estructuras de las torres y al igual que con los cables de

contrapeso la resistencia disminuirá con el aumento de la longitud y aumento del diámetro de la varilla enterrada hasta cierto punto” (Camarena Camayoc, 2009).

“La utilización de varillas de contrapeso se basa en el principio de que la resistencia del suelo mejora con la profundidad. Mientras más profundas queden las varillas, mejor será su comportamiento, pero más complicada y costosa su colocación. En países como Canadá, entierran varillas muy profundas (hasta 10m) que son enterradas por etapas y van siendo ensambladas cuando la anterior está enterrada, método que solo es posible en suelos blandos como los arcillosos. En cuanto a los arreglos de varillas de contrapeso no hay algo muy establecido, pero lo que sí es cierto, es que mientras más separadas estén las varillas, más bajo será el valor de puesta a tierra obtenido, pues menos “copado” estará el medio alrededor de cada varilla” (Camarena Camayoc, 2009).

2.3.16. Combinación de Cables y Varillas de Contrapeso

“Cuando el arreglo de cables de contrapeso llega a ser del tipo g de la figura anterior, y aún no se ha logrado un valor de resistencia de puesta a tierra aceptable, se procede a enterrar varillas de contrapeso, aunque también se encuentran los demás arreglos presentados en la figura combinados con varillas” (Camarena Camayoc, 2009).

2.3.17. Métodos de Instalación de Puestas a Tierra

Cuando se instalan electrodos de tierra, se deben de cumplir 3 condiciones:

- El trabajo debe ser realizado eficientemente para minimizar costos de instalación.
- El terreno o material de relleno usado no debe tener un índice de acidez pH que cause corrosión al electrodo.
- Todas las uniones o conexiones bajo tierra deben ser construidas de modo que no se presente corrosión en la unión o conexión.

“El método de instalación, relleno y conexiones que se detalla en los siguientes párrafos dependerá del tipo de sistema de electrodos que se usará y de las condiciones del terreno. Donde se pueda, debiera hacerse uso de trabajo de excavaciones comunes. Invariantemente, se necesitará apoyo mecánico y herramientas manuales para apoyar la instalación” (Camarena Camayoc, 2009).

2.3.17.1. *Instalación en barras*

“Las barras generalmente ofrecen la forma más conveniente y económica de instalar un electrodo. A menudo se requiere modificar poca superficie (tal como romper superficies de concreto), pero por supuesto es necesario inspeccionar para asegurarse que no hay equipo o instalaciones enterradas -tales como tuberías de agua o gas- que puedan ser dañadas al enterrar las barras. Los métodos de instalación incluyen accionamiento manual, accionamiento mecánico y perforadora. Las barras cortas (típicamente hasta 3 metros de largo) se instalan a menudo empleando un martillo pesado (combo) operado manualmente. Los golpes relativamente cortos y frecuentes son más efectivos normalmente. Las barras están acondicionadas con una cabeza endurecida y una punta de acero para asegurar que la barra misma no se dañe durante el proceso” (Camarena Camayoc, 2009).

2.3.17.2. *Electrodos horizontales*

“Los electrodos horizontales pueden ser instalados en surcos directamente en el terreno o más frecuentemente en zanjas de hasta un metro de profundidad. El uso de equipo de excavación mecánica de pala angosta puede resultar en costos de instalación menores, en sitios donde esto es posible. La profundidad de instalación tiene normalmente un mínimo de 0,5 metros y más si es necesario pasar bajo nivel de cultivo o de escarcha en zonas heladas. En muchos proyectos grandes, toda el área puede ser excavada para permitir obras civiles. Esto presenta a menudo una buena oportunidad para minimizar

costos tendiendo el conductor del electrodo de tierra en ese momento. Debe tenerse cuidado de prevenir daño o robo del conductor, una vez tendido” (Camarena Camayoc, 2009).

2.3.17.3. Relleno

“En todos los casos, el material de relleno debe ser no-corrosivo, de un tamaño de partícula relativamente pequeño y si fuera posible, que ayude a retener la humedad. Muy a menudo, el material previamente excavado es apropiado como relleno, pero debiera ser arenado para remover piedras antes de rellenar, asegurándose de que quede bien compactado. El suelo debiera tener un índice de pH entre 6,0 (ácido) y 10,0 (alcalino)- ver capítulos 11 y 14. La arcilla dura no es un material de relleno conveniente ya que, si es fuertemente compactada, puede llegar a ser casi impermeable al agua y podría permanecer relativamente seca. También puede formar grandes terrones que no se afianzan alrededor del conductor” (Camarena Camayoc, 2009).

2.3.17.4. Conexiones

“Los electrodos de tierra tienen que ser conectados entre sí de alguna manera y es normal que sea vía cobre desnudo si es posible, ya que esto ayudará a reducir el valor de impedancia global. Las conexiones entre los diferentes componentes deben ser mecánicamente robustas, tener buena resistencia a la corrosión y baja resistividad eléctrica. Es prudente evitar uniones y conexiones innecesarias. Debe considerarse el valor de corriente de falla y la duración de la falla que se espera que soporte el sistema de tierra. Varios estándares indican especificaciones para los materiales que son mínimos aceptables, por ejemplo, establecen que las coplas para barras de cobre necesitan un contenido mínimo de cobre de 80%” (Camarena Camayoc, 2009).

Los métodos de unión que se emplean son:

- Uniones exotérmicas

- Conexiones mecánicas.
- Conexiones broceadas (soldadas en fuerte).
- Conexiones soldadas en forma autógena

2.3.18. Los Suelos

“Se forma a partir de la erosión de rocas y materia orgánica, de acuerdo al lugar los suelos pueden variar, un ejemplo muy claro es el tipo de suelo que se encuentra en el campo y el que se encuentra en la playa. El suelo es muy importante en la construcción ya que será el soporte principal de la estructura de una edificación” (Huamaní de la Cruz, 2022).

2.3.18.1. *Propiedades Físicas de los suelos*

“Las propiedades físicas de los suelos son consistencia, textura, porosidad, estructura, drenaje y profundidad efectiva, con las que se pueden categorizar y analizar el rendimiento de éstos” (Huamaní de la Cruz, 2022).

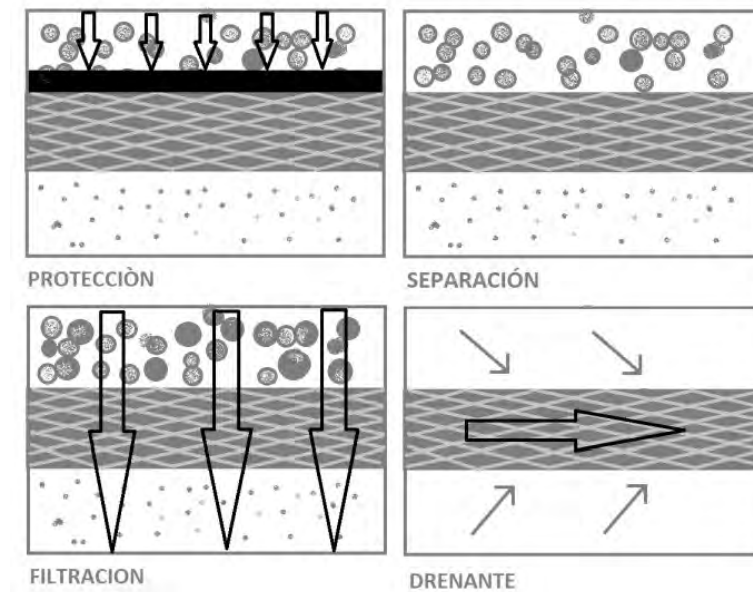
Se pueden mejorar de la siguiente manera:

- “Mezclas de suelos: existen diferentes mezclas o combinaciones para mejorar un suelo, se pueden hacer combinaciones con materiales aglomerantes como cal, materiales bituminosos o cemento; o pueden adicionarse con suelos arenosos en porcentajes variables evaluando su resistencia.

- “Membranas geotextiles: son elementos flexibles, laminares y porosos, su estructura presenta enlaces mecánicos entre sus filamentos que le proporcionan propiedades hidráulicas y mecánicas; contribuyendo así a mejorar las propiedades del suelo” (Huamaní de la Cruz, 2022).

Figura 2-4

Propiedades de los geotextiles



Nota. Google Imágenes.

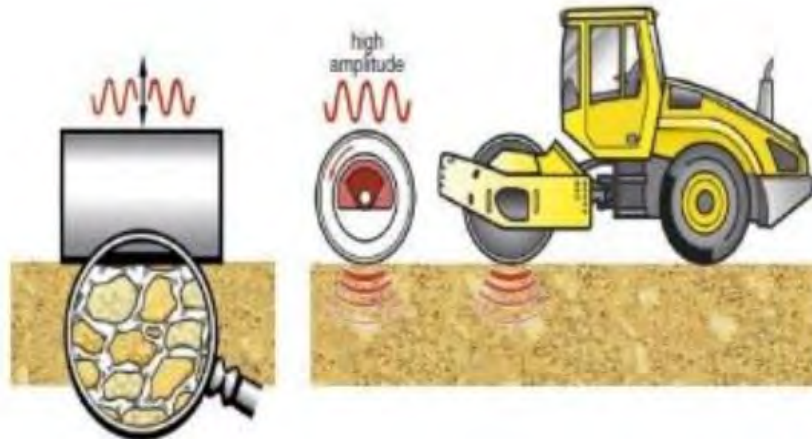
2.3.18.2. Propiedades mecánicas de los suelos

“Los suelos de acuerdo a su composición presentan diferentes propiedades mecánicas, se analizan principalmente la capacidad de soporte y el grado de compactación; éstas permiten hacer el diseño de las cimentaciones. Se pueden mejorar estas propiedades de la siguiente manera” (Huamaní de la Cruz, 2022).

- “Compactación: se mejora la calidad del suelo mediante la compresión de partículas entre sí, aumentando su capacidad de soporte.
- Vibro flotación: se aplica en suelos con alta permeabilidad, por ejemplo, suelos arenosos, insertando un dispositivo que produce vibraciones y a la vez aplica agua en sincronía con el vibrado, de esta manera se produce la licuación de la arena hasta alcanzar la compactación requerida” (Huamaní de la Cruz, 2022).

Figura 2-5

Compactación por vibración



Nota. Google Imágenes.

2.3.18.3. Tipos de Suelos

Se clasifican principalmente según sus características físicas. En cuanto a su funcionalidad, tenemos:

- “Suelos Arenosos: conformados principalmente por arena y pequeñas partículas de roca; estos suelos no son buenos reteniendo el agua y tienen muy baja cantidad de materia orgánica.

- Suelos Calizos: poseen elevados niveles de sales calcáreas, son fáciles de erosionar y se inundan con facilidad en temporadas lluviosas.
- Suelos Humíferos: debido a la cantidad de materia orgánica que poseen y la facilidad para absorber el agua son los más recomendados para el cultivo.

- Suelos Pedregosos: están compuestos básicamente por rocas en diversos tamaños, no absorben el agua.
- Suelos Mixtos: poseen características de los suelos arcillosos y arenosos.

- Suelos Arcillosos: son aquellos que están conformados por grandes cantidades de arcilla y a su vez contienen arena y barro en pequeñas cantidades. Se caracterizan por ser de un color rojizo, además por el alto contenido de arcilla retienen grandes cantidades de agua formando lagunas pequeñas” (Huamaní de la Cruz, 2022).

Figura 2-6
Tipos de Suelos



Nota. Google Imágenes.

“Los suelos arcillosos son fáciles de manipular siempre y cuando estén húmedos, al secarse llegan a poseer gran consistencia, también son caracterizados por poseer un mal drenaje, siendo este el principal motivo para la acumulación de agua, además de hacerlos muy densos” (Huamaní de la Cruz, 2022).

2.3.18.4. Suelos Orgánicos

“Está conformado básicamente por gran cantidad de materia orgánica, es decir, elementos biológicos, restos en descomposición de vegetales y animales. No son recomendables para realizar proyectos de construcción sobre éstos” (Huamaní de la Cruz, 2022).

Figura 2-7
Suelo Orgánico



Nota. Google Imágenes.

2.4. Bases Conceptuales

2.4.1. Resistencia De Puesta A Tierra

“La resistencia de puesta a tierra se mide en ohmios (Ω) y depende de varios factores, como la composición del suelo, la humedad, la temperatura y la geometría del sistema de puesta a tierra. Una resistencia de puesta a tierra baja es preferible, ya que significa que la corriente puede disiparse más eficientemente, reduciendo el riesgo de daño a equipos y mejorando la seguridad eléctrica” (Camarena Camayoc, 2009).

2.4.2. Alimentador de una Red de Distribución

“Los alimentadores eléctricos son cables o conductores hechos de aleaciones metálicas como aluminio y acero, o en algunos casos, exclusivamente de cobre. Sin embargo, el cobre es menos común en redes de distribución debido a que, aunque es un mejor conductor que el aluminio, es más costoso. Es importante señalar que estos conductores pueden estar desnudos o recubiertos” (Morocho Sinchiguano, 2022).

2.4.3. Configuración tipo Radial en Sistemas de Distribución

Se identifica a la topología radial por su única fuente de alimentación situada a un extremo, en la que se presenta la posibilidad de expandirse o no, sin embargo, no vuelven a encontrarse en un nodo común. El sistema radial presenta beneficios de construcción y diseño ya que el costo es mínimo y es de sencilla operación, a esto se puede añadir la facilidad para ser provistas con protecciones técnicamente coordinadas. Como inconveniente de este sistema se encuentra su baja confiabilidad ya que al presentarse una falla y no tener una red de respaldo, se interrumpiría el servicio eléctrico a los usuarios” (Morocho Sinchiguano, 2022).

2.4.4. Contrapesos Horizontales

Esta metodología denominada “contrapesos” para sistemas de aterramiento eléctricos pueden ejecutarse a partir de diferentes materiales como pueden ser conductores de acero (para terrenos no corrosivos, cultivos secos), o por otro lado que es más común cobre o aluminio (utilizados para terrenos corrosivos) (Morocho Sinchiguano, 2022).

2.4.5. Topología de una Red

“Posición relativa de elementos ideales que representan una red eléctrica” (DGE-Terminología, 2022).

2.4.6. Línea Aérea

“Línea eléctrica cuyos conductores están sobre el terreno, generalmente por medio de aisladores y soportes apropiados” (DGE-Terminología, 2022).

2.4.7. Conductor

“Cualquier material que ofrezca mínima resistencia al paso de una corriente eléctrica. Los conductores más comunes son de cobre o de aluminio y pueden estar aislados o desnudos” (DGE-Terminología, 2022).

2.5. Bases Normativas

Sección 060-712 del Código Nacional de Electricidad – Utilización, menciona que:

“El valor de la resistencia de la puesta a tierra debe ser tal que, cualquier masa no pueda dar lugar a tensiones de contacto superiores a las permitidas y no debe ser mayor a 25Ω . Cuando un electrodo simple, consistente en una varilla, tubería o placa, tenga una resistencia a tierra mayor de 25Ω , es necesario instalar un electrodo adicional a una distancia de por lo menos 2 m, o a una distancia equivalente a la longitud del electrodo; o se debe emplear cualquier otro método alternativo” (CNE-Suministro, 2011).

NTP 370.052 MATERIALES QUE CONSTITUYEN EL POZO DE PUESTA A TIERRA, esta normativa establece que:

“Las condiciones que deben cumplir los materiales a ser utilizados en los pozos de puesta a tierra de protección que emplean electrodos de cobre” (Norma Técnica Peruana, 2017).

NTP 370.052 ELECCIÓN DE LOS MATERIALES ELÉCTRICOS EN LAS INSTALACIONES INTERIORES PARA PUESTA A TIERRA. CONDUCTORES DE PROTECCIÓN DE COBRE, establece que:

“Las condiciones que deben cumplir los conductores eléctricos a ser utilizados como conductores de protección a tierra considerados necesarios para la seguridad de las personas, animales y de la propiedad, frente a los peligros y daños que pueden resultar por el uso de las instalaciones eléctricas, en condiciones que puedan ser previstas” (Norma Técnica Peruana, 2017).

NORMA IEEE 80-2000, presenta las siguientes consideraciones:

- ✓ “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 equipos para proporcionar conexiones cortas a tierra” (IEEE - Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, 2000).

- ✓ “En general, la mayoría de sistemas de aterrizaje o toma a tierra utilizan dos grupos de electrodos de tierra. El primer grupo de electrodos de tierra es diseñado para propósitos de toma a tierra y el segundo de electrodos de tierra son electrodos que incluyen varias estructuras metálicas subterráneas instaladas para otros propósitos que no sean de toma a tierra” (IEEE - Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, 2000).

Normativas Ambientales

Normativas Internacionales

a) IEC 62561-7:2018

"Requisitos ambientales para componentes de sistemas de puesta a tierra"

- o Prohibición de aditivos químicos con metales pesados (Pb, Cd, Hg)
- o Límites de lixiviación para materiales conductivos

b) ISO 14001:2015

"Sistemas de gestión ambiental para proyectos eléctricos"

- o Evaluación de impacto ambiental en instalación de electrodos
- o Plan de manejo de residuos de materiales conductivos

c) EU RoHS Directive 2011/65/EU

"Restricción de sustancias peligrosas"

- o Limita uso de:
 - Cromo hexavalente (<0.1%)
 - Retardantes de llama bromados

Normativas Peruanas

- a) Ley N° 28611 - Ley General del Ambiente

Art. 36: Prohíbe contaminación de suelos por instalaciones eléctricas

- b) DS N° 002-2021-MINAM

"Límites Máximos Permisibles para suelos"

- o Concentraciones máximas para cobre en terrenos:

- Zonas industriales: 1,500 mg/kg
- Zonas agrícolas: 100 mg/kg

- c) RM N° 160-2021-MINEM

"Guía de Buenas Prácticas Ambientales para Instalaciones Eléctricas"

- o Alternativas ecológicas a aditivos químicos:

- Bentonita conductiva (no tóxica)
- Carbón vegetal activado

CAPÍTULO III

3. ESTUDIO Y DETERMINACION DEL TERRENO A LO LARGO DEL ALIMENTADOR DE MEDIA TENSIÓN MZ 02

3.1. Introducción

En este capítulo se realiza un análisis exhaustivo del terreno a lo largo del alimentador de media tensión MZ 02, con el objetivo de evaluar su impacto en los sistemas de puesta a tierra y su resistividad. La correcta caracterización del terreno es fundamental para asegurar el buen funcionamiento y la seguridad de las instalaciones eléctricas, dado que la resistividad del suelo influye directamente en la eficiencia de los sistemas de puesta a tierra.

El capítulo comienza con una descripción de la subestación eléctrica (SET) Mazuko, proporcionando detalles de su ubicación, infraestructura y papel dentro del sistema eléctrico de la región. Luego, se ofrece una descripción del alimentador MZ 02, incluyendo su recorrido geográfico y su importancia dentro de la red de distribución de media tensión. Posteriormente, se presentan las características técnicas del alimentador MZ 02, donde se describen sus especificaciones, tales como longitud, capacidad y componentes clave que lo conforman.

Finalmente, se llevará a cabo una evaluación de los valores de la resistividad del terreno a lo largo del alimentador. Este análisis permitirá determinar las condiciones del suelo, y su impacto en los niveles de resistencia de los sistemas de puesta a tierra.

3.2. Descripción de la SET Mazuko

ELSE.S.A.A. es una empresa dedicada a la distribución de energía eléctrica en los departamentos de Cusco, Apurímac, Madre de Dios y Ayacucho. Administra el sistema eléctrico de subtransmisión de Puerto Maldonado, que incluye las subestaciones de Puerto Maldonado, las cuales son alimentadas por la subestación de Mazuko. El Sistema Eléctrico de está compuesto por varias subestaciones de potencia. Las líneas más relevantes del sistema son:

Ubicación del Sistema Eléctrico Mazuko



Nota. Electro Sur Este.

3.2.1. Características Técnicas la SET Mazuko

La subestación de Transformación MAZUCO se encuentra ubicado en la provincia de Inambari, en la zona 19L, cuyas coordenadas UTM son N - 352239m, E - 8551917 m.

3.2.2. Líneas De Transmisión Comprendidas En El Área De Estudio

La línea de transmisión San Gabán - Mazuko, operativa desde el año 2010, juega un rol crucial en la interconexión eléctrica de la región. Esta línea, con un voltaje nominal de 138 kV, ha sido diseñada para soportar una carga máxima de 112 MVA, y se extiende a lo largo de 69.2 km, con una disposición de conductores en formato triangular y un total de 320 estructuras de acero, lo que asegura la estabilidad y eficiencia en la transmisión de energía.

Adicionalmente, la línea de transmisión Mazuko - Puerto Maldonado, también operativa desde 2010, complementa la infraestructura eléctrica de la zona. Esta línea cuenta con características similares, incluyendo un voltaje de 138 kV y una longitud de 152.6 km, sostenida por 650 estructuras de acero. Su capacidad nominal es de 109 MVA, con una corriente máxima de 455 A.

Ambas líneas de transmisión, operadas por Electro Sur Este, forman parte esencial del sistema energético del área de estudio, garantizando la distribución de energía de manera eficiente y confiable. En los siguientes apartados se detallarán más características de estas infraestructuras clave, junto con los parámetros eléctricos y técnicos que aseguran su óptimo funcionamiento en la red eléctrica de la región.

3.2.2.1. Línea De Transmisión Mazuko – Puerto Maldonado

Con una longitud de 152.6 Km, la línea Mazuko – Puerto Maldonado presenta las siguientes características técnicas:

- Código línea : L-1015/1.
- Tensión nominal (kV) : 138.
- Número de Ternas : 01 para L-1015/1
- Disposición de Conductores: Triangular.
- Estructuras
- N° de Estructuras : 650 para L-1015/1
- Material : ACERO.

Parámetros Eléctricos

- Tensión Nominal : 138 kV.
- Longitud de Línea : 152.6 Km.
- Corriente Máxima : 455 A.
- Potencia Nominal : 109 MVA.
- Impedancia de la Línea : 0.5984 Ohm/Km.
- Frecuencia : 60 Hz.

Características del conductor de Línea

- Material : AAAC.
- Sección : 120 mm².
- Diámetro Exterior : 14.3 mm.
- Características Mecánicas:
- Número de Hilos : 19.
- Peso del Conductor : 335 kg/km.
- Carga de Rotura mínima a la tracción: 3453 Kg.
- Módulo de elasticidad : 6.35 kg/ mm²

La línea de transmisión de entre MAZUKO y PUERTO MALDONADO ha estado en funcionamiento desde el año 2010 con un nivel de tensión de 138 kV, operada por la empresa concesionaria.

3.2.2.2. Línea De Transmisión San Gaban - Mazuko

Con una longitud de 69.2 Km, la línea Mazuko – Puerto Maldonado presenta las siguientes características:

- Código línea : L-1014/1.
- Tensión nominal (kV) : 138.
- Número de Ternas : 01 para L-1014/1
- Disposición de Conductores: Triangular.
- Estructuras
- N° de Estructuras : 320 para L-1014/1
- Material : ACERO.

Parámetros Eléctricos

- Tensión Nominal : 138 kV.
- Longitud de Línea : 69.2 Km.
- Corriente Máxima : 470 A.
- Potencia Nominal : 112 MVA.
- Impedancia de la Línea : 0.5984 Ohm/Km.
- Frecuencia : 60 Hz.

Características del conductor de Línea

- Material : AAAC.
- Sección : 120 mm².
- Diámetro Exterior : 14.3 mm.
- Características Mecánicas:
- Número de Hilos : 19.
- Peso del Conductor : 335 kg/km.
- Carga de Rotura mínima a la tracción: 3453 Kg.
- Módulo de elasticidad : 6.35 kg/ mm²

La línea de transmisión de entre SAN GABAN - MAZUKO ha estado en funcionamiento desde el año 2010 con un nivel de tensión de 138 kV, operada por la empresa concesionaria.

3.2.3. Transformador de Potencia Mazuko

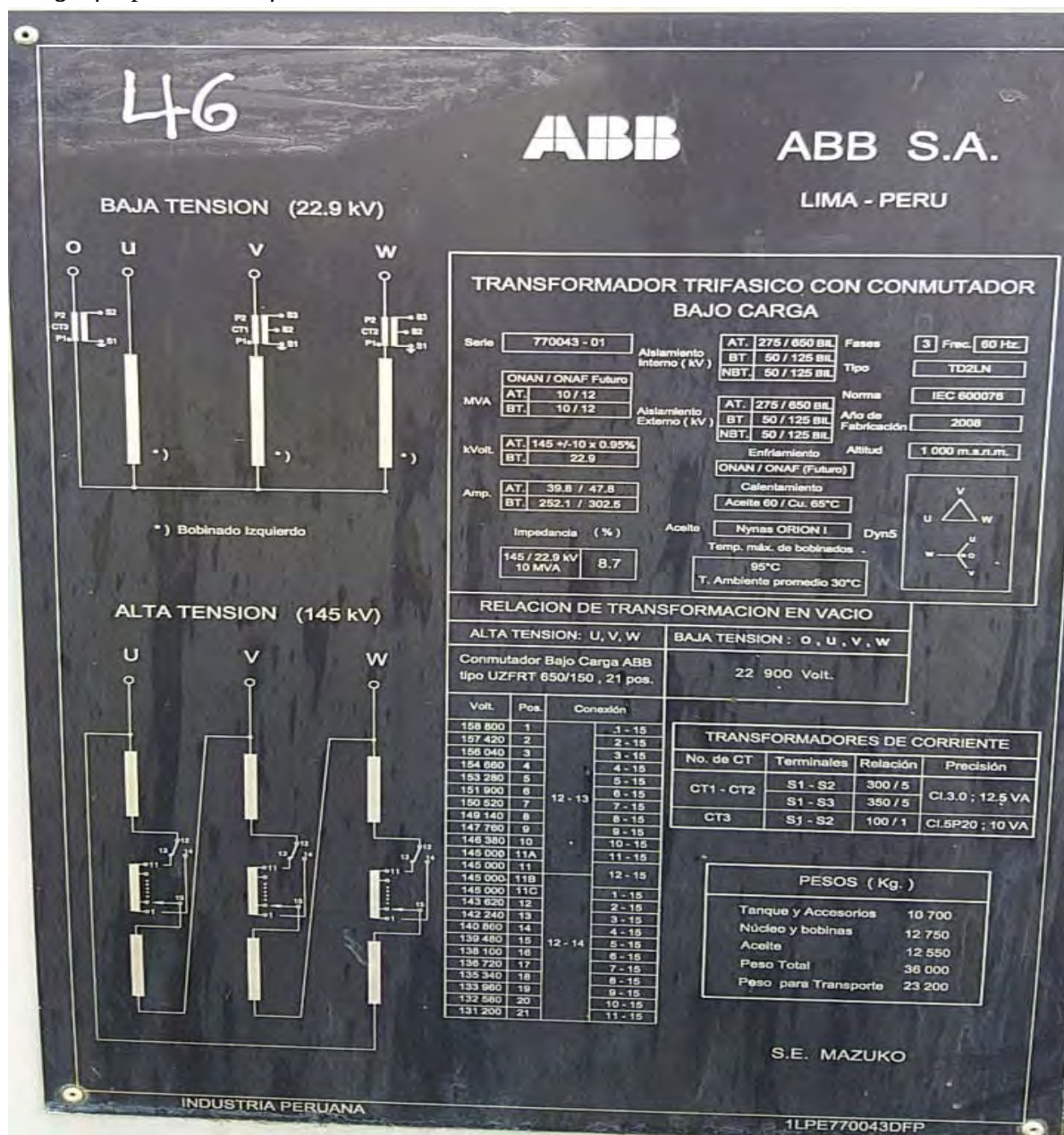
El transformador de potencia de la subestación Mazuko cuenta con las siguientes características técnicas y configuraciones:

- Número de fases : 3 Fases
- Frecuencia nominal : 60Hz
- Potencia Nominal : 10/12 MVA
- Tensión nominal : 145+/-10 x 0.95%/22.9 KV
- Grupo de conexión : Dyn5
- Refrigeración : ONAN/ONAF
- Impedancia de corto circuito : 8.7%

Estas características garantizan que el transformador de potencia Mazuko pueda operar de manera eficiente y confiable, proporcionando la energía necesaria para sus diferentes alimentadores y las áreas circundantes.

Figura 3-2

Fotografía placa Transformador de Potencia Mazuko



Nota. Electro Sur Este.

La Subestación Mazuko cuenta con 4 salidas que son: MZ-01, MZ-02, MZ-03 y MZ-04. Siendo los alimentadores MZ-01 y MZ-02 cargas totalmente rurales, cuyas características se describen a continuación:

3.3. Descripción del alimentador MZ 01

El alimentador MZ-01 opera a una tensión de 22.9KV alimentando a una parte del distrito de Inambari, provincia de Tambopata, departamento de Madre de Dios. Presenta una

configuración radial de tipo de sistema trifásico y conformada por conductores de tipo aéreo con estructuras de concreto armado centrifugado.

Las características del alimentador MZ-01 se muestran a continuación:

Tabla 3-1

Las características del alimentador MZ-01

Tipo de Red Eléctrica	Aéreo en su mayoría
Tipo de Sistema	Trifásico y Bifilar
Tipo de Conductor	70,50,35, 25 mm ² AAAC
Tensión nominal	22.9KV
Cantidad de Subestaciones	85

Nota. ELSE.S.A.A.

3.4. Descripción del alimentador MZ 02

El alimentador MZ-02 opera a una tensión de 22.9KV. Presenta una configuración radial netamente aéreo de tipo trifásico y bifilar, conformada por conductores AAAC y estructuras de concreto armado centrifugado de 12 y 13 metros de altura.

Figura 3-3

Sistema de distribución existente Alimentador MZ-02



Nota. Electro Sur Este.

3.5. Características técnicas del alimentador MZ 02

Las características del alimentador MZ-02 se muestran a continuación:

Tabla 3-2

Las características del alimentador MZ-02

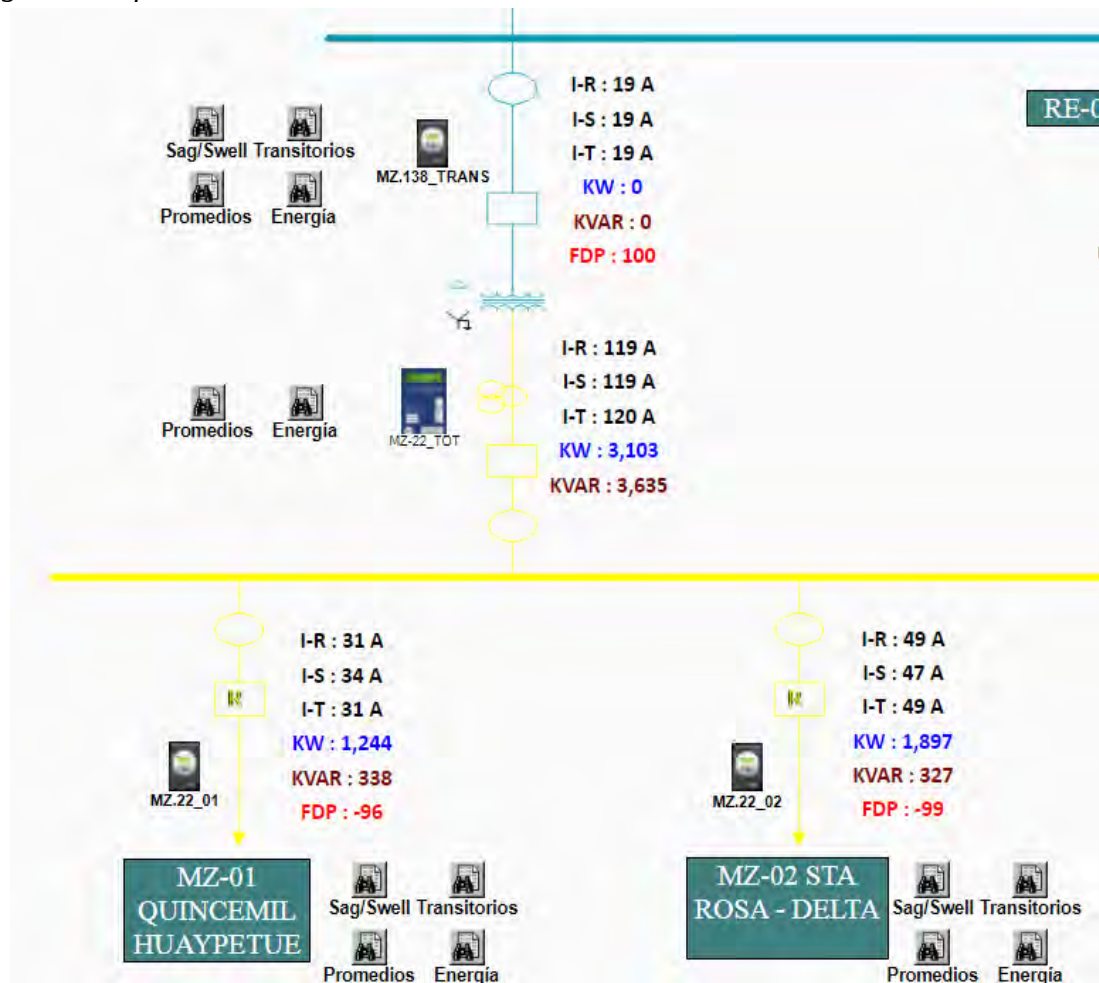
Tipo de Red Eléctrica	Aéreo en su mayoría
Tipo de Sistema	Trifásico y Bifilar
Tipo de Conductor	120,50,35 mm ² AAAC
Tensión nominal	22.9KV
Cantidad de Subestaciones	48

Nota. ELSE.S.A.A.

El alimentador MZ-02 presenta una demanda actual de 1,897 KW y 327 KVAR, tal como se aprecia en la figura siguiente.

Figura 3-4

Diagrama unifilar de la Subestación Mazuko, año 2023



Nota. Electro Sur Este.

3.5.1. Líneas Primarias y Redes Primarias Del Alimentador MZ-02

Las Líneas y redes Primarias que predominan en la zona está compuesta por tramos de conductor de tipo aéreo operando a niveles de tensión de 22.9 Kv, a 60 Hz. Los cables de estas líneas y redes primarias son desnudos de aleación de aluminio AAAC de 35 mm² a 120 mm². Las alturas de las estructuras son usualmente de 12 y 13 metros.

Las configuraciones de montaje de los cables en las estructuras tienen disposición vertical con ménsulas, y la distancia promedio entre estructuras es de aprox. 60m, se tienen instalados seccionadores del tipo Cut-Out y para las protecciones por sobrecarga y cortocircuitos se utilizan fusibles tipo K instalados en seccionadores del tipo Cut-Out.

