



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE ELECTRICIDAD

**DISEÑO DE PUESTA A TIERRA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN NUEVO
CASTILLO EN LA SUBESTACIÓN LA PRIMAVERA DE LA PROVINCIA DE EL ORO**

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

AUTORES: LUIS FERNANDO ARIZAGA CARRANZA

MARCO VINICIO SOLÓRZANO AJILA

TUTOR: ING. HERNÁN PATRICIO GUILLEN COELLO

Cuenca - Ecuador

2025

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Luis Fernando Arizaga Carranza con documento de identificación N° 1400862189 y Marco Vinicio Solórzano Ajila con documento de identificación N° 0706640505; manifestamos que:

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

Cuenca, 24 de febrero del 2025

Atentamente,



Luis Fernando Arizaga Carranza
1400862189



Marco Vinicio Solórzano Ajila
0706640505

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

Nosotros, Luis Fernando Arizaga Carranza con documento de identificación N° 1400862189 y Marco Vinicio Solórzano Ajila con documento de identificación N° 0706640505, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto técnico: “Diseño de puesta a tierra para la implementación de un nuevo castillo en la subestación la primavera de la provincia de El Oro”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Cuenca, 24 de febrero del 2025

Atentamente,

Luis Fernando Arizaga Carranza

1400862189

Marco Vinicio Solórzano Ajila

0706640505

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Hernán Patricio Guillen Coello con documento de identificación N° 0102063120, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO DE PUESTA A TIERRA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN NUEVO CASTILLO EN LA SUBESTACIÓN LA PRIMAVERA DE LA PROVINCIA DE EL ORO, realizado por Luis Fernando Arizaga Carranza con documento de identificación N° 1400862189 y por Marco Vinicio Solórzano Ajila con documento de identificación N° 0706640505, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 24 de febrero del 2025

Atentamente,



Firmado electrónicamente por:
HERNAN PATRICIO
GUILLEN COELLO

Ing. Hernán Patricio Guillen Coello, Mgtr.

0102063120

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios por darme la vida, la fortaleza y la sabiduría, por guiar mi camino y permitirme culminar este proceso de formación académica y personal.

A mi familia, quienes han sido un apoyo incondicional en esta etapa tan significativa de mi vida, brindándome amor, comprensión para seguir adelante y alcanzar mis metas.

A los docentes de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana, quienes, con su sabiduría, destreza y conocimientos, no solo me han formado académicamente, sino que también han compartido sus experiencias y valores, dejándome enseñanzas para todo la vida.

A nuestro tutor, el Ingeniero Hernán Guillén, cuyo profesionalismo, liderazgo, paciencia y apoyo incondicional fueron fundamentales para la culminación de nuestra carrera.

Y finalmente todas aquellas personas con quienes he compartido grandes momentos y que han sido parte fundamental de mi vida, en especial a mis amigos y amigas, cuyo consejo y apoyo incondicional han sido valiosos a lo largo de esta etapa.

Luis Arizaga

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a Dios, por brindarme sabiduría, salud y la oportunidad de alcanzar este logro, guiándome con fe y determinación en cada paso. A mis padres, Marco y Flor quienes con su amor incondicional, sacrificio y apoyo constante han sido el pilar fundamental en mi vida, siempre creyendo en mí y motivándome a seguir adelante. A mi hermana, Ericka por su continuo apoyo, por estar siempre a mi lado y motivándome en todo momento. A mi pareja, Haylin por su amor, comprensión y paciencia, siempre a mi lado, dándome el apoyo emocional necesario para superar cada etapa de este proceso. Al Ing. Hernán Coello, mi tutor, por su valiosa orientación, dedicación y apoyo durante todo el desarrollo de esta tesis. A todos ustedes, les debo este logro, pues sin su ayuda, este sueño no habría sido posible.

Marco Solorzano

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a toda mi familia, que ha estado a mi lado durante este proceso tan importante en mi vida.

A mis padres, María y Ernesto, por su amor incondicional, su apoyo constante y por nunca dejar de creer en mí. Gracias a su esfuerzo, sus consejos y su confianza, hoy he logrado alcanzar esta meta.

A mis hermanos, Gericá y David, quienes han sido mi inspiración y un pilar fundamental en mi camino. Su compañía y palabras de aliento me han impulsado a seguir adelante y a superarme cada día.

A mi abuela Lucía, cuya sabiduría y cariño me han guiado siempre. Como una segunda madre, sus enseñanzas me han fortalecido y me han ayudado a tomar buenas decisiones a lo largo de la vida.

Luis Arizaga

DEDICATORIA

A mis queridos padres, Flor y Marco cuyo amor incondicional, sacrificio y apoyo constante me han impulsado a ser la persona que soy hoy. Esta tesis es el reflejo de su esfuerzo y dedicación, y es mi forma de agradecerles por todo lo que han hecho por mí. Sin su apoyo, no habría llegado tan lejos. Gracias por siempre estar a mi lado, motivándome a seguir mis sueños. Esta victoria es tan suya como mía.

Marco Solorzano

RESUMEN

El presente proyecto sobre SPT es muy importante en el ámbito de ingeniería eléctrica, desempeñándose como un medio de seguridad en contra sobretensiones, cortocircuitos y descargas atmosféricas. Su función principal es disipar las corrientes de falla, con el fin de resguardar tanto la vida humana como los equipos en las subestaciones.

Este estudio tiene como propósito diseñar una malla de puesta a tierra para implementar en la Subestación La Primavera, la cual abastece de energía eléctrica a la parte norte de Machala, en la provincia de El Oro, bajo nuevas condiciones de servicio.

En primer lugar, es importante analizar los diferentes características de la subestación. Esto incluye el esquema de suelo, los efectos fisiológicos causados por la circulación del voltaje y la corriente admisible para el cuerpo humano, así como la resistencia y el diseño según la norma IEEE Std 80-2000.

En segundo lugar, se realiza una investigación meticulosa sobre la condición presente de la Subestación La Primavera. Este análisis incluye el tipo de subestación, el área del terreno, la situación de los alimentadores, transformador y corrientes de cortocircuito.

Debido a la alta demanda, se llevará a cabo la implementación de un nuevo castillo en el área de maniobras. Como parte de este proyecto, se diseñó una nueva malla que se incorporará a la ya existente, resultando en una malla de 160 metros cuadrados. Esta malla está compuesta por 6 varillas de 2,40 metros de longitud, con una separación de 4 metros entre conductores y una profundidad de 0,5 metros, de este modo como resultado se ha cumplido con los diferentes criterios especificados por el estándar IEEE 80-2000 E IEEE 80-2013 .

Palabras clave: Malla de puesta a tierra, Protección contra sobretensiones, Cortocircuitos, Subestación La Primavera, Corrientes de falla, Resistencia de la malla, Descargas atmosféricas, IEEE Std 80-2000, Voltaje de contacto permisible.

ÍNDICE

GLOSARIO	xii
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Justificación	1
1.2 Descripción del problema	2
1.3 Antecedentes	2
1.4 Objetivos	3
1.4.1 General	3
1.4.2 Específico	3
1.5 Metodología	4
2 MARCO TEÓRICO	5
2.1 Subestaciones Eléctricas	5
2.1.1 Clasificación de las subestaciones	5
2.1.2 Elementos de una subestación eléctrica	7
2.2 Sistemas de puesta a tierra	9
2.2.1 Importancia de un sistema puesta a tierra	10
2.2.2 Tipos de puestas a tierra	11
2.2.3 Características de Puestas a Tierra	11
2.2.3.1 Malla a tierra	12
2.3 Seguridad en Instalaciones eléctricas	13
2.3.0.1 Condiciones de riesgos durante fallas	13
2.3.0.2 Tensiones de seguridad	13
2.4 Resistividad del terreno	15
2.4.1 Principales componentes que definen la resistividad del suelo	16
2.4.1.1 Composición de suelo	16
2.4.1.2 Humedad	16
2.4.1.3 Temperatura	17
2.4.1.4 Estratos del suelo	17
2.5 Elementos de los sistemas de puesta a tierra	18
2.5.1 Conductores	18
2.5.1.1 Conductores de cobre	19
2.5.1.2 Conductores de acero bañados de cobre	19

2.5.1.3	Conductores de Aluminio	19
2.5.2	Electrodos	21
2.5.3	Tipos de Electrodos	22
2.5.3.1	Electrodo tipo pica	22
2.5.3.2	Electrodo de tipo semiesférico	22
2.5.3.3	Teoría de electrodos Múltiples	23
2.6	Mediciones de la resistividad del terreno	23
2.6.1	Sondeo eléctrico(SEV)	23
2.6.2	Método de Schlumberger	24
2.6.3	Método de Wenner	24
3	SUBESTACIÓN ELÉCTRICA "LA PRIMAVERA"	25
3.1	Subestación Eléctrica "La Primavera"	25
3.1.1	Generalidades	25
3.1.2	Situación Actual	27
3.1.2.1	Alimentadores	29
3.1.2.2	Transformador	29
3.1.2.3	Corrientes de cortocircuito de las barras de 69 y 13,8 KV y la relación X/R	30
4	Diseño del sistema de puesta a tierra S/E "LA PRIMAVERA"	31
4.1	Norma IEEE 80-2000 Guide for Safety in A.C. Substation Grounding	31
4.2	Normativa IEEE Std 80-2013	32
4.3	Diseño de la malla puesta a tierra para el nuevo castillo de 13,8 KV en la Subestación La Primavera	32
4.3.1	Procedimiento	32
4.3.1.1	Determinación del área del terreno	33
4.3.2	Resistividad del área de 13,8 KV	33
4.3.2.1	Mediciones en campo sobre la resistividad del terreno	35
4.3.2.2	Corrientes de cortocircuito	38
4.3.3	Dimensionamiento del conductor de la malla	39
4.3.3.1	Corriente máxima a disipar de la malla	39
4.3.3.2	Determinación de la sección transversal del conductor	41
4.3.3.3	Tensiones tolerables de paso y contacto	41
4.3.3.4	Diseño preliminar de la malla	43
4.3.3.5	Resistencia de la malla	45
4.3.3.6	Corriente máxima disipada por la malla	46
4.3.3.7	Potencial máximo de la malla(GPR)	47
4.3.3.8	Cálculo de tensiones de malla y paso reales	47
4.3.3.9	Tensión de paso real	50