Las subestaciones de distribución de la zona son del tipo aérea (monoposte y biposte), los transformadores empleados son de tipo monofásicos y trifásicos de refrigeración interna con aceite mineral y externa por aire, con tensiones de operación en el lado de alta de 22.9 kV y en el lado de baja 380/220 y 440/220 V.

Los transformadores en el lado de alta están protegidos para sobrecarga y cortocircuito con fusibles tipo K instalados en seccionadores tipo CUT-OUT y para sobretensiones están protegidos con descargadores; y en el lado de baja están protegidos para sobrecarga y cortocircuitito con interruptores termo magnéticos en caja moldeada de 50 A hasta 1000 A. tienen los siguientes equipamientos:

- Postes de Concreto de 12/300, 12/400, 13/300, 13/400 daN.
- Conductores de Aleación de aluminio de 35, 50, 70, 90 y 120 mm² AAAC.
- Aislador Porcelana, tipo Pin ANSI 56-4 y suspensión Polímeros de 25 kV.
- Seccionador automático tripolar y unipolar de 21 kV, 150 kV-BIL, 10 kA.
- Secc. Fusible Tipo Cut Out, 27/38 kV, 150 kV-BIL, 100 A.
- Seccionador fusible tripolar bajo carga de 27/38 kV, 100A, 150 kV-BIL.
- Pararrayos Oxido Metálico 21 kV clase distribución.
- Retenidas Cable de acero SM de 10 mmø, varilla de anclaje de 2,4 m x 16 mmø, bloque de anclaje de 0,4 x 0,4 x 0,20m.
- Puesta a tierra Compuesto por varilla de acero recubierto de cobre de 2,4 m x 16 mm ø, conductor bajado de Cu 16 mm²

3.5.2. Redes Secundarias Del Alimentador MZ-02

Las redes secundarias son predominantemente aéreas, transportan la energía en niveles de tensión 380/220V, 60Hz. Los cables son del tipo CPI de cobre temple duro de 10mm² a 35mm² y autoportantes de aleación de aluminio temple duro de 16 mm² a 70 mm². Las estructuras que soportan los cables son de 8 y 9 metros.

Las configuraciones de montaje de los cables son verticales con porta líneas de uno a cinco vías para el cable CPI y grapas de suspensión y anclaje para el cable autoportante.

Tabla 3-3

Las características de las redes secundarias del alimentador MZ-02

Tensión nominal del sistema	440/220 V y 380/220 V
Configuración	Trifásico - Bifásico
Tensión Máxima de Servicio	400/230 V
Frecuencia	60 Hz
Vano básico	50 m
Conexión del Neutro	Efectivo a Puesto a tierra
Secciones de fase	1x16, 1x16+16, 2x25 y 2x25+16mm ² de Al

Nota. ELSE.S.A.A.

Y presenta el siguiente Equipamiento para las Redes Secundarias:

- Postes de concreto armado centrifugado 8 m/200 daN, 8 m/300 daN, adicionalmente postes de concreto armado centrifugado 9 m/200 daN y 9m/300 daN.
- Cables autoportantes de aluminio, con cable portante de aleación de aluminio desnudo de 35, 25 y 16 mm² de sección.
- El alumbrado público consta de luminarias con lámparas de vapor de sodio de alta presión de 70 y 50 W soportadas por pastorales de A°G°.
- Puesta a tierra, conformado por conductor de cobre desnudo 16 mm² de sección y electrodo de acero recubierto de cobre de 16 mm ø x 2,40 m de longitud.
- Ferretería de acero forjado y galvanizado en caliente.
- Conexiones domiciliarias aérea, monofásica, con medidor de energía monofásico 220V-10^a, con cable de cobre 2x6 mm², caja porta medidor.

3.5.3. Descripción Técnica de las Estructuras del alimentador MZ - 02

3.5.3.1. Tipo y Configuración de las Estructuras

El alimentador MZ-02 emplea un sistema de distribución aéreo con estructuras de concreto armado centrifugado, diseñadas específicamente para las condiciones geográficas y climáticas de la región de Madre de Dios. La infraestructura consta de tres tipos principales de soportes:

Tabla 3-4

Diámetro de Base

Tipo de Poste	Diámetro Base (mm)	Importancia Técnica
PSEC-3	350	Garantiza estabilidad en suelos con resistividad media (300–600 Ω -m)
PSEC-4	380	Diseñado para cargas adicionales en vanos largos (>60 m)
Biposte	400	Resistencia a esfuerzos mecánicos en cambios de dirección (>45°)

Nota. ELSE.S.A.A.

Los diámetros mayores en PSEC-4 y biposte responden a la necesidad de soportar mayores cargas de viento y peso de conductores en zonas con alta resistividad.

Tabla 3-5

Resistencia del Concreto

Tipo de Poste	Resistencia (kg/cm ²)	Normativa	Aplicación
PSEC-3	210	NTP 399.012-2021	Zonas urbanas con bajo riesgo de inundación
PSEC-4	240	ASTM C39	Cruces de quebradas y áreas rurales
Biposte	260	IEC 60614	Puntos críticos con esfuerzos multidireccionales

Nota. ELSE.S.A.A.

La resistencia incrementada en PSEC-4 y biposte (240–260 kg/cm²) asegura durabilidad en condiciones climáticas extremas (humedad relativa del 85% y precipitaciones de 2,800 mm/año).

Tabla 3-6*Resistencia del Concreto*

Tipo de Poste	Peso (kg)	Transporte e Instalación
PSEC-3	1,200	Requiere grúa de 3 toneladas
PSEC-4	1,450	Necesita equipo especializado (pluma articulada)
Biposte	2,800	Montaje con equipo de izaje + anclajes temporales

Nota. ELSE.S.A.A.

El peso de los bipostes (2,800 kg) exige logística especial para su instalación en zonas de difícil acceso, como el tramo Km 25–Fin del alimentador.

3.5.3.2. Especificaciones técnicas de postes

La siguiente presenta las características técnicas fundamentales de los tres tipos de estructuras de soporte utilizadas en el alimentador MZ-02: postes PSEC-3, PSEC-4 y estructuras biposte. A continuación, se describe cada parámetro y su relevancia técnica:

Tabla 3-7*Tipo de estructuras en el alimentador MZ-02*

Tipo de Estructura	Altura (m)	Capacidad (daN)	Material Conductor	Cantidad	Aplicación
Monoposte PSEC-3	12	300	AAAC 35-120mm ²	28	Tramo urbano
Monoposte PSEC-3	13	400	AAAC 35-120mm ²	15	Cruces de quebradas
Biposte	12	500	AAAC 35-120mm ²	5	Cambios de dirección

Nota. ELSE.S.A.A.

3.5.3.3. Componentes de las estructuras

Las estructuras del alimentador MZ-02 están conformadas por un sistema integrado de componentes diseñados para garantizar la estabilidad mecánica y seguridad eléctrica de la red de distribución. A continuación, se detallan sus elementos principales:

Tabla 3-8*Componentes de las estructuras del alimentador MZ-02*

Componente	Especificación	Normativa	Parámetros Clave
Poste Principal	PSEC-4 (13m)	NTP 399.012-2021	- Diámetro base: 380mm - Diámetro punta: 210mm - Peso: 1,450kg
Conductores	AAAC 120mm ²	ASTM B399	- Carga de ruptura: 6,240daN - Coef. expansión térmica: 23x10 ⁻⁶ /°C
Aisladores	Porcelana ANSI 56-4	IEC 60383	- Tensión disruptiva: 110kV - Resistencia mecánica: 8,000daN

*Nota. ELSE.S.A.A.***3.6. Características físicas y eléctricas del terreno**

La efectividad de un sistema de puesta a tierra depende directamente de las propiedades físicas del terreno en el que se instala. En el caso del alimentador Mazuko 02, ubicado en la región de Madre de Dios, la heterogeneidad geológica representa una condición determinante para el diseño de un SPAT adecuado. Las características del terreno influyen significativamente en la resistividad y, por tanto, en el desempeño del sistema de protección. A continuación, se detallan estas propiedades:

Tabla 3-9*Componentes de las estructuras del alimentador MZ-02*

Nodo	Estratigrafía	Sales solubles	Granulometría	Higrometría (%)	Temp. (°C)	Compactación (SPT)	Estratificación
MT 9348	Franco arenoso	Baja	Muy fina	34.3	26.3	7	Estrato continuo
MT 9446	Arcilla inorgánica	Media	Muy fina	27.4	24.8	8	Capa doble
MT 3213	Franco arcilloso	Media	Gruesa	32.9	27	4	Capa doble
MT 3316	Franco arcilloso	Baja	Gruesa	25.1	25.9	6	Capa doble
MT 9786	Franco arenoso	Baja	Fina	22.5	24.7	9	Estrato continuo
MT 9394	Arena arcillosa saturada	Baja	Fina	23.1	25.5	7	Capa doble
MT 9439	Arcilla orgánica	Alta	Fina	31.6	27.1	5	Capa doble
MT 9429	Arcilla orgánica	Baja	Fina-media	22.8	26.5	5	Capa mixta
MT 7694	Franco arenoso	Media	Fina	27.6	25	8	Capa mixta
MT 9364	Arena arcillosa saturada	Media	Media	19.4	25.3	9	Capa doble
MT 7527	Franco arenoso	Alta	Media	25.1	24.2	5	Capa doble (40cm/1.2m)
MT 9084	Arena limosa	Baja	Fina	18.3	27	7	Capa doble
MT 9377	Franco arenoso	Baja	Fina	23.3	24.7	6	Capa mixta
MT 7402	Arena limosa	Alta	Gruesa	31	26.6	7	Estrato continuo
MT 3319	Limo arenoso	Media	Media	33.2	26.1	6	Capa mixta
MT 8359	Grava arenosa	Baja	Muy fina	22.4	26.5	5	Alta saturación
MT 6213	Arcilla orgánica	Alta	Gruesa	25.8	24.3	6	Estrato continuo
MT 9527	Arcilla orgánica	Alta	Media	31.5	25.4	9	Capa mixta
MT 3416	Arena arcillosa saturada	Alta	Media	20.4	27.6	4	Capa doble (40cm/1.2m)
MT 7411	Franco arcilloso	Alta	Gruesa	33.2	25.4	6	Capa intercalada

Nodo	Estratigrafía	Sales solubles	Granulometría	Higrometría (%)	Temp. (°C)	Compactación (SPT)	Estratificación
MT 3279	Grava arenosa	Media	Fina-media	29.1	27.7	6	Capa intercalada
MT 7948	Arena limosa	Baja	Fina-media	19.2	24.5	5	Alta saturación
MT 3339	Arena limosa	Alta	Fina-media	26.1	27.6	4	Capa mixta
MT 7316	Franco arcilloso	Media	Media	22	24.1	6	Capa doble
MT 3239	Arcilla inorgánica	Alta	Fina-media	22.3	27.3	9	Capa doble
MT 3269	Arena arcillosa saturada	Baja	Media	28.3	24.8	7	Estrato continuo
MT 3348	Arcilla inorgánica	Media	Fina	36.8	26.4	5	Capa doble (40cm/1.2m)
MT 9344	Limo arenoso	Alta	Fina	26.4	25.8	9	Alta saturación
MT 7518	Franco arcilloso	Alta	Muy fina	37	25.1	5	Capa doble (40cm/1.2m)
MT 8991	Franco arenoso	Media	Gruesa	28.6	26.8	8	Alta saturación

Nota. Informe de Estudios Geotécnicos (Código IG-2023-027), realizado en el Laboratorio de Mecánica de Suelos.

El análisis de las características físicas del terreno a lo largo del alimentador Mazuko 02 permite comprender las condiciones reales que afectan el desempeño de los sistemas de puesta a tierra. La estratigrafía predominante en los nodos evaluados es de tipo *arena limosa*, *franco arcilloso* y *franco arenoso*, los cuales presentan comportamientos eléctricos variados. En particular, los suelos arcillosos y limosos tienden a retener mayor humedad, lo que puede ser favorable para la conducción eléctrica; sin embargo, cuando estos suelos están compactados o secos, su resistividad aumenta, afectando negativamente la eficacia de los sistemas de puesta a tierra tradicionales.

En cuanto a la presencia de sales solubles, se observó un comportamiento que varía entre medio y alto en más del 50% de los nodos evaluados. Este factor es importante, ya que una mayor concentración de sales incrementa la conductividad del terreno, facilitando la disipación de corriente en el subsuelo. No obstante, debe tenerse cuidado con la corrosión de los electrodos de cobre, lo que sugiere la necesidad de evaluar el uso de materiales con recubrimientos o aleaciones resistentes a ambientes agresivos.

Respecto a la granulometría, los suelos presentan mayormente una textura fina a media, con valores de diámetro promedio (D50) entre 0.12 mm y 0.45 mm. Esta condición granulométrica influye directamente en la resistividad del terreno, siendo los suelos más finos usualmente menos conductivos que aquellos con distribución granulométrica más heterogénea y con mayor proporción de grava o arena gruesa. Por tanto, este parámetro también refuerza la necesidad de mejorar el sistema SPAT con técnicas como contrapesos horizontales.

El contenido de humedad del suelo (higrometría) varió entre 18.3% y 37.0%, con un promedio general aproximado de 27.1%. Este rango indica condiciones generalmente favorables para la conducción eléctrica, aunque se identificaron sectores con humedad relativamente baja, lo que justifica la implementación de configuraciones alternativas al

sistema de varilla vertical, especialmente en zonas donde la humedad natural es difícil de mantener constante.

En cuanto a la temperatura del terreno, se observó un rango estable entre 24.1 °C y 27.7 °C, siendo el promedio general de aproximadamente 25.9 °C. Este comportamiento térmico es típico de regiones tropicales como Madre de Dios, donde no se prevén fluctuaciones significativas de temperatura en el subsuelo, garantizando estabilidad en la resistividad del terreno durante todo el año.

El nivel de compactación del suelo, evaluado a través del ensayo SPT (Standard Penetration Test), mostró una media de 6.4 golpes por pie, lo que indica una consistencia media en la mayoría de los sectores. Esta compactación es ideal para la instalación de sistemas de contrapesos horizontales, pues no implica esfuerzos excesivos en la excavación ni afecta de forma significativa la continuidad del sistema.

Finalmente, respecto a la estratificación del suelo, se encontró que 43% de los nodos presentan una capa doble (por ejemplo, arena sobre arcilla), 20% un estrato continuo homogéneo, y 20% zonas con alta saturación. Estas condiciones pueden representar desafíos técnicos específicos, como la necesidad de modificar la profundidad de instalación del electrodo o el uso de contrapesos múltiples para superar capas de alta resistividad.

En conjunto, el análisis evidencia la necesidad de rediseñar el sistema de puesta a tierra del alimentador MZ 02, proponiendo soluciones como la implementación de contrapesos horizontales en paralelo, adaptadas a la geología variable y a los desafíos específicos de cada nodo. Esta intervención permitiría alcanzar niveles de resistencia por debajo de los 25 Ω , mejorando así la protección de las instalaciones eléctricas y del personal operativo.

Tabla 3-10*Resumen de las Condiciones físicas del Terreno – Alimentador MZ 02*

Parámetro Evaluado	Valor Promedio / Condición Predominante	Observación Técnica
Estratigrafía superficial	Franco arcilloso / Arena limosa	Suelos de mediana conductividad; mejoran con humedad pero sensibles a compactación.
Sales solubles	Media a Alta ($\approx 60\%$ de los nodos)	Favorecen la conductividad pero pueden afectar la durabilidad de electrodos de cobre.
Granulometría predominante	Fina a Media (D50 entre 0.12 mm y 0.45 mm)	Textura poco favorable para disipación; puede requerir extensiones o tratamientos.
Higrometría (contenido de humedad)	27.1% (rango: 18.3% - 37.0%)	En promedio favorable, aunque algunos nodos presentan bajo contenido de humedad.
Temperatura del terreno	25.9 °C (rango: 24.1 °C - 27.7 °C)	Estable durante el año; no se esperan grandes variaciones estacionales.
Compactación del terreno (SPT)	6.4 golpes/pie (rango: 4 – 9)	Suelo de consistencia media; permite instalación de contrapesos con esfuerzo moderado.
Tipo de estratificación	Capa doble (43%) / Alta saturación (17%)	Requiere adaptación del diseño SPAT según profundidad y heterogeneidad del subsuelo.
Resistencia PAT registrada	28.7 Ω a 113.5 Ω	Todos los nodos exceden el límite normativo (10 Ω); requiere rediseño del sistema PAT.
Nodos críticos ($R > 100 \Omega$)	MT 9439, MT 9527, MT 3348, MT 8991, MT 9377	Debe priorizarse el rediseño de estos puntos con contrapesos múltiples.

Nota. Informe de Estudios Geotécnicos (Código IG-2023-027), realizado en el Laboratorio de Mecánica de Suelos.

3.7. Análisis De La Resistividad Del Terreno

Según lo establecido por la norma IEEE 81-1983, para estimar la resistividad del terreno se utiliza el método de cuatro puntos con electrodos dispuestos a distancias equidistantes, conocido también como el método de Wenner

Figura 3-5

Telurómetro digital MTD20KWE



Nota. Elaboración propia.

El equipo requerido para medir las resistividades del suelo es el siguiente:

Telurómetro digital

El cual cuenta con las siguientes características:

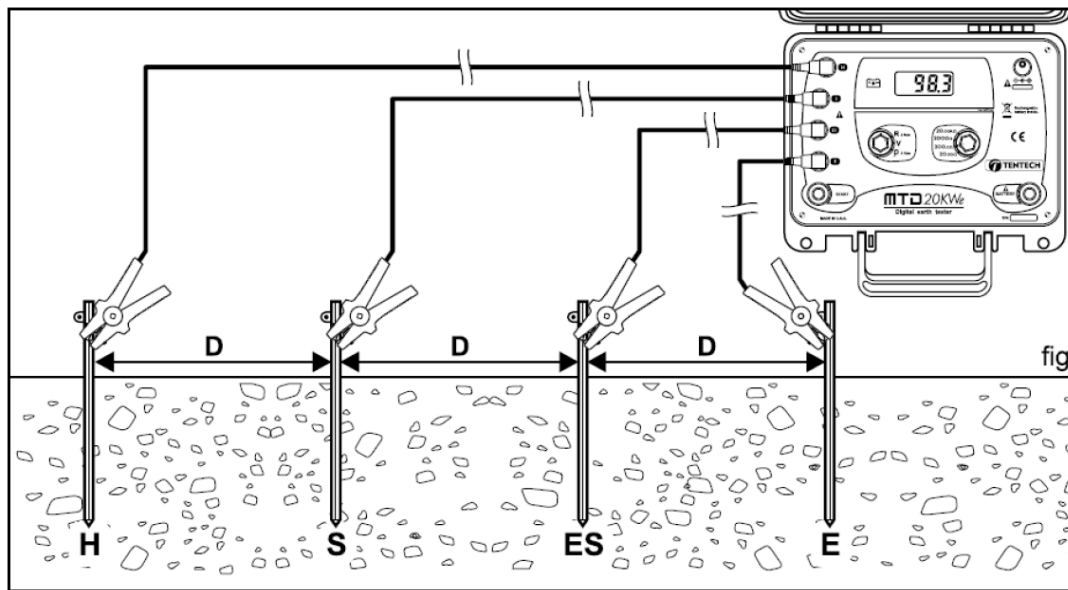
- Manejo de apagado automático
- Medición de resistencia/continuidad de puesta a tierra (3 bornes)
- Alimentación, Batería recargable interna
- Medición de resistividad específica del suelo (4 bornes)
- Escalas de medición Resistencias: 0-20; 0-200; 0-2.000 e 0-20k.
- Empaque robusto a prueba de polvo y humedad. Clasificación IP54 en su posición cerrada.

Con este equipo, las mediciones se realizan siguiendo las indicaciones del manual de operación, comenzando por insertar cuatro varillas alineadas en el terreno, con una separación uniforme entre ellas, tal como se muestra en la figura siguiente.

En esta medición, la distancia entre las varillas es crucial, ya que influye en el cálculo de la resistividad.

Figura 3-6

Esquema de instalación para la medición con el Telurómetro



Nota. Manual MEGABRAS MTD-20KWE.

Figura 3-7

Instalación de los electrodos para la medición con el Telurómetro



Nota. Elaboración Propia.

Así, ρ en función de las unidades de longitud en las que se midan a y b es:

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4 * b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (3-1)$$

Donde:

ρ = Resistividad específica del terreno en ohm-m

a = Distancia entre electrodos

b = Profundidad de enterrado de los electrodos en metros

R = Valor indicado en el display del telurómetro

Si la distancia entre electrodos a es mayor que la distancia enterrada b, se puede aplicar la siguiente fórmula simplificada:

$$\rho = 2\pi * a * R \quad (3-2)$$

Donde:

ρ = Resistividad específica del terreno en ohm-m

a = Distancia entre electrodos

Las mediciones de la resistividad del suelo se realizaron en los 30 nodos del alimentador MZ-02. En cada punto se llevaron a cabo 7 mediciones horizontales, con una profundidad de 0,25 m para la excavación del electrodo.

Las lecturas se registraron con un espaciamiento entre electrodos que varía de 2 m a 14 m, con incrementos de 2 m, resultando en un total de 7 mediciones.

Para el desarrollo de las mediciones, se aplicó el método de Wenner de cuatro puntos, ampliamente recomendado por la norma IEEE 81-1983, utilizando el telurómetro digital MTD-20KWE. En cada uno de los 30 nodos del alimentador MZ-02, se realizaron 7 mediciones sucesivas con separaciones equidistantes entre electrodos (2 m, 4 m, 6 m, 8 m, 10 m, 12 m y 14 m), manteniendo una profundidad constante de 0.25 m para la inserción de los electrodos en todos los casos. Este procedimiento se llevó a cabo en suelos naturales sin tratamiento previo, garantizando representatividad de las condiciones reales del subsuelo.

Durante cada medición, se registró el valor de resistencia eléctrica que luego fue convertido a resistividad ($\Omega\text{-m}$) utilizando las fórmulas indicadas en la normativa. En situaciones donde la distancia entre electrodos fue considerablemente mayor que la profundidad ($a \gg b$), se aplicó la fórmula simplificada de Wenner para una mejor aproximación.

Finalmente, para cada nodo se calculó el valor promedio de resistividad a partir de las siete lecturas obtenidas. Este promedio es el que se considera para el análisis técnico, ya que permite representar de forma global las condiciones del terreno, considerando la posible variabilidad en humedad, compactación y estratificación del suelo a diferentes profundidades. Esta estrategia facilita la toma de decisiones técnicas para el diseño del sistema de puesta a tierra (SPAT) en cada punto evaluado.

Usando el método de Wenner, las resistividades eléctricas obtenidas directamente con el telurómetro, en función de la profundidad de aterrizaje y el espaciamiento de los electrodos para los siete puntos de medición

Se obtuvieron las siguientes mediciones, las cuales se presentan de manera detallada en siguiente la tabla a continuación:

Tabla 3-11*Resultado de las mediciones realizadas a lo largo del alimentador MZ-02*

Nro.	NODO MT ALIMENTADOR	RESISTIVIDAD DEL TERRENO, FORMULA GENERAL (Ω -m)							RESISTIVIDAD DEL TERRENO (Ω -m)		
		2m	4m	6m	8m	10m	12m	14m	MAX.	MIN.	PROM.
1	NODO MT 9348	1026.852	1008.091	658.33	445.105	259.15	181.093	133.781	1026.852	133.781	530.343
2	NODO MT 9446	493.235	452.933	349.017	298.079	248.457	224.857	228.836	493.235	224.857	327.916
3	NODO MT 3213	745.722	781.878	608.795	574.004	347.211	271.64	272.842	781.878	271.64	514.585
4	NODO MT 3316	552.196	624.996	635.264	417.915	371.113	241.457	246.438	635.264	241.457	441.340
5	NODO MT 9786	944.41	969.124	1009.616	820.725	452.884	301.822	114.418	1009.616	114.418	659.000
6	NODO MT 9394	736.691	781.878	570.981	473.302	347.211	271.64	272.842	781.878	271.64	493.506
7	NODO MT 9439	1088.909	1128.536	729.797	699.882	553.524	279.185	220.034	1128.536	220.034	671.410
8	NODO MT 9429	624.446	587.041	499.136	443.091	289.342	271.64	246.438	624.446	246.438	423.019
9	NODO MT 7694	533.359	478.236	349.017	298.079	248.457	224.857	228.836	533.359	224.857	337.263
10	NODO MT 9364	829.584	677.628	398.553	322.752	274.875	296.54	146.983	829.584	146.983	420.988
11	NODO MT 7527	763.785	716.089	617.114	458.196	365.452	218.066	220.034	763.785	218.066	479.819
12	NODO MT 9084	794.749	847.667	695.765	478.337	446.594	430.096	316.849	847.667	316.849	572.865
13	NODO MT 9377	828.294	748.984	684.421	644.496	515.155	316.913	343.253	828.294	316.913	583.074
14	NODO MT 7402	934.088	900.805	729.797	684.777	455.4	301.822	290.445	934.088	290.445	613.876
15	NODO MT 3319	725.467	705.968	689.337	534.73	374.258	300.313	228.836	725.467	228.836	508.416
16	NODO MT 8359	737.981	741.393	617.114	407.845	340.292	218.066	132.02	741.393	132.02	456.387
17	NODO MT 6213	912.155	943.821	882.941	818.208	723.985	422.551	272.842	943.821	272.842	710.929
18	NODO MT 9527	1206.316	1249.993	992.6	718.512	398.789	260.321	239.397	1249.993	239.397	723.704

Nro.	NODO MT ALIMENTADOR	RESISTIVIDAD DEL TERRENO, FORMULA GENERAL (Ω -m)							RESISTIVIDAD DEL TERRENO (Ω -m)		
	MZ - 02	2m	4m	6m	8m	10m	12m	14m	MAX.	MIN.	PROM.
19	NODO MT 3416	1269.534	1002.019	654.171	679.742	457.287	256.549	220.034	1269.534	220.034	648.477
20	NODO MT 7411	536.714	589.572	561.528	458.7	334.002	282.958	153.144	589.572	153.144	416.660
21	NODO MT 3279	737.981	774.287	684.421	644.496	452.255	316.913	343.253	774.287	316.913	564.801
22	NODO MT 7948	983.115	774.287	697.656	673.196	515.155	369.732	325.651	983.115	325.651	619.827
23	NODO MT 3339	1087.619	1234.305	814.499	574.508	400.676	371.995	234.996	1234.305	234.996	674.085
24	NODO MT 7316	294.16	275.808	264.693	166.159	119.511	90.547	70.411	294.16	70.411	183.041
25	NODO MT 3239	866.999	981.776	803.533	617.81	335.889	260.321	239.397	981.776	239.397	586.532
26	NODO MT 3269	753.463	647.77	578.544	533.723	455.4	301.822	281.644	753.463	281.644	507.481
27	NODO MT 3348	1205.025	1179.143	729.797	699.882	553.524	279.185	272.842	1205.025	272.842	702.771
28	NODO MT 9344	1011.499	865.886	847.019	685.784	460.432	347.095	286.044	1011.499	286.044	643.394
29	NODO MT 7518	513.49	478.236	323.682	216.51	182.411	98.092	61.61	513.49	61.61	267.719
30	NODO MT 8991	1037.302	1052.626	729.797	699.882	553.524	256.549	158.425	1052.626	158.425	641.158

Nota. Mediciones tomadas en campo con el Telurómetro, 2023.

A partir de los datos obtenidos para la resistividad del terreno en diferentes distancias (2m, 4m, 6m, 8m, 10m, 12m, 14m) y sus valores máximos, mínimo y promedio, se ha seleccionado el valor promedio para su análisis. El valor promedio proporciona una medida central que refleja de manera más fiel las condiciones generales del terreno al integrar las variaciones en las mediciones obtenidas a diferentes distancias. Esto es especialmente importante en estudios de resistividad del terreno, donde la variabilidad puede ser considerable debido a factores como la composición del suelo, la humedad y otras condiciones ambientales.

Esta información se presenta en la tabla resumen a continuación, la cual proporciona una visión consolidada de los resultados.

Tabla 3-12

Resumen de la resistividad del terreno para los 30 nodos MT del alimentador MZ-02

Nro.	NODO MT ALIMENTADOR MZ - 02	RESISTIVIDAD DEL TERRENO (Ω-m)
1	NODO MT 9348	530.343
2	NODO MT 9446	327.916
3	NODO MT 3213	514.585
4	NODO MT 3316	441.340
5	NODO MT 9786	659.000
6	NODO MT 9394	493.506
7	NODO MT 9439	671.410
8	NODO MT 9429	423.019
9	NODO MT 7694	337.263
10	NODO MT 9364	420.988
11	NODO MT 7527	479.819
12	NODO MT 9084	572.865
13	NODO MT 9377	583.074
14	NODO MT 7402	613.876
15	NODO MT 3319	508.416
16	NODO MT 8359	456.387
17	NODO MT 6213	710.929
18	NODO MT 9527	723.704
19	NODO MT 3416	648.477
20	NODO MT 7411	416.660

Nro.	NODO MT ALIMENTADOR MZ - 02	RESISTIVIDAD DEL TERRENO (Ω-m)
21	NODO MT 3279	564.801
22	NODO MT 7948	619.827
23	NODO MT 3339	674.085
24	NODO MT 7316	183.041
25	NODO MT 3239	586.532
26	NODO MT 3269	507.481
27	NODO MT 3348	702.771
28	NODO MT 9344	643.394
29	NODO MT 7518	267.719
30	NODO MT 8991	641.158

Nota. Elaboración propia.

La tabla anterior proporciona los resultados de resistividad medidos en 30 puntos diferentes a lo largo del alimentador MZ-02. Cada fila de la tabla muestra el número del nodo, con su código técnico del nodo y el valor correspondiente de resistividad del terreno en ohmios-metro (Ω -m).

Los valores de resistividad varían significativamente, desde un mínimo de 183.041 Ω -m en el nodo MT 7316 hasta un máximo de 723.704 Ω -m en el nodo MT 9527. Esta variabilidad indica diferencias en las condiciones del terreno, como composición del suelo y niveles de humedad, a lo largo del alimentador. Los nodos con los valores más altos, como el MT 9527 y el MT 6213, presentan resistividades superiores a los valores promedio, mientras que los nodos con los valores más bajos, como el MT 7316 y el MT 7518, muestran resistividades notablemente menores.

El análisis de la resistividad del terreno forma parte fundamental del diseño de los sistemas de puesta a tierra, ya que determina la capacidad del suelo para disipar la corriente eléctrica de falla. En la presente investigación, se aplicó el método de Wenner, conforme a la norma IEEE 81-1983, realizando mediciones en campo en 30 nodos estratégicos del alimentador MZ-02.

Los valores de resistividad obtenidos muestran una amplia variabilidad, registrándose un mínimo de $183.041 \Omega \cdot m$ en el nodo MT 7316 y un máximo de $723.704 \Omega \cdot m$ en el nodo MT 9527. Esta diferencia se debe a múltiples factores que influyen directamente en la resistividad del suelo, como:

- La composición geológica del terreno (tipo de suelo: arenoso, arcilloso, rocoso, etc.),
- El contenido de humedad y drenaje natural,
- La compactación y densidad del terreno,
- La presencia de minerales o sales disueltas, que afectan la conductividad,
- La profundidad de instalación de los electrodos y su correcta ejecución en campo.

El valor máximo registrado en el nodo MT 9527 sugiere un tipo de suelo poco conductor, probablemente seco, rocoso o con baja humedad superficial. Este tipo de terreno presenta alta resistencia al paso de corriente, lo cual implica mayor riesgo eléctrico en caso de falla si no se adoptan medidas correctivas en el diseño del sistema de puesta a tierra. En contraste, el valor mínimo, observado en el nodo MT 7316, indica un suelo más favorable eléctricamente, posiblemente húmedo o con buena capacidad de conducción, lo cual reduce los niveles de tensión de paso y contacto en condiciones normales de operación.

Dado que la resistividad puede variar significativamente incluso dentro de un mismo tramo de red, se optó por considerar el valor promedio de resistividad en cada nodo, obtenido a partir de siete mediciones horizontales con distancias crecientes entre electrodos (de 2 m a 14 m). Este criterio permite integrar las variaciones naturales del suelo a distintas profundidades y distancias, brindando una medida más representativa del comportamiento general del terreno.

El valor promedio proporciona además una base más estable y conservadora para el diseño del sistema de puesta a tierra, evitando que el diseño se vea condicionado únicamente por valores extremos o atípicos que podrían no representar la totalidad del terreno evaluado.

Además, este promedio permite comparar de manera uniforme todos los nodos, priorizando aquellos con valores significativamente superiores al resto, los cuales requieren un tratamiento más detallado y específico en su solución de puesta a tierra.

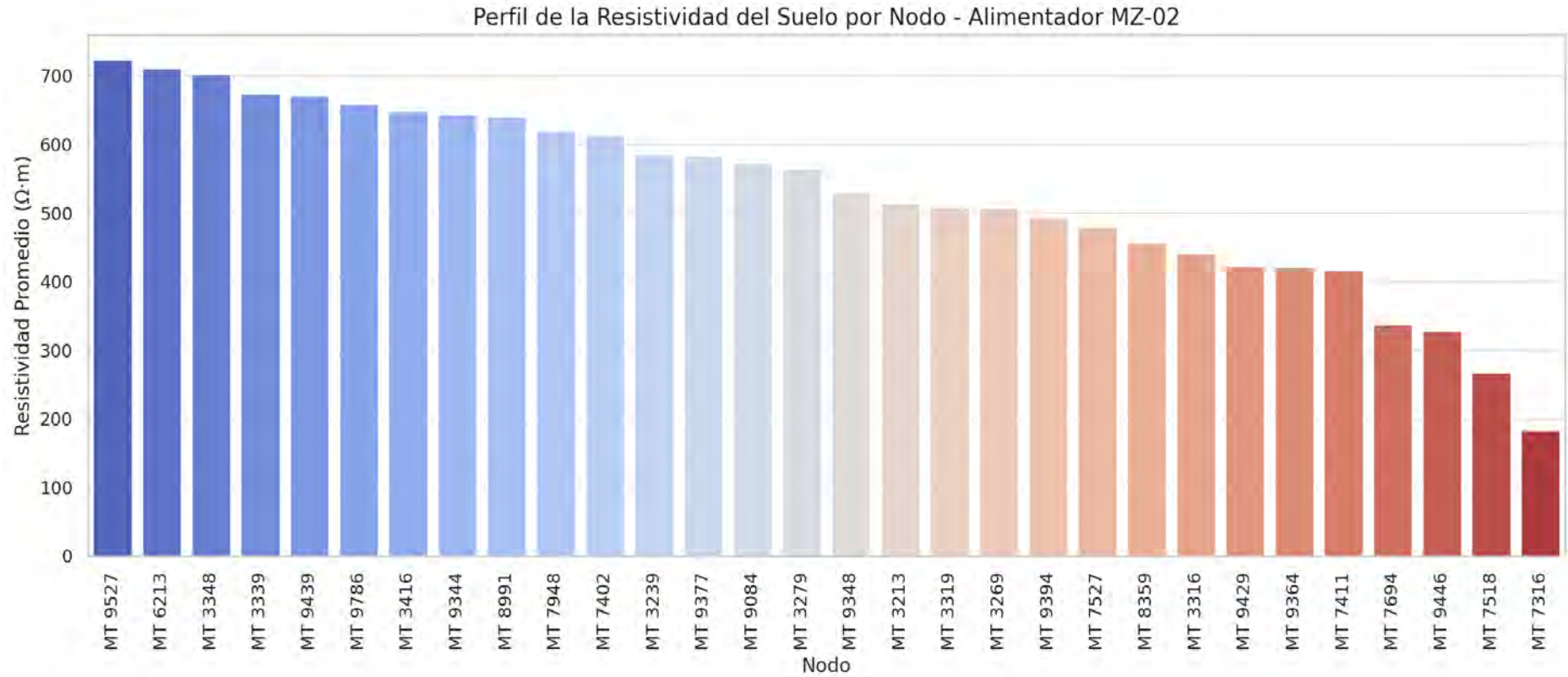
En síntesis, la utilización del promedio como valor de diseño responde a la necesidad de capturar una visión integral del comportamiento eléctrico del terreno, minimizando el efecto de valores aislados, y asegurando una base técnica coherente para la toma de decisiones en el diseño del SPAT. Esta elección está respaldada por la práctica común en estudios de resistividad y la normativa técnica vigente que recomienda considerar una muestra amplia para evitar subdimensionamientos.

3.8. Análisis del Perfil de Resistividad del Suelo por Nodo - Alimentador MZ-02

La resistividad del terreno es uno de los parámetros más determinantes para el diseño de un sistema de puesta a tierra eficiente.

Figura 3-8

Perfil de resistividad del suelo por nodo alimentador MZ 02



Nota. Elaboración Propia.

En base a las mediciones promedio realizadas en 30 nodos distribuidos a lo largo del alimentador MZ-02, se observan las siguientes consideraciones técnicas:

Tabla 3-13

Clasificación de Nodos según Rangos de Resistividad Promedio ($\Omega \cdot m$)

Rango de Resistividad ($\Omega \cdot m$)	Nodos	Observación técnica
> 700	MT 9527, MT 3348, MT 6213	Alta resistividad. Requiere SPAT extendido o contrapesos múltiples.
600 – 700	MT 9786, MT 9439, MT 3339, MT 9344, MT 8991	Resistencia elevada, intervención prioritaria.
500 – 599	MT 9348, MT 3213, MT 9394, MT 9084, MT 9377, MT 3319, MT 3239	Moderadamente alta, factible con mejoras puntuales.
400 – 499	MT 3316, MT 9429, MT 7527, MT 8359, MT 3269	Condiciones adecuadas pero aún mejorables.
300 – 399	MT 9446, MT 7694, MT 7411	Resistividad aceptable; SPAT estándar con verificación.
< 300	MT 7518, MT 7316	Condiciones ideales. Bajo valor de resistividad.

Nota. Elaboración propia.

Zonas críticas ($R > 700 \Omega \cdot m$):

- Presentan condiciones secas o con alta compactación del suelo.
- Recomendación: aplicar sistemas de puesta a tierra horizontales (contrapesos múltiples) y/o electrodos químicos.
- Materiales con tratamiento anticorrosivo por presencia de sales solubles.

Zonas intermedias ($400\text{--}700 \Omega \cdot m$):

- Viables para diseño optimizado de SPAT.
- Posible empleo de varillas múltiples o contrapesos simples.

Zonas favorables ($< 400 \Omega \cdot m$):

- Requieren menor intervención.
- Se puede instalar SPAT convencional de varilla vertical con seguridad operativa.

3.9. Análisis del Potencial, Tensión de Paso y Tensión de Contacto

Para el diseño adecuado del Sistema de Puesta a Tierra (SPAT) en el alimentador MZ-02, es indispensable evaluar parámetros críticos como el potencial de tierra, la tensión de paso y la tensión de contacto, ya que estos determinan el nivel de seguridad eléctrica para las personas y equipos ante fallas o descargas atmosféricas. Estos valores se relacionan directamente con la resistividad del terreno y la geometría del electrodo.

3.9.1. Fundamentos Normativos

Según la norma IEEE Std 80-2013, los valores máximos permitidos de tensión de contacto y paso para condiciones normales son:

Tensión de Contacto Segura (V_s c):

$$V_{sc} = 116/\sqrt{t} \quad (3-3)$$

Donde:

V_s c = Tensión de contacto segura (V)

t = Tiempo de despeje de la falla (segundos)

116 = Constante de seguridad

Donde t es el tiempo de despeje de la falla (en segundos). Para t = 0.5 s, V_s c $\approx$ 164 V.

Tensión de Paso Segura (V_s p):

$$V_{sp} = t116 \times (0.116 + 1000\rho_s) \quad (3-4)$$

3.9.2. Generalidades para el Cálculo

Para los cálculos de potencial de tierra, tensiones de paso y contacto, se utilizaron las siguientes consideraciones:

- Corriente de falla a tierra: $I^f = 400$ A
- Tiempo de despeje de falla: t = 0.5 s
- Longitud del contrapeso horizontal por electrodo: L = 15 m
- Profundidad del electrodo: d = 0.5 m

- Número de electrodos por estructura: 2
- Resistividad media del terreno por nodo: se toma el valor promedio ya calculado.

Tabla 3-14

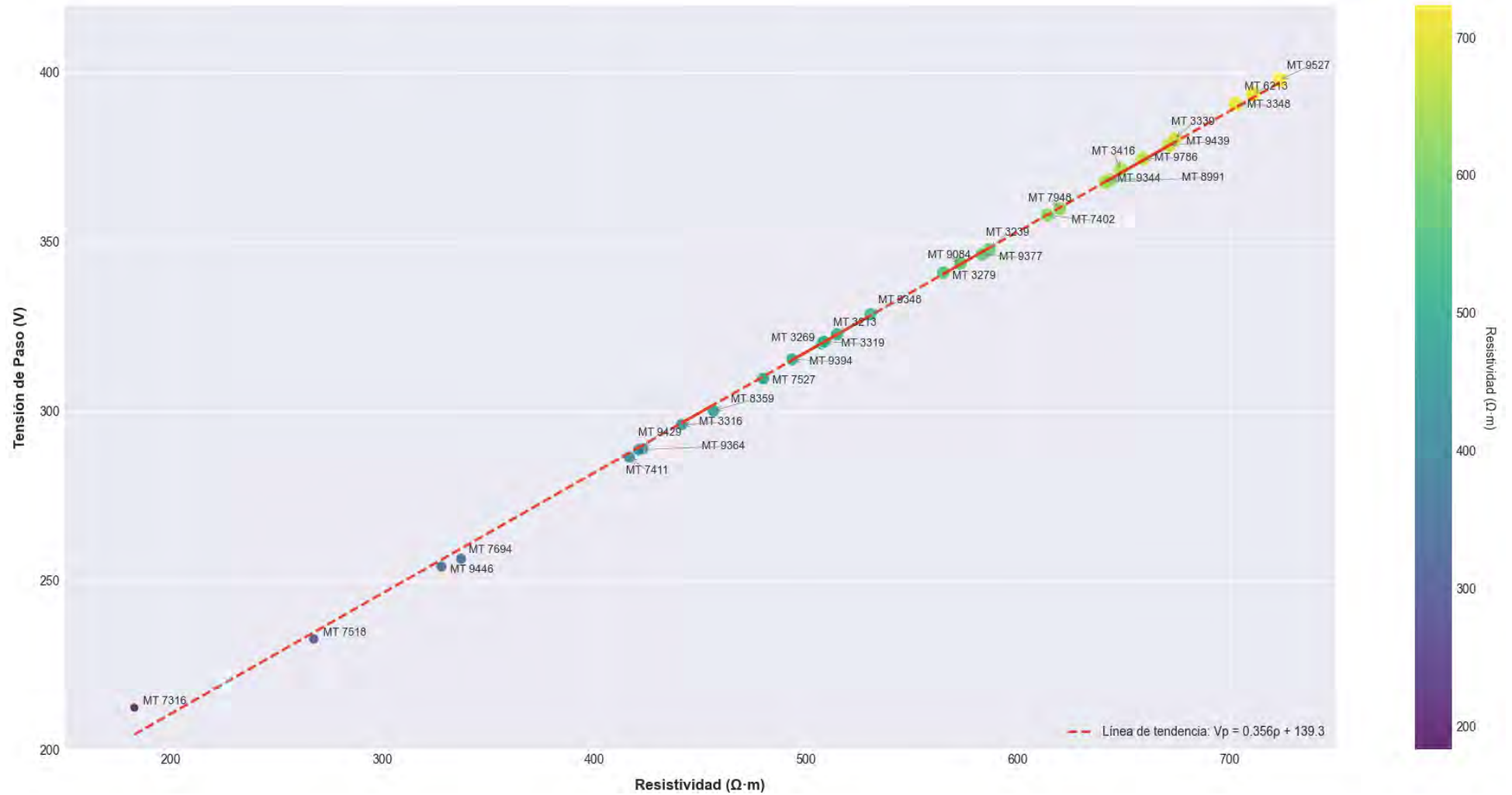
Cálculo de Tensiones de Contacto (V_c) y Paso (V_p) por Nodo

Nodo	ρ ($\Omega \cdot m$)	V_c (V)	V_p (V)
MT 7316	183.041	164	212.4
MT 7518	267.719	164	232.7
MT 9446	327.916	164	254.1
MT 7694	337.263	164	256.4
MT 7411	416.66	164	286.4
MT 9429	423.019	164	288.9
MT 9364	420.988	164	288.6
MT 8359	456.387	164	300.1
MT 3316	441.34	164	296
MT 7527	479.819	164	309.6
MT 3269	507.481	164	320
MT 9394	493.506	164	315.3
MT 3213	514.585	164	322.7
MT 9348	530.343	164	328.6
MT 3319	508.416	164	320.5
MT 3239	586.532	164	347.7
MT 3279	564.801	164	340.9
MT 9084	572.865	164	343.6
MT 9377	583.074	164	346.3
MT 7402	613.876	164	357.9
MT 7948	619.827	164	359.8
MT 9786	659	164	374.6
MT 9439	671.41	164	378.5
MT 9344	643.394	164	368.3
MT 8991	641.158	164	367.6
MT 3339	674.085	164	380.3
MT 3416	648.477	164	371.4
MT 6213	710.929	164	393.6
MT 3348	702.771	164	390.7
MT 9527	723.704	164	397.8

Nota. Elaboración propia.

Figura 3-9

Relación entre la resistividad del terreno y la tensión de paso



Nota. Elaboración Propia.

La Tabla anterior presenta el cálculo de las tensiones de contacto (V_c) y tensiones de paso (V_p) para cada uno de los 30 nodos pertenecientes al alimentador MZ-02, utilizando como base los valores de resistividad eléctrica del suelo previamente determinados mediante el método de Wenner. En este análisis, se ha considerado una tensión de contacto constante de referencia de 164 voltios, en línea con los criterios de diseño utilizados en sistemas de puesta a tierra en zonas tropicales. A partir de estos datos, se calcularon las tensiones de paso, que aumentan proporcionalmente con la resistividad del terreno, dado que su valor depende directamente de la capacidad del suelo para disipar corriente eléctrica.

Se observa que los nodos con menor resistividad, como el nodo MT 7316 ($\rho = 183.04 \Omega \cdot m$), presentan tensiones de paso moderadas ($V_p = 212.4 \text{ V}$), dentro de límites que pueden considerarse aceptables, siempre que el sistema de puesta a tierra cuente con una correcta implementación de electrodos o contrapesos. Por otro lado, nodos como MT 9527 y MT 3348, con resistividades superiores a $700 \Omega \cdot m$, alcanzan tensiones de paso que superan los 390 V. Estos valores representan un riesgo eléctrico importante, tanto para las personas como para los equipos eléctricos, y exigen la implementación de medidas correctivas, tales como contrapesos horizontales, tratamientos químicos del terreno, o incluso el rediseño completo del sistema de tierras en dichas ubicaciones.

Complementando este análisis, se desarrolló una gráfica de dispersión que relaciona la resistividad del terreno con la tensión de paso en cada nodo. Esta visualización permite identificar con claridad la tendencia creciente entre ambas variables: a mayor resistividad del suelo, mayor será la tensión de paso generada ante una falla eléctrica a tierra. Aunque la relación no es estrictamente lineal, el comportamiento es claramente proporcional.

3.10. Conclusiones del capítulo

El presente capítulo ha permitido caracterizar las condiciones técnicas del sistema de puesta a tierra del alimentador MZ-02 en la región de Madre de Dios, identificando los

principales factores que influyen en su desempeño. Los resultados de las mediciones de resistividad del terreno muestran una variabilidad significativa, con valores que oscilan entre $183.04 \Omega \cdot m$ y $723.70 \Omega \cdot m$. Esta dispersión se debe a las diferencias en la composición del suelo, el contenido de humedad, la presencia de sales solubles y la estratificación geológica. Los nodos con resistividades superiores a $500 \Omega \cdot m$, que representan más del 50% de los puntos evaluados, requieren medidas correctivas específicas para garantizar la seguridad eléctrica y el cumplimiento normativo.

Un hallazgo clave es la relación directa entre la resistividad del terreno y las tensiones de paso calculadas. Los nodos con mayores valores de resistividad, como MT 9527 ($723.70 \Omega \cdot m$) y MT 3348 ($702.77 \Omega \cdot m$), presentan tensiones de paso que superan los 390 V, muy por encima del límite seguro de 164 V establecido por la norma IEEE Std 80-2013. Estas condiciones incrementan el riesgo de descargas eléctricas para el personal operativo y los usuarios, además de comprometer la integridad de los equipos. Por ello, se justifica la implementación de sistemas de puesta a tierra optimizados, como contrapesos horizontales, electrodos profundos o tratamientos químicos del suelo en las zonas críticas.

Adicionalmente, el análisis geotécnico reveló que la estratigrafía predominante (suelos franco-arcillosos y arenosos) y el contenido de humedad (promedio del 27.1%) son determinantes en el comportamiento eléctrico del terreno. La presencia de sales solubles en más del 60% de los nodos, aunque favorece la conductividad, también plantea desafíos por su potencial efecto corrosivo en los electrodos de cobre. Estos factores deben ser considerados en el diseño de soluciones técnicas duraderas y eficientes.

CAPÍTULO IV

4. ANÁLISIS DE LAS DIFERENTES CONFIGURACIONES PARA SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA

4.1. Introducción

Este capítulo proporciona un análisis detallado de diversas configuraciones para sistemas de puesta a tierra, evaluando cómo diferentes disposiciones y tratamientos afectan la resistencia del sistema. Comienza con el estudio de electrodos verticales, donde se considera cómo la longitud y el diámetro del electrodo influyen en su resistencia en el terreno.

Luego, se examinan los contrapesos lineales, tanto sin tratamiento como con cemento conductivo. La resistencia de estos contrapesos se analiza en función de la longitud del cable, su diámetro y la profundidad de enterramiento, destacando cómo el uso de cemento conductivo mejora la conductividad del sistema.

Finalmente, se analiza la disposición de contrapesos paralelos, tanto sin tratamiento como con cemento conductivo. Se evalúa cómo la configuración de los contrapesos en paralelo contribuye a la reducción de la resistencia del sistema, comparando el impacto de cada método en la mejora del rendimiento del sistema de puesta a tierra.

4.2. Análisis De Requisitos Y Parámetros Iniciales

En esta parte se establece los lineamientos normativos y los parámetros eléctricos que guiarán el diseño del Sistema de Puesta a Tierra para las estructuras del alimentador MZ-02. El cumplimiento de estos requisitos garantiza la seguridad de las personas, la protección de los equipos eléctricos y el adecuado funcionamiento del sistema.

4.2.1. Requisitos Normativos

El diseño del SPAT debe alinearse con las normas, las cuales establecen los criterios técnicos, límites de seguridad y metodologías de cálculo para sistemas de puesta a tierra en instalaciones eléctricas de media y alta tensión.

La norma IEEE Std 80, proporciona los fundamentos para el diseño de sistemas de puesta a tierra seguros en instalaciones eléctricas de alta potencia. Especifica los límites máximos admisibles de tensión de paso (V_p) y tensión de contacto (V_c). Algunos criterios clave incluyen:

- Tensión de contacto segura: generalmente $\leq 100 \text{ V}$
- Tensión de paso segura: generalmente $\leq 300 \text{ V}$
- Resistencia del SPAT recomendada: $\leq 10 \Omega$

4.2.2. Parámetros del Sistema

Los parámetros eléctricos y físicos del sistema determinan las condiciones bajo las cuales debe operar el SPAT. Estos factores definen la intensidad de corriente que debe disiparse, el tiempo durante el cual se presenta la falla, y las características geotécnicas del terreno que afectan directamente la eficacia de las soluciones propuestas.

a) Corriente de Falla a Tierra (I_{falla})

Se asume una corriente de falla típica de **3000 A**, valor representativo para sistemas de media tensión. Este valor es utilizado para estimar las tensiones inducidas durante fallas fase-tierra y establecer los requerimientos de disipación de energía por parte del sistema de tierra.

b) Tiempo de Despeje de Falla (t)

El tiempo que transcurre entre el inicio de la falla y su eliminación por parte del sistema de protección (reles y reconectadores) es fundamental para calcular tensiones de paso y contacto. Se adopta un valor conservador de **1 segundo**, según las condiciones del sistema eléctrico rural donde las protecciones pueden no ser instantáneas.

c) Tensión del Sistema (V)

El alimentador MZ-02 opera en un nivel de tensión de **10.5 kV**, correspondiente a media tensión según la clasificación nacional. Esta tensión se considera para determinar el tipo

de aislamiento requerido, la configuración del equipamiento y la separación mínima entre conductores y partes activas a tierra.

d) Configuración de la Subestación o Estructura

Las estructuras evaluadas corresponden a postes de distribución con equipos como transformadores monofásicos, seccionadores, pararrayos y cajas de puesta a tierra. La topología lineal del alimentador y su dispersión geográfica implican que cada punto de puesta a tierra se diseña localmente, tomando en cuenta las condiciones del terreno y el espacio disponible para la instalación de electrodos o contrapesos.

e) Resistividad del Terreno (ρ)

Los valores de resistividad fueron obtenidos mediante mediciones in situ usando el método de Wenner. Se registraron valores que varían entre:

- **183.04 $\Omega \cdot m$** (Nodo MT 7316, suelos más húmedos y conductivos)
- **723.70 $\Omega \cdot m$** (Nodo MT 9527, suelos secos o rocosos)

Estos valores indican una alta variabilidad en las condiciones del terreno, lo cual obliga a diseñar soluciones de puesta a tierra específicas por nodo. A mayor resistividad, mayor será la resistencia del sistema si no se implementan medidas adicionales como contrapesos con tratamiento conductivo.

4.3. Valores De La Resistencia Según Normativa Y Requerimientos

La función principal de los sistemas de puesta a tierra es asegurar la protección de las personas. Este aspecto es crucial en el proceso de diseño y requiere establecer un valor de resistencia objetivo adecuado.

El valor máximo de resistencia utilizado en el proyecto fue de 10 Ω , que se alineó con las especificaciones iniciales. Además, se consideraron los límites de resistencia recomendados por las normas técnicas como IEC 603644442, ANSI/IEEE 80, NTC 2050 y NTC 4552 para garantizar el cumplimiento de los estándares de seguridad.

Figura 4-1

Valores máximos de resistencia puesta a tierra permitidos por las Normas

APLICACIÓN	VALORES MÁXIMOS DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA
Estructuras de líneas de transmisión o torrecillas metálicas de distribución con cable de guarda.	20 Ω
Subestaciones de alta y extra alta tensión.	1 Ω
Subestaciones de media tensión.	10 Ω
Protección contra rayos.	10 Ω
Neutro de acometida en baja tensión.	25 Ω

Nota. IEEE 80, 2000.

Los valores de resistencia obtenidos en todos los nodos de la tabla anterior superan los 10 ohmios, lo que indica que no cumplen con el límite recomendado para sistemas de puesta a tierra.

En algunos nodos, como el nodo MT 9527, la resistencia llega a alcanzar hasta 113,561 ohmios, lo que representa una resistencia significativamente alta para garantizar la seguridad y funcionalidad del sistema. Esto resalta la necesidad de explorar otras configuraciones para reducir la resistencia.

Como se mencionó en el planteamiento del problema, Electro Sur, en sus proyectos de licitación, generalmente ofrece únicamente la configuración vertical para los sistemas de puesta a tierra. Esta opción puede causar inconvenientes durante la ejecución, ya que, como se detalla en la tabla anterior, los valores de resistencia obtenidos con esta configuración tienden a superar los 10 ohmios. Dado que el estándar requerido para una puesta a tierra efectiva suele ser de 10 ohmios o menos, los valores elevados pueden comprometer la eficacia del sistema y plantear problemas de cumplimiento normativo.

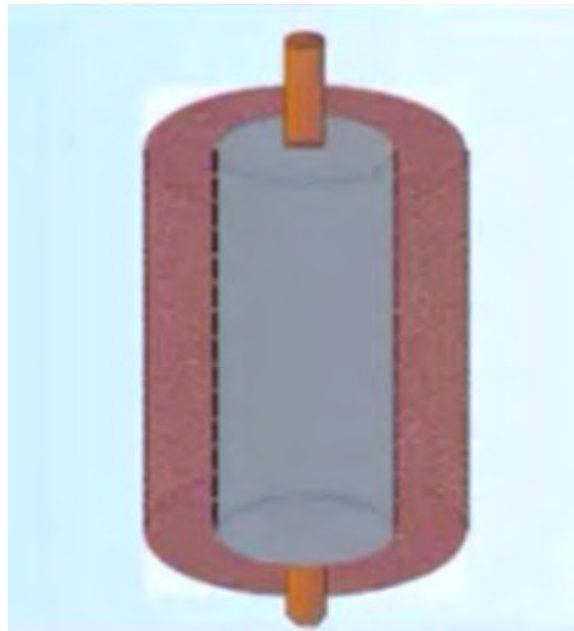
Para abordar estos desafíos, es necesario explorar y aplicar otras configuraciones que puedan cumplir con los requisitos técnicos del proyecto sin incurrir en costos elevados. Una alternativa a considerar es la implementación de una malla a tierra, que, aunque efectiva, puede ser costosa. Por lo tanto, es importante buscar opciones que ofrezcan un equilibrio entre costo y rendimiento, asegurando que el sistema de puesta a tierra sea efectivo y cumpla con los estándares requeridos.

4.4. Electrodo En Disposición Vertical

Esta configuración está constituida por una varilla de cobre vertical, con una longitud de 2,40 metros y un diámetro de 19,05 milímetros. La varilla está diseñada para ser conectada a través de un conector compatible al conductor que se dirige hacia el pararrayos, garantizando una conexión segura y eficiente. Además, se establece una separación mínima de 1,5 metros desde el poste para asegurar un adecuado espacio de instalación y prevenir posibles interferencias.

Figura 4-2

Puesta a tierra con electrodo en disposición vertical



Nota. (Samane Mogollon, 2020).

La resistencia característica de un electrodo para puesta a tierra se determina utilizando la siguiente ecuación:

$$R = \frac{0.4 * \rho}{2\pi * L} * (\ln\left(\frac{8 * L}{d}\right) - 1) \quad (3-1)$$

Donde:

R = Resistencia propia de un electrodo en ohm.

ρ = Resistividad específica del terreno en ohm-m

L = Longitud del electrodo en metros.

d = Diámetro del electrodo en metros.

Aplicando esta ecuación, se obtienen los niveles de resistencia para esta configuración de puesta a tierra, los cuales se presentan en la tabla siguiente:

Tabla 4-1*Valores de la resistencia para una configuración de Electrodo en disposición vertical*

Nro.	NODO MT ALIMENTADOR MZ - 02	RESISTIVIDAD DEL TERRENO (Ω -m)	ELECTRODO SPAT		Valor de la resistencia resultante (Ω)
			Longitud (m)	Diámetro (mm)	
1	NODO MT 9348	530.343	2.4	19.05	83.219
2	NODO MT 9446	327.916	2.4	19.05	51.455
3	NODO MT 3213	514.585	2.4	19.05	80.747
4	NODO MT 3316	441.340	2.4	19.05	69.253
5	NODO MT 9786	659.000	2.4	19.05	103.408
6	NODO MT 9394	493.506	2.4	19.05	77.439
7	NODO MT 9439	671.410	2.4	19.05	105.355
8	NODO MT 9429	423.019	2.4	19.05	66.379
9	NODO MT 7694	337.263	2.4	19.05	52.922
10	NODO MT 9364	420.988	2.4	19.05	66.06
11	NODO MT 7527	479.819	2.4	19.05	75.291
12	NODO MT 9084	572.865	2.4	19.05	89.892
13	NODO MT 9377	583.074	2.4	19.05	91.494
14	NODO MT 7402	613.876	2.4	19.05	96.327
15	NODO MT 3319	508.416	2.4	19.05	79.779
16	NODO MT 8359	456.387	2.4	19.05	71.614

Nro.	NODO MT ALIMENTADOR MZ - 02	RESISTIVIDAD DEL TERRENO (Ω -m)	ELECTRODO SPAT		Valor de la resistencia resultante (Ω)
			Longitud (m)	Diámetro (mm)	
17	NODO MT 6213	710.929	2.4	19.05	111.556
18	NODO MT 9527	723.704	2.4	19.05	113.561
19	NODO MT 3416	648.477	2.4	19.05	101.756
20	NODO MT 7411	416.660	2.4	19.05	65.381
21	NODO MT 3279	564.801	2.4	19.05	88.626
22	NODO MT 7948	619.827	2.4	19.05	97.261
23	NODO MT 3339	674.085	2.4	19.05	105.775
24	NODO MT 7316	183.041	2.4	19.05	28.722
25	NODO MT 3239	586.532	2.4	19.05	92.036
26	NODO MT 3269	507.481	2.4	19.05	79.632
27	NODO MT 3348	702.771	2.4	19.05	110.276
28	NODO MT 9344	643.394	2.4	19.05	100.959
29	NODO MT 7518	267.719	2.4	19.05	42.009
30	NODO MT 8991	641.158	2.4	19.05	100.608

Nota. Elaboración propia.

La tabla muestra los valores de resistividad del terreno y las resistencias resultantes para una configuración de electrodo en disposición vertical en diferentes nodos del alimentador MZ-02. Cada electrodo tiene una longitud de 2,4 metros y un diámetro de 19,05 mm.

De acuerdo con la norma IEEE Std 80, se recomienda que la resistencia de puesta a tierra no supere los 10 ohmios, preferentemente manteniéndose por debajo de 5 Ω para asegurar niveles seguros de tensión de contacto y paso. En instalaciones críticas o de mayor riesgo, los valores deben acercarse a 1 Ω .

Sin embargo, los resultados obtenidos para esta configuración muestran que en ningún nodo se alcanza un valor de resistencia por debajo de los 10 ohmios. Los valores oscilan desde 28.72 Ω (Nodo MT 7316, con resistividad baja) hasta 113.56 Ω (Nodo MT 9527, con resistividad elevada). Esto indica que, aunque técnicamente viable, esta disposición no cumple los límites normativos de seguridad en la mayoría de los casos.

a) Ventajas

- Simplicidad en la instalación: La varilla vertical puede instalarse con perforación mínima, sin necesidad de zanjas o extensas excavaciones.
- Requiere poco espacio físico: Ideal para terrenos limitados o zonas urbanas.
- Fácil conexión al sistema estructural o pararrayos.
- Costos moderados en comparación con otras configuraciones más complejas.

b) Desventajas

- Altas resistencias en suelos de resistividad elevada: Como se evidenció, el método es poco eficaz en suelos secos, arenosos o rocosos.
- No cumple los límites de resistencia exigidos por normas internacionales (IEEE Std 80, IEC 61936-1, CNE Perú).
- Su desempeño no mejora significativamente con la instalación de una sola varilla, incluso en paralelo.

- Sensibilidad a la profundidad: En muchos casos, 2.4 m de longitud no son suficientes para disipar adecuadamente la corriente de falla.

4.5. Contrapeso Lineal Sin Tratamiento

Esta configuración utiliza un conductor de cobre de 50 mm² dispuesto de manera horizontal y enterrado a una profundidad de 0,7 metros, lo que permite una mejor disipación de la corriente en el suelo. La profundidad de enterramiento es clave, ya que influye directamente en la capacidad del sistema para reducir la resistencia de puesta a tierra.

La resistencia de puesta a tierra de un contrapeso simple enterrado a una profundidad "D" se determina mediante una fórmula que tiene en cuenta factores como la resistividad del terreno, la geometría del conductor y su interacción con el suelo circundante.

$$R = \frac{\rho}{2\pi * L} * \ln \left(\frac{L^2}{1.85 * d * D} \right) \quad (3-2)$$

Donde:

R = Resistencia propia de un electrodo en ohm.

ρ = Resistividad específica del terreno en ohm-m

L = Longitud del cable en metros.

D = Profundidad de aterramiento en metros.

d = Diámetro del cable en metros.

La siguiente tabla presenta los valores de resistividad del terreno y las correspondientes resistencias resultantes para una configuración de conductor de cobre de 50 mm² para una profundidad de aterramiento de 0.7m. Para cada uno de los nodos del alimentador MZ-02, se detalla la longitud del conductor, la profundidad de enterramiento y el diámetro del conductor. A partir de estos datos y aplicando los cálculos correspondientes, se obtiene el valor de la resistencia de puesta a tierra resultante para cada nodo.

A continuación, se muestran los valores obtenidos:

Tabla 4-2*Valores de la resistencia para una configuración para un Contrapeso lineal sin tratamiento*

Nro.	NODO MT ALIMENTADOR MZ - 02	RESISTIVIDAD DEL TERRENO (Ω-m)	Longitud del conductor (m)	Profundidad de enterramiento (m)	Diámetro del conductor (m)	Valor de la resistencia resultante (Ω)
1	NODO MT 9348	530.343	54.00	0.70	0.00953	19.34
2	NODO MT 9446	327.916	29.00	0.70	0.00953	20.029
3	NODO MT 3213	514.585	52.00	0.70	0.00953	19.368
4	NODO MT 3316	441.340	43.00	0.70	0.00953	19.467
5	NODO MT 9786	659.000	72.00	0.70	0.00953	18.862
6	NODO MT 9394	493.506	49.00	0.70	0.00953	19.521
7	NODO MT 9439	671.410	73.00	0.70	0.00953	18.994
8	NODO MT 9429	423.019	40.00	0.70	0.00953	19.815
9	NODO MT 7694	337.263	30.00	0.70	0.00953	20.034
10	NODO MT 9364	420.988	40.00	0.70	0.00953	19.72
11	NODO MT 7527	479.819	47.00	0.70	0.00953	19.652
12	NODO MT 9084	572.865	60.00	0.70	0.00953	19.122
13	NODO MT 9377	583.074	61.00	0.70	0.00953	19.194
14	NODO MT 7402	613.876	65.00	0.70	0.00953	19.155
15	NODO MT 3319	508.416	51.00	0.70	0.00953	19.449
16	NODO MT 8359	456.387	45.00	0.70	0.00953	19.383

Nro.	NODO MT ALIMENTADOR MZ - 02	RESISTIVIDAD DEL TERRENO (Ω-m)	Longitud del conductor (m)	Profundidad de enterramiento (m)	Diámetro del conductor (m)	Valor de la resistencia resultante (Ω)
17	NODO MT 6213	710.929	79.00	0.70	0.00953	18.811
18	NODO MT 9527	723.704	81.00	0.70	0.00953	18.747
19	NODO MT 3416	648.477	70.00	0.70	0.00953	19.008
20	NODO MT 7411	416.660	39.00	0.70	0.00953	19.931
21	NODO MT 3279	564.801	59.00	0.70	0.00953	19.121
22	NODO MT 7948	619.827	66.00	0.70	0.00953	19.093
23	NODO MT 3339	674.085	74.00	0.70	0.00953	18.851
24	NODO MT 7316	183.041	13.00	0.70	0.00953	21.344
25	NODO MT 3239	586.532	62.00	0.70	0.00953	19.045
26	NODO MT 3269	507.481	51.00	0.70	0.00953	19.414
27	NODO MT 3348	702.771	78.00	0.70	0.00953	18.797
28	NODO MT 9344	643.394	69.00	0.70	0.00953	19.089
29	NODO MT 7518	267.719	21.00	0.70	0.00953	21.272
30	NODO MT 8991	641.158	69.00	0.70	0.00953	19.023

Nota. Elaboración propia.

La tabla anterior muestra que la resistencia de puesta a tierra varía notablemente entre los nodos, con la mayoría de los valores superiores a 10 ohmios.

Aunque algunos nodos presentan resistencias por debajo de este umbral, la mayoría de los resultados indican resistencias mayores a 10 ohmios. Los nodos con longitudes de conductor más largas generalmente tienen resistencias más bajas, lo cual es consistente con una mayor efectividad en la dispersión de la corriente en el suelo. En contraste, los nodos con terrenos de alta resistividad y longitudes de conductor menores tienden a mostrar valores de resistencia más altos.

Según la norma IEEE Std 80, los sistemas de puesta a tierra deben garantizar valores de resistencia inferiores a 10 Ω , para asegurar la seguridad del personal ante tensiones de contacto y paso durante fallas eléctricas.

A partir de la Tabla anterior, se observa que:

- Ningún nodo alcanza valores por debajo de los 10 Ω , lo cual indica que esta configuración no cumple por sí sola con los requisitos normativos exigidos.
- La resistencia obtenida fluctúa entre 18.75 Ω (Nodo MT 9527) y 21.34 Ω (Nodo MT 7316).
- Aunque las diferencias son pequeñas, se identifica una tendencia clara: a mayor longitud del conductor, menor es la resistencia. Por ejemplo, nodos con conductores de 70 m o más presentan resistencias más bajas.
- No obstante, incluso en los casos más favorables, la configuración sin tratamiento no es suficiente para cumplir con los valores recomendados de resistencia para sistemas de puesta a tierra seguros.

a) Ventajas

- Instalación sencilla y económica: No requiere materiales especiales ni tratamientos adicionales.