4.3.3.10	Resultados del diseño de la malla de puesta a tierra	
	para el nuevo castillo de 13,8 KV de la subestación	
	La Primavera	52
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	53
5.1	Conclusiones	53
5.2	Recomendaciones	54

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1	Tipos de Subestaciones. [1].	6
2.2	Elementos de una subestación eléctrica [2].	8
2.3	"Esquema típico de un Sistema de Puesta a Tierra" [3].	9
2.4	Tipos de malla: (a) Pica. (b) Placa. (c) Malla. d) Malla con picas periféricas [4].	11
2.5	Elementos de la malla a tierra [5].	12
2.6	Tensiones de paso [3].	14
2.7	Circulación de las tensiones de contacto [3].	14
2.8	Resistividad en función de la Humedad [3].	17
2.9	Estratificación del suelo. Fuente: Autores.	18
2.10	Conductor de puesta a tierra [6].	18
2.11	Formas para la instalación de electrodos [5].	21
2.12	Electrodo de pica [7].	22
2.13	Electrodo semiesférico [7].	22
2.14	Forma de medición SEV [7].	23
2.15	Configuración del método Schlumberger [7].	24
3.1	S/E La Primavera. Fuente: Autores	26
3.2	Ubicación de la S/E La Primavera; Fuente: Google Maps.	26
3.3	Especificaciones de la Subestación La Primavera; Fuente: Geoportal CNEL EP Unidad de Negocio El Oro.	27
3.4	Planos actuales de la S/E la Primavera; Fuente: CNEL EP Unidad de Negocio El Oro.	28
3.5	Esquema unifilar eléctrico de la S/E La Primavera; Fuente: CNEL EP Unidad de Negocio El Oro.	28
3.6	Transformador de potencia S/E La Primavera Fuente: CNEL EP Unidad de Negocio El Oro.	29
3.7	Corrientes de cortocircuito de las barras de 69 y 13,8 KV de la S/E La Primavera; Fuente:CNEL EP Unidad de Negocio El Oro.	30
4.1	Impedancias equivalentes (Z_{eq}), para diferentes configuraciones de líneas de transmisión y neutros de distribución [8].	32
4.2	Dimensión del terreno; Fuente: Autores.	33

4.3	Método de Wenner [8].	34
4.4	Medición a 1 m: Fuente: Autores.	35
4.5	Medición a 2 m: Fuente: Autores.	36
4.6	Medición a 3 m: Fuente Autores.	36
4.7	Diseño de la malla de puesta a tierra para el nuevo castillo de 13,8	
	KV de la S/E La Primavera; Fuente: Autores	44
4.8	Tipos de Soldaduras;Fuente: Autores	45
5.1	Subestación Eléctrica La Primavera	57
5.2	Explicación del funcionamiento del Telurómtetro por parte del Ing.	
	Javier Arichábala.	58
5.3	Instrucciones por parte del Ing. Javier Arichábala.	58
5.4	Medición de la Distancia.	59
5.5	Removiendo la tierra para enterrar las picas. Fuente: Autores.	59
5.6	Medición de la Resistencia del Suelo.	60
5.7	Telurómetro	60
5.8	Medición del telurometro	61
5.9	Toma de mediciones en la S/E La Primavera.	61
5.10	Culminación de la Medición en la S/E La Primavera.	62

Índice de tablas

2.1	Niveles de tensión establecidas por Arconel [9].	7
2.2	Causas de la corriente en el cuerpo Humano [3].	15
2.3	Naturaleza del terreno [3].	15
2.4	Características de los materiales [8].	20
2.5	Dimensiones de los materiales [8].	21
3.1	Datos de la S/E La Primavera y sus alimentadores; Fuente: CNEL EP Unidad de Negocio El Oro.	29
4.1	Resistencias para diferentes condiciones de operación [10].	32
4.2	Valores medidos de resistencia y resistividad del terreno; Fuente: Autores.	37
4.3	Equivalente de Thevenin de la S/E La primavera; Fuente: CNEL EP Unidad de Negocio El Oro..	38
4.4	Datos de la línea de transmisión L/ST Los pinos - La Primavera; Fuente: CNEL EP Unidad de Negocio El Oro.	38
4.5	Datos del transformador de potencia existente; Fuente: CNEL EP EL ORO.	38
4.6	Tabla de valores de cortocircuito a 69 KV; Fuente: CNEL EP Unidad de Negocio El Oro.	39
4.7	Tabla de valores de cortocircuito a 13,8 KV; Fuente: CNEL EP Unidad de Negocio El Oro.	39
4.8	Valores calculados y observaciones de la malla de puesta a tierra; Fuente: Autores.	52

GLOSARIO

- **SPT:** Sistema de Puesta a Tierra.
- **m:** Metros.
- **IEEE:** Institute of Electrical and Electronics Engineers (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos).
- **SEV:** Sondeo Eléctrico Vertical.
- **kV:** Kilovoltios.
- **GPR:** Elevación del Potencial de la tierra.
- **CNEL EP:** Corporación Nacional de Electricidad Empresa Pública.
- **S/E:** Subestación Eléctrica.
- **Zeq:** Impedancias Equivalentes.
- **AC:** Corriente Alterna.
- **AIS:** Subestaciones Aisladas al Aire.
- **GIS:** Subestaciones Aisladas en Gas.
- **HIS:** Subestaciones Híbridas.
- **ARCONEL:** Agencia Nacional de Regulación y Control de Electricidad.
- **AAT:** Muy Alta Tensión.
- **AT:** Alta Tensión.
- **MT:** Media Tensión.
- **TC:** Transformadores de Corriente.
- **TP:** Transformadores de Potencia.
- E_p : Tensiones de Paso.
- E_t : Tensión de Contacto.
- R_0, R_1, R_2 : Resistencias.
- **RT:** Resistencia del Terreno
- **RC:** Resistencia del Cuerpo.

- **GWh:** Gigavatios.
- **USD:** Dólares Americanos.
- **ONAN:** Oil Natural Air Natural (Aceite Natural Aire Natural)
- **ONAF:** Oil Natural Air Forced (Aceite Natural Aire Forzado)
- **MVA:** Megavoltamperios.
- R_{tg} : Resistente de electrodos de puesta a tierra de las líneas de transmisión.
- R_{dg} : Resistente de electrodos de puesta a tierra de alimentadores de distribución.
- **L/ST:** Línea de Transmisión de Subestación.
- **Ohms** $[\Omega]$: Ohmios.
- **MCM:** Mil Circular Mils.
- **DC:** Corriente Continua.
- **AWG:** American Wire Gauge (Calibre Americano de Conductores).

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación

El crecimiento de la población y el desarrollo en la provincia de El Oro, particularmente en Machala, conocida como la Capital Bananera del Mundo, exigen un avance en la calidad del servicio eléctrico. Este aumento en la demanda ha llevado a una ineficiencia en el sistema eléctrico existente, obligando a la empresa a construir un nuevo castillo para modernizar la subestación y mejorar el servicio. En este caso, se instalará una nueva malla que se conectará a la existente, asegurando así una adecuada protección para el nuevo castillo.

La subestación no solo suministra energía a hogares, sino también a instituciones públicas y privadas, lo que subraya la necesidad de esta actualización.

La repotenciación que se llevará a cabo permitirá ofrecer un servicio mejorado al nuevo castillo 13.8 kV, que corresponde a la media tensión necesaria para satisfacer la demanda existente. Esto proporcionará una proyección más eficiente y mejorará la calidad del servicio eléctrico para los consumidores.

Se utiliza como prioridad para los SPT las normativas "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding" Std 80-2013, 80-2000, estas normas aseguran el cumplimiento de los requisitos necesarios para ofrecer una protección adecuada tanto para las personas como para los equipos de la subestación, garantizando un funcionamiento seguro y eficiente.

1.2 Descripción del problema

Generalmente, los SPT están formados por una red conductora, ubicada bajo la superficie del suelo. Esta red conductora es muy importante en las instalaciones eléctricas por que elimina la diferencia de potencial entre la estructura y los diversos equipos instalados.

La subestación La Primavera, ubicada en la provincia de El Oro, es una infraestructura crítica para la distribución y estabilidad del sistema eléctrico en la región. Debido al creciente aumento de la demanda eléctrica, se ha identificado la necesidad de repotenciar esta subestación para asegurar su capacidad de suministro y garantizar la seguridad y continuidad del servicio. Una parte esencial de esta repotenciación es la construcción de un nuevo castillo.

El objetivo es diseñar para el nuevo castillo de 13,8 KV, un sistema de puesta a tierra que se complemente con las nuevas condiciones de servicio de la subestación. Este diseño debe asegurar una baja resistencia del sistema, permitiendo una rápida disipación de los cortocircuitos en el suelo. Además, se busca analizar y garantizar, tanto como las tensiones de paso y tensiones de contacto, se mantengan dentro de los límites seguros, minimizando el riesgo para las personas. Estas magnitudes deben cumplir rigurosamente con los estándares nacionales e internacionales vigentes.