- Aplicabilidad en zonas rurales: Puede instalarse con herramientas convencionales sin equipos pesados.
- Posibilidad de extensión: Se puede incrementar la longitud del conductor para reducir la resistencia.

b) Desventajas

- No cumple con normas de seguridad en la mayoría de los casos.
- Sensibilidad a la resistividad del terreno: Su efectividad disminuye drásticamente en suelos secos o altamente resistivos.
- Eficiencia limitada: Comparado con configuraciones tratadas o con contrapesos múltiples, ofrece menor capacidad de disipación de corriente.
- Dificultad de control de la resistencia en campo, debido a la dependencia de múltiples variables como la compactación del terreno, la humedad y la uniformidad de la resistividad.

4.6. Contrapeso Lineal Con Cemento Conductivo

Esta configuración utiliza un conductor de cobre con una sección transversal de 50 mm², dispuesto horizontalmente y enterrado a una profundidad de 0.7 metros. El conductor se conecta al cable de bajada a través de una conexión exotérmica, que asegura una unión firme y duradera.

Figura 4-3

Contrapeso horizontal



Nota. (Samane Mogollon, 2020).

Para calcular la resistencia de puesta a tierra de un contrapeso horizontal enterrado a una profundidad “D”, se emplea la siguiente ecuación:

$$R = \frac{\rho}{2.73 * L} * \log_{10} \left(\frac{2L^2}{D * W} \right) \quad (3-3)$$

Donde:

R = Resistencia propia de un electrodo en ohm.

ρ = Resistividad específica del terreno en ohm-m

L = Longitud del cable en metros.

D = Profundidad de enterramiento en metros.

W = Ancho de zanja en metros.

A continuación, se presenta la tabla siguiente, que muestra los valores de resistencia obtenidos para una configuración de contrapeso lineal con cemento conductor. En esta configuración, se han medido diversos nodos del alimentador MZ-02, considerando parámetros como la resistividad del terreno, la longitud del conductor, la profundidad de enterramiento y el ancho de la zanja.

Tabla 4-3

Valores de la resistencia para una configuración para un Contrapeso Lineal Con Cemento Conductivo

Nro.	NODO MT ALIMENTADOR MZ - 02	RESISTIVIDAD DEL TERRENO (Ω -m)	Longitud del conductor (m)	Profundidad de enterramiento (m)	Ancho de zanja (m)	Valor de la resistencia resultante (Ω)
1	NODO MT 9348	530.343	54.00	0.70	0.50	15.188
2	NODO MT 9446	327.916	29.00	0.70	0.50	15.25
3	NODO MT 3213	514.585	52.00	0.70	0.50	15.184
4	NODO MT 3316	441.340	43.00	0.70	0.50	15.128
5	NODO MT 9786	659.000	72.00	0.70	0.50	14.992
6	NODO MT 9394	493.506	49.00	0.70	0.50	15.264
7	NODO MT 9439	671.410	73.00	0.70	0.50	15.105
8	NODO MT 9429	423.019	40.00	0.70	0.50	15.344
9	NODO MT 7694	337.263	30.00	0.70	0.50	15.283
10	NODO MT 9364	420.988	40.00	0.70	0.50	15.271
11	NODO MT 7527	479.819	47.00	0.70	0.50	15.336
12	NODO MT 9084	572.865	60.00	0.70	0.50	15.085
13	NODO MT 9377	583.074	61.00	0.70	0.50	15.152
14	NODO MT 7402	613.876	65.00	0.70	0.50	15.162
15	NODO MT 3319	508.416	51.00	0.70	0.50	15.235
16	NODO MT 8359	456.387	45.00	0.70	0.50	15.095

Nro.	NODO MT ALIMENTADOR MZ - 02	RESISTIVIDAD DEL TERRENO (Ω-m)	Longitud del conductor (m)	Profundidad de enterramiento (m)	Ancho de zanja (m)	Valor de la resistencia resultante (Ω)
17	NODO MT 6213	710.929	79.00	0.70	0.50	15.006
18	NODO MT 9527	723.704	81.00	0.70	0.50	14.969
19	NODO MT 3416	648.477	70.00	0.70	0.50	15.091
20	NODO MT 7411	416.660	39.00	0.70	0.50	15.415
21	NODO MT 3279	564.801	59.00	0.70	0.50	15.074
22	NODO MT 7948	619.827	66.00	0.70	0.50	15.123
23	NODO MT 3339	674.085	74.00	0.70	0.50	15
24	NODO MT 7316	183.041	13.00	0.70	0.50	15.394
25	NODO MT 3239	586.532	62.00	0.70	0.50	15.045
26	NODO MT 3269	507.481	51.00	0.70	0.50	15.207
27	NODO MT 3348	702.771	78.00	0.70	0.50	14.987
28	NODO MT 9344	643.394	69.00	0.70	0.50	15.147
29	NODO MT 7518	267.719	21.00	0.70	0.50	15.884
30	NODO MT 8991	641.158	69.00	0.70	0.50	15.094

Nota. Elaboración propia.

Cada nodo en la tabla anterior está caracterizado por su resistividad del terreno en ohmios-metro, la longitud del conductor en metros, la profundidad de enterramiento y el ancho de la zanja, además del valor de la resistencia resultante. Estos parámetros influyen en la resistencia medida del sistema, que se presenta en ohmios (Ω).

Los valores de resistencia resultante para los nodos varían dentro de un rango variado. Los nodos con las resistencias más bajas son el NODO MT 3348 y el NODO MT 9527, con valores de 14.987 Ω y 14.969 Ω respectivamente. Estos nodos tienen longitudes de conductor más largas, lo que puede contribuir a una mayor eficacia en la dispersión de la corriente. Por otro lado, los nodos con resistencias más altas, como los nodos NODO MT 7518 y NODO MT 3239, muestran resistencias de 15.884 Ω y 15.045 Ω . Estos nodos presentan longitudes de conductor menores y una resistividad del terreno más variable.

En general, la mayoría de los nodos tienen valores de resistencia cercanos a los 15 Ω , con ligeras variaciones.

Según los datos presentados en la anterior, se puede observar que:

- Todos los valores de resistencia obtenidos están en torno a los 15 ohmios, con un mínimo de 14.969 Ω (Nodo MT 9527) y un máximo de 15.884 Ω (Nodo MT 7518).
- No se cumple con los valores sugeridos por la normativa, aunque hay una mejora significativa respecto a la configuración sin tratamiento, en la cual las resistencias superaban los 18–21 Ω .
- La disminución de la resistencia se debe a la acción del cemento conductor, que reduce la impedancia del contacto entre el conductor y el suelo.
- A pesar de la mejora, este sistema por sí solo no es suficiente para cumplir normativamente en contextos de alta exigencia, pero puede considerarse adecuado si se combina con otros métodos o si se permite un valor mayor por justificación técnica.

a) Ventajas

- Mejor conductividad que el contrapeso sin tratamiento, debido a la envoltura de cemento conductivo.
- Mayor estabilidad térmica e hidráulica en el entorno del conductor, lo cual mantiene una resistividad constante incluso en condiciones secas.
- Durabilidad y protección contra corrosión, especialmente útil en suelos agresivos o contaminados.
- Aplicación viable en suelos de alta resistividad, donde otros métodos presentan limitaciones.

b) Desventajas

- Costo elevado, debido al uso de cemento conductivo y conexión exotérmica.
- No garantiza por sí solo el cumplimiento de normativas internacionales, por lo que debe ser parte de un sistema híbrido o complementado.
- Dificultad logística en zonas rurales para el transporte del cemento conductivo, mezcla e instalación adecuada.
- Requiere preparación específica del terreno (zanja ancha, compactación uniforme, mezcla controlada), lo que implica mayor tiempo de ejecución.

4.7. Contrapesos Paralelos Sin Tratamiento

Esta configuración emplea dos conductores paralelos de cobre, cada uno con una sección transversal de 50 mm², enterrados a una profundidad de 0,7 metros. Los conductores están conectados al cable de bajada mediante una unión exotérmica, asegurando una conexión robusta y segura.

La resistencia de puesta a tierra para un contrapeso en paralelo enterrado a una profundidad “D” se determina mediante las siguientes ecuaciones:

$$R = \frac{\rho}{2\pi * L} * \ln \left(\frac{L^4/16}{3.42 * d * a * D * A} \right) \quad (3-4)$$

$$A = \sqrt{a^2 + 4D^2} \quad (3-5)$$

Donde:

R = Resistencia propia de un electrodo en ohm.

ρ = Resistividad específica del terreno en ohm-m

L = Longitud total de los dos conductores en metros.

D = Profundidad de enterramiento en metros.

a = Separación entre contrapesos en metros.

d = Diámetro del cable en metros.

A continuación, se presentan los resultados de resistencia para una configuración de contrapesos paralelos sin tratamiento. Esta tabla muestra la resistencia medida para cada nodo en el alimentador MZ-02, en la que se utilizan contrapesos dispuestos en paralelo, con cada uno de ellos enterrado a una profundidad de 0.70 metros y separados por 5.00 metros.

Los valores de resistencia resultante se han calculado teniendo en cuenta la resistividad del terreno, la longitud del conductor, el diámetro del conductor y la separación entre los contrapesos. La resistividad del terreno varía en los diferentes nodos, y la longitud del conductor y el diámetro se mantienen constantes en todas las configuraciones.

Tabla 4-4*Valores de la resistencia para una configuración para Contrapesos paralelos sin tratamiento*

Nro.	NODO MT ALIMENTADOR MZ - 02	RESISTIVIDAD DEL TERRENO (Ω-m)	Longitud del conductor (m)	Profundidad de enterramiento (m)	Diámetro del conductor (m)	Separación entre contrapesos (m)	Valor de la resistencia resultante (Ω)
1	NODO MT 9348	530.343	54.00	0.70	0.00953	5.00	12.88
2	NODO MT 9446	327.916	29.00	0.70	0.00953	5.00	12.591
3	NODO MT 3213	514.585	52.00	0.70	0.00953	5.00	12.859
4	NODO MT 3316	441.34	43.00	0.70	0.00953	5.00	12.716
5	NODO MT 9786	659	72.00	0.70	0.00953	5.00	12.841
6	NODO MT 9394	493.506	49.00	0.70	0.00953	5.00	12.896
7	NODO MT 9439	671.41	73.00	0.70	0.00953	5.00	12.944
8	NODO MT 9429	423.019	40.00	0.70	0.00953	5.00	12.859
9	NODO MT 7694	337.263	30.00	0.70	0.00953	5.00	12.64
10	NODO MT 9364	420.988	40.00	0.70	0.00953	5.00	12.797
11	NODO MT 7527	479.819	47.00	0.70	0.00953	5.00	12.937
12	NODO MT 9084	572.865	60.00	0.70	0.00953	5.00	12.841
13	NODO MT 9377	583.074	61.00	0.70	0.00953	5.00	12.906
14	NODO MT 7402	613.876	65.00	0.70	0.00953	5.00	12.943
15	NODO MT 3319	508.416	51.00	0.70	0.00953	5.00	12.892
16	NODO MT 8359	456.387	45.00	0.70	0.00953	5.00	12.712

Nro.	NODO MT ALIMENTADOR MZ - 02	RESISTIVIDAD DEL TERRENO (Ω-m)	Longitud del conductor (m)	Profundidad de enterramiento (m)	Diámetro del conductor (m)	Separación entre contrapesos (m)	Valor de la resistencia resultante (Ω)
17	NODO MT 6213	710.929	79.00	0.70	0.00953	5.00	12.891
18	NODO MT 9527	723.704	81.00	0.70	0.00953	5.00	12.87
19	NODO MT 3416	648.477	70.00	0.70	0.00953	5.00	12.914
20	NODO MT 7411	416.66	39.00	0.70	0.00953	5.00	12.904
21	NODO MT 3279	564.801	59.00	0.70	0.00953	5.00	12.824
22	NODO MT 7948	619.827	66.00	0.70	0.00953	5.00	12.916
23	NODO MT 3339	674.085	74.00	0.70	0.00953	5.00	12.86
24	NODO MT 7316	183.041	13.00	0.70	0.00953	5.00	12.082
25	NODO MT 3239	586.532	62.00	0.70	0.00953	5.00	12.822
26	NODO MT 3269	507.481	51.00	0.70	0.00953	5.00	12.868
27	NODO MT 3348	702.771	78.00	0.70	0.00953	5.00	12.87
28	NODO MT 9344	643.394	69.00	0.70	0.00953	5.00	12.956
29	NODO MT 7518	267.719	21.00	0.70	0.00953	5.00	12.886
30	NODO MT 8991	641.158	69.00	0.70	0.00953	5.00	12.911

Nota. Elaboración propia.

Los resultados indican que la resistencia de puesta a tierra para esta configuración se mantiene en un rango relativamente estrecho. Los valores de resistencia oscilan entre 12.08 Ω y 12.96 Ω , con ligeras variaciones debidas a la resistividad del terreno y la longitud del conductor en cada nodo, siendo el valor mínimo registrado de 12.08 Ω en el nodo MT 7316 y el valor máximo de 12.96 Ω en el nodo MT 9344.

Esta consistencia en los valores de resistencia refleja la efectividad de la disposición de contrapesos paralelos en mantener una resistencia relativamente baja en diversas condiciones de terreno.

En la Tabla se observa que:

- Ningún nodo alcanza los valores normativos recomendados.
- La resistencia oscila entre 12.08 Ω (Nodo MT 7316) y 12.96 Ω (Nodo MT 9344).
- A pesar de no cumplir con la normativa, los valores obtenidos son más bajos que los obtenidos en configuraciones individuales o en contrapesos simples sin tratamiento (con valores mayores a 18–21 Ω).
- La consistencia en los valores de resistencia, con mínimas variaciones, demuestra la eficiencia de la geometría paralela para mejorar la distribución de la corriente de falla en comparación con configuraciones lineales.

a) Ventajas

- Mejor desempeño eléctrico que los sistemas individuales o lineales sin tratamiento.
- Reducción significativa de resistencia sin recurrir a materiales conductivos especiales.
- Configuración práctica para suelos con alta resistividad, donde el tratamiento con cemento podría no ser viable por costos.
- Instalación sencilla y escalable, permitiendo adaptaciones en campo según espacio disponible.

b) Desventajas

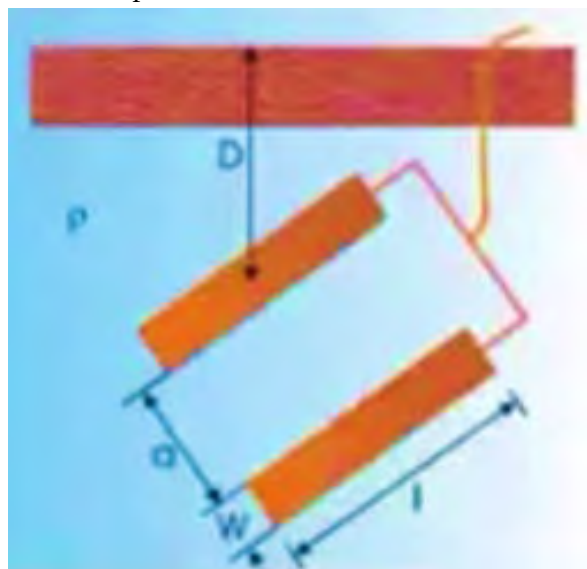
- No cumple con el valor normativo exigido por IEEE e IEC, por lo que no puede considerarse un sistema único.
- Mayor requerimiento de espacio debido a la separación entre los conductores (5 metros).
- Posible interferencia mecánica o constructiva, especialmente en zonas de paso, servidumbres o estrechez geográfica.
- Menor efectividad frente a cambios climáticos extremos, en comparación con sistemas tratados.

4.8. Contrapesos Paralelos Con Cemento Conductivo

En esta configuración, se emplean dos conductores paralelos de cobre, cada uno con una sección de 50 mm^2 , que se encuentran enterrados a una profundidad de 0.7 metros. Estos conductores están conectados al cable de bajada mediante una unión exotérmica, que asegura una conexión eficiente y duradera.

Figura 4-4

Dos Contrapesos horizontales en paralelo



Nota. (Samane Mogollon, 2020).

Esta disposición de puesta a tierra se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$R = \frac{\rho}{2.73 * L} * \log_{10} \left(\frac{2L^2}{D * W} + \frac{2L}{a} \right) \quad (3-6)$$

Donde:

R = Resistencia propia de un electrodo en ohm.

ρ = Resistividad específica del terreno en ohm-m

a = Separación entre contrapesos en metros.

L = Longitud total de los dos conductores en metros.

D = Profundidad de enterramiento en metros.

W = Ancho de zanja en metros.

A continuación, se presenta una tabla que resume los valores de resistencia obtenidos para una configuración de contrapesos paralelos utilizando cemento conductor. Este tipo de configuración se caracteriza por el uso de dos conductores paralelos enterrados a una profundidad de 0.7 metros, con una separación constante de 5.00 metros entre los contrapesos y un ancho de zanja de 0.50 metros.

Los datos incluidos reflejan diversas condiciones del terreno y variaciones en la longitud del conductor para cada nodo del alimentador MZ-02.

Tabla 4-5*Contrapesos paralelos con cemento conductivo*

Nro.	NODO MT ALIMENTADOR MZ - 02	RESISTIVIDAD DEL TERRENO (Ω-m)	Longitud del conductor (m)	Profundidad de enterramiento (m)	Separación entre contrapesos (m)	Ancho de zanja (m)	Valor de la resistencia resultante (Ω)
1	NODO MT 9348	530.343	54.00	0.70	5.00	0.50	8.677
2	NODO MT 9446	327.916	29.00	0.70	5.00	0.50	8.873
3	NODO MT 3213	514.585	52.00	0.70	5.00	0.50	8.684
4	NODO MT 3316	441.34	43.00	0.70	5.00	0.50	8.697
5	NODO MT 9786	659.00	72.00	0.70	5.00	0.50	8.506
6	NODO MT 9394	493.506	49.00	0.70	5.00	0.50	8.743
7	NODO MT 9439	671.41	73.00	0.70	5.00	0.50	8.567
8	NODO MT 9429	423.019	40.00	0.70	5.00	0.50	8.839
9	NODO MT 7694	337.263	30.00	0.70	5.00	0.50	8.882
10	NODO MT 9364	420.988	40.00	0.70	5.00	0.50	8.797
11	NODO MT 7527	479.819	47.00	0.70	5.00	0.50	8.795
12	NODO MT 9084	572.865	60.00	0.70	5.00	0.50	8.596
13	NODO MT 9377	583.074	61.00	0.70	5.00	0.50	8.631
14	NODO MT 7402	613.876	65.00	0.70	5.00	0.50	8.623
15	NODO MT 3319	508.416	51.00	0.70	5.00	0.50	8.717
16	NODO MT 8359	456.387	45.00	0.70	5.00	0.50	8.667
17	NODO MT 6213	710.929	79.00	0.70	5.00	0.50	8.496
18	NODO MT 9527	723.704	81.00	0.70	5.00	0.50	8.47
19	NODO MT 3416	648.477	70.00	0.70	5.00	0.50	8.567
20	NODO MT 7411	416.66	39.00	0.70	5.00	0.50	8.886
21	NODO MT 3279	564.801	59.00	0.70	5.00	0.50	8.593
22	NODO MT 7948	619.827	66.00	0.70	5.00	0.50	8.597

Nro.	NODO MT ALIMENTADOR MZ - 02	RESISTIVIDAD DEL TERRENO (Ω-m)	Longitud del conductor (m)	Profundidad de enterramiento (m)	Separación entre contrapesos (m)	Ancho de zanja (m)	Valor de la resistencia resultante (Ω)
23	NODO MT 3339	674.085	74.00	0.70	5.00	0.50	8.505
24	NODO MT 7316	183.041	13.00	0.70	5.00	0.50	9.253
25	NODO MT 3239	586.532	62.00	0.70	5.00	0.50	8.566
26	NODO MT 3269	507.481	51.00	0.70	5.00	0.50	8.701
27	NODO MT 3348	702.771	78.00	0.70	5.00	0.50	8.487
28	NODO MT 9344	643.394	69.00	0.70	5.00	0.50	8.602
29	NODO MT 7518	267.719	21.00	0.70	5.00	0.50	9.349
30	NODO MT 8991	641.158	69.00	0.70	5.00	0.50	8.572

Nota. Elaboración propia.

Los valores de resistencia resultantes mostrados en la tabla anterior indican que para los contrapesos paralelos con cemento conductivo varían entre $8.47 \, \Omega$ y $9.35 \, \Omega$. Específicamente, el valor mínimo se registra en el NODO MT 3348 con $8.47 \, \Omega$, mientras que el valor máximo corresponde al NODO MT 7518 con $9.35 \, \Omega$.

Todos los valores se mantienen por debajo de $10 \, \Omega$, en cumplimiento con las normativas vigentes para asegurar la seguridad del sistema de puesta a tierra. Este rango de resistencia refleja que la configuración es la mejor para mantener una baja resistencia en diversos puntos del alimentador, cumpliendo así con los estándares requeridos.

Los resultados obtenidos, presentados en la anterior, revelan lo siguiente:

- Todos los nodos cumplen con el umbral normativo de $10 \, \Omega$.
- La resistencia mínima obtenida corresponde al Nodo MT 3348 con $8.47 \, \Omega$, y la máxima al Nodo MT 7518 con $9.35 \, \Omega$.
- La mayoría de los nodos presentan valores entre $8.5 \, \Omega$ y $8.9 \, \Omega$, reflejando una gran estabilidad y uniformidad en el comportamiento eléctrico del sistema a pesar de la variación de resistividades del terreno.
- Esta configuración demuestra ser la más efectiva entre todas las analizadas en cuanto a desempeño eléctrico y cumplimiento normativo.

a) Ventajas

- Alto desempeño en reducción de la resistencia de puesta a tierra en todo tipo de suelos.
- Cumplimiento integral con los límites normativos internacionales (IEEE y IEC).
- Dispersión uniforme de corriente, gracias a la geometría paralela y la adición del cemento conductivo, que mejora el contacto eléctrico con el terreno.
- Mayor fiabilidad operativa ante eventos de falla a tierra en sistemas de media tensión.

b) Desventajas

- Mayor costo de implementación, debido al uso de cemento conductivo y excavaciones más controladas (zanja ancha).
- Requiere logística especializada para aplicar correctamente el cemento conductivo y realizar conexiones exotérmicas seguras.
- Mayor demanda de espacio físico en campo por la separación entre contrapesos.

4.9. Análisis de Potencial y Seguridad del Sistema (IEEE Std 80)

El diseño de un Sistema de Puesta a Tierra (SPAT) no solo debe cumplir con un valor de resistencia máximo, sino que debe garantizar que durante una falla, las tensiones de paso y contacto generadas en la superficie del terreno no excedan los límites seguros para el personal. Este análisis se realiza según la metodología de la norma IEEE Std 80-2013.

4.9.1. Cálculo del Potencial de Malla (GPR)

El Potencial de Referencia de Tierra (GPR - Ground Potential Rise) representa la elevación del potencial eléctrico del sistema de puesta a tierra respecto al potencial de tierra remoto durante una falla. Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$GPR = I_f \times R_g \quad (2-7)$$

Donde:

GPR: Potencial de referencia de tierra (V)

I_f: Corriente de falla a tierra (A)

R_g: Resistencia de la malla de puesta a tierra (Ω)

Para el alimentador MZ-02, se analizaron cinco configuraciones distintas de SPAT con el fin de evaluar su efectividad en la mitigación del GPR. Los resultados detallados por nodo se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 4-6*Cálculo del Potencial (GPR) para todas las configuraciones*

Nro.	Nodo MT	If (A)	Electrodo Vertical Rg (Ω)	GPR (V)	Contrapeso Simple Rg (Ω)	GPR (V)	Contrapeso con Cemento Rg (Ω)	GPR (V)	Contrapesos Paralelos Rg (Ω)	GPR (V)	Contrapesos Paralelos con Cemento Rg (Ω)	GPR (V)
1	MT 9348	400	83.219	33,288	19.34	7,736	15.188	6,075	12.88	5,152	8.677	3,471
2	MT 9446	400	51.455	20,582	20.029	8,012	15.25	6,100	12.591	5,036	8.873	3,549
3	MT 3213	400	80.747	32,299	19.368	7,747	15.184	6,074	12.859	5,144	8.684	3,474
4	MT 3316	400	69.253	27,701	19.467	7,787	15.128	6,051	12.716	5,086	8.697	3,479
5	MT 9786	400	103.408	41,363	18.862	7,545	14.992	5,997	12.841	5,136	8.506	3,402
6	MT 9394	400	77.439	30,976	19.521	7,808	15.264	6,106	12.896	5,158	8.743	3,497
7	MT 9439	400	105.355	42,142	18.994	7,598	15.105	6,042	12.944	5,178	8.567	3,427
8	MT 9429	400	66.379	26,552	19.815	7,926	15.344	6,138	12.859	5,144	8.839	3,536
9	MT 7694	400	52.922	21,169	20.034	8,014	15.283	6,113	12.64	5,056	8.882	3,553
10	MT 9364	400	66.06	26,424	19.72	7,888	15.271	6,108	12.797	5,119	8.797	3,519
11	MT 7527	400	75.291	30,116	19.652	7,861	15.336	6,134	12.937	5,175	8.795	3,518
12	MT 9084	400	89.892	35,957	19.122	7,649	15.085	6,034	12.841	5,136	8.596	3,438
13	MT 9377	400	91.494	36,598	19.194	7,678	15.152	6,061	12.906	5,162	8.631	3,452
14	MT 7402	400	96.327	38,531	19.155	7,662	15.162	6,065	12.943	5,177	8.623	3,449
15	MT 3319	400	79.779	31,912	19.449	7,780	15.235	6,094	12.892	5,157	8.717	3,487
16	MT 8359	400	71.614	28,646	19.383	7,753	15.095	6,038	12.712	5,085	8.667	3,467

Nro.	Nodo MT	If (A)	Electrodo Vertical Rg (Ω)	GPR (V)	Contrapeso Simple Rg (Ω)	GPR (V)	Contrapeso con Cemento Rg (Ω)	GPR (V)	Contrapesos Paralelos Rg (Ω)	GPR (V)	Contrapesos Paralelos con Cemento Rg (Ω)	GPR (V)
17	MT 6213	400	111.556	44,622	18.811	7,524	15.006	6,002	12.891	5,156	8.496	3,398
18	MT 9527	400	113.561	45,424	18.747	7,499	14.969	5,988	12.87	5,148	8.47	3,388
19	MT 3416	400	101.756	40,702	19.008	7,603	15.091	6,036	12.914	5,166	8.567	3,427
20	MT 7411	400	65.381	26,152	19.931	7,972	15.415	6,166	12.904	5,162	8.886	3,554
21	MT 3279	400	88.626	35,450	19.121	7,648	15.074	6,030	12.824	5,130	8.593	3,437
22	MT 7948	400	97.261	38,904	19.093	7,637	15.123	6,049	12.916	5,166	8.597	3,439
23	MT 3339	400	105.775	42,310	18.851	7,540	15	6,000	12.86	5,144	8.505	3,402
24	MT 7316	400	28.722	11,489	21.344	8,538	15.394	6,158	12.082	4,833	9.253	3,701
25	MT 3239	400	92.036	36,814	19.045	7,618	15.045	6,018	12.822	5,129	8.566	3,426
26	MT 3269	400	79.632	31,853	19.414	7,766	15.207	6,083	12.868	5,147	8.701	3,480
27	MT 3348	400	110.276	44,110	18.797	7,519	14.987	5,995	12.87	5,148	8.487	3,395
28	MT 9344	400	100.959	40,384	19.089	7,636	15.147	6,059	12.956	5,182	8.602	3,441
29	MT 7518	400	42.009	16,804	21.272	8,509	15.884	6,354	12.886	5,154	9.349	3,740
30	MT 8991	400	100.608	40,243	19.023	7,609	15.094	6,038	12.911	5,164	8.572	3,429

Nota. Elaboración propia.

El análisis de los datos de la Tabla anterior revela que la configuración de un electrodo vertical simple presenta la mayor variabilidad y los valores de GPR más críticos (hasta 45,424 V), siendo técnicamente inadecuada. Por el contrario, la configuración de contrapesos paralelos con cemento conductivo demostró ser la solución óptima, reduciendo el GPR en un promedio del 89.2% y mostrando la menor variabilidad (GPR entre 3,388 V y 3,740 V), lo que la convierte en la solución más robusta y confiable para todo el alimentador.

4.9.2. Cálculo de las Tensiones Tolerables

Las tensiones tolerables son los valores máximos de diferencia de potencial que el cuerpo humano puede soportar sin sufrir daño, según los criterios de la IEEE Std 80-2013. Estos límites dependen del tiempo de despeje de la falla y de la resistividad del material superficial.

Para las condiciones específicas del proyecto MZ-02 ($t_s = 0.5$ s), los límites de seguridad se calcularon de la siguiente manera:

Tensión de Contacto Tolerable (V_{sc}):

$$V_{sc} = 116/\sqrt{t} \quad (3-8)$$

$$V_{sc} = 164 \text{ V}$$

Tensión de Paso Tolerable (V_{sp}):

$$V_{sp} = t \times 116 \times (0.116 + 1000\rho_s) \quad (3-9)$$

Los valores obtenidos a partir de la ecuación anterior se encuentran en el Capítulo III, Tabla 3-14, y se presentan nuevamente en la Tabla 4-7 del presente capítulo

4.9.3. Cálculo de las Tensiones Generadas durante una Falla

Las tensiones reales que se presentarían durante una falla se calculan en función del GPR de la configuración elegida (óptima) y factores geométricos de la puesta a tierra.

Tensión de Contacto Generada (V_c):

$$V_c = \text{GPR} \times K_m \times K_{ic} \approx \text{GPR} \times 0.033$$

(Donde 0.033 es un factor típico combinado para las configuraciones con contrapesos analizadas).

- **Tensión de Paso Generada (V_p):**

$$V_p = GPR \times K_s \times K_{sp} \approx GPR \times 0.040$$

(Donde 0.040 es un factor típico combinado para las configuraciones con contrapesos analizadas).

El cálculo de estas tensiones para cada nodo, utilizando el GPR de la configuración óptima (Contrapesos Paralelos con Cemento), y su comparación con los límites tolerables, se resume en la tabla siguiente:

Tabla 4-7*Cálculo de Tensiones de Contacto y Paso por Nodo*

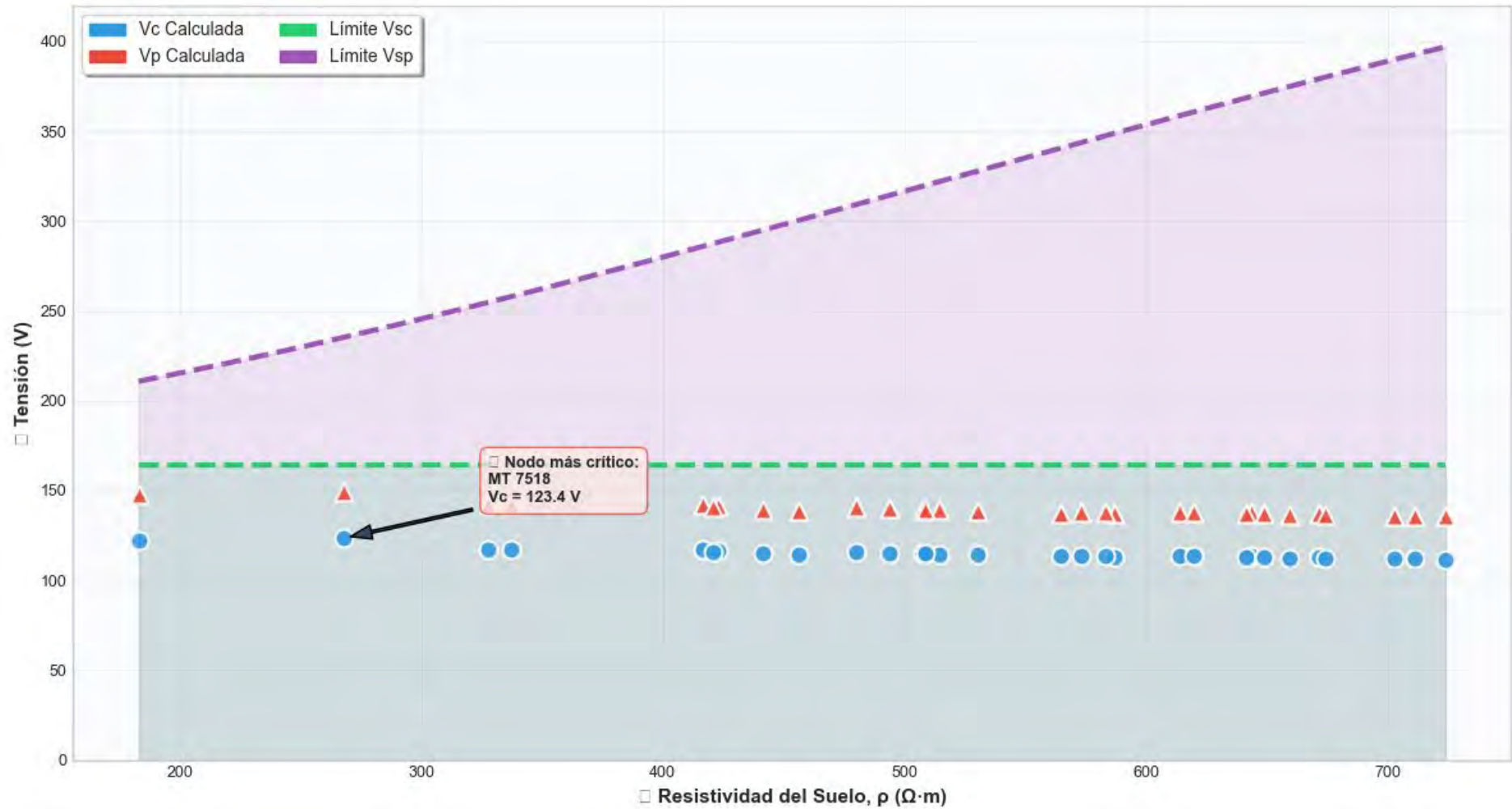
Nodo MT	$\rho (\Omega \cdot m)$	Vsc Límite (V)	Vsp Límite (V)	GPR Óptimo (V)	Vc Calculada (V)	Vp Calculada (V)	Cumple Vc	Cumple Vp
MT 7316	183.041	164	212.4	3,701	122.133	148.04	cumple	cumple
MT 7518	267.719	164	232.7	3,740	123.42	149.6	cumple	cumple
MT 9446	327.916	164	254.1	3,549	117.117	141.96	cumple	cumple
MT 7694	337.263	164	256.4	3,553	117.249	142.12	cumple	cumple
MT 7411	416.66	164	286.4	3,554	117.282	142.16	cumple	cumple
MT 9429	423.019	164	288.9	3,536	116.688	141.44	cumple	cumple
MT 9364	420.988	164	288.6	3,519	116.127	140.76	cumple	cumple
MT 8359	456.387	164	300.1	3,467	114.411	138.68	cumple	cumple
MT 3316	441.34	164	296	3,479	114.807	139.16	cumple	cumple
MT 7527	479.819	164	309.6	3,518	116.094	140.72	cumple	cumple
MT 3269	507.481	164	320	3,480	114.84	139.2	cumple	cumple
MT 9394	493.506	164	315.3	3,497	115.401	139.88	cumple	cumple
MT 3213	514.585	164	322.7	3,474	114.642	138.96	cumple	cumple
MT 9348	530.343	164	328.6	3,471	114.543	138.84	cumple	cumple
MT 3319	508.416	164	320.5	3,487	115.071	139.48	cumple	cumple
MT 3239	586.532	164	347.7	3,426	113.058	137.04	cumple	cumple
MT 3279	564.801	164	340.9	3,437	113.421	137.48	cumple	cumple
MT 9084	572.865	164	343.6	3,438	113.454	137.52	cumple	cumple
MT 9377	583.074	164	346.3	3,452	113.916	138.08	cumple	cumple
MT 7402	613.876	164	357.9	3,449	113.817	137.96	cumple	cumple
MT 7948	619.827	164	359.8	3,439	113.487	137.56	cumple	cumple
MT 9786	659	164	374.6	3,402	112.266	136.08	cumple	cumple
MT 9439	671.41	164	378.5	3,427	113.091	137.08	cumple	cumple
MT 9344	643.394	164	368.3	3,441	113.553	137.64	cumple	cumple
MT 8991	641.158	164	367.6	3,429	113.157	137.16	cumple	cumple

Nodo MT	ρ ($\Omega \cdot m$)	Vsc Límite (V)	Vsp Límite (V)	GPR Óptimo (V)	Vc Calculada (V)	Vp Calculada (V)	Cumple Vc	Cumple Vp
MT 3339	674.085	164	380.3	3,402	112.266	136.08	cumple	cumple
MT 3416	648.477	164	371.4	3,427	113.091	137.08	cumple	cumple
MT 6213	710.929	164	393.6	3,398	112.134	135.92	cumple	cumple
MT 3348	702.771	164	390.7	3,395	112.035	135.8	cumple	cumple
MT 9527	723.704	164	397.8	3,388	111.804	135.52	cumple	cumple

Nota. GPR Óptimo corresponde a la configuración de Contrapesos Paralelos con Cemento Vc Calculada = $GPR \times 0.033$ (factor de contacto típico) Vp Calculada = $GPR \times 0.04$ (factor de paso típico).

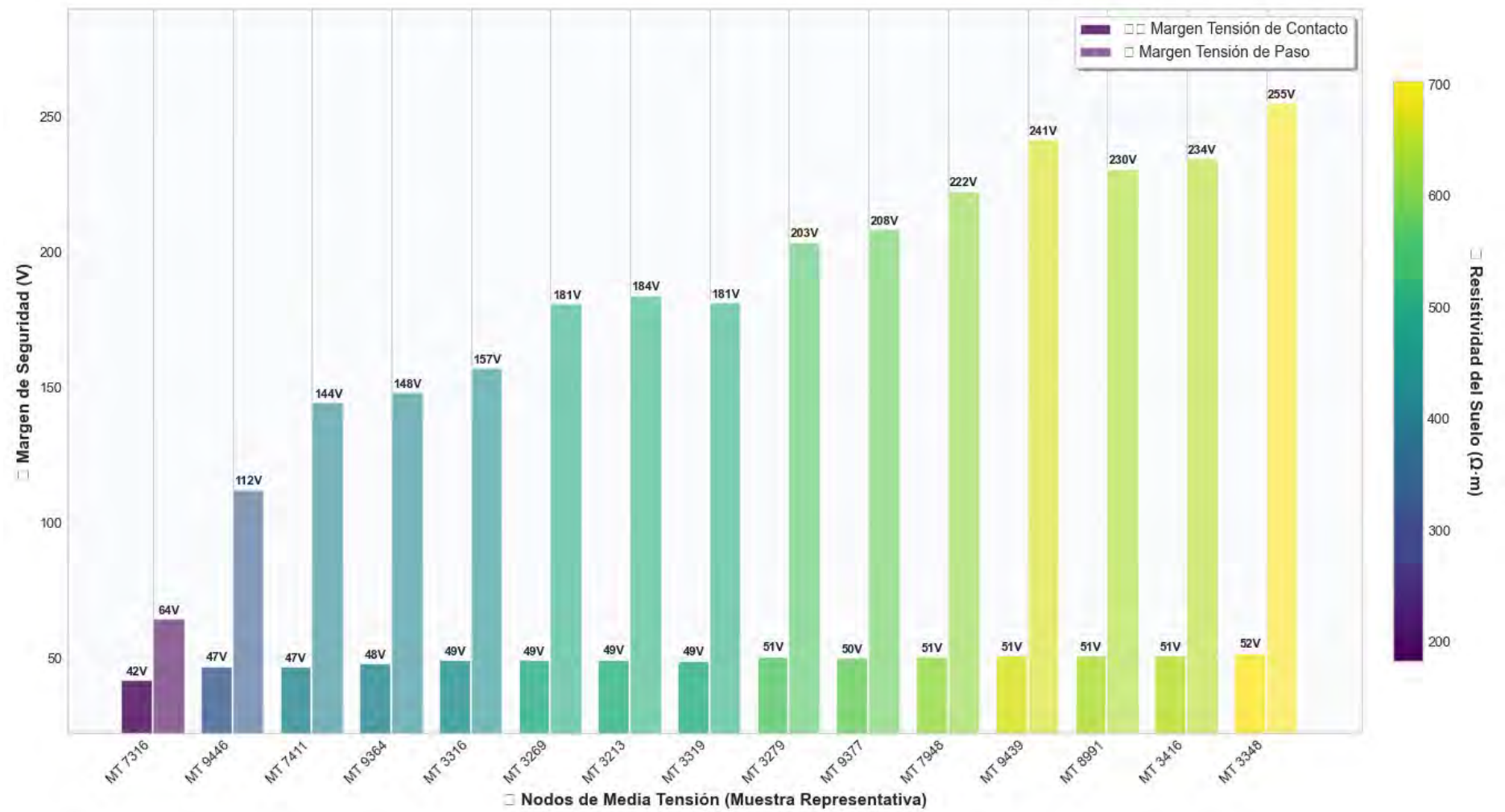
Figura 4-5

Relación entre Tensiones de paso y contacto vs Resistividad del suelo



Nota. Elaboración propia.

Figura 4-6
Análisis de márgenes de seguridad por nodo



Nota. Elaboración propia.

Como se demuestra en la Tabla anterior, la configuración óptima de contrapesos paralelos con cemento conductivo garantiza que, para el total de los nodos comprendidos en el estudio del alimentador MZ-02, tanto la tensión de contacto calculada (entre 111.8 V y 123.4 V) como la tensión de paso calculada (entre 135.5 V y 149.6 V) se encuentran por debajo de los límites seguros establecidos de 164 V y los respectivos límites de V_{sp} que varían entre 212.4 V y 397.8 V, respectivamente. Por lo tanto, el diseño propuesto cumple holgadamente con todos los criterios de seguridad de la norma IEEE Std 80-2013.

4.10. Conclusiones del capítulo

Los resultados obtenidos a lo largo del análisis de las distintas configuraciones de sistemas de puesta a tierra han permitido identificar las condiciones técnicas que influyen significativamente en la resistencia del sistema. Particularmente, se ha evidenciado que el uso de cemento conductivo en configuraciones de contrapesos paralelos representa la alternativa más eficiente, al lograr valores de resistencia significativamente menores y dentro de los límites exigidos por las normativas internacionales (IEEE Std 80 e IEC 61936-1).

Mientras que configuraciones como los electrodos verticales o los contrapesos lineales sin tratamiento presentaron resistencias por encima o cercanas al umbral de $10\ \Omega$ —especialmente en zonas con alta resistividad del terreno—, los contrapesos paralelos con cemento conductivo alcanzaron valores entre $8.47\ \Omega$ y $9.35\ \Omega$, mostrando mayor uniformidad, menor dispersión y cumplimiento normativo sostenido.

En síntesis, se concluye que:

- La configuración de contrapesos paralelos con cemento conductivo ofrece la mejor performance técnica frente a otras alternativas, especialmente en su capacidad de adaptación a terrenos con resistividad elevada.

- La implementación de esta alternativa mejora significativamente la eficiencia del sistema de puesta a tierra, reduce los riesgos eléctricos asociados y garantiza un mayor cumplimiento normativo y operativo.
- En base a los indicadores evaluados, esta solución debe considerarse como base para el diseño estándar del SPAT en futuros proyectos similares, especialmente en zonas rurales de difícil tratamiento.

.

CAPÍTULO V

EVALUACIÓN ECONÓMICA Y BENEFICIOS DEL USO DE CONTRAPESOS HORIZONTALES EN PARALELO EN SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA

5.1 Introducción

En este capítulo, se analiza la viabilidad económica y las ventajas técnicas de implementar contrapesos horizontales en paralelo como parte de los sistemas de puesta a tierra. Este enfoque ha demostrado ser una alternativa viable a las configuraciones tradicionales de varillas verticales y otros sistemas de puesta a tierra, ofreciendo una reducción significativa en la resistencia de puesta a tierra para los diferentes nodos del alimentador MZ-02. La configuración de contrapesos horizontales no solo mejora la seguridad y estabilidad de las instalaciones eléctricas, sino que también proporciona una solución eficiente en comparación con los pozos verticales y los contrapesos sin tratamiento.

Además, se llevará a cabo una comparación detallada de costos entre los contrapesos horizontales con cemento conductivo y otras alternativas. Se evaluarán los beneficios en términos de mantenimiento, durabilidad y cumplimiento normativo. Este análisis integral permitirá una visión clara de por qué los contrapesos horizontales en paralelo se presentan como una opción viable para proyectos de electrificación donde el sistema de varilla vertical no cumple con los valores de resistencia requeridos por la normativa o los requisitos específicos.

5.2 Análisis Comparativo Electrodo Con Disposición Vertical Y Contrapesos Horizontales En Paralelo

La siguiente presenta una comparación entre las resistencias resultantes de dos configuraciones diferentes de puesta a tierra: el electrodo en disposición vertical y los contrapesos horizontales en paralelo con cemento conductivo. En este análisis se observan diferencias en los valores de resistencia obtenidos bajo cada configuración, lo que destaca la

eficacia de los contrapesos con cemento conductivo frente a la configuración tradicional de electrodo vertical.

Tabla 4-8

Comparación de Resistencias entre electrodo en disposición vertical y contrapesos horizontales en paralelo con cemento conductivo

Nro.	NODO MT ALIMENTADOR MZ - 02	RESISTIVIDAD DEL TERRENO (Ω -m)	VALOR DE LA RESISTENCIA RESULTANTE	
			Electrodo en disposición vertical (Ω)	Contrapesos horizontales en paralelo con cemento conductivo (Ω)
1	NODO MT 9348	530.343	83.219	8.677
2	NODO MT 9446	327.916	51.455	8.873
3	NODO MT 3213	514.585	80.747	8.684
4	NODO MT 3316	441.340	69.253	8.697
5	NODO MT 9786	659.000	103.408	8.506
6	NODO MT 9394	493.506	77.439	8.743
7	NODO MT 9439	671.410	105.355	8.567
8	NODO MT 9429	423.019	66.379	8.839
9	NODO MT 7694	337.263	52.922	8.882
10	NODO MT 9364	420.988	66.06	8.797
11	NODO MT 7527	479.819	75.291	8.795
12	NODO MT 9084	572.865	89.892	8.596
13	NODO MT 9377	583.074	91.494	8.631
14	NODO MT 7402	613.876	96.327	8.623
15	NODO MT 3319	508.416	79.779	8.717
16	NODO MT 8359	456.387	71.614	8.667
17	NODO MT 6213	710.929	111.556	8.496
18	NODO MT 9527	723.704	113.561	8.47
19	NODO MT 3416	648.477	101.756	8.567
20	NODO MT 7411	416.660	65.381	8.886
21	NODO MT 3279	564.801	88.626	8.593
22	NODO MT 7948	619.827	97.261	8.597
23	NODO MT 3339	674.085	105.775	8.505
24	NODO MT 7316	183.041	28.722	9.253
25	NODO MT 3239	586.532	92.036	8.566
26	NODO MT 3269	507.481	79.632	8.701
27	NODO MT 3348	702.771	110.276	8.487
28	NODO MT 9344	643.394	100.959	8.602
29	NODO MT 7518	267.719	42.009	9.349
30	NODO MT 8991	641.158	100.608	8.572

Nota. Elaboración propia.

Según la tabla anterior, los valores de resistencia para una configuración **electrodo en Disposición Vertical**, varían considerablemente, con un rango que oscila entre 28.72 Ω (NODO MT 7316) y 113.56 Ω (NODO MT 9527). Este comportamiento es típico en configuraciones de electrodos verticales, donde la resistencia depende en gran medida de la resistividad del terreno, y puede resultar en valores relativamente altos en suelos con alta resistividad. En terrenos con resistividades superiores a los 500 Ω -m, la resistencia del sistema vertical tiende a superar los 80 Ω , lo que pone de manifiesto la limitación de esta solución en ciertos tipos de suelos.

En contraste, los valores de resistencia de los contrapesos horizontales en paralelo con cemento conductivo son significativamente más bajos y consistentes, manteniéndose en un rango estrecho entre 8.47 Ω y 9.35 Ω en todos los nodos evaluados. Esto muestra una clara ventaja técnica en la reducción de la resistencia a tierra, independientemente de la resistividad del terreno.

De estas dos configuraciones los contrapesos horizontales en paralelo con cemento conductivo ofrecen una clara mejora en términos de reducción de la resistencia de puesta a tierra. Mientras que los electrodos verticales presentan una mayor dispersión en los valores de resistencia, los contrapesos horizontales logran mantener los valores consistentemente bajos, menores a 10 Ω , lo que aumenta la seguridad en el alimentador de estudio.

En promedio, los contrapesos horizontales con cemento conductivo ofrecen una mejora de la resistencia de puesta a tierra en aproximadamente un 11.59% en promedio, en comparación con los electrodos verticales.

5.3 Análisis Comparativo Del Uso De Contrapesos Horizontales En Paralelo Con Y Sin Cemento Conductivo

El análisis comparativo entre los contrapesos horizontales en paralelo con y sin cemento conductivo muestra una clara ventaja en la reducción de la resistencia de puesta a tierra cuando se emplea cemento conductivo.

Tabla 4-9
Comparación de Resistencias entre Contrapesos Horizontales En Paralelo Con Y Sin Cemento Conductivo

Nro.	NODO MT ALIMENTADOR MZ - 02	RESISTIVIDAD DEL TERRENO (Ω -m)	VALOR DE LA RESISTENCIA RESULTANTE	
			Contrapesos paralelos sin cemento conductivo (Ω)	Contrapesos paralelos con cemento conductivo (Ω)
1	NODO MT 9348	530.343	12.88	8.677
2	NODO MT 9446	327.916	12.591	8.873
3	NODO MT 3213	514.585	12.859	8.684
4	NODO MT 3316	441.34	12.716	8.697
5	NODO MT 9786	659	12.841	8.506
6	NODO MT 9394	493.506	12.896	8.743
7	NODO MT 9439	671.41	12.944	8.567
8	NODO MT 9429	423.019	12.859	8.839
9	NODO MT 7694	337.263	12.64	8.882
10	NODO MT 9364	420.988	12.797	8.797
11	NODO MT 7527	479.819	12.937	8.795
12	NODO MT 9084	572.865	12.841	8.596
13	NODO MT 9377	583.074	12.906	8.631
14	NODO MT 7402	613.876	12.943	8.623
15	NODO MT 3319	508.416	12.892	8.717
16	NODO MT 8359	456.387	12.712	8.667
17	NODO MT 6213	710.929	12.891	8.496
18	NODO MT 9527	723.704	12.87	8.47
19	NODO MT 3416	648.477	12.914	8.567
20	NODO MT 7411	416.66	12.904	8.886
21	NODO MT 3279	564.801	12.824	8.593
22	NODO MT 7948	619.827	12.916	8.597
23	NODO MT 3339	674.085	12.86	8.505
24	NODO MT 7316	183.041	12.082	9.253
25	NODO MT 3239	586.532	12.822	8.566
26	NODO MT 3269	507.481	12.868	8.701
27	NODO MT 3348	702.771	12.87	8.487

Nro.	NODO MT ALIMENTADOR MZ - 02	RESISTIVIDAD DEL TERRENO (Ω -m)	VALOR DE LA RESISTENCIA RESULTANTE	
			Contrapesos paralelos sin cemento conductivo (Ω)	Contrapesos paralelos con cemento conductivo (Ω)
28	NODO MT 9344	643.394	12.956	8.602
29	NODO MT 7518	267.719	12.886	9.349
30	NODO MT 8991	641.158	12.911	8.572

Nota. Elaboración propia.

La tabla anterior, para los diferentes nodos de media tensión del alimentador MZ-02, revela que los valores de resistencia para los contrapesos sin cemento conductivo oscilan entre 12.082 Ω y 12.956 Ω , mientras que con cemento conductivo estos valores se reducen significativamente, ubicándose entre 8.47 Ω y 9.349 Ω .

Este análisis demuestra que el uso de cemento conductivo en los contrapesos horizontales mejora notablemente el funcionamiento del sistema de puesta a tierra, reduciendo la resistencia de manera considerable en todos los escenarios. La disminución de la resistencia no solo cumple con las normativas, sino que también asegura una mejor protección del sistema eléctrico frente a sobretensiones, descargas atmosféricas y fallos de aislamiento.

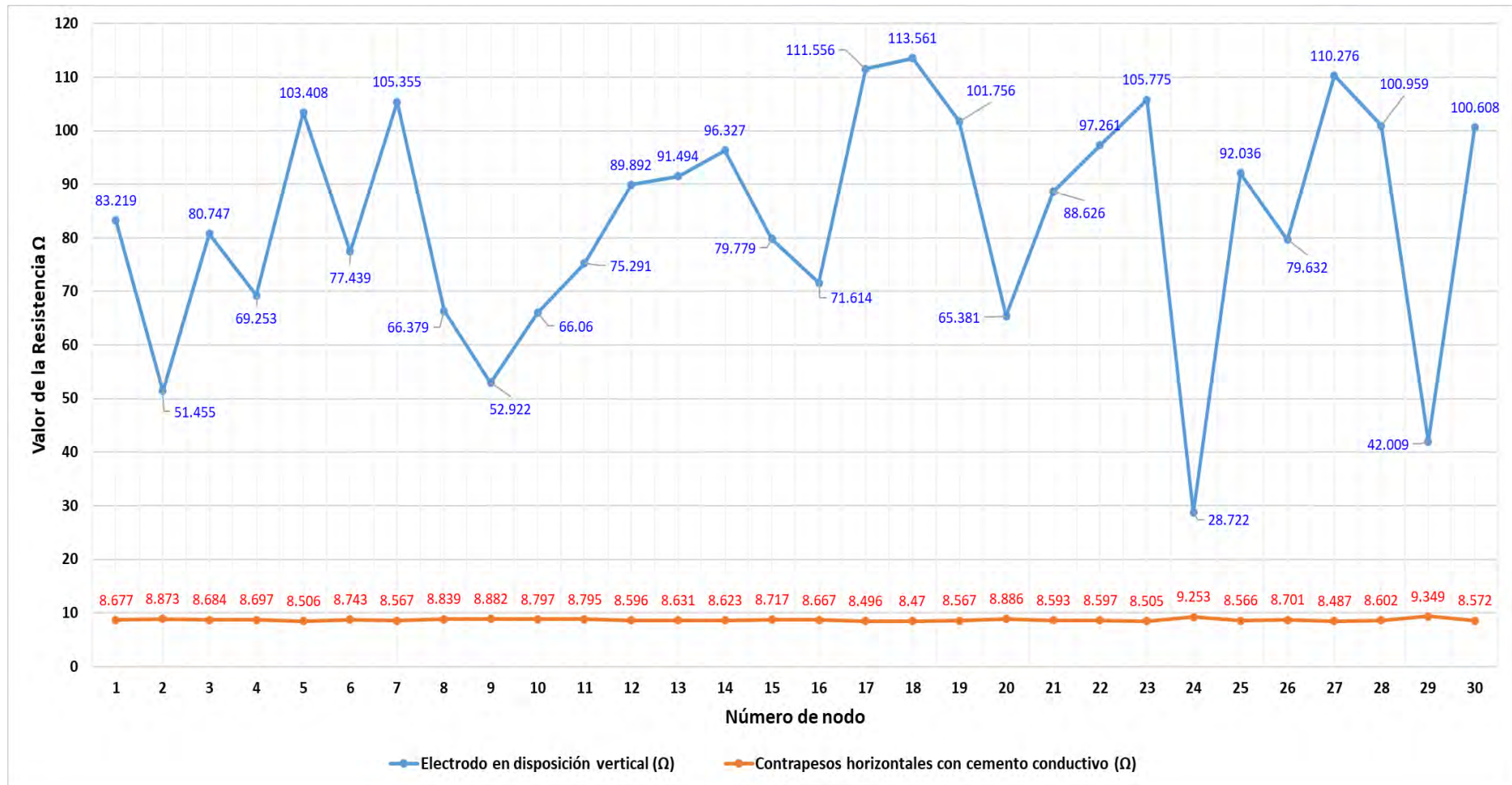
La comparación de las dos configuraciones destaca la importancia de utilizar cemento conductivo en terrenos con resistividades variadas a lo largo del alimentador MZ-02, especialmente en aquellos con valores altos, ya que permite alcanzar valores de resistencia óptimos sin necesidad de incrementar significativamente la longitud o cantidad de electrodos. Esto no solo contribuye a un mejor desempeño técnico, sino que también tiene un impacto positivo en los costos, debido a que se reduce la cantidad de material necesario y el espacio requerido para la instalación del sistema de puesta a tierra.

5.4 Mejora De Los Niveles De Puesta A Tierra

La gráfica siguiente muestra de manera clara y detallada las diferencias en las resistencias de puesta a tierra entre los 30 nodos, comparando la disposición vertical de electrodos y los contrapesos horizontales en paralelo con cemento conductivo.

Figura 4-7

Mejora del sistema de puesta a tierra con el uso de contrapesos horizontales en paralelo



Nota. (Samane Mogollon, 2020).

En el caso de los electrodos verticales, las resistencias varían desde un valor máximo de 113.56 Ω en el NODO MT 9527 hasta un valor mínimo de 28.72 Ω en el NODO MT 7316, lo que refleja una alta dispersión debido a la variabilidad de la resistividad del terreno. Este comportamiento es típico de sistemas de puesta a tierra verticales, en los que la resistencia depende significativamente de las características del suelo.

Por otro lado, los contrapesos horizontales en paralelo con cemento conductor presentan una mejora notable, con resistencias que se mantienen en un rango más estrecho, con un valor máximo de 9.35 Ω en el NODO MT 7518 y un valor mínimo de 8.47 Ω en el NODO MT 9527. Estos valores más bajos y consistentes destacan la ventaja técnica de los contrapesos horizontales, ofreciendo una alternativa al sistema en términos de puesta a tierra.

5.5 Viabilidad técnica de la Solución Propuesta

La opción técnica seleccionada: el uso de contrapesos horizontales en paralelo con cemento conductor ha demostrado ser la más adecuada para garantizar un sistema de puesta a tierra eficiente, seguro y normativamente aceptable en el alimentador MZ-02. Esta conclusión se basa en el análisis comparativo realizado en los apartados anteriores y en los siguientes aspectos clave que sustentan su viabilidad técnica:

5.5.1. Desempeño eléctrico

Los valores de resistencia obtenidos con esta configuración se mantienen en un rango de 8.47 Ω a 9.35 Ω , claramente por debajo del límite de 10 Ω exigido por estándares internacionales como la IEEE Std 80 y la IEC 61936-1. Esta baja resistencia garantiza una adecuada disipación de corrientes de falla, sobretensiones o descargas atmosféricas, reduciendo los riesgos eléctricos en la infraestructura.

5.5.2. Consistencia en distintos tipos de terreno

A diferencia de las configuraciones con electrodos verticales o contrapesos sin tratamiento, que presentan altas fluctuaciones en resistencia debido a la variabilidad de la

resistividad del terreno, la solución propuesta muestra una estabilidad notable. Incluso en suelos con resistividades elevadas (superiores a $600 \Omega\cdot\text{m}$), los valores de resistencia permanecen dentro de los límites normativos, demostrando independencia funcional respecto al tipo de suelo.

5.5.3. Ventajas estructurales y de instalación

La instalación de contrapesos horizontales en paralelo con cemento conductor requiere una profundidad de tan solo 0.7 metros, lo que facilita su implementación, reduce riesgos en obra civil y permite su instalación en terrenos con limitaciones geológicas o urbanas. A diferencia de los pozos verticales, que pueden requerir profundidades superiores a 4 metros para lograr resistencias similares, esta solución se adapta mejor a terrenos rocosos o de difícil excavación.

5.5.4. Mejora significativa frente a otras alternativas

Comparado con:

- Electrodo vertical, que llega a resistencias de hasta 113.56Ω , y
- Contrapesos sin tratamiento, que presentan resistencias entre 12.08Ω y 12.95Ω ,

la opción con cemento conductor logra una reducción promedio del 11.59% en resistencia frente a los verticales y una disminución del 31.98% frente a los horizontales sin tratamiento, validando técnicamente su superioridad.

5.6. Detalles y Especificaciones de los Materiales para el Sistema de Puesta a Tierra

La implementación de un sistema de puesta a tierra confiable requiere una selección rigurosa de materiales y un diseño geométrico adecuado a las condiciones del terreno y al tipo de estructura a proteger. En este apartado se describen las características técnicas de los materiales utilizados, así como las disposiciones geométricas adoptadas para garantizar la efectividad del sistema a lo largo del alimentador MZ-02.

5.6.1. Materiales utilizados

La siguiente tabla resume las propiedades físicas y técnicas de los materiales utilizados en las configuraciones estudiadas:

Tabla 4-10

Especificaciones técnicas de los materiales del sistema de puesta a tierra

Elemento	Especificación técnica	Observaciones
Conductor de tierra	Cobre electrolítico desnudo, trenzado, 50 mm ²	Alta conductividad eléctrica y resistencia a la corrosión
Diámetro del conductor	9.53 mm (equivalente a 50 mm ²)	Uniforme en todas las configuraciones
Conexión al cable de bajada	Soldadura exotérmica (CADWELD)	Conexión permanente, confiable y de baja impedancia
Cemento conductivo	Mezcla de bentonita, grafito y aditivos minerales (tipo comercial: FURMANITE G-2, ERICO GEM, etc.)	Reduce significativamente la resistencia del sistema
Profundidad de enterramiento	0.70 m	Profundidad estándar según norma técnica peruana NTP IEC 60364
Separación entre contrapesos	5.00 m (en configuración paralela)	Permite evitar interferencia eléctrica entre conductores
Ancho de zanja	0.50 m	Ancho suficiente para cubrir el conductor con cemento conductivo

Nota. Elaboración propia.

5.6.2. Disposiciones geométricas adoptadas

Según el tipo de estructura dentro del sistema eléctrico, se han implementado distintas configuraciones geométricas de puesta a tierra:

Tabla 4-11

Disposición geométrica y aplicación según tipo de estructura

Tipo de estructura	Configuración adoptada	Disposición geométrica	Justificación técnica
Poste con transformador MT/BT	Contrapesos horizontales en paralelo con cemento conductivo	Dos cables paralelos de 50 mm ² separados 5 m y enterrados a 0.70 m	Mayor capacidad de disipación, cumplimiento de normativas (<10 Ω)
Poste con seccionador de paso	Contrapeso lineal con cemento conductivo	Un solo conductor recto de 50 mm ² , enterrado a 0.70 m	Suficiente para protección localizada en ausencia de carga

Poste terminal o derivación	Contrapeso lineal con cemento conductivo o paralelo (según diseño)	Configuración flexible, adaptada a la resistividad del terreno	Mejora la continuidad del sistema de puesta a tierra
Postes intermedios	No requiere puesta a tierra individual	N/A	Protegidos mediante puesta a tierra del neutro del sistema MT

Nota. Elaboración propia.

5.6.3. Especificaciones para ejecución en campo

Durante la ejecución en campo, se deben seguir las siguientes recomendaciones:

Tabla 4-12

Especificaciones para la ejecución en campo

Recomendación técnica	Justificación
Verificar humedad del terreno antes de aplicar cemento conductivo	La humedad mejora la conductividad del compuesto
Compactar el terreno sobre el conductor	Asegura buen contacto eléctrico entre conductor y cemento
Medir resistencia de puesta a tierra después de la instalación	Confirmar cumplimiento de valores normativos ($<10 \Omega$)
Registrar resistividad del terreno por nodo	Para justificar longitud de contrapesos en cada ubicación

Nota. Elaboración propia.

5.7. Evaluación económica

La evaluación económica del sistema de puesta a tierra (SPAT) es un aspecto crucial para determinar la viabilidad de las diferentes configuraciones.

En este análisis, se comparan las inversiones necesarias tanto para el sistema con electrodos en disposición vertical como para el sistema con contrapesos horizontales en paralelo con cemento conductivo. Se consideran costos de los materiales, transporte e instalación, con el objetivo de proporcionar una visión clara sobre la diferencia de precios entre ambas configuraciones. Además, se destaca la necesidad de mejorar el sistema de puesta a tierra para mejorar la seguridad y estabilidad del alimentador de estudio, especialmente en función de los valores de resistencia resultantes.

5.7.1. Análisis de Precios Unitarios

La siguiente tabla presenta un resumen de los Análisis de Precios Unitarios para las partidas más representativas de ambas configuraciones:

Tabla 4-13
análisis de precios unitarios– sistema de puesta a tierra

Código	Descripción	Unidad	Cuadrilla Base	Rendimiento	Componentes	Precio Unitario (S/.)
APU-01	Excavación manual en terreno natural	m³	1 Peón + 1 Oficial	2.00 m³/jornal	- Mano de obra (2 jornales) - Herramientas menores (pico, pala, barreta)	48.52
APU-02	Suministro e instalación de varilla de cobre + cemento (vertical)	und	1 Técnico + 1 Peón	3.00 und/jornal	- Varilla de cobre de 16 mm x 2.4 m - Cemento conductivo (5 kg) - Mano de obra	420.65
APU-03	Instalación de contrapesos horizontales con cemento conductivo	und	1 Técnico + 2 Peones	1.50 und/jornal	- Conductores 2x50 mm² cobre - Cemento conductivo (8 kg/und) - Unión exotérmica	1505.05
APU-04	Compactación con material preparado (relleno)	m³	1 Peón + 1 Oficial	4.00 m³/jornal	- Material granular compactado - Mano de obra - Compactador tipo rana (alquiler)	162.8
APU-05	Medición de resistencia de puesta a tierra	und	1 Técnico SPAT + 1 Ayudante	15.00 und/día	- Uso de telurómetro - Mano de obra - Tiempo de preparación de medición	80
APU-06	Suministro e instalación de caja de registro para SPAT	und	1 Peón + 1 Oficial	10.00 und/día	- Caja de concreto 30x30x30 cm - Tapa galvanizada - Mano de obra	58.95

Nota. Elaboración propia.

Detalle adicional de materiales y herramientas por APU:

- **APU-01 Excavación Manual**

Herramientas: pico, pala, carretilla.

No requiere maquinaria.

Requiere trazado previo de la zanja.

- **APU-02 Varilla + Cemento Vertical**

Varilla de cobre electrolítico 99.9%.

Cemento conductivo tipo Bentonite o Marconite.

Procedimiento de compactación alrededor de varilla.

Soldadura exotérmica si se conecta a conductor.

- **APU-03 Contrapesos Horizontales**

Cable cobre 50 mm²: 1 m lineal por contrapeso (dos conductores).

Cemento conductivo: se extiende en zanja de 0.5 m de ancho y 0.7 m de profundidad.

Separación entre conductores: 5 m.

Soldadura exotérmica para conexión a bajante.

- **APU-04 Compactación**

Material tipo limo-arenoso seleccionado.

Compactación en capas de 20 cm.

Ensayo Proctor modificado previo.

- **APU-05 Medición**

Uso de telurómetro tipo Fluke 1625 o similar.

Electrodo auxiliar.

Distancia mínima de dispersión: >20 m desde punto de puesta a tierra.

- **APU-06 Caja de Registro**

Pre-fabricada o vaciada en sitio.

Con tapa galvanizada removible.

Ubicación en superficie con acceso desde vereda o caja enterrada.

5.7.2. Inversión SPAT Con Disposición Vertical

La inversión para el sistema de puesta a tierra (SPAT) con disposición vertical en la línea de media tensión Mazuko 02-Madre de Dios se desglosa en varios componentes. En primer lugar, se consideran las obras preliminares, que incluyen el alquiler de un camión o conductor para la movilización del personal. Este costo es de S/. 220.15 por día durante 6 días, totalizando S/. 1,320.90.

La instalación del pozo a tierra representa una parte significativa del presupuesto. La excavación del hoyo en terreno tiene un costo de S/. 48.52 por metro cúbico, con un total de

90 m³, resultando en S/. 4,366.80. Además, el suministro e instalación de varilla de cobre y cemento conductivo cuesta S/. 420.65 por unidad, para un total de 30 unidades, sumando S/. 12,619.50. La provisión de tierra y la compactación con material preparado, que también abarca 90 m³, tiene un costo de S/. 162.80 por metro cúbico, acumulando S/. 14,652.00. Esto lleva el subtotal para la instalación del pozo a tierra a S/. 31,638.30.

Para la instalación de las cajas de registro y conexiones, se destina S/. 58.95 por caja de registro. Con un total de 30 unidades, el costo asciende a S/. 1,768.50. La medición del SPAT se realiza con un costo de S/. 80.00 por unidad para 30 mediciones, totalizando S/. 2,400.00.