1.3 Antecedentes

Los sistemas de puesta a tierra son extremadamente importantes ya que deben ser capaces de soportar las corrientes de cortocircuito cuando ocurre la falla.

La subestación eléctrica la Primavera, ubicada en la provincia de El Oro, es una instalación clave en el sistema de distribución eléctrica de la región. lo cual tiene como objetivo principal transformar la electricidad de alta tensión a niveles de baja tensión, adecuados para su distribución a los consumidores finales. Dado el constante crecimiento de la demanda energética, impulsado tanto por el aumento de la población como por el desarrollo industrial y comercial, se ha vuelto imperativo repotenciar esta subestación para asegurar la continuidad y calidad del suministro eléctrico.

Las primeras aproximaciones al estudio de las puestas a tierra se llevaron a cabo en el siglo XX, específicamente en las décadas de 1920 y 1930, mediante el uso de ecuaciones analíticas. Estas ecuaciones permitían calcular el valores de resistencia de los SPT para configuraciones sencillas, aunque debido a la complejidad matemática asociada con la representación de diseños más complicados, se comenzaron a utilizar ecuaciones de campos electromagnéticos. Inicialmente, estas ecuaciones se emplearon en forma estática y posteriormente de manera transitoria [11].

En 1961, fue la primera edición de la normativa IEEE 80 [12], donde se tomo como una referencia esencial en el diseño seguro para los sistemas de puesta a tierra en subestaciones de corriente alterna AC. Este estándar proporciona directrices detalladas para la instalación, mantenimiento y diseño de SPT en subestaciones eléctricas, con el fin de asegurar la seguridad de personas y equipos en entornos de alta tensión.

Este estudio se centró en analizar aspectos fundamentales para el diseño, considerando el modelo del suelo y los efectos fisiológicos derivados del paso de corriente, junto con los límites seguros de voltaje, regidos por normativas tales como IEEE 80-2013 y la IEEE 80-2013 [8].

En los proyectos previamente construidos, se han considerado los análisis realizados, lo que nos permitirá centrarnos en la implementación de un nuevo castillo para la subestación La Primavera de manera eficiente y segura.

1.4 Objetivos

1.4.1 General

Diseñar el sistema de puesta a tierra que garantice las nuevas condiciones de servicio de la subestación La Primavera de la provincia de el Oro.

1.4.2 Específico

- Analizar el sistema de puesta a tierra para la construcción de un nuevo castillo en la subestación.
- Evaluar la eficiencia del sistema de puesta a tierra de la subestación.

- Verificar el cumplimiento de las normativas de diseño y construcción.

1.5 Metodología

Mediante este proyecto se desarrollara una investigación de cada una de los componentes actuales de la subestación La Primavera. Donde buscaremos identificar estrategias o mecanismos que optimicen el diseño del sistema de puesta a tierra que sirviera para la implementación de un nuevo castillo.

Para alcanzar este objetivo, se desarrollará un análisis integral que involucrará varias etapas.

En la etapa de investigación, se recolectará información minuciosa de la subestación, basado en estos datos se deberá desarrollar el diseño cumpliendo con normativas y estándares nacionales e internacionales.

En la etapa de medición, se analizara las condiciones del suelo utilizando el método de Wenner, lo cual se empleará un telurómetro para medir la resistencia del terreno en la ubicación planificada para el nuevo castillo. Estas mediciones son fundamentales para evaluar la resistividad de la misma y ajustar el diseño de la malla de puesta a tierra, asegurando su eficacia.

Para poder cumplir con los límites de seguridad de diseño que desarrollará en el patio de maniobras de la subestación, se contemplara que las dimensiones del terreno para el nuevo castillo de 13,8 kV sean de 20m largo y de 8 m de ancho, dando un área total de (160 m²).

Por ultimo, se analizará cada uno de los resultados y se comparara con los estándares establecidos e identificando áreas para mejorar el rendimiento del sistema, lo cual se expondrán conclusiones claras y concisas, tomando en cuenta los resultados obtenidos.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 Subestaciones Eléctricas

Las subestaciones eléctricas son parte fundamental para la red de transporte de energía eléctrica que hacen posible la subida y bajada de voltaje, además compensa el factor de potencia que se necesita para poder llevar desde la central hasta los diferentes consumidores, para esto se utilizan diferentes tipos de centrales y se lo hace en alta tensión para minimizar las pérdidas.

Las subestaciones eléctricas se caracterizan porque su flexibilidad, confiabilidad, seguridad, y puede ser modificada en cualquier momento, ya sea para una repotenciación o una proyección diferente a lo que existe [13].

2.1.1 Clasificación de las subestaciones

Mediante la siguiente figura, se observara diferentes tipos de subestación según diversas características:

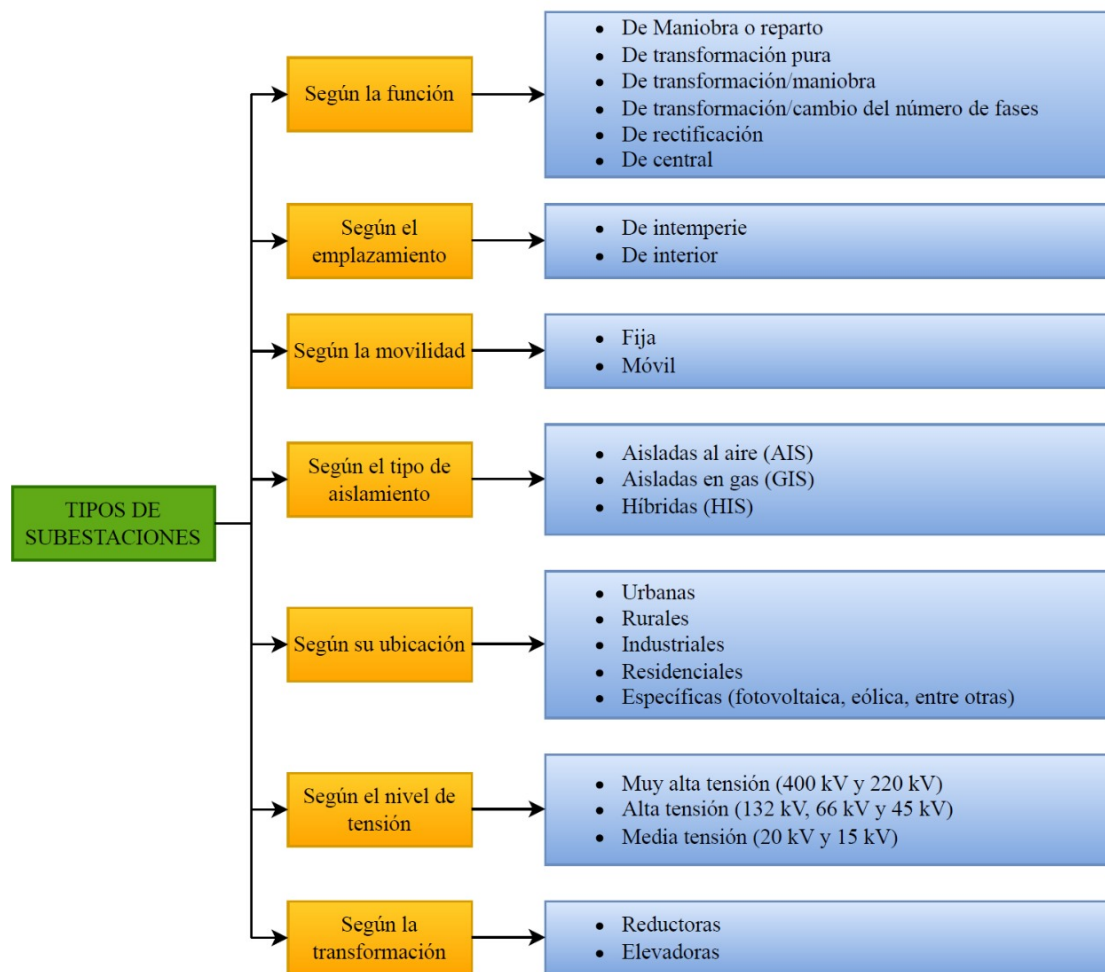


Figura 2.1: Tipos de Subestaciones. [1].

El Ministerio de Energía y Minas de Ecuador es el encargado de planificación del sector eléctrico, lo cual establece las políticas y directrices para el desarrollo y funcionamiento del sistema. Por otro lado, ARCONEL (Agencia Nacional de Regulación y Control de Electricidad) se encarga de supervisar el cumplimiento de las normativas técnicas y de calidad en la distribución de electricidad [9].

Entre sus responsabilidades, ARCONEL establece los niveles de tensión que deben cumplir las empresas eléctricas distribuidoras, garantizando así la calidad y estabilidad del suministro eléctrico para los usuarios, estos niveles de tensión se podrán observar en la tabla 2.1 [9].

Niveles de tensión alterna	Voltaje 1	Voltaje 2	Voltaje 3
Muy alta tensión AAT	500 kV	230 kV	-
Alta tensión AT	138 kV	69 kV	46 kV
Media tensión MT	34.5 kV	22 kV	13.8 kV

Tabla 2.1: Niveles de tensión establecidas por Arconel [9].