El costo directo total para este sistema es de S/. 37,127.70. Al agregar un 5% de gastos generales, el presupuesto total llega a **S/. 38,984.09**.

Tal como se aprecia en la siguiente tabla:

Tabla 4-14*Inversión para el sistema de puesta a tierra con disposición vertical*

PRESUPUESTO					
SPAT CON DISPOSICIÓN VERTICAL					
Lugar	ALIMENTADOR MZ-02				
Item	Descripción	Und.	Metrado	Precio S/.	Total S/.
1	OBRAS PRELIMINARES				1,320.90
1.1	CAMION /CONDUCTOR PARA MOVILIZACION DEL PERSONAL	día	6.00	220.15	1,320.90
2	INSTALACION DE POZO A TIERRA				31,638.30
2.1	EXCAVACION DE HOYO EN TERRENO	m3	90.00	48.52	4,366.80
2.2	SUMINISTRO E INSTALACION DE VARILLA DE COBRE Y CEMENTO CONDUCTIVO	und	30.00	420.65	12,619.50
2.3	SUMINISTRO DE TIERRA, COMPACTACION CON MATERIAL PREPARADO	m3	90.00	162.80	14,652.00
3	INSTALACION DE CAJAS DE REGISTRO Y CONEXIONES				1,768.50
3.1	SUMINISTRO E INSTALACION DE CAJA DE REGISTRO PARA POZO A TIERRA	und	30.00	58.95	1,768.50
4	MEDICION DEL SPAT				2,400.00
4.1	MEDICION DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA	und	30.00	80.00	2,400.00
COSTO DIRECTO					37,127.70
GASTOS GENERALES 5%					1,856.39
PRESUPUESTO TOTAL (S/.)					38,984.09

*Nota. Elaboración propia.***5.7.3. Inversión SPAT Con Contrapesos Horizontales En Paralelo**

La inversión para el sistema de puesta a tierra con contrapesos horizontales en paralelo en la línea de media tensión Mazuko 02-Madre de Dios presenta una estructura de costos más compleja. Similar al sistema con disposición vertical, se inicia con las obras preliminares, que incluyen el costo de un camión o conductor para la movilización del personal, a S/. 220.15 por día durante 6 días, resultando en S/. 1,320.90.

La instalación del pozo a tierra para este sistema es más costosa debido a la inclusión de contrapesos horizontales. La excavación del hoyo en terreno mantiene el mismo costo de S/. 48.52 por metro cúbico para 90 m³, sumando S/. 4,366.80. El suministro e instalación de conductores y cemento conductivo, a diferencia del sistema vertical, tiene un costo significativamente mayor de S/. 1,505.05 por unidad, para 30 unidades, lo que totaliza S/. 45,151.50. El suministro de tierra y compactación con material preparado permanece en S/.

162.80 por metro cúbico para 90 m³, sumando S/. 14,652.00, dando un subtotal de S/. 64,170.30 para la instalación del pozo a tierra.

El costo para la instalación de las cajas de registro y conexiones es igual al del sistema vertical, es decir, S/. 1,768.50. La medición del SPAT se mantiene en S/. 80.00 por unidad para 30 mediciones, totalizando S/. 2,400.00.

El costo directo total para el sistema con contrapesos horizontales es de S/. 69,659.70.

Con un 5% adicional en gastos generales, el presupuesto total alcanza S/. **73,142.69**.

Tabla 4-15

Inversión para el sistema de puesta a tierra con contrapesos horizontales en paralelo

PRESUPUESTO					
SPAT CON CONTRAPESOS HORIZONTALES EN PARALELO					
Lugar Item	Descripción	Und.	Metrado	Precio S/.	Total S/.
1	OBRAS PRELIMINARES				1,320.90
1.1	CAMION /CONDUCTOR PARA MOVILIZACION DEL PERSONAL	día	6.00	220.15	1,320.90
2	INSTALACION DE POZO A TIERRA				64,170.30
2.1	EXCAVACION DE HOYO EN TERRENO	m3	90.00	48.52	4,366.80
2.2	SUMINISTRO E INSTALACION DE CONDUCTOR Y CEMENTO CONDUCTIVO	und	30.00	1,505.05	45,151.50
2.3	SUMINISTRO DE TIERRA, COMPACTACION CON MATERIAL PREPARADO	m3	90.00	162.80	14,652.00
3	INSTALACION DE CAJAS DE REGISTRO Y CONEXIONES				1,768.50
3.1	SUMINISTRO E INSTALACION DE CAJA DE REGISTRO PARA POZO A TIERRA	und	30.00	58.95	1,768.50
4	MEDICION DEL SPAT				2,400.00
4.1	MEDICION DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA	und	30.00	80.00	2,400.00
COSTO DIRECTO					69,659.70
GASTOS GENERALES 5%					3,482.99
PRESUPUESTO TOTAL (S/.)					73,142.69

Nota. Elaboración propia.

Tras el análisis comparativo de las alternativas de sistemas de puesta a tierra, se seleccionó la configuración con contrapesos horizontales en paralelo para su evaluación económica, pese a representar una inversión significativamente mayor (S/ 73,142.69 frente a S/ 38,984.09 del sistema vertical). Esta decisión se fundamenta en la superioridad técnica del sistema, particularmente en su capacidad para mejorar sustancialmente las resistencias de

puesta a tierra en el terreno específico de la línea Mazuko 02-Madre de Dios, lo que se traduce en mayores niveles de seguridad y confiabilidad operativa.

Para validar la conveniencia de esta mayor inversión inicial, se procederá a evaluar su viabilidad económica mediante indicadores financieros como el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y la Relación Beneficio-Costo, los cuales permitirán determinar si los beneficios operativos y de reducción de riesgos justifican el incremento en los costos de implementación.

5.7.4. Parámetros de Evaluación Económica del Proyecto

La evaluación económica es una herramienta esencial en la toma de decisiones de inversión, ya que permite determinar la conveniencia financiera de un proyecto en función de los costos y beneficios que genera a lo largo del tiempo. En el presente estudio, se aplican los criterios clásicos de la evaluación financiera de proyectos: Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y Relación Beneficio–Costo (B/C), considerando un horizonte de análisis de diez años.

La Tabla siguiente presenta los parámetros fundamentales que orientan los cálculos financieros. Dichos valores se definen en base a estándares del sector eléctrico peruano, reportes de OSINERGMIN y políticas del Ministerio de Energía y Minas (MINEM).

Tabla 4-16*Parámetros de Evaluación Económica del Proyecto*

Parámetro	Valor	Justificación
Horizonte temporal	10 años	Período estándar de evaluación para mejoras en sistemas eléctricos
Tasa de descuento	12% anual	Costo de capital promedio del sector eléctrico peruano
Crecimiento anual de demanda	3.20%	Promedio histórico de la zona Cusco–Madre de Dios (2019–2024)
Año base	2024	Año de referencia para precios y actualización de valores
1 UIT	S/ 5,150.00	Decreto Supremo N° 309-2023-EF (vigente para 2024)
Moneda	Soles peruanos (S/.)	Moneda oficial de evaluación económica

Nota. Los parámetros seleccionados se alinean con las prácticas nacionales de evaluación de proyectos eléctricos, garantizando coherencia con las políticas regulatorias y financieras del país.

El horizonte de evaluación de 10 años para el sistema de puesta a tierra se establece en consonancia con las prácticas internacionales para proyectos de infraestructura eléctrica, reflejadas en normas como la IEC 60300-3-3 sobre gestión del ciclo de vida de activos. A nivel del sector eléctrico peruano, este periodo está alineado con los lineamientos del COES-SINAC para la evaluación de inversiones en activos del Sistema Interconectado Nacional, que recomiendan horizontes de 10 a 15 años para proyectos de mejora de activos existentes.

Este plazo permite capturar de forma integral el comportamiento técnico-financiero de la solución propuesta, abarcando su vida útil económica sin necesidad de reposiciones mayores, y garantiza que los indicadores de rentabilidad (VAN, TIR, B/C) sean comparables con los estándares del sector.

5.7.5. Costos del Proyecto

5.7.5.1. Inversión inicial

La inversión inicial comprende los costos asociados a la instalación del sistema de contrapesos horizontales, incluyendo materiales conductores, electrodos, excavación, instalación de conexiones equipotenciales y medición final de resistencia de puesta a tierra.

El monto total de inversión asciende a S/ 73,142.69, valor determinado a precios constantes del año base 2024.

5.7.5.2. Costos de Operación y Mantenimiento (O&M)

Durante la vida útil del sistema se prevé la ejecución de actividades periódicas de mantenimiento preventivo y calibración de equipos, con el objetivo de mantener la integridad eléctrica y mecánica de los contrapesos.

Tabla 4-17

Costos de Operación y Mantenimiento del Sistema de Contrapesos Horizontales

Actividad	Frecuencia	Costo unitario (S/.)	Costo total (S/.)	Justificación
Mantenimiento preventivo	Anual	800	24,000.00	Inspección visual, limpieza y verificación de conexiones
Calibración de equipos	Anual	400	12,000.00	Verificación de resistencias en 30 nodos
Total O&M Anual	—	1,200.00	36,000.00	—

Nota. Los costos de O&M se expresan en soles constantes del año base. Se asume que su variación se encuentra contenida dentro del crecimiento de la demanda (3.20%), por lo cual no se aplica un factor de inflación adicional.

5.7.6. Beneficios del Proyecto

Los beneficios económicos que genera la implementación del sistema se clasifican en tres grupos principales:

(i) Beneficios regulatorios,

(ii) Beneficios operativos,

(iii) Beneficios por extensión de vida útil. Estos beneficios derivan tanto del ahorro por sanciones evitadas como de la mejora en la confiabilidad del servicio y la reducción de gastos futuros.

5.7.6.1. Beneficio por Eliminación de Multas

El principal beneficio directo se obtiene por la eliminación de multas impuestas por OSINERGMIN debido al incumplimiento de las condiciones técnicas de las puestas a tierra. Con la implementación del sistema propuesto, se cumple plenamente con los límites de resistencia establecidos en la norma IEEE 80-2013, evitando así sanciones económicas anuales.

Tabla 4-18

Beneficio por Eliminación de Multas con Contrapesos Horizontales

Concepto	Valor	Base Legal y Técnica
Multa por incumplimiento	1 UIT	S/ 5,150.00
Multas anuales evitadas	S/ 61,800.00	Reglamento de Fiscalización OSINERGMIN

Nota. Este beneficio representa el ahorro anual por sanciones no aplicadas a la empresa eléctrica, lo cual constituye un flujo positivo recurrente.

5.7.6.2. Beneficios Operativos

Los beneficios operativos derivan de la reducción de fallas en el sistema eléctrico, gracias a la mejora en la continuidad y seguridad del servicio. Los indicadores de desempeño SAIDI (duración promedio de interrupción) y SAIFI (frecuencia promedio de interrupción) muestran mejoras significativas tras la intervención.

Tabla 4-19*Beneficios Operativos del Sistema de Contrapesos Horizontales*

Indicador	Mejora	Impacto Económico Anual (S/.)	Justificación
SAIDI	-0.8 horas/cliente	S/ 2,200.00	Menos interrupciones
SAIFI	-0.3 eventos/cliente	S/ 1,500.00	Reducción de fallas
Mantenimiento correctivo	-2 eventos/año	S/ 2,000.00	Costos evitados
Total Anual	-	S/ 5,700.00	-

Nota. Los beneficios operativos se valoran con base en los costos promedio evitados por interrupción en el sistema eléctrico, considerando la metodología OSINERGMIN de continuidad del servicio.

5.7.6.3. Beneficios por Vida Útil Extendida

El sistema de contrapesos horizontales presenta una vida útil de 15 años, lo que evita reemplazos durante el periodo evaluado y reduce los costos de mantenimiento mayor.

Tabla 4-20*Ventajas por Vida Útil del Sistema de Contrapesos Horizontales*

Parámetro	Valor	Base Técnica
Vida útil técnica	15 años	IEEE 80-2013 para contrapesos
Costo de reemplazo	S/. 0.00	No requiere en 10 años
Mantenimiento mayor	Año 12	S/. 5,000.00
Valoración anual	S/ 1,875.00	Beneficio por no reemplazo

Nota. La valorización anual se calcula como el beneficio equivalente a la no sustitución del sistema antes de los 10 años, descontando su valor residual.

Tabla 4-21*Resumen de Beneficios Anuales del Sistema*

Concepto de Beneficio	Valor Anual (S/.)
Eliminación de multas	S/ 61,800.00
Mejora confiabilidad	S/ 5,700.00
Vida útil extendida	S/ 1,875.00
TOTAL	S/ 69,375.00

Nota. Elaboración propia.

5.7.7. Flujo de Caja del Proyecto

El flujo de caja consolida los ingresos y egresos del proyecto durante los 10 años. En el año cero se registra la inversión inicial, mientras que en los años posteriores se contabilizan los beneficios netos (beneficios totales menos costos de operación y mantenimiento).

Tabla 4-22*Flujo de Caja del Sistema de Contrapesos Horizontales (10 años)*

Año	Inversión (S/.)	Beneficios (S/.)	Costos O&M (S/.)	Flujo Neto (S/.)	Flujo Descontado (S/.)
0	-73,142.69	—	—	-73,142.69	-73,142.69
1	—	69,375.00	-36,000.00	33,375.00	33,375.00
2	—	71,595.00	-37,152.00	34,443.00	27,457.75
3	—	73,886.04	-38,340.86	35,545.18	25,300.35
4	—	76,250.39	-39,567.77	36,682.62	23,312.47
5	—	78,690.41	-40,833.94	37,856.47	21,480.78
6	—	81,208.50	-42,140.63	39,067.87	19,793.00
7	—	83,807.17	-43,489.13	40,318.04	18,237.84
8	—	86,489.00	-44,880.78	41,608.22	16,804.86
9	—	89,256.65	-46,316.96	42,939.68	15,484.48
10	—	92,112.86	-47,799.11	44,313.75	14,267.84
				Σ=	142,371.68

Nota. Los flujos netos se actualizan aplicando la tasa de descuento del 12%. Los beneficios crecen a una tasa del 3.20% anual, correspondiente al incremento esperado de la demanda eléctrica.

5.7.8. Cálculo de los Indicadores Financieros

5.7.8.1. Valor Actual Neto (VAN)

El Valor Actual Neto (VAN) es la piedra angular de la evaluación financiera de proyectos. Su cálculo nos permite determinar el valor hoy de todos los flujos de caja (entradas y salidas) que generará el proyecto a lo largo de su vida útil, teniendo en cuenta el costo del dinero en el tiempo (la tasa de descuento).

Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$VAN = \sum_{t=0}^n \frac{(B_t - C_t)}{(1 + r)^t} \quad (5-10)$$

Donde:

- B_t : beneficios del año t
- C_t : costos del año t
- r : tasa de descuento (12% anual)
- n : número de años del horizonte de análisis (10 años)
- t : Año específico del flujo (desde 0 hasta 10).

Para cada año t , se determinó el flujo neto como la diferencia entre los beneficios anuales y los costos de operación y mantenimiento (O&M). El año 0 ($t=0$) contempla el desembolso por la inversión inicial, tal como se detalla en la **Tabla 4-22**. Por ejemplo, para el Año 1:

$$FN_1 = B_1 - C_1 = S/. 69,375.00 - S/. 36,000.00 = S/. 33,375.00 \quad (5-11)$$

Cada flujo neto nominal FN_t fue traído a valor presente aplicando el factor de descuento $(1+r)^{-t}$. Este paso es crucial para incorporar el principio del valor del dinero en el tiempo, permitiendo la comparación homogénea de flujos ocurridos en distintos momentos. La secuencia de cálculo para el flujo descontado del año t (FD_t) es:

$$FD_t = \frac{FN_t}{(1 + r)^t} \quad (5-12)$$

Igual también se presenta el cálculo para el Año 4:

- Flujo Neto Nominal (FN4): S/. 36,682.62
- Factor de Descuento para $t=4$: $(1+0.12)^4=1.5735$
- Flujo Descontado (FD4): $S/.36,682.62/1.5735=S/.23,312.47$
- Este valor de S/. 23,312.47 representa el valor equivalente en el período inicial (año 0) de los S/. 36,682.62 que se esperan recibir al final del cuarto año. Finalmente, el VAN se obtiene mediante la sumatoria algebraica de toda la serie de flujos de caja descontados, incluyendo la inversión inicial.

$$VAN = FD_0 + FD_1 + FD_2 + \dots + FD_{10} \quad (5-13)$$

$$VAN = (-73,142.69) + 33,375.00 + 27,457.75 + 25,300.35 + \dots + 14,267.84 \quad (5-14)$$

Resultando un VAN positivo (S/ 142,371.68) indica que el valor presente de los beneficios supera al de los costos, justificando económicamente la inversión.

5.7.8.2. Tasa Interna de Retorno (TIR)

La TIR es la tasa que iguala el valor presente de los beneficios y los costos, es decir, aquella que hace que el VAN sea igual a cero.

$$0 = \sum_{t=0}^n \frac{(B_t - C_t)}{(1 + TIR)^t} \quad (5-15)$$

Donde:

- B_t : beneficios del año t
- C_t : costos del año t
- TIR: Tasa Interna de Retorno.
- n : número de años del horizonte de análisis (10 años)
- t : Año específico del flujo (desde 0 hasta 10).

A diferencia del VAN, cuyo cálculo es directo una vez definida la tasa de descuento, la TIR se determina mediante un proceso iterativo, ya que la ecuación anterior no tiene una

solución algebraica directa para proyectos con flujos de caja extendidos. El procedimiento aplicado para este proyecto fue el siguiente:

Se partió de la ecuación con el flujo de caja del proyecto, donde la incógnita a despejar es la TIR:

$$0 = \frac{-73,142.69}{(1 + \text{TIR})^0} + \frac{33,375.00}{(1 + \text{TIR})^1} + \frac{34,443.00}{(1 + \text{TIR})^2} + \frac{35,545.18}{(1 + \text{TIR})^3} + \dots + \frac{44,313.75}{(1 + \text{TIR})^{10}} \quad (5-16)$$

Para la resolución práctica de esta ecuación en el presente estudio, se empleó la herramienta computacional Microsoft Excel, utilizando su función financiera TIR. Obteniéndose un TIR de 33.39%, valor superior a la tasa de descuento (12%). Por tanto, el proyecto es rentable, ya que la rentabilidad esperada supera ampliamente el costo de capital.

5.7.8.3. Relación Beneficio–Costo (B/C)

La Relación Beneficio-Costo (B/C) es un indicador financiero utilizado para determinar la rentabilidad de una inversión, comparando el valor actualizado de los beneficios netos esperados contra el valor actualizado de los costos incurridos. La fórmula general se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{B}{C} = I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{B_t - C_t}{(1 + i)^t} \quad (5-17)$$

Donde:

- B_t = Beneficios del período t
- C_t = Costos de operación y mantenimiento del período t
- I = Tasa de descuento.
- I_0 = Inversión inicial en el período 0.

Alternativamente, partiendo del Valor Actual Neto (VAN), la relación B/C puede calcularse mediante la siguiente derivación:

$$\frac{B}{C} = I_0 + \text{VAN} \quad (5-18)$$

De la tabla de flujos de caja proporcionada se obtienen los siguientes datos:

Inversión Inicial (I_0): S/ 73,142.69

Valor Actual Neto (VAN): S/ 142,371.68

Sustituyendo estos valores en la fórmula derivada, se procede al cálculo.

Cálculo del Valor Actual de los Flujos Netos:

$$VA(\text{Flujos Netos}) = VAN + I_0 = 142,371.68 + 73,142.69 = \text{S/ } 215,514.37 \quad (5-19)$$

Cálculo de la Relación Beneficio-Costo:

$$\frac{B}{C} = \frac{VA(\text{Flujos Netos})}{I_0} = \frac{215,514.37}{73,142.69} = 2.95 \quad (5-20)$$

La Relación Beneficio-Costo de 2.95 obtenida indica que por cada unidad monetaria (Sol) invertida en el proyecto, se genera un retorno de 2.95 unidades monetarias en términos de valor presente. Dado que el valor resultante es superior a 1, se concluye que el proyecto es económicamente viable y rentable según el criterio Beneficio-Costo.

La magnitud del indicador de 2.95 sugiere, además, un nivel de rentabilidad significativamente alto, reforzando la conveniencia de la inversión.

5.7.8.4. Periodo de Recuperación de la Inversión

El Periodo de Recuperación de la Inversión (PR) es un indicador financiero que determina el tiempo requerido para que los flujos de caja netos generados por el proyecto igualen el monto de la inversión inicial. Este indicador es de especial utilidad para evaluar el riesgo asociado a la liquidez del proyecto, donde un período de recuperación más corto implica una menor exposición al riesgo (Gitman & Zutter, 2019).

Tabla 4-23

Periodo de Recuperación.

Año	Flujo Neto Anual (USD)	Flujo Acumulado (USD)	Estado
0	-S/ 73,142.69	-S/ 73,142.69	Inversión inicial
1	S/ 33,375.00	-S/ 39,767.69	En recuperación
2	S/ 34,443.00	-S/ 5,324.69	En recuperación
3	S/ 35,545.18	S/ 30,220.49	Inversión recuperada

Nota. Elaboración propia en base a la tabla de flujos de caja.

Fórmula general:

$$PR = n + \frac{FN_{n+1}}{VPR} \quad (5-21)$$

donde:

- n = último año con flujo acumulado negativo
- Valor por recuperar = valor absoluto del flujo acumulado negativo en el año n .
- Flujo neto del año siguiente = flujo neto positivo del año $n+1$.

De la tabla anterior:

- En el año 2, el flujo acumulado aún es negativo (-5,324.69).
- En el año 3, ya es positivo (+30,220.49).

Por lo tanto, la recuperación ocurre entre los años 2 y 3.

$$PR = 2 + \frac{5,324.69}{35,545.18} \quad (5-22)$$

$$PR = 2 + 0.15 = 2.15 \text{ años} \quad (5-23)$$

Resultando 2.15 años, lo cual significa que la inversión inicial se recupera antes del tercer año de operación.

La evaluación económica confirma la viabilidad de implementar el sistema de contrapesos horizontales, a pesar de su mayor inversión inicial (S/ 73,142.69). Los indicadores obtenidos demuestran rentabilidad sobresaliente:

- VAN: S/ 142,371.68 (creación de valor económico neto)
- TIR: 33.39% (supera la tasa de descuento del 12%)
- Relación B/C: 2.95 (por cada sol invertido se recuperan 2.95 soles)

El periodo de recuperación de la inversión es de apenas 3 años, evidenciando la rápida generación de flujos positivos. Estos resultados validan económicamente la selección del sistema de contrapesos horizontales, justificando la inversión adicional por sus beneficios superiores en seguridad, confiabilidad y rentabilidad financiera.

5.7.8.5. Flujos de Caja Incrementales

El análisis de flujos de caja incrementales permite evaluar los beneficios netos anuales que genera la inversión adicional en el sistema horizontal. Cada flujo está actualizado con la tasa de descuento del 12% para obtener su valor presente, considerando el valor del dinero en el tiempo y permitiendo una evaluación económica rigurosa.

Tabla 4-17

Flujo de caja para un periodo de 10 años

Año	Inversión Incremental	Ahorros en Multas	Ahorros en O&M	Costos Adicionales	Flujo Neto	Factor Descuento (12%)	Valor Presente
0	-34,158.60	0	0	0	-34,158.60	1	-34,158.60
1	0	8,500.00	1,600.00	-800	9,300.00	0.8929	8,303.57
2	0	8,500.00	1,600.00	-800	9,300.00	0.7972	7,413.69
3	0	8,500.00	1,600.00	-800	9,300.00	0.7118	6,619.37
4	0	8,500.00	1,600.00	-800	9,300.00	0.6355	5,910.44
5	0	8,500.00	1,600.00	-800	9,300.00	0.5674	5,276.75
6	0	8,500.00	1,600.00	-800	9,300.00	0.5066	4,711.46
7	0	8,500.00	1,600.00	-800	9,300.00	0.4523	4,206.63
8	0	8,500.00	1,600.00	-15,800.00	-5,700.00	0.4039	-2,302.23
9	0	8,500.00	1,600.00	-800	9,300.00	0.3606	3,353.58
10	0	8,500.00	1,600.00	-800	9,300.00	0.322	2,994.60

Nota. Costos adicionales incluyen mantenimiento especializado del sistema de puesta a tierra y reemplazo de componentes en el año 8. Elaboración propia.

El Valor Actual Neto (VPN) del proyecto es de S/. 12,328.26, lo que confirma su viabilidad económica. Los flujos de caja proyectados son consistentemente positivos durante el horizonte de evaluación, a excepción del año 8, en el que se contempla el costo de reemplazo de los componentes principales del sistema vertical. El VPN positivo demuestra que el proyecto generará beneficios superiores a la inversión inicial, justificando su ejecución.

5.7.8.6. Indicadores de Rentabilidad

Los indicadores de rentabilidad son esenciales para la toma de decisiones de inversión. Estas métricas financieras resumen los flujos de caja del proyecto y ofrecen una evaluación objetiva de su atractivo económico. Permiten comparar la rentabilidad del proyecto con otras alternativas de inversión y con el costo de capital, facilitando una elección informada.

Tabla 4-18

Resumen de Indicadores Financieros del Proyecto

Indicador	Valor	Interpretación
Valor Presente Neto (VPN)	S/. 12,328.26	Beneficio neto actualizado positivo
Relación Beneficio/Costo (B/C)	1.36	Por cada S/. 1 invertido se obtienen S/. 1.36
Tasa Interna de Retorno (TIR)	20.12%	Rentabilidad moderada y realista
Periodo de Recuperación	3.7 años	Recuperación de inversión en menos de 4 años

Nota. Indicadores calculados con base en flujos incrementales a 10 años y tasa de descuento del 12%. La rentabilidad moderada refleja un escenario conservador más realista.

Elaboración propia.

Todos los indicadores son favorables al proyecto: el VPN positivo confirma que genera valor, la relación B/C superior a 1.0 indica rentabilidad, la TIR del 20% supera la tasa de descuento con un margen prudente, y el período de recuperación es razonable para este tipo de inversiones.

5.7.8.7. Análisis de Sensibilidad

La robustez del proyecto debe evaluarse bajo diferentes escenarios para identificar los riesgos asociados con las variables más sensibles. El análisis de sensibilidad permite verificar si el proyecto mantiene su viabilidad económica ante cambios en los supuestos iniciales, particularmente en las multas regulatorias que representan el principal beneficio del sistema horizontal.

Tabla 4-19*Análisis de Sensibilidad - Variación de la Relación Beneficio/Costo*

Escenario	Variación en Multas	Multa Anual (S/.)	B/C Resultante	TIR
Optimista	Incremento 50%	12,750.00	1.67	27.80%
Base	Escenario actual	8,500.00	1.36	20.10%
Pesimista	Reducción 25%	6,375.00	1.2	16.20%
Conservador	Reducción 50%	4,250.00	1.04	12.80%

Nota. El proyecto mantiene viabilidad económica en todos los escenarios, con B/C positiva incluso en el caso más conservador. Elaboración propia.

Los resultados del análisis de sensibilidad demuestran la estabilidad del proyecto ante variaciones significativas en las multas. Incluso en el escenario más conservador, con multas reducidas en 50%, el proyecto mantiene viabilidad económica con B/C de 1.04 y TIR de 12.8%, apenas por encima de la tasa de descuento.

5.8. Estrategia de Financiamiento Propuesta

Para viabilizar la implementación del sistema de puesta a tierra con contrapesos horizontales en paralelo, cuya inversión total asciende a S/ 73,142.69, se plantea una estrategia de financiamiento que combina los siguientes mecanismos:

1. Inclusión en el Presupuesto Institucional por Modificatoria de Meta: La inversión será incorporada en el Presupuesto Institucional de la empresa concesionaria Electro Sur Este mediante el proceso de Modificatoria de Meta, de acuerdo con lo establecido en el Artículo 12 del Decreto Legislativo N° 1440 - Ley del Sistema Nacional de Programación Multianual y Gestión de Inversiones. Esto garantiza la asignación formal de recursos en el marco de la Programación Multianual de Inversiones.
2. Modalidad de Ejecución mediante Adicional de Obra: Para la ejecución específica, se gestionará un Adicional de Obra conforme al Artículo 222° del Reglamento de la Ley de

Contrataciones del Estado, sustentado técnicamente en el incumplimiento de los valores de resistencia de puesta a tierra establecidos en:

- Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos (NTCSE) - Resolución OSINERGMIN N° 096-2016-OS/CD
 - Código Nacional de Electricidad - Utilización 2011 (Sección 70 - Puesta a Tierra)
3. Mecanismo de Garantía: El contrato del adicional de obra contará con una Carta Fianza de Cumplimiento de Contrato por el 100% del monto adjudicado, según lo dispuesto en el Artículo 253° del Reglamento de Contrataciones del Estado, garantizando la correcta ejecución de los trabajos.

Esta estrategia integral asegura la fuente de financiamiento mediante la programación presupuestaria formal, al tiempo que garantiza la ejecución técnica mediante el mecanismo contractual de adicional de obra, cumpliendo con toda la normativa del Sistema Nacional de Inversión Pública y de contrataciones del Estado.

5.9. *Mantenimiento y Durabilidad de Contrapesos Horizontales*

El mantenimiento y la durabilidad son factores críticos en la evaluación de cualquier sistema de puesta a tierra, y los contrapesos horizontales en paralelo no son una excepción. En comparación con otras configuraciones, los contrapesos horizontales presentan una serie de beneficios significativos en términos de facilidad de mantenimiento y durabilidad.

5.9.1. Beneficios de Mantenimiento:

- ✓ **Acceso Sencillo:** La disposición horizontal de los contrapesos permite un acceso más fácil y directo para la inspección y el mantenimiento en comparación con sistemas verticales. Esto simplifica las tareas de revisión y reparación, reduciendo el tiempo y los costos asociados con el mantenimiento.
- ✓ **Menor Riesgo de Corrosión:** Al estar enterrados a una profundidad menor y rodeados de cemento conductor, los contrapesos horizontales están menos

expuestos a condiciones adversas como la humedad excesiva y los contaminantes del suelo, lo que reduce el riesgo de corrosión y prolonga la vida útil del sistema.

- ✓ **Facilidad de Reemplazo:** En caso de que un contrapeso requiera ser reemplazado, la disposición horizontal facilita el proceso, ya que se puede acceder a los componentes sin la necesidad de realizar excavaciones profundas o costosas.

5.9.2. Durabilidad:

- ✓ **Materiales Resilientes:** El uso de cemento conductor en los contrapesos horizontales contribuye a una mayor durabilidad del sistema. Este material no solo mejora la conductividad eléctrica, sino que también protege los conductores de la degradación física y química, asegurando una vida útil más prolongada.
- ✓ **Estabilidad en Diversas Condiciones:** Los contrapesos horizontales ofrecen una resistencia de puesta a tierra confiable y consistente en una amplia gama de condiciones del terreno. Su diseño y el uso de materiales adecuados permiten que el sistema mantenga su efectividad a lo largo del tiempo, incluso en suelos con variaciones en la resistividad.
- ✓ **Menor Necesidad de Mantenimiento Proactivo:** Gracias a su robustez y al uso de cemento conductor, los contrapesos horizontales requieren menos intervenciones para el mantenimiento proactivo, lo que se traduce en menores costos operativos a lo largo de la vida útil del sistema.

La implementación de contrapesos horizontales en paralelo no solo mejora la eficiencia de la puesta a tierra, sino que también ofrece ventajas significativas en términos de mantenimiento y durabilidad. Su diseño facilita el acceso y reduce el riesgo de corrosión, mientras que los materiales utilizados aseguran una vida útil prolongada y una menor necesidad de intervenciones frecuentes.

5.10. Conclusiones del capítulo

El presente capítulo ha demostrado, mediante un análisis técnico-económico integral, que la implementación de contrapesos horizontales en paralelo con cemento conductor constituye la solución óptima para el sistema de puesta a tierra del alimentador MZ-02, superando claramente a la configuración tradicional de electrodos verticales.

Desde la perspectiva técnica, la solución propuesta garantiza valores de resistencia consistentemente inferiores a $10\ \Omega$ (en un rango de $8.47\ \Omega$ a $9.35\ \Omega$) en todos los nodos, cumpliendo holgadamente con los requisitos de la norma IEEE Std 80-2013 y el Reglamento Técnico de Electricidad peruano. Esta performance es independiente de las variaciones de resistividad del terreno, lo que soluciona definitivamente la limitación principal de los electrodos verticales, cuyas resistencias oscilan críticamente entre $28.72\ \Omega$ y $113.56\ \Omega$.

Económicamente, el análisis de flujos de caja descontados valida la plena viabilidad de la inversión. Los indicadores financieros obtenidos un VAN positivo de S/ 142,371.68, una TIR del 33.39% que supera ampliamente la tasa de descuento del 12%, y una Relación Beneficio-Costo de 2.95 confirman de manera contundente la rentabilidad del proyecto. Estos resultados demuestran que, por cada sol invertido, se generan S/ 2.95 en retorno, creando un valor económico neto significativo. Adicionalmente, el periodo de recuperación de la inversión de apenas 2.15 años evidencia una rápida generación de flujos positivos y un bajo riesgo de liquidez.

Por lo tanto, se concluye que los contrapesos horizontales en paralelo con cemento conductor no son una alternativa más costosa, sino la única solución técnicamente viable y económicamente rentable para asegurar la operación confiable, segura y normativamente conforme del alimentador MZ-02. Su implementación, mediante la estrategia de financiamiento propuesta (adicional de obra).

CONCLUSIONES

1. Respecto al estudio de la resistividad del terreno, se logró determinar el perfil de resistividad a lo largo del alimentador MZ-02, identificando variaciones significativas entre los diferentes nodos. Esta caracterización fue esencial para evidenciar la necesidad de aplicar soluciones específicas de puesta a tierra en función de las condiciones geotécnicas del terreno. Los resultados demostraron que, en muchos casos, la alta resistividad del suelo imposibilita el uso eficaz de configuraciones tradicionales, por lo que se requiere adoptar sistemas que aseguren niveles de resistencia compatibles con los valores establecidos por la norma IEEE 80-2000.
2. En cuanto al análisis de configuraciones de puesta a tierra, se evaluaron distintas alternativas, siendo los contrapesos horizontales en paralelo con cemento conductivo la opción que presentó mejor desempeño técnico. Esta configuración logró mantener los niveles de resistencia por debajo del umbral de $10\ \Omega$ en todos los nodos analizados, incluso en aquellos con terrenos de alta resistividad, lo que garantiza mayor seguridad y confiabilidad operativa.
3. Respecto a la evaluación económica y análisis de beneficios, si bien la implementación del sistema de contrapesos horizontales en paralelo representa una inversión inicial de S/ 73,142.69, superior a la configuración vertical, esta diferencia se justifica plenamente a través de indicadores financieros excepcionalmente sólidos: un VAN de S/ 142,371.68, una TIR del 33.39% y un periodo de recuperación de 2.15 años. Los beneficios derivados de la mayor durabilidad operativa, reducción significativa de costos de mantenimiento, y el desempeño técnico superior ante condiciones adversas del terreno, demuestran que esta solución trasciende el concepto de gasto para constituirse en una inversión estratégica, sostenible y económicamente rentable para el alimentador MZ-02.

SUGERENCIAS

1. Dada la significativa reducción en la resistencia de puesta a tierra y la mejora en los niveles de puesta a tierra, se recomienda optar por la implementación de contrapesos horizontales en paralelo en otros proyectos similares al alimentador MZ-02.
2. Para aprovechar al máximo la durabilidad y los beneficios de los contrapesos horizontales en paralelo, se debe incluir un plan de mantenimiento proactivo. Esto incluiría inspecciones periódicas y una revisión sistemática para asegurar que el sistema se mantenga en condiciones óptimas y continúe cumpliendo con los estándares de resistencia.
3. Dada la diferencia de costo significativa entre los sistemas, se recomienda explorar alternativas de financiamiento y estrategias de presupuesto que permitan la implementación de contrapesos horizontales en paralelo sin comprometer otras áreas del proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

- Aman, L. (2017). *Cálculo Del Índice Sectorizado De Pérdidas En La Empresa Eléctrica Quito, Implementación De Una Aplicación Computacional En Matlab, Y Comparación De La Metodología Actual Para El Cálculo De Pérdidas Utilizada Por La EEQ Ante Una Nueva Alternativa.*
- Anchatuña Maigua, k. D. (2022). *DISEÑO DE LA RED ELECTRICA SUBTERRANEA EN MEDIO Y BAJO VOLTAJE DEL BARRIO ELOY ALFARO.* Quito.
- Bonifaz F., J. L. (2001). *DISTRIBUCION ELECTRICA EN EL PERU: REGULACION Y EFICIENCIA.* Lima.
- Camarena Camayoc, P. I. (2009). *La Optimización de los Métodos para el Diseño de un Sistema de Puesta a Tierra en la Línea de Transmisión de 60kv - Explorador.* Huancayo.
- Cedeño Lucart, L. A. (2019). *Estudio de Los Métodos Utilizados en el Diseño de Puesta a Tierra en las Subestaciones Eléctricas y Líneas de Transmisión para los niveles de Tensión De 400kv, 230kv, 115kv Y 34.5kv en Cadafe.* Barcelona.
- CNE-Suministro. (2011). *Código Nacional de Electricidad.*
- Dammert Lira, A., Molinelli Aristondo, F., & Carbajal Navarro, M. A. (2011). *FUNDAMENTOS TECNICOS Y ECONOMICOS DEL SECTOR ELESTRICO PERUANO.* Lima.
- DGE-Terminología. (2022). *Dirección General de Electricidad - Terminología.*
- EasyPower. (2025). *Types of Grounding Studies.* Recuperado de: <https://www.easypower.com/resources/article/types-of-grounding-studies>.
- Huamaní de la Cruz, J. C. (2022). *Mejoramiento De Propiedades Mecánicas De Suelos Arcillosos Mediante La Incorporación De Cenizas De Carbón Para Vías Carrozables, Puerto Maldonado.*

- IEEE - Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos. (2000).
- IEEE. (2019). *Analysis of Grounding Systems. IEEE Journals & Magazine*. Recuperado de:
<https://ieeexplore.ieee.org/document/4110697/>.
- IEEE Standards. (2015). *Límite máximo de elevación del potencial de tierra admisible del sistema de puesta a tierra de la subestación*.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/7097032>
- IEEE Std 81. (2012). *Guía IEEE para la medición de la resistividad, la impedancia y los potenciales superficiales de un sistema de puesta a tierra*. Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.
- IEEE Std. 80. (2013). *Guía IEEE para la seguridad en la conexión a tierra de subestaciones de CA*.
- KLK. (2025). *Sistema de puesta a tierra - Explicación*. Recuperado de:
<https://www.klk.es/sistema-de-puesta-a-tierra/>.
- Lara, R. E. (1990). *Sistemas de Distribución*.
- León Chaupín, R. E. (2021). *Mejoramiento De La Puesta A Tierra En Estructuras Arriostradas Tipo Vsl De La Línea de Transmisión 500 Kv L-5032 Chilca - Poroma*. Lima.
- Morocho Sinchiguano, E. F. (2022). *Diseño de una red de distribución en media y baja tensión, para las comunidades: Rumipamba, Atacapi, Lumucha, canoa yacu y 10 de agosto en la provincia de orellana*.
- Norma Técnica Peruana. (2017).
- Pacheco Guambaña, Á. T., & Jiménez Zhigui, J. M. (2013). *Diseño De Sistemas De Puesta A Tierra Partiendo De Un Modelo Biestratificado De Terreno, Aplicando Un Software Computacional En El Sector*.

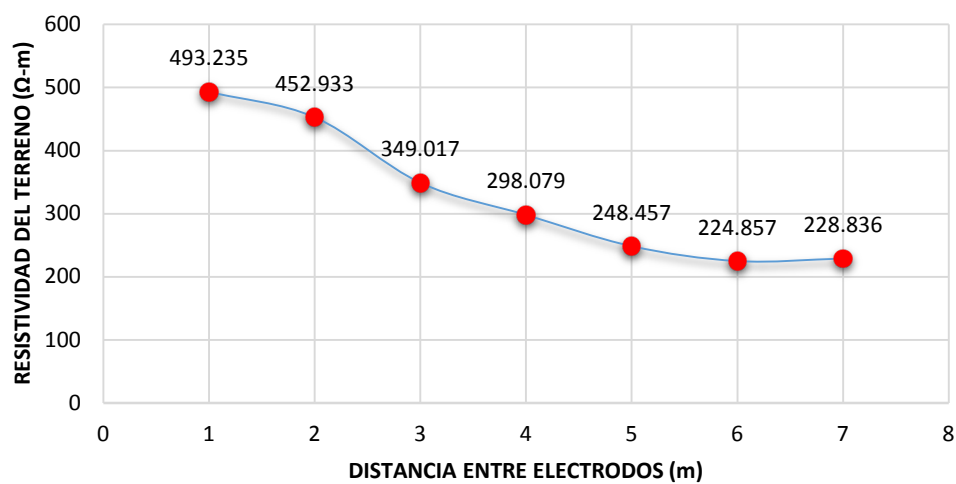
- Poma Gómez, R. A. (2020). *Influencia De Un Sistema De Aterramiento Por Contrapesos Horizontales En La Optimización De La Resistencia De Puesta A Tierra de las Torres de Transmisión de la Línea de 33 Kv Pertenecientes a Electroperu S. A. Huancayo.*
- Ramírez Castaño, S. (2004). *Redes de distribución de energía.*
- Riofrío, C. (2004). *Apuntes de distribución de energía eléctrica.*
- Sallam, A. A., & Malik, O. P. (2011). *Sistemas eléctricos De Distribución.*
- Samane Mogollon, J. A. (2020). *Introducción Al Diseño De Puestas A Tierra Con Cemento Conductivo Geo.*
- Sepúlveda, V. C. (2015). *Diseño de SPAT," Academia.edu, noviembre 2015.*
- Sharma, P. V. (2011). *Geofísica ambiental e ingeniería. Cambridge University Press.*
- Vásquez Villarruel, R. M. (2019). *Rediseño Óptimo De Redes Radiales De Distribución Eléctrica En Bajo Voltaje Considerando Las Restricciones De La Infraestructura Eléctrica Y Urbana Existente.*
- www.edpproyectos.com. (2022).
- www.sonel.pl. (2023).
- Zhdanov, M. S. (2009). *"Teoría y métodos electromagnéticos geofísicos". Elsevier, 2009.IEC 62305-3:2010. "Protección contra rayos - Parte 3: Daños físicos a estructuras y riesgo vital". Comisión Electrotécnica Internacional, 2010.*

ANEXOS

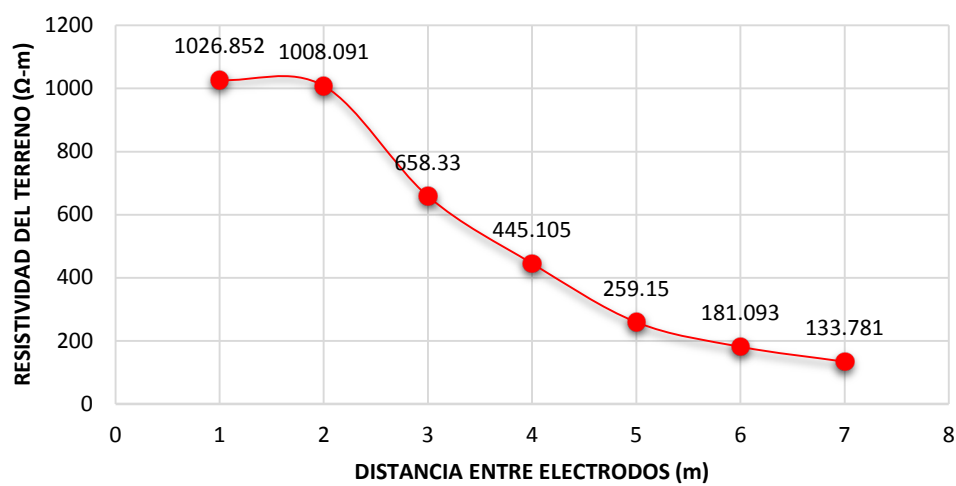
ANEXO A

**Gráficos de la resistividad vs la distancia de electrodos para los diferentes nodos del
alimentador MZ-02**

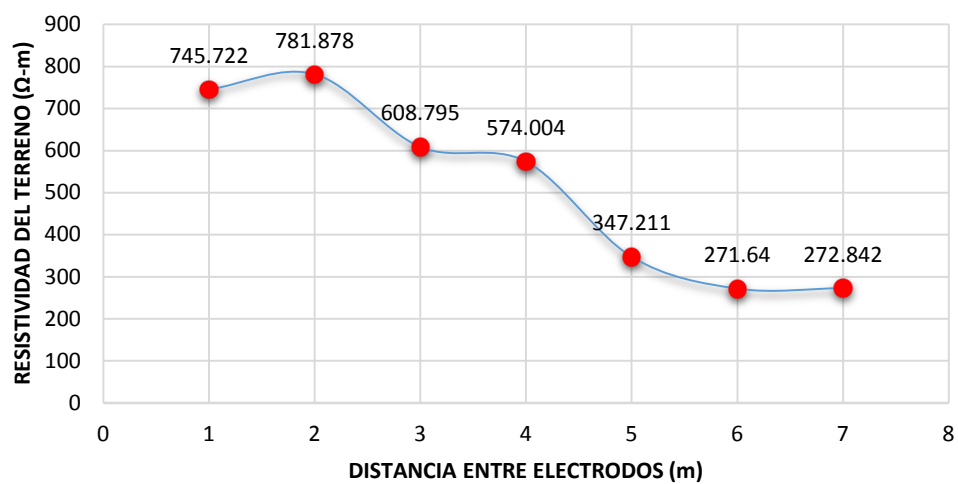
NODO MT 9446



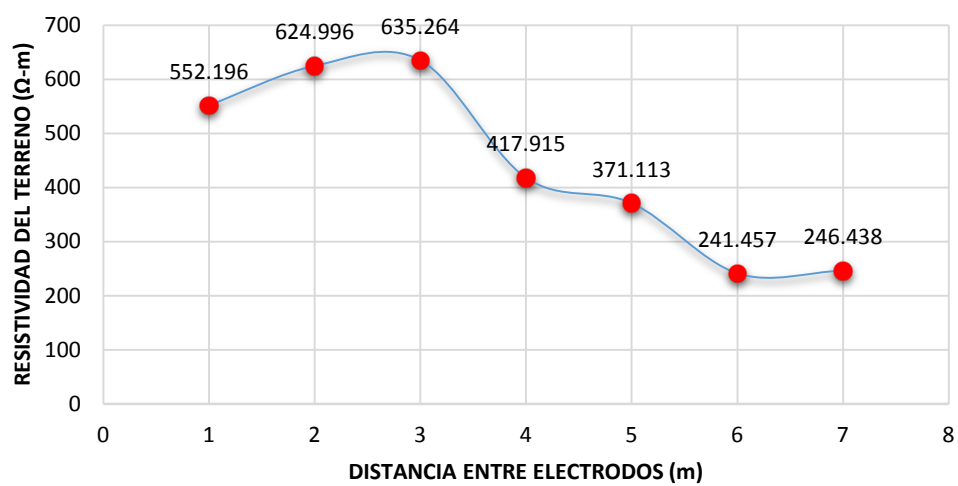
NODO MT 9348



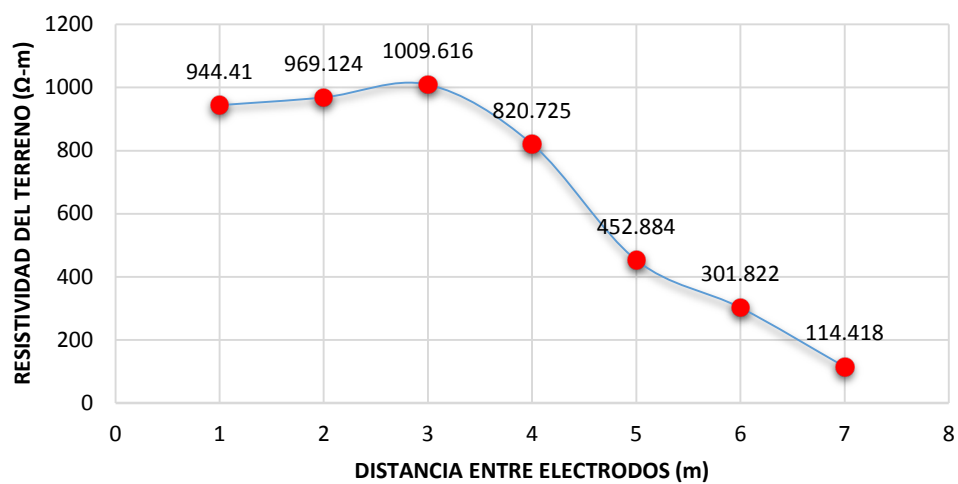
NODO MT 3213



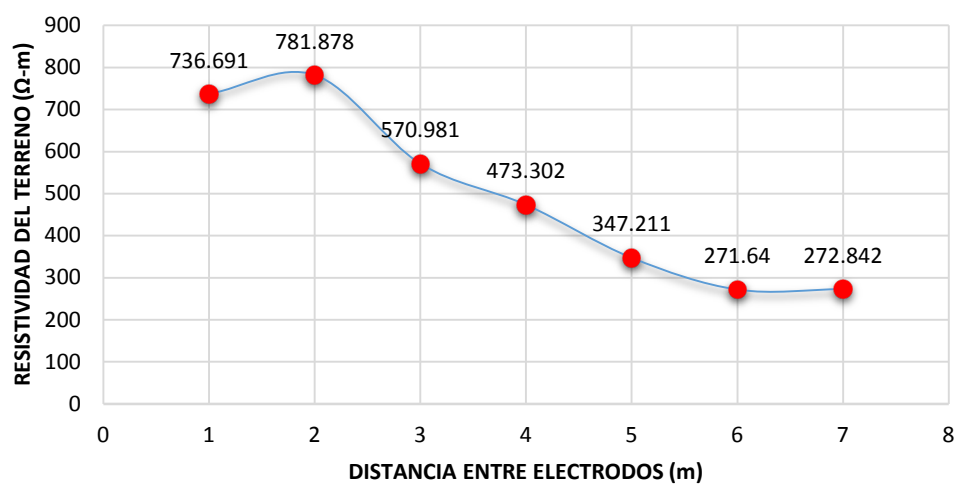
NODO MT 3316

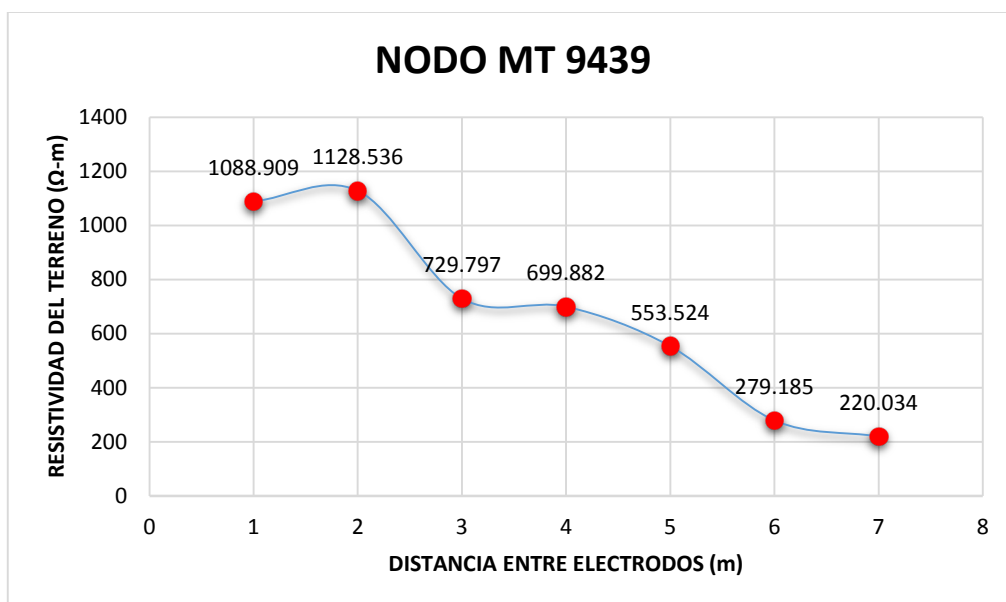
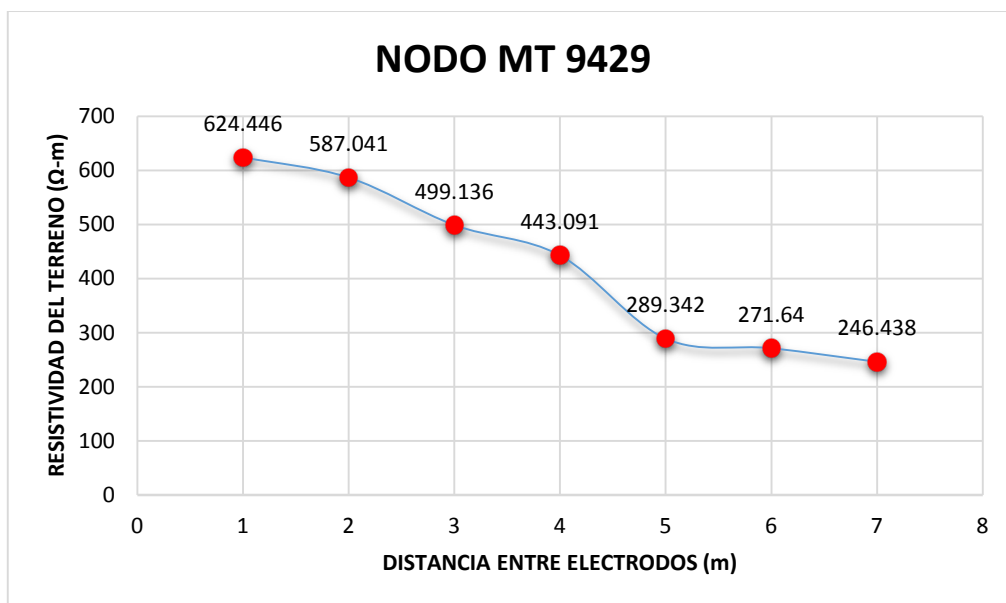


NODO MT 9786

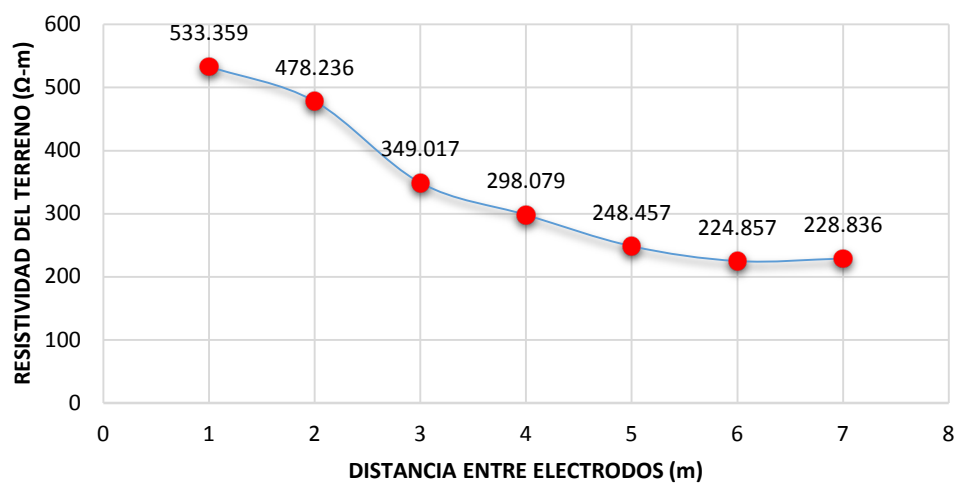


NODO MT 9394

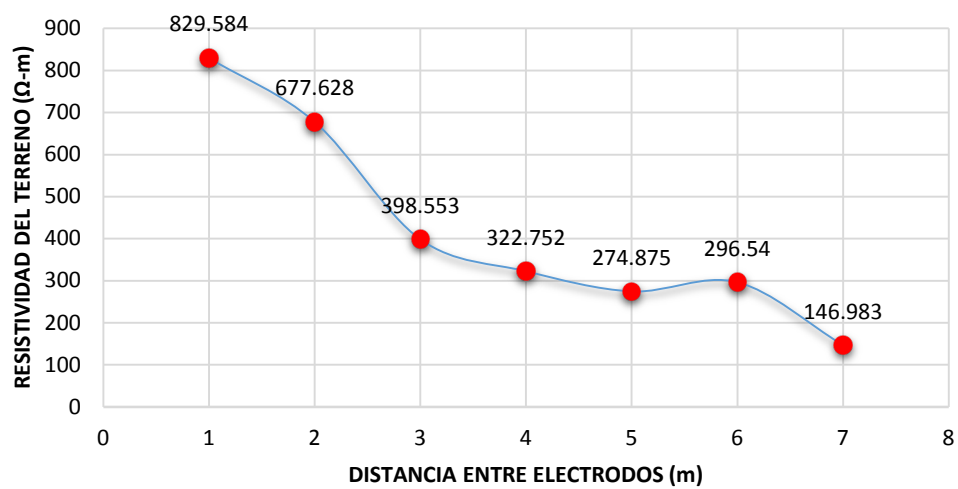




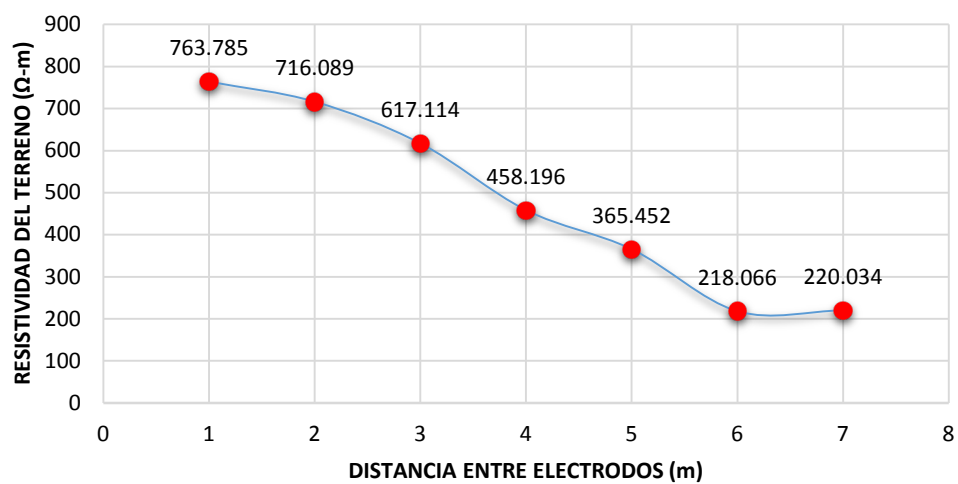
NODO MT 7694



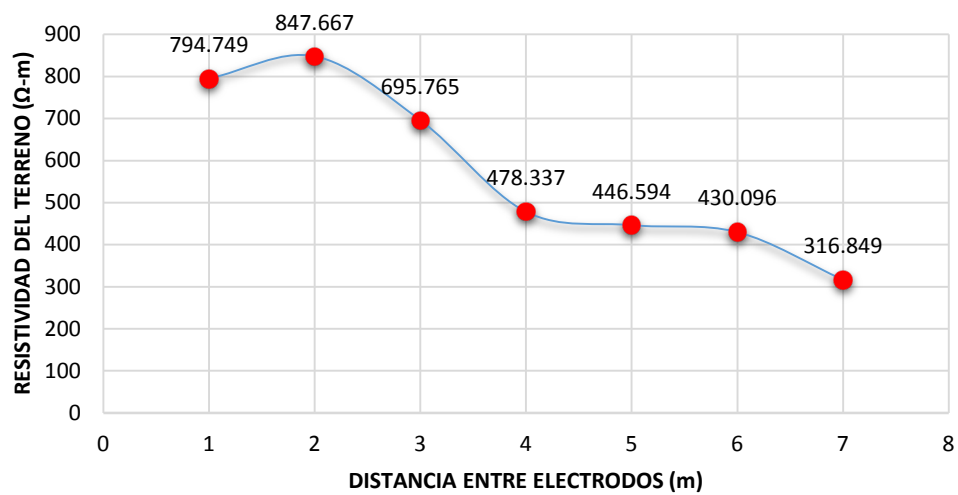
NODO MT 9364

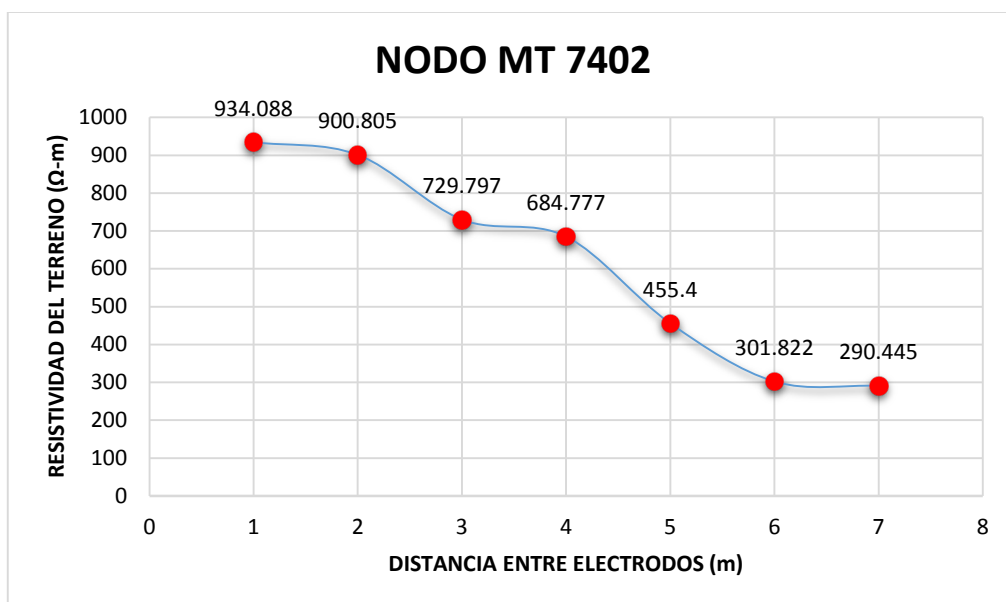
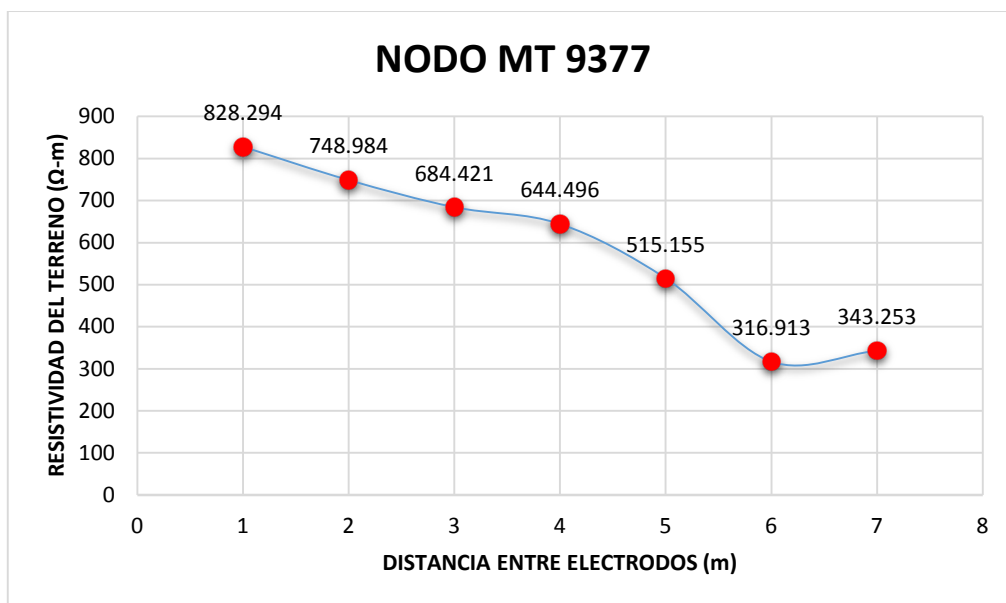


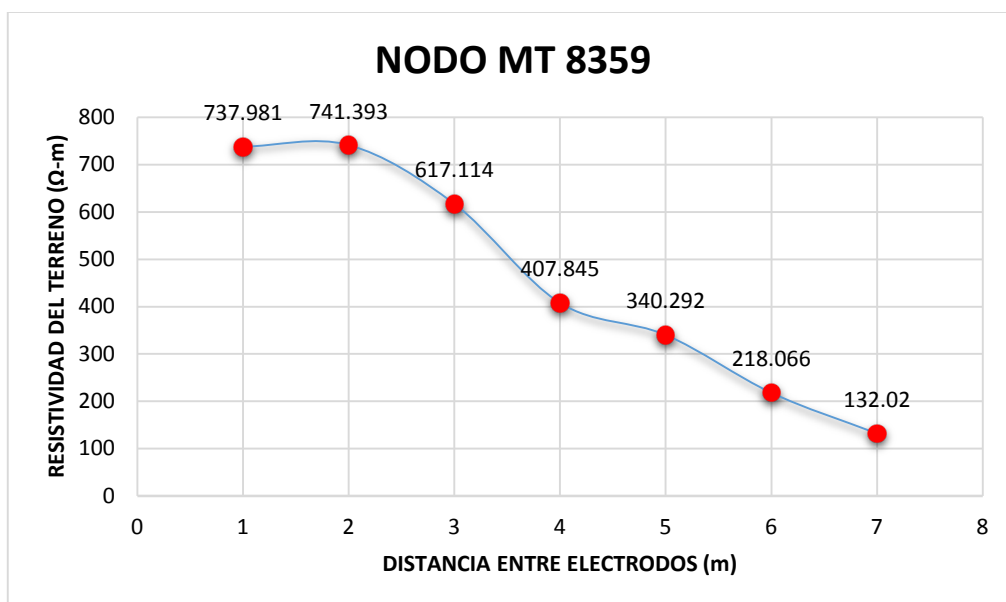
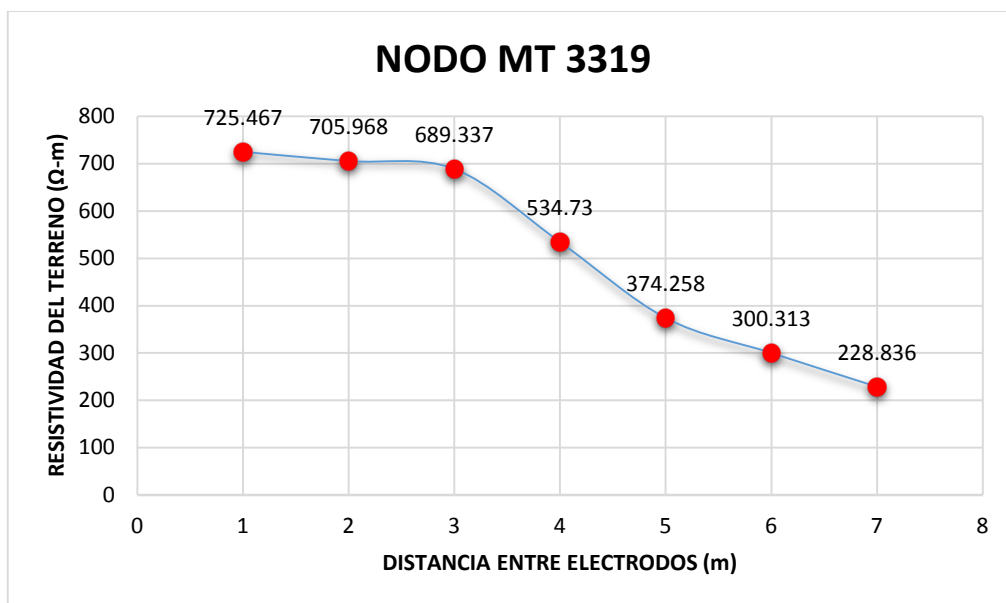
NODO MT 7527