2.1.2 Elementos de una subestación eléctrica

Las subestaciones eléctricas modifican diversos parámetros de la energía eléctrica, este subsistema es fundamental en los ámbitos como transformación, generación, distribución y transmisión, de energía. Los elementos principales que conforman son los siguientes:

- Transformador. es un aparato eléctrico que se encarga de cambiar los niveles de voltaje de la energía. Su función principal es transformar la energía eléctrica de un nivel de tensión a otro, ya sea para aumentar (elevar) o disminuir (reducir) la tensión, dependiendo de las necesidades de transmisión y distribución.
- Interruptor de Potencia. Un interruptor de potencia tienen como objetivo controlar el flujo de electricidad del sistema, tanto de distribución como transmisión. Su función principal es abrir y cerrar circuitos eléctricos bajo condiciones normales y de falla, proporcionando así protección y control en la red eléctrica.
- Restaurador. Es un dispositivo de protección y control que tiene la capacidad de interrumpir y restablecer automáticamente el flujo de electricidad en caso de una falla o interrupción en el sistema. Su función principal es mejorar la fiabilidad y estabilidad del suministro eléctrico al aislar rápidamente las áreas problemáticas y restablecer el servicio una vez que la falla ha sido solucionada o si es temporal.
- Cuchillas fusibles. Las cuchillas fusibles cumplen con la función principal de proteger el sistema eléctrico al interrumpir el flujo de corriente en situaciones de sobrecarga o cortocircuito. Estas cuchillas contienen un fusible que se funde cuando la corriente supera un nivel seguro, desconectando así el circuito y evitando daños mayores en el equipo y las instalaciones. Una vez que el fusible se ha fundido, la cuchilla puede ser reemplazada para restablecer el servicio eléctrico.

- **Cuchillas Desconectadoras.** Las cuchillas desconectadoras son dispositivos mecánicos utilizados para aislar secciones del sistema eléctrico para mantenimiento, reparación o en situaciones de emergencia. Estas cuchillas permiten la desconexión segura de circuitos eléctricos sin carga, proporcionando un punto visible de separación que asegura que no haya flujo de corriente en la sección aislada.
- **Aparrarrayos.** También conocido como pararrayos de línea o descargador de sobretensión, es un dispositivo de protección en una subestación eléctrica y en líneas de transmisión que protege los equipos eléctricos contra las sobretensiones transitorias causadas por descargas atmosféricas (rayos) o por maniobras en la red eléctrica.
- **Transformadores TC, TP.** Los transformadores, son componentes esenciales en las subestaciones eléctricas, los TC o transformadores de corriente se encargan de medir estas corrientes en niveles de alta tensión, mientras que los TP o transformadores de potencial, se utilizan para medir las tensiones en los sistemas de alta tensión.
- **Barras.** Son las terminales de conexión por fase.

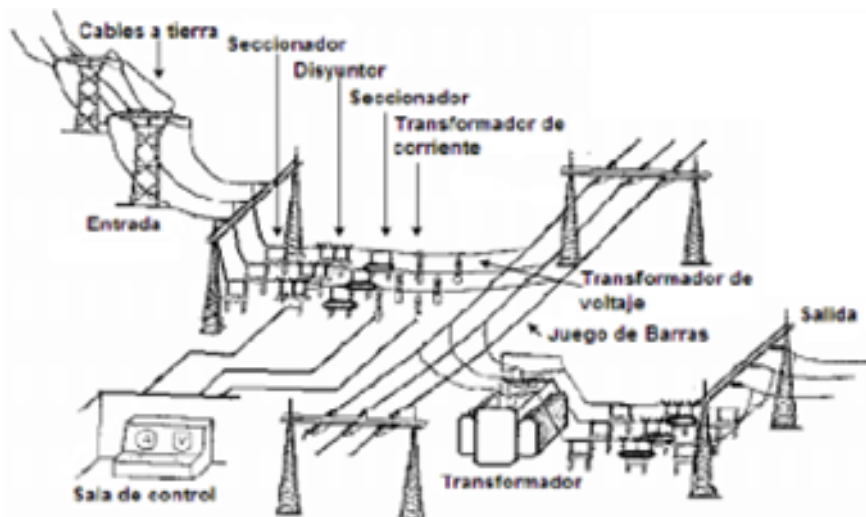


Figura 2.2: Elementos de una subestación eléctrica [2].

2.2 Sistemas de puesta a tierra

Son mecanismos que sirven como protección para equipos eléctricos y electrónicos, que se encuentran conectados en la superficie a un punto no energizado, con el propósito de disminuir dichas tensiones de cada objeto metálico que esta expuesto por influencias eléctricas.

Al producirse una falla a tierra o descarga atmosférica este sistema proporciona el camino seguro en la circulación de la corriente hacia el suelo, garantizando la seguridad de las personas y seres vivos en general.

La explicación que nos proporciona el estándar IEEE Std. 80-2000 referido al sistema de puesta a tierra es: “Tierra o sistema de tierra es una conexión conductora, ya sea intencional o accidental, por medio de la cual un circuito eléctrico o equipo se conecta a la tierra o a algún cuerpo conductor de dimensión relativamente grande que cumple la función de la tierra” [5].

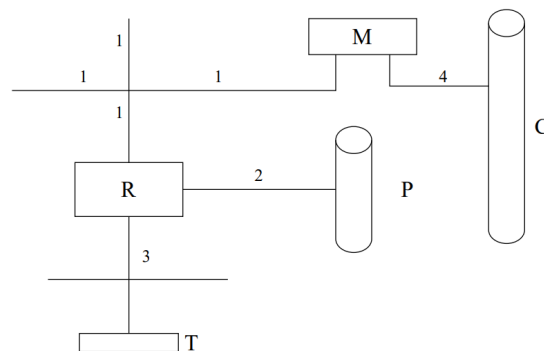


Figura 2.3: "Esquema típico de un Sistema de Puesta a Tierra" [3].

A continuación detallaremos los puntos de la figura 2.3:

1: Conductor de seguridad o protección.

2: Conductor principal de unión equipotencial.

3: Conductor de tierra enlazado con el electrodo de puesta a tierra.

4: Conductor suplementario de equipotencialidad.

R: Borne principal a tierra.

M:Masa.

C:Elemento conductor.

P:Canalización metálica principal de agua.

T:Toma a tierra

2.2.1 Importancia de un sistema puesta a tierra

Los SPT es muy importante en los sistemas eléctricos, cuyas conexiones deben estar en todas las partes metálicas de los elementos de una S/E, como los interruptores de potencia, seccionadores, tableros, reconectadores, tanque del transformador, transformadores corriente y potencia, pararrayos, entre otras, todos estos deben estar interconectados al mismo sistema de protección.

Para alcanzar estos propósitos se debe tener en cuenta el cumplimiento de la normativas IEEE 80-2000, IEEE Guide for Safety in Substation Grounding esto se refiere a lo siguiente [\[5\]](#).

- Son los encargados de Estabilizar la diferencia de potencial baja de cada una de las estructuras metálicas, esto nos ayudara garantizando la seguridad del personal mediante algún suceso de falla o sobretension.
- Promueve una mejor rendimiento de las protecciones.
- Previene incendios inducidos por la emisión de gases, ya que proporciona una vía segura para eliminar dichas corrientes, producida por sobretensiones o descargas atmosféricas.
- En toda instalación eléctrica una buena conexión de puesta a tierra, además de la protección de equipos y personal.

Estas, junto con otras razones, llegan hacer muy importantes los sistemas de puesta a tierra .

2.2.2 Tipos de puestas a tierra

Los sistemas puesta tierra de conexión simple, utiliza solo un electrodo de tierra instalado en la superficie del suelo. Este método es el más común para establecer una instalación a tierra y puede encontrarse afuera de su hogar u oficina. Los SPT Son considerados más complejos en comparación con un sistema simple, este sistema está formada por varias varillas de conexión a tierra interconectadas que se encuentra en subestaciones y grandes instalaciones eléctricas [14].

2.2.3 Características de Puestas a Tierra

1. Electrodo simple.
2. Electrodo tipo Plato.
3. Malla o rejilla.
4. Electrodo en paralelo.

La siguiente figura 2.4, nos proporcionará una visualización de distintos tipos de sistemas de puesta a tierra:

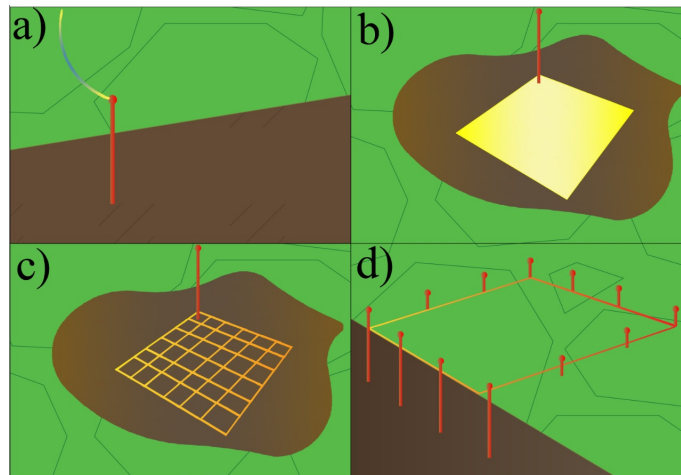


Figura 2.4: Tipos de malla: (a) Pica. (b) Placa. (c) Malla. d) Malla con picas periféricas [4].

2.2.3.1 Malla a tierra

El objetivo de la malla a tierra es salvaguardar al personal que maneja las subestaciones y proteger los equipos, asegurando así la continuidad del Sistema Eléctrico [15].

Estos objetivos deben tener en cuenta las diferentes características.

- Asegurar una baja resistencia a tierra.
- Garantiza la disipación de descargas atmosféricas y corrientes de cortocircuito a tierra sin provocar daños.
- Proporciona niveles seguros entre los equipos energizados y las estructuras.
- Asegurar el correcto funcionamiento de los equipos de protección permitiendo aislar rápidamente las fallas que se puedan producir durante la operación.
- Garantizar puntos accesibles seguros para las personas, para que no sufran cualquier descarga .

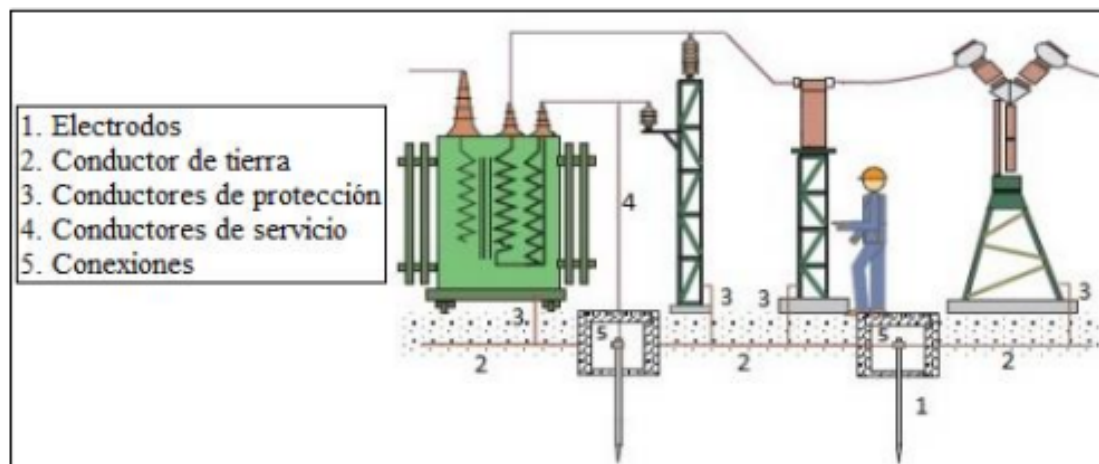


Figura 2.5: Elementos de la malla a tierra [5].

2.3 Seguridad en Instalaciones eléctricas

La seguridad en las instalaciones eléctricas es muy importante, pues de ello depende la protección de las personas y la integridad de las infraestructuras [16].

2.3.0.1 Condiciones de riesgos durante fallas

Cuando ocurre una falla, el flujo de corriente hacia tierra produce un gradiente de tensión tanto en el interior como en los alrededores de la subestación.

Los factores que pueden ocurrir por accidentes basado en shock eléctrico son:

- Una corriente de falla a tierra que sea de alta magnitud y duración, en relación con el sistema de puesta a tierra y su resistencia, puede provocar accidentes graves.
- La resistividad del suelo puede generar variaciones significativas de potencial en diferentes puntos de su superficie.

2.3.0.2 Tensiones de seguridad

Para garantizar la seguridad del personal y el correcto funcionamiento de las máquinas, es imprescindible que toda instalación eléctrica esté equipada con un sistema de puesta a tierra. Este sistema debe estar presente en cualquier punto tanto del interior como del exterior de la estructura.

En el estudio de riesgo eléctrico, existen diferentes condiciones que definen el diseño de un sistema de puesta a tierra:

- Tensiones de Paso (E_p): El voltaje de paso se refiere a la diferencia de potencial que puede existir en una persona cuando está parada y caminando sobre una superficie conductora aislada del suelo.
- Tensiones de contacto (E_t): El voltaje de contacto se refiere a la diferencia de potencial que puede existir entre la persona y el objeto conductor con el que está directamente conectada.

Tensión de malla : Es la diferencia de potencial que puede ocurrir entre diferentes puntos de una malla o estructura conductora debido al flujo de corriente o fallas eléctricas.

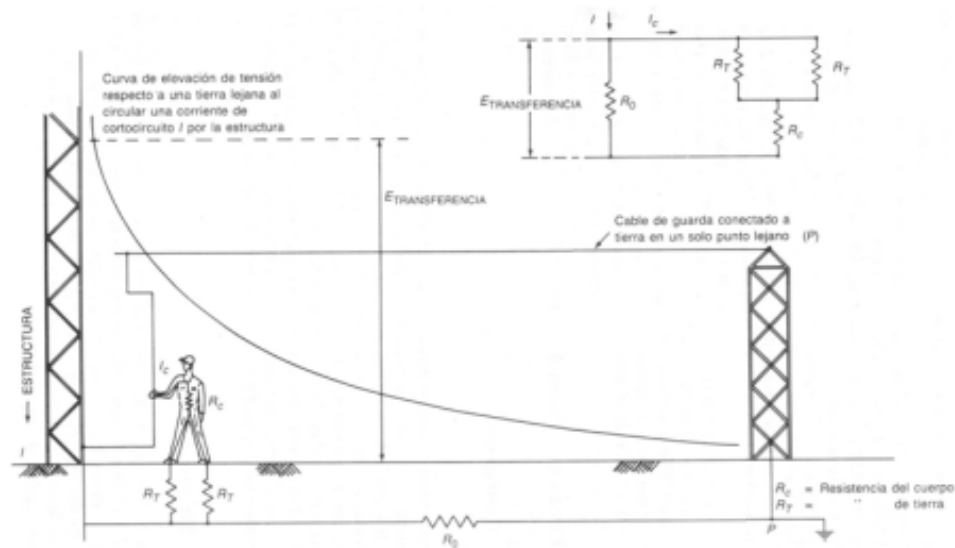


Figura 2.6: Tensiones de paso [3].

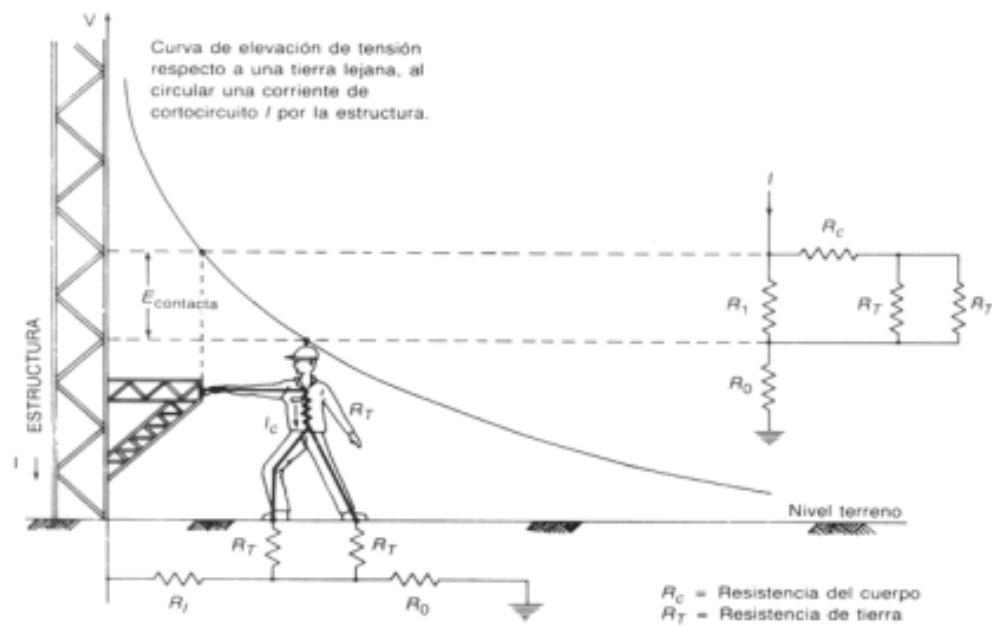


Figura 2.7: Circulación de las tensiones de contacto [3] .

Mediante la siguiente tabla se visualizara los efectos producidos por la corriente eléctrica.

Corriente Eléctrica	Efectos
Inferior a 25 mA	Contracciones musculares. Aumento de la presión sanguínea
25 a 80 mA	Posibles perturbaciones en los ritmos cardíacos y respiratorios con parada temporal del corazón y respiración
80 mA a 3 A	Especialmente peligrosa, puede ocasionar fibrilación ventricular, de consecuencias mortales en la mayoría de los casos
Mayor a 3 A	Perturbaciones del ritmo cardíaco. Posibilidad de parálisis cardíaca y respiratoria

Tabla 2.2: Causas de la corriente en el cuerpo Humano [3] .

2.4 Resistividad del terreno

Para que el sistema de puesta tierra sea efectivo, es importante que su resistencia sea lo más baja posible frente a corrientes de defecto. La resistencia de este sistema depende principalmente de las propiedades del terreno en el que se colocan los electrodos [17].

NATURALEZA DEL TERRENO	Resistividad (Ωm)
Terrenos pantanosos	De algunas unidades a 30
Limo	20 a 40
Humus	10 a 150
Turba húmeda	5 a 100
Arcilla plástica	1 a 100
Margas y arcillas compactas	100 a 200
Margas del jurásico	30 a 40
Arena arcillosa	50 a 300
Arena silíceo	200 a 3000
Suelo pedregoso cubierto de césped	50 a 500
Suelo pedregoso desnudo	100 a 600
Calizas blandas	100 a 300
Calizas compactas	500 a 3000
Calizas agrietadas	500 a 1000
Pizarras	50 a 300
Rocas de mica y cuarzo	800
Granitos y gres procedentes de alteración	1500 a 10000
Granitos y gres muy alterados	100 a 600

Tabla 2.3: Naturaleza del terreno [3] .