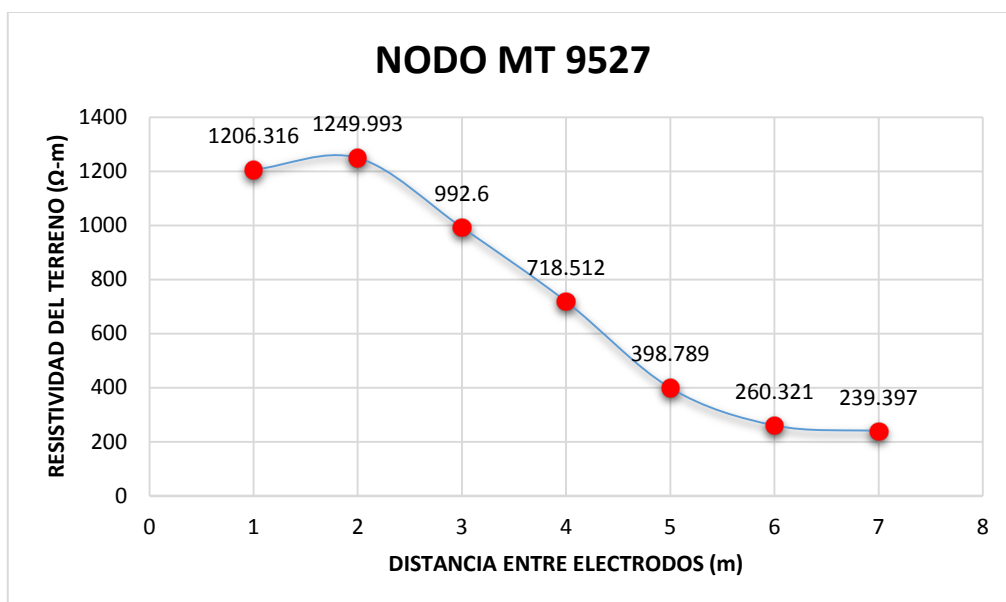
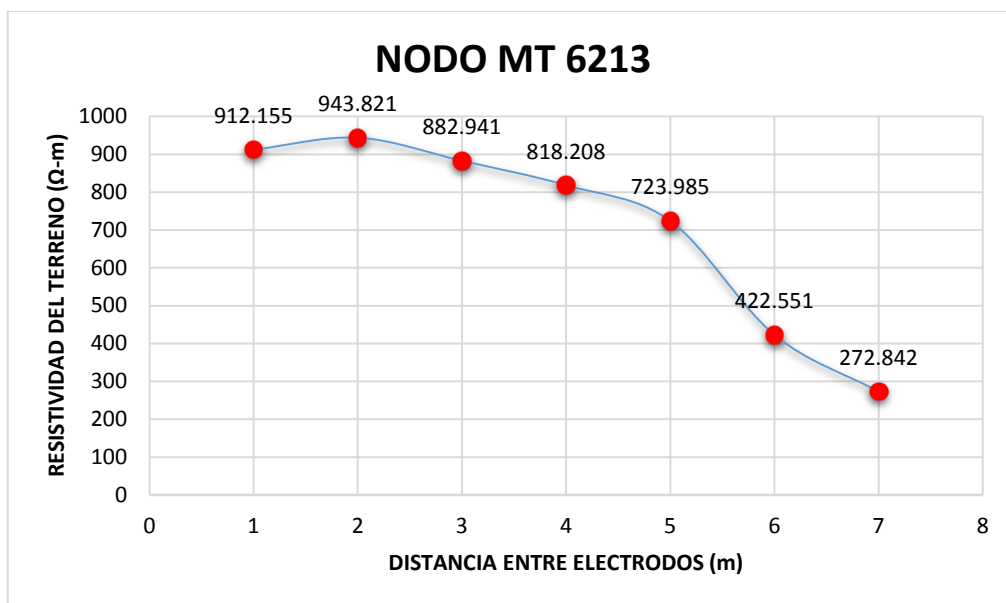


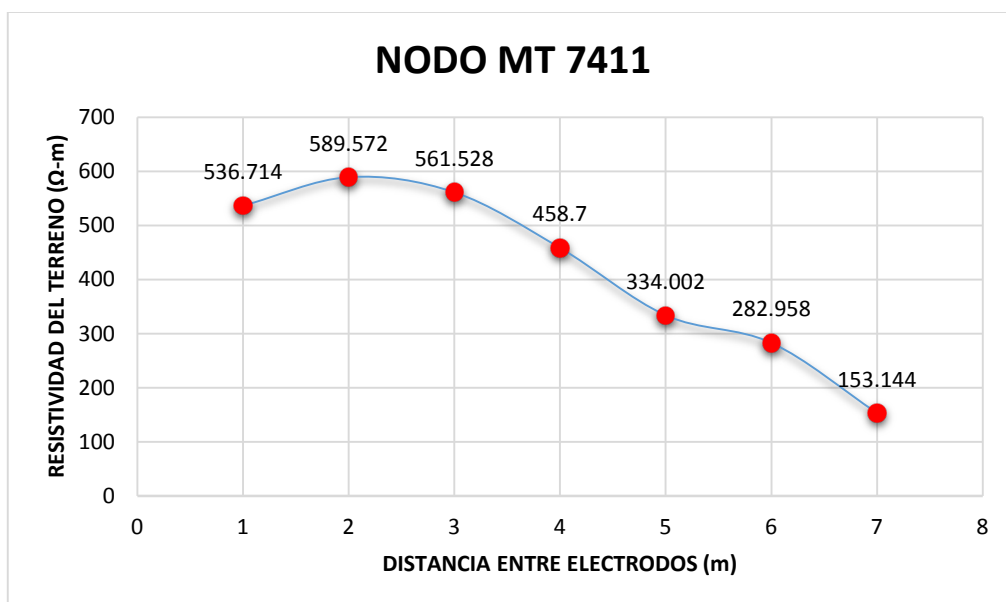
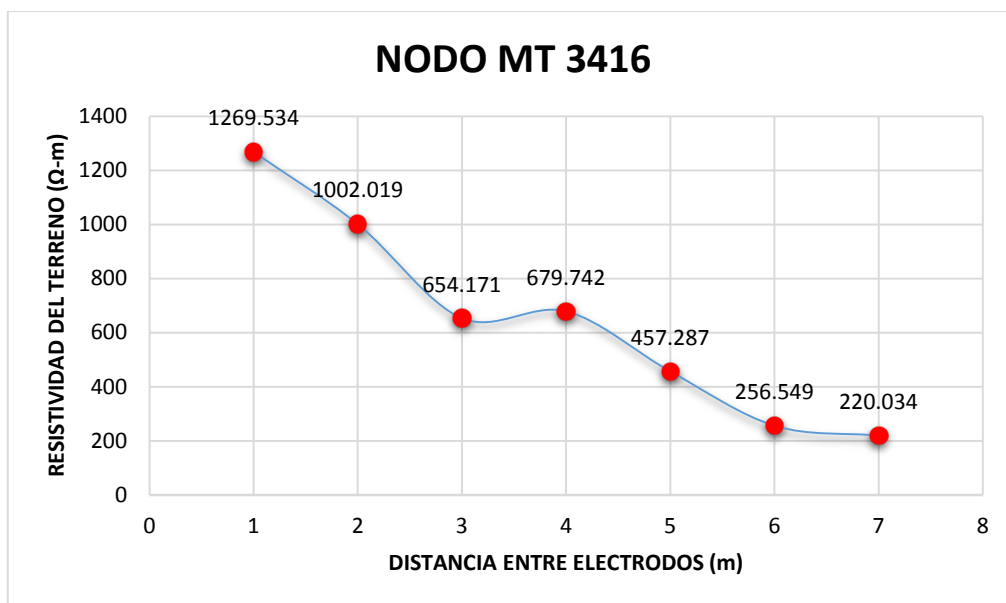
NODO MT 9084



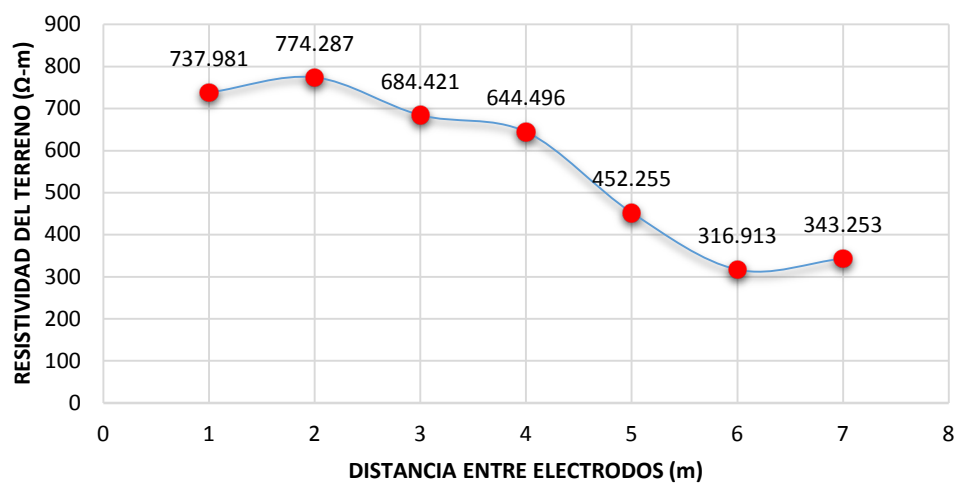




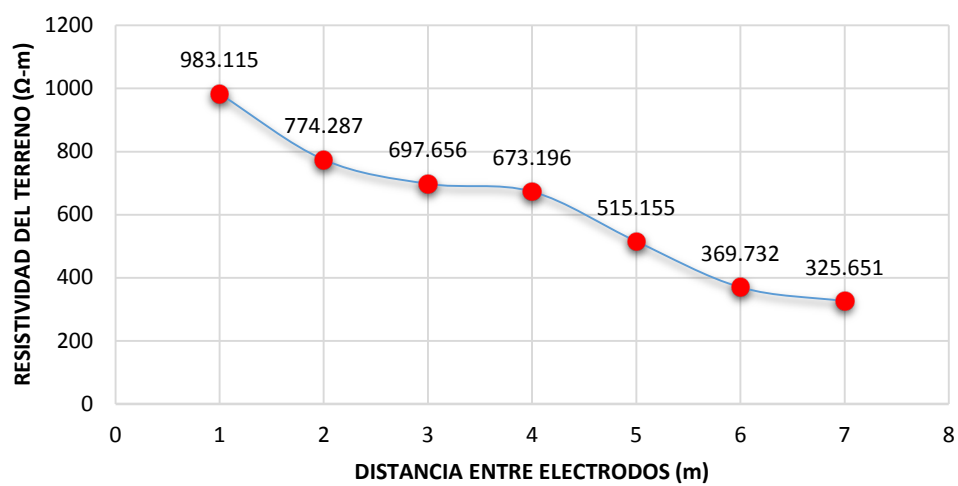


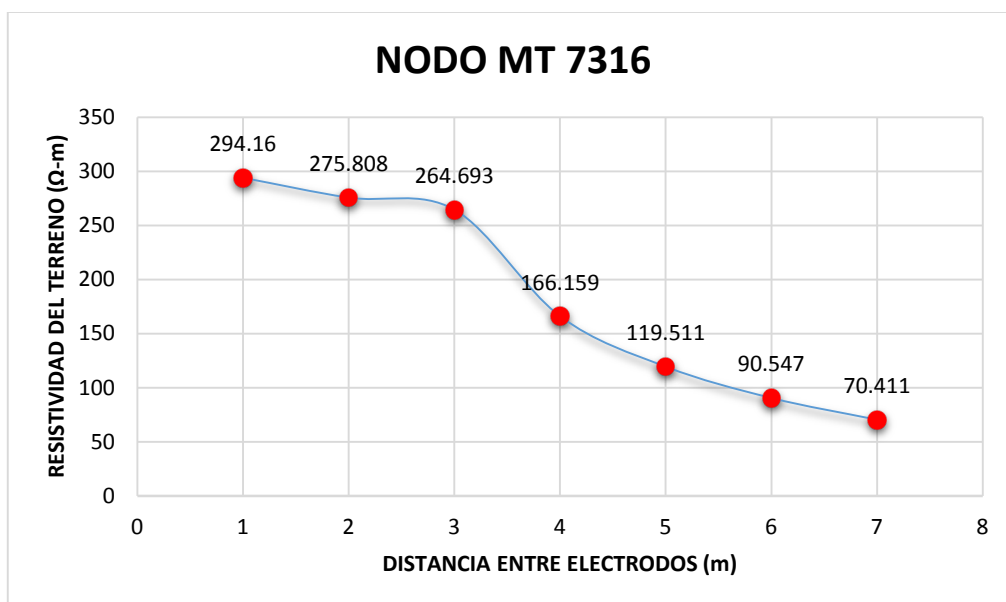
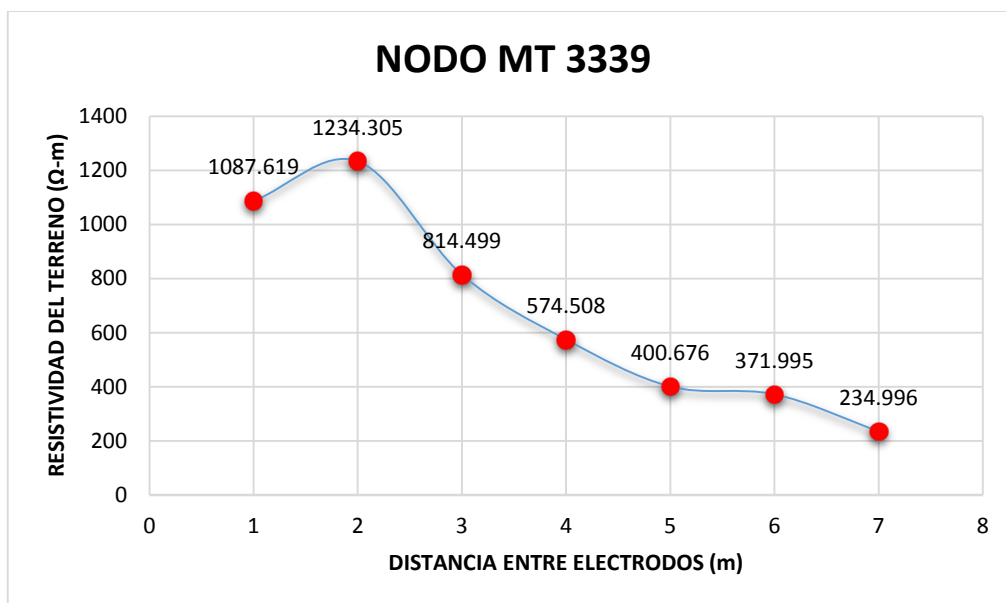


NODO MT 3279

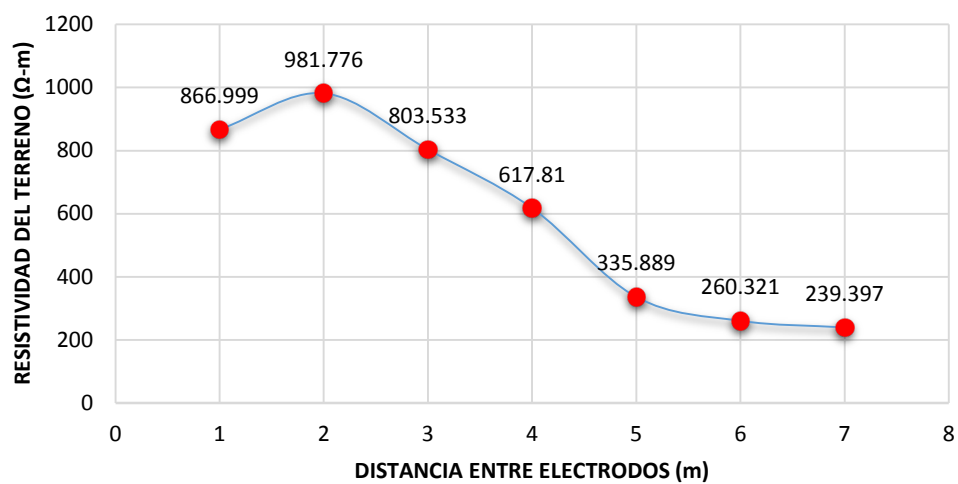


NODO MT 7948

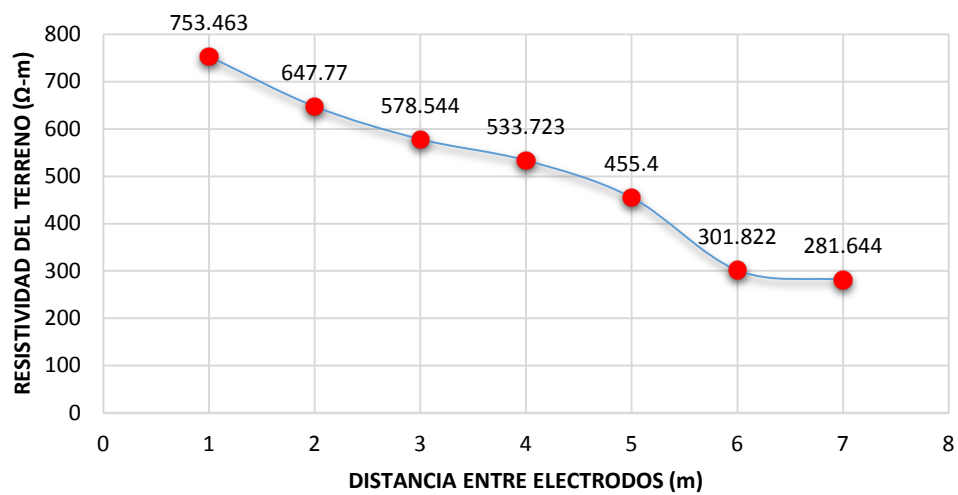




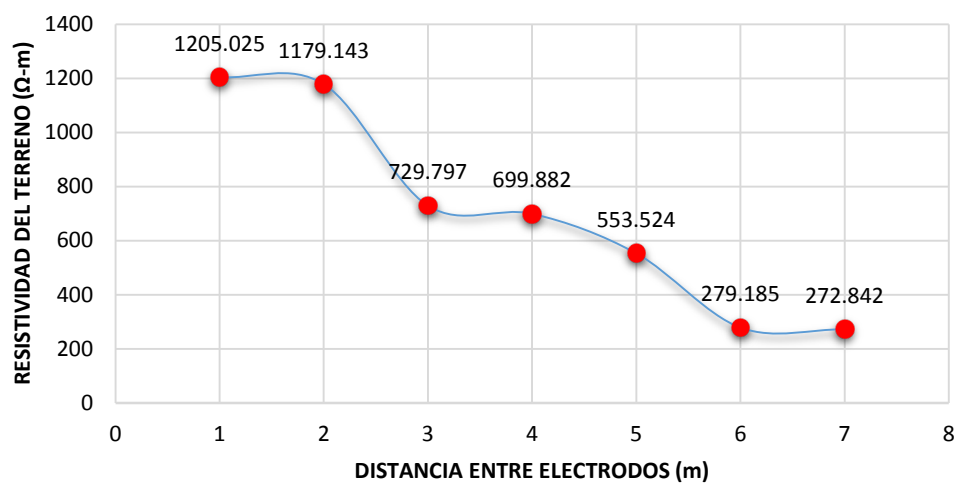
NODO MT 3239



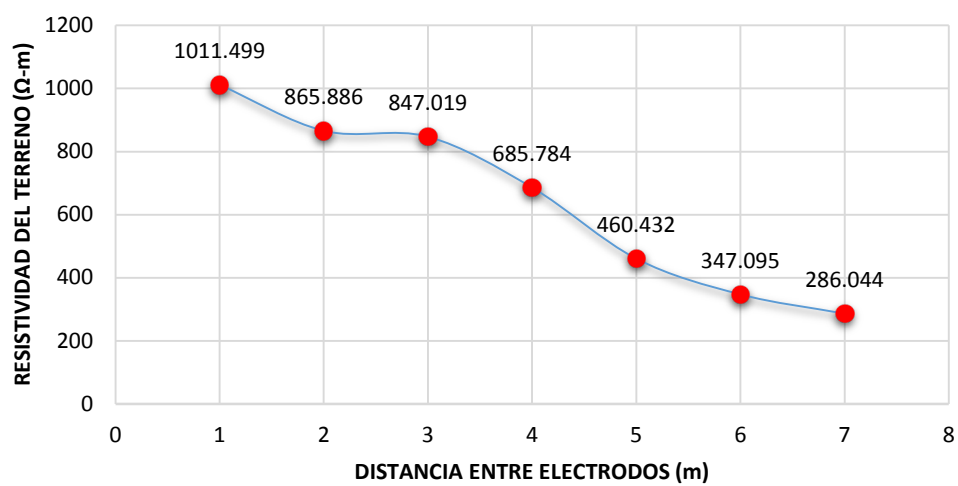
NODO MT 3269



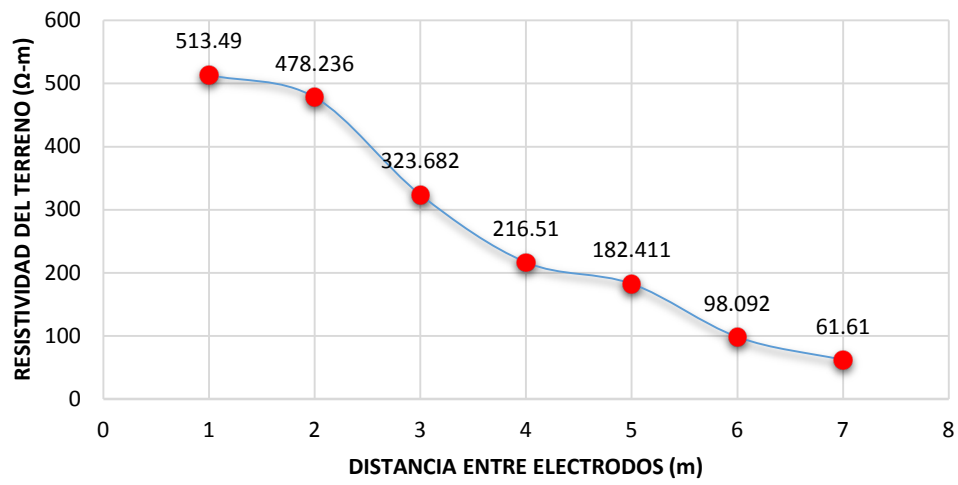
NODO MT 3348



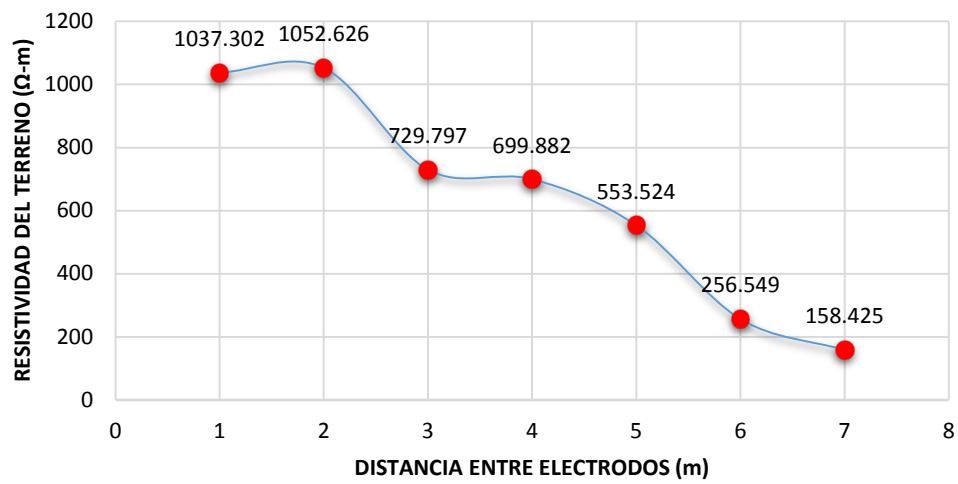
NODO MT 9344



NODO MT 7518

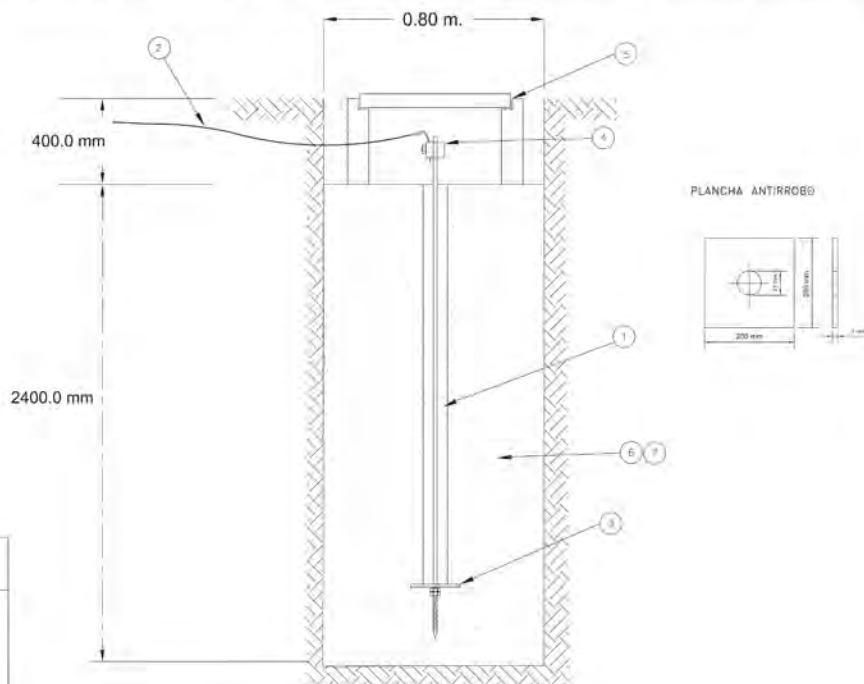


NODO MT 8991



ANEXO B

Detalle de Sistema de puesta a tierra para proyectos de licitación



VER. 02	VER. 01	VER. 00	VER. 03	VER. 04	VER. 05	VER. 06	VER. 07	VER. 08	VER. 09	VER. 10	VER. 11	VER. 12	VER. 13	VER. 14	VER. 15	VER. 16	VER. 17	VER. 18	VER. 19	VER. 20	VER. 21	VER. 22	VER. 23	VER. 24	VER. 25	VER. 26	VER. 27	VER. 28	VER. 29	VER. 30	VER. 31	VER. 32	VER. 33	VER. 34	VER. 35	VER. 36	VER. 37	VER. 38	VER. 39	VER. 40	VER. 41	VER. 42	VER. 43	VER. 44	VER. 45	VER. 46	VER. 47	VER. 48	VER. 49	VER. 50	VER. 51	VER. 52	VER. 53	VER. 54	VER. 55	VER. 56	VER. 57	VER. 58	VER. 59	VER. 60	VER. 61	VER. 62	VER. 63	VER. 64	VER. 65	VER. 66	VER. 67	VER. 68	VER. 69	VER. 70	VER. 71	VER. 72	VER. 73	VER. 74	VER. 75	VER. 76	VER. 77	VER. 78	VER. 79	VER. 80	VER. 81	VER. 82	VER. 83	VER. 84	VER. 85	VER. 86	VER. 87	VER. 88	VER. 89	VER. 90	VER. 91	VER. 92	VER. 93	VER. 94	VER. 95	VER. 96	VER. 97	VER. 98	VER. 99	VER. 100	VER. 101	VER. 102	VER. 103	VER. 104	VER. 105	VER. 106	VER. 107	VER. 108	VER. 109	VER. 110	VER. 111	VER. 112	VER. 113	VER. 114	VER. 115	VER. 116	VER. 117	VER. 118	VER. 119	VER. 120	VER. 121	VER. 122	VER. 123	VER. 124	VER. 125	VER. 126	VER. 127	VER. 128	VER. 129	VER. 130	VER. 131	VER. 132	VER. 133	VER. 134	VER. 135	VER. 136	VER. 137	VER. 138	VER. 139	VER. 140	VER. 141	VER. 142	VER. 143	VER. 144	VER. 145	VER. 146	VER. 147	VER. 148	VER. 149	VER. 150	VER. 151	VER. 152	VER. 153	VER. 154	VER. 155	VER. 156	VER. 157	VER. 158	VER. 159	VER. 160	VER. 161	VER. 162	VER. 163	VER. 164	VER. 165	VER. 166	VER. 167	VER. 168	VER. 169	VER. 170	VER. 171	VER. 172	VER. 173	VER. 174	VER. 175	VER. 176	VER. 177	VER. 178	VER. 179	VER. 180	VER. 181	VER. 182	VER. 183	VER. 184	VER. 185	VER. 186	VER. 187	VER. 188	VER. 189	VER. 190	VER. 191	VER. 192	VER. 193	VER. 194	VER. 195	VER. 196	VER. 197	VER. 198	VER. 199	VER. 200	VER. 201	VER. 202	VER. 203	VER. 204	VER. 205	VER. 206	VER. 207	VER. 208	VER. 209	VER. 210	VER. 211	VER. 212	VER. 213	VER. 214	VER. 215	VER. 216	VER. 217	VER. 218	VER. 219	VER. 220	VER. 221	VER. 222	VER. 223	VER. 224	VER. 225	VER. 226	VER. 227	VER. 228	VER. 229	VER. 230	VER. 231	VER. 232	VER. 233	VER. 234	VER. 235	VER. 236	VER. 237	VER. 238	VER. 239	VER. 240	VER. 241	VER. 242	VER. 243	VER. 244	VER. 245	VER. 246	VER. 247	VER. 248	VER. 249	VER. 250	VER. 251	VER. 252	VER. 253	VER. 254	VER. 255	VER. 256	VER. 257	VER. 258	VER. 259	VER. 260	VER. 261	VER. 262	VER. 263	VER. 264	VER. 265	VER. 266	VER. 267	VER. 268	VER. 269	VER. 270	VER. 271	VER. 272	VER. 273	VER. 274	VER. 275	VER. 276	VER. 277	VER. 278	VER. 279	VER. 280	VER. 281	VER. 282	VER. 283	VER. 284	VER. 285	VER. 286	VER. 287	VER. 288	VER. 289	VER. 290	VER. 291	VER. 292	VER. 293	VER. 294	VER. 295	VER. 296	VER. 297	VER. 298	VER. 299	VER. 300	VER. 301	VER. 302	VER. 303	VER. 304	VER. 305	VER. 306	VER. 307	VER. 308	VER. 309	VER. 310	VER. 311	VER. 312	VER. 313	VER. 314	VER. 315	VER. 316	VER. 317	VER. 318	VER. 319	VER. 320	VER. 321	VER. 322	VER. 323	VER. 324	VER. 325	VER. 326	VER. 327	VER. 328	VER. 329	VER. 330	VER. 331	VER. 332	VER. 333	VER. 334	VER. 335	VER. 336	VER. 337	VER. 338	VER. 339	VER. 340	VER. 341	VER. 342	VER. 343	VER. 344	VER. 345	VER. 346	VER. 347	VER. 348	VER. 349	VER. 350	VER. 351	VER. 352	VER. 353	VER. 354	VER. 355	VER. 356	VER. 357	VER. 358	VER. 359	VER. 360	VER. 361	VER. 362	VER. 363	VER. 364	VER. 365	VER. 366	VER. 367	VER. 368	VER. 369	VER. 370	VER. 371	VER. 372	VER. 373	VER. 374	VER. 375	VER. 376	VER. 377	VER.
---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	------

ANEXO C

Fichas técnicas para sistemas de puesta a tierra

DATOS TECNICOS DE MATERIALES PARA PUESTA A TIERRA
CONDUCTOR DE COBRE PARA PUESTA A TIERRA

Nº	CARACTERISTICAS	UNIDAD	VALOR REQUERIDO	OFERTADO (*)
1.0	<u>CARACTERISTICAS GENERALES</u>			
1.1	FABRICANTE			
1.2	PAIS DE FABRICACION			
1.3	NUMERO DE ALAMBRES		7	
1.4	NORMA DE FABRICACION Y PRUEBAS		NTP 370.251.2003	
2.0	<u>DIMENSIONES</u>			
2.1	SECCION NOMINAL	mm ²	25	
2.2	SECCION REAL	mm ²		
2.3	DIAMETRO DE LOS ALAMBRES	mm	2.14	
2.4	DIAMETRO EXTERIOR DEL CONDUCTOR	mm	6.4	
3.0	<u>CARACTERISTICAS MECANICAS</u>			
3.1	MASA DEL CONDUCTOR	kg/m	0.228	
3.2	CARGA DE ROTURA MINIMA	kN		
3.3	MODULO DE ELASTICIDAD INICIAL	kN/mm ²		
3.4	MODULO DE ELASTICIDAD FINAL	kN/mm ²		
3.5	COEFICIENTE DE DILATACION TERMICA	1/°C		
4.0	<u>CARACTERISTICAS ELECTRICAS:</u>			
4.1	RESISTENCIA ELECTRICA MAXIMA EN C.C. A 20 °C	Ohm/km	0.727	
4.2	COEFICIENTE TECNICO DE RESISTENCIA	1/°C	0,00384	

TABLA DE DATOS TÉCNICOS GARANTIZADOS ELECTRODO, CONECTORES Y PROTECTOR

Nº	CARACTERÍSTICAS	UNIDAD	VALOR REQUERIDO	OFERTADO (*)
A	<u>ELECTRODO</u>			
1.0	FABRICANTE			
2.0	MATERIAL		COBRE	
3.0	NORMA DE FABRICACION			
4.0	DIAMETRO	mm	19 (3/4")	
5.0	LONGITUD	m	2,4	
6.0	SECCION	mm²	226	
7.0	RESISTENCIA ELECTRICA A 20 °c	Ohm		
8.0	MASA DEL ELECTRODO	Kg		
B	<u>CONECTOR(ANDERSON)</u>			
1.0	FABRICANTE			
2.0	MATERIAL		BRONCE	
3.0	DIAMETRO DE ELECTRODO	mm	19	
4.0	SECCION DEL CONDUCTOR	mm²	25	
5.0	NORMA DE FABRICACION			
6.0	MASA DEL CONECTOR	Kg		
C	<u>CONECTOR TIPO PERNO PARTIDO (SPILT BOLT)</u>			
1.0	FABRICANTE			
2.0	MATERIAL		COBRE	
3.0	NORMA DE FABRICACION			
4.0	DIAMETRO DEL CONDUCTOR PRINCIPAL	mm	5,1	
5.0	DIAMETRO DEL CONDUCTOR SECUNDARIO	mm	5,1	
6.0	NUMERO DE CATALOGO DEL FABRICANTE			
7.0	TORQUE DE AJUSTE RECOMENDADO	N-m		
8.0	MASA POR UNIDAD	Kg		
D	<u>PROTECTOR ANTIRROBO</u>			
1.0	FABRICANTE			
2.0	MATERIAL		BRONCE	
3.0	NORMA DE FABRICACION			
4.0	DIMENSIONES			
4.1		ESPESOR	mm	4.8
4.2		LADO	mm	200
4.2		LADO	mm	200
5.0	RESISTENCIA ELECTRICA A 20 °c	Ohm		
6.0	MASA DE LA PLANCHA	Kg		

ANEXO C

Panel fotográfico