2.4.1 Principales componentes que definen la resistividad del suelo

2.4.1.1 Composición de suelo

Los tipos de suelo varían según su contenido y estructura. Los suelos negros, ricos en materia orgánica, son buenos conductores debido a su alta humedad y propiedades electrolíticas. Por otro lado, los suelos arenosos tienen una alta impedancia debido a su rápido drenaje, baja humedad y niveles bajos de electrolitos. Las rocas y las cenizas volcánicas de montaña, por su parte, tienen poca humedad y por lo tanto una mayor resistividad.

2.4.1.2 Humedad

La humedad es crucial para la resistividad del suelo porque mejora la conducción de corriente a través de la composición química que rodea al conductor. Por lo general, a medida que aumenta la humedad, la resistividad del suelo disminuye. Factores como las condiciones climáticas locales, la estructura del electrolito, que incluye el contenido mineral, la ionización del suelo, el tamaño de las partículas y la densidad, también afectan cómo el suelo retiene el agua.

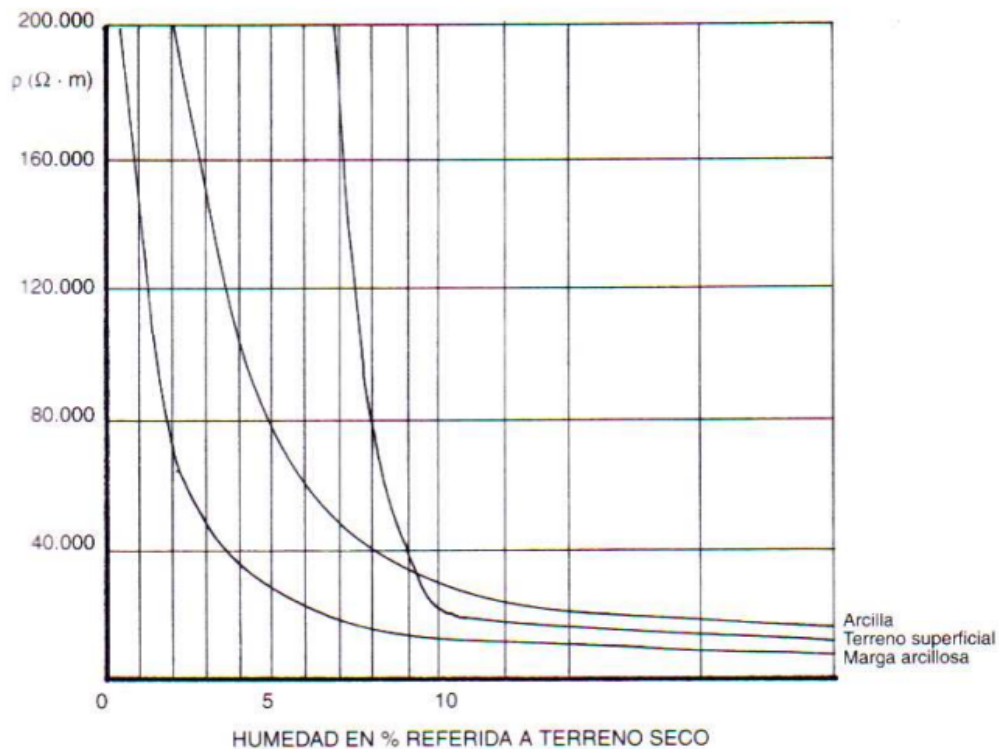


Figura 2.8: Resistividad en función de la Humedad [3] .

2.4.1.3 Temperatura

Las altas temperaturas secas o las temperaturas bajo cero con heladas severas pueden incrementar la resistividad del suelo significativamente. Cuando el suelo está congelado, la resistividad aumenta considerablemente debido a la presencia de hielo. Las regiones que experimentan lluvias frecuentes tienden a tener una resistividad baja en comparación con áreas secas o con suelo permanentemente congelados.

2.4.1.4 Estratos del suelo

Normalmente, los terrenos consisten en diversas capas o estratos que están compuestos por diferentes materiales, lo que provoca variaciones en la resistividad entre ellos. Estos estratos suelen representarse mediante una secuencia de capas uniformes y horizontales dispuestas verticalmente, conocida como "perfil geo eléctrico".

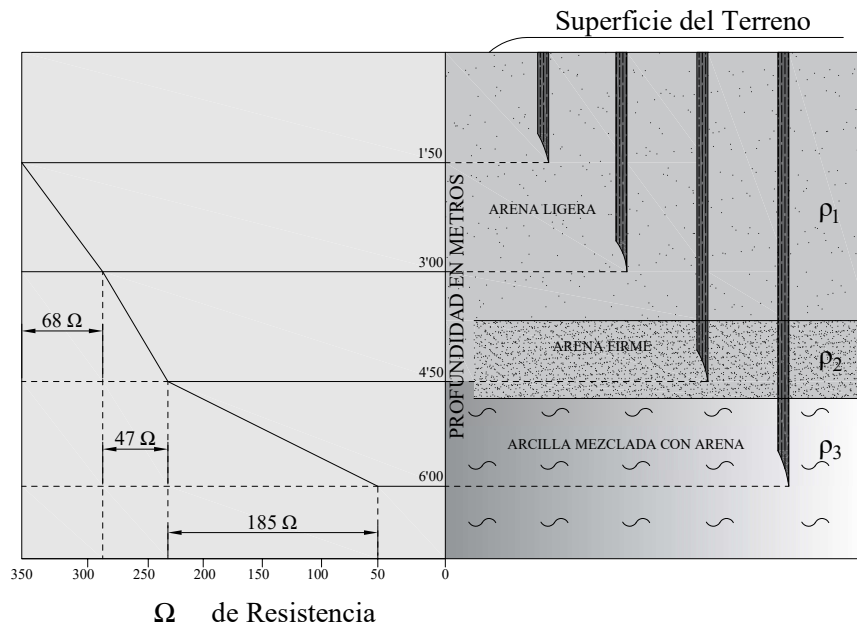


Figura 2.9: Estratificación del suelo. Fuente: Autores.

Determinar la resistividad del suelo es fundamental para identificar la configuración óptima del diseño de puesta a tierra según el caso específico [17].

2.5 Elementos de los sistemas de puesta a tierra

2.5.1 Conductores

La función del conductor en el sistema de puesta a tierra es conectar todos los electrodos a la red, unir todos los equipos de la subestación y proporcionar una ruta para la corriente durante una falla a tierra o una descarga atmosférica.

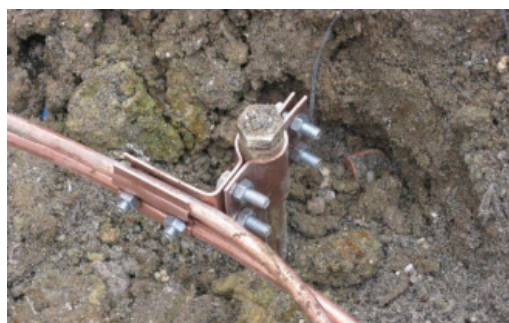


Figura 2.10: Conductor de puesta a tierra [6]

2.5.1.1 Conductores de cobre

El cobre tiene una excelente conductividad térmica y muy buena resistencia a la corrosión y humedad, es decir es capaz de soportar altas temperaturas gracias a sus propiedades. Su baja resistividad y otras características lo convierten en un material ideal para una variedad de aplicaciones.

2.5.1.2 Conductores de acero bañados de cobre

Es un producto bimetálico ampliamente empleado en la industria, que combina la gran resistencia mecánica con su conductividad y la capacidad de resistir la corrosión del cobre.

2.5.1.3 Conductores de Aluminio

El aluminio es ampliamente disponible y es adecuado para fabricar conductores eléctricos debido a su maleabilidad, suavidad y ligereza. Usualmente se utiliza como aleaciones con diferentes materiales para aumentar sus características. Se convierten en una de los mejores elementos favorables cuando se considera la carga de un conductor para un proyecto específico.

Descripción	Conductividad del Material (%)	α factor a 20 °C (1/°C)	K_0 a 0 °C ($\Omega \cdot \text{cm}$)	Temperatura de fusión T_f (°C)	ρ_{20C} ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)	Capacidad Térmica TCAP [J/(cm ³ °C)]
Cobre, recocido y estirado en blando.	100.0	0.00393	234	1083	1.72	3.42
Cobre, estirado duro comercial.	97.0	0.00381	234	1084	1.78	3.42
Alambre de acero revestido de cobre	40.0	0.00378	245	1084	4.30	3.85
Alambre de acero revestido de cobre	30.0	0.00378	245	1084	5.48	3.85
Varilla de acero revestida de cobre	21.0	0.00378	245	1084	8.62	3.85
Aluminio, grado EC	61.0	0.00403	268	657	2.83	2.43
Aluminio, aleación 5005	52.5	0.00403	268	657	3.28	2.43
Aluminio, aleación 6201	52.5	0.00400	268	657	3.28	2.43
Alambre de acero revestido de aluminio	20.3	0.00381	258	658	8.50	2.32
Acero, 1020	10.4	0.00369	244	1508	16.90	3.85
Varilla de acero revestido de acero inoxidable	8.4	0.00100	140	1508	19.00	3.50
Varilla de acero revestida de zinc	6.8	0.00130	245	419	32.70	2.03
Acero inoxidable, 304	2.4	0.00100	749	1404	72.00	3.50

Tabla 2.4: Características de los materiales[8].

Se mostrará en la siguiente tabla las dimensiones típicas de los conductores de puesta a tierra.

CALIBRE DEL CONDUCTOR		ÁREA NOMINAL (mm ²)	DIÁMETRO (m)
MCM	AWG		
350		177,35	0,015
300		152,01	0,0139
250		126,68	0,0127
211,6	4/0	107,22	0,0117
167,8	3/0	85,03	0,0104
133,1	2/0	67,44	0,0093

Tabla 2.5: Dimensiones de los materiales [8].

2.5.2 Electrodo

Desempeñan una parte fundamental para la protección de los sistemas eléctricos y equipos contra posibles daños ocasionados por fallas de aislamiento, sobretensiones y descargas atmosféricas.

En una S/E, las corrientes deben ser dirigidas a tierra son consideradas de gran magnitud, mientras que los equipos deben estar distribuidos a lo largo de toda el área de la subestación. Por lo tanto, es necesario utilizar múltiples electrodos colocados estratégicamente para optimizar la eficiencia del SPT.

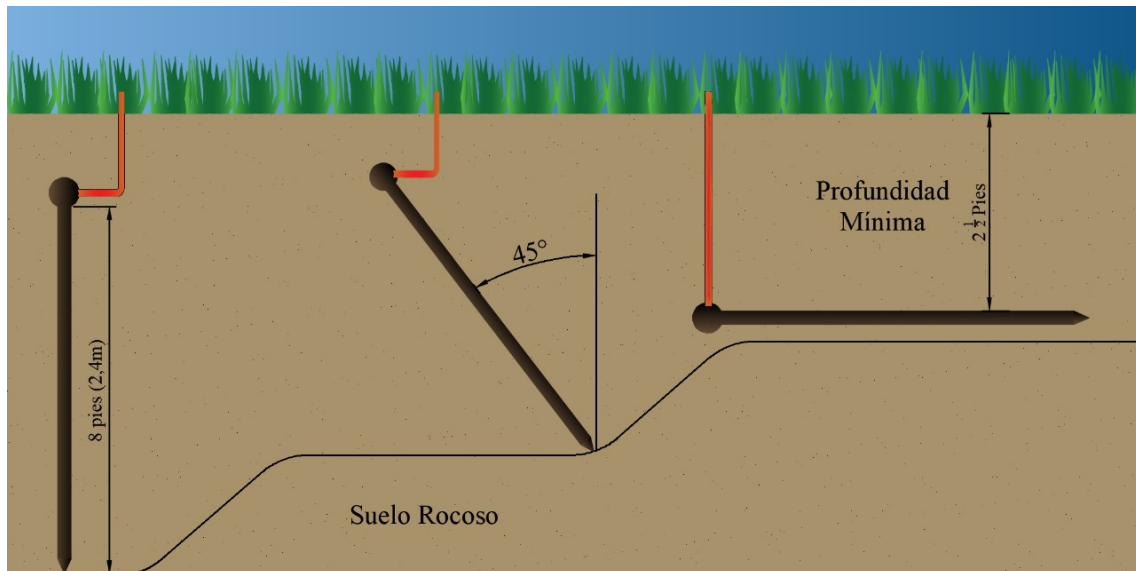


Figura 2.11: Formas para la instalación de electrodos [5].

2.5.3 Tipos de Electroodos

2.5.3.1 Electrodo tipo pica

El electrodo tipo pica, se utiliza comúnmente en sistemas de puesta a tierra. Este consiste en insertar verticalmente el suelo de un conductor metálico, que puede ser un tubo o una varilla. Este electrodo es relativamente delgado en comparación con su longitud, que puede extenderse hasta 10 metros o más, dependiendo de la necesidad y la conveniencia.

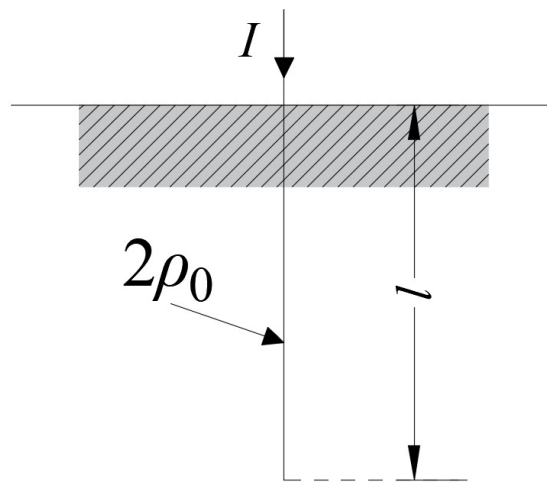


Figura 2.12: Electrodo de pica [7].

2.5.3.2 Electrodo de tipo semiesférico

El electrodo tipo semiesférico tiene forma de cascara esférica que corresponde a la mitad de un orbe. Se instala en la superficie del suelo de manera que su diámetro ecuatorial quede expuesto al aire.

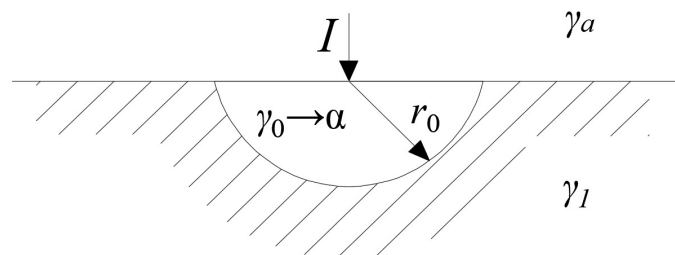


Figura 2.13: Electrodo semiesférico [7].

2.5.3.3 Teoría de electrodos Múltiples

En situaciones donde se requiere disipar una corriente de alta intensidad en el suelo, se utiliza un sistema de electrodos compuestos o múltiples diseñado para gestionar de manera efectiva la porción específica de la corriente total que debe ser dirigida a tierra. En estos sistemas, es esencial que los electrodos operen en paralelo para garantizar que todos mantengan un potencial eléctrico uniforme en todo momento y contribuyan eficientemente al proceso.

2.6 Mediciones de la resistividad del terreno

2.6.1 Sondeo eléctrico(SEV)

El sondeo eléctrico vertical (SEV) utiliza el método de 4 electrodos, en el cual se inyecta corriente eléctrica en el suelo a través de 2 electrodos, mientras que la diferencia de potencial eléctrico se mide con los otros dos.

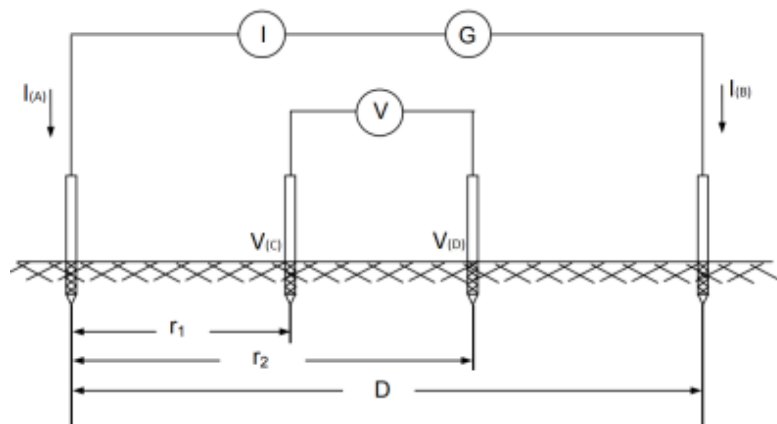


Figura 2.14: Forma de medición SEV [7].

2.6.2 Método de Schlumberger

En el método de Schlumberger, se colocan los dos electrodos de potencial (los internos) se sitúan simétricamente con respecto a un punto central de medición, separados por 1 metro. Los electrodos de corriente (los externos) también se colocan simétricamente entre sí, respecto al mismo punto central. Durante el estudio, los electrodos de potencial permanecen inmóviles, mientras que los electrodos de corriente se desplazan gradualmente a distancias variables desde el punto central para cada medición requerida en el sondeo eléctrico vertical.

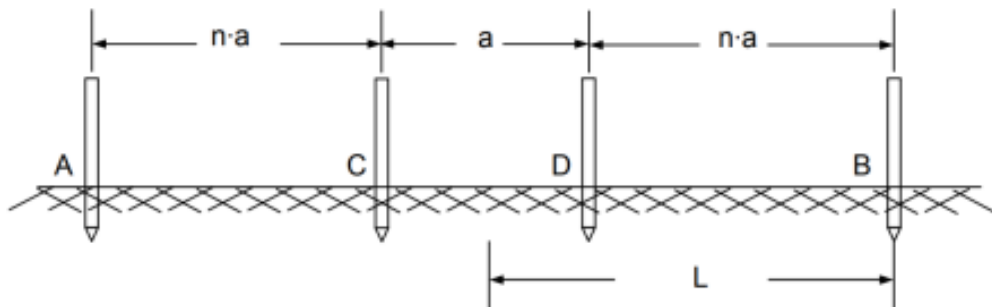


Figura 2.15: Configuración del método Schlumberger[7].

2.6.3 Método de Wenner

En el método de Wenner, al igual que en el método de Schlumberger, los dos electrodos exteriores están conectados con cada terminales, mientras que los otros 2 electrodos interiores se conectan a los de potencial. Estos se conectan en línea recta y equidistantes respecto al eje de medición, separados por una distancia "a". La diferencia del método de Schlumberger, en el método de Wenner no se mantiene fijo ningún electrodo durante las diferentes mediciones realizadas para el estudio.

CAPÍTULO 3

SUBESTACIÓN ELÉCTRICA ”LA PRIMAVERA”

3.1 Subestación Eléctrica ”La Primavera”

3.1.1 Generalidades

La Empresa eléctrica CNEL EP Unidad de Negocio El Oro abarca un área de 6,637.21 m² y atiende a 242,420 clientes. La demanda de energía es de 1,119.03 GWh, con una prestación de servicios del 99.16% . En la sección de subtransmisión, dispone de 18 subestaciones cada una con un nivel de tensión de 69 / 13.8 kV y con distancia de 347 kilómetros de líneas a 69 kV.

En el área de distribución, cuenta con 64 alimentadores primarios, 4.767 Kilómetros de redes de distribución de media tensión, 14.838 transformadores de distribución y 7.526,34 km de redes de baja tensión. Además, tiene 73.845 luminarias de alumbrado público. En cuanto a la comercialización, cuenta con 242.419 medidores: 238.549 convencionales y 3.870 inteligentes, así como 225.321 acometidas.

La subestación La Primavera se encuentra en la parte noroeste de la ciudad, en Sauces 1, fue construida para reducir la demanda que tenía la Subestación Machala y Los Pinos, de esta manera con una inversión de USD 2.4 millones se inauguraba otorgando el servicio a alrededor de 20 barrios del norte y noroeste de la Capital Orense.

La Subestación Eléctrica La Primavera cuenta con un área total de 10.455,9 m².



Figura 3.1: S/E La Primavera. Fuente: Autores

Ubicación.

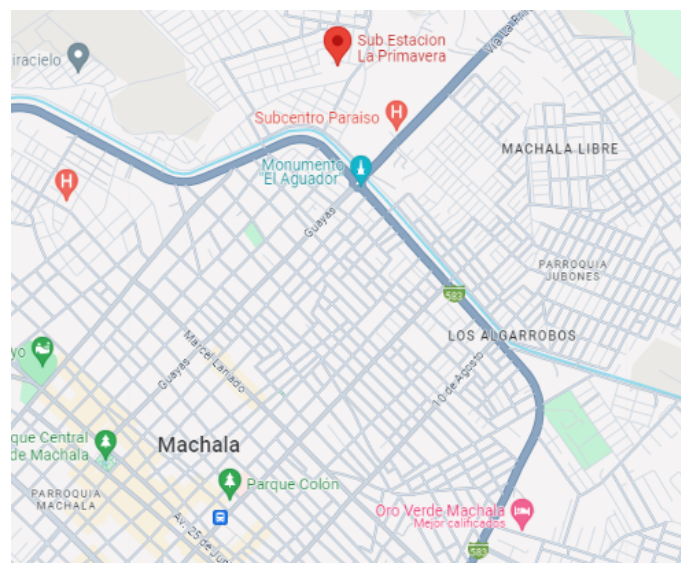


Figura 3.2: Ubicación de la S/E La Primavera; Fuente: Google Maps.

Especificaciones tomadas del Geoportal de la Empresa CNEL EP Unidad de Negocio El Oro.



Figura 3.3: Especificaciones de la Subestación La Primavera; Fuente: Geoportal CNEL EP Unidad de Negocio El Oro.

3.1.2 Situación Actual

Actualmente la creciente demanda de electricidad, se ha ido incrementando a gran escala a causa del crecimiento poblacional, vivienda, comercial e industrial (Minería, agricultura, producción acuícola, etc.). La industria camaronera ha experimentado un significativo desarrollo a lo largo de su historia, gracias a las condiciones favorables de nuestro país que facilitan su rol como exportador de camarón.

La Subestación Eléctrica La Primavera se encuentran desarrollando proyectos urbanísticos y además el cultivo de camarón intensivo, por lo que la demanda de potencia y energía eléctrica se ha visto incrementada, de igual manera al ser esta una zona urbana de gran movimiento comercial demanda de mayor cantidad de potencia y energía eléctrica.

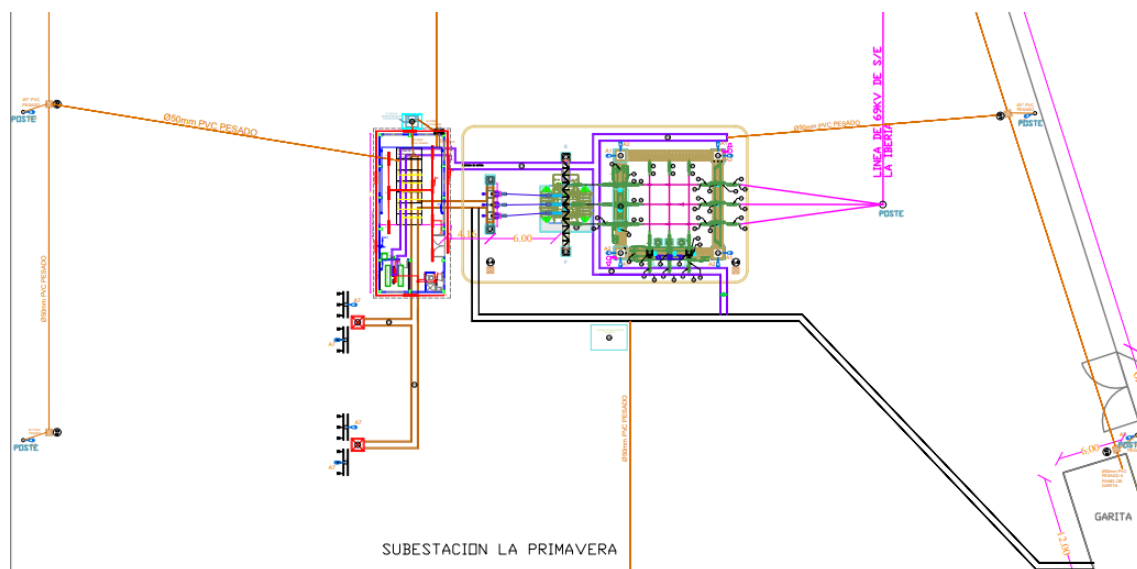


Figura 3.4: Planos actuales de la S/E la Primavera; Fuente: CNEL EP Unidad de Negocio El Oro.

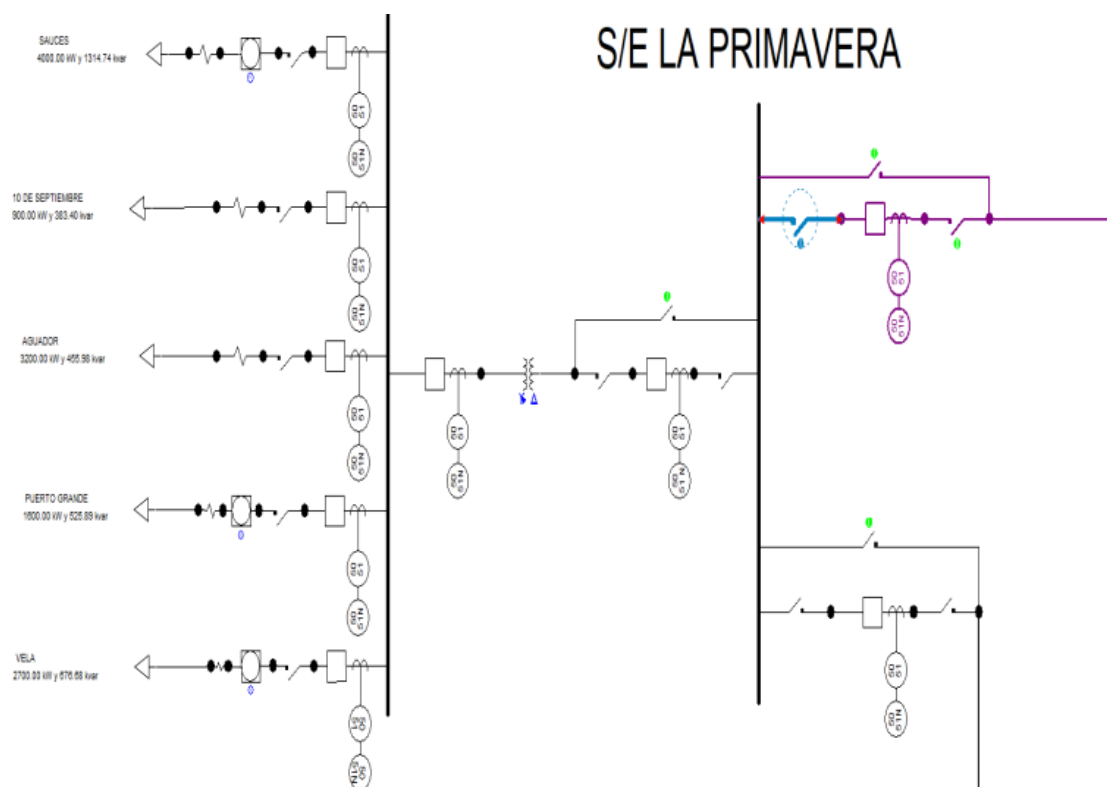


Figura 3.5: Esquema unifilar eléctrico de la S/E La Primavera; Fuente: CNEL EP Unidad de Negocio El Oro.

3.1.2.1 Alimentadores

La situación de los alimentadores de la subestación La Primavera se presenta a continuación en la tabla 3.1 .

Subestación	Alimentador	Demanda máxima [MW]	Capacidad [MVA]		Dmax coincidente	
			ONAN	ONAF	[MVA]	[MW]
LA PRIMAVERA	Sauces	6,36	20	24	19,02	18,14
	10 de septiembre	1,37				
	Aguador	4,22				
	Puerto Grande	3,77				
	Vela	3,34				
Tipo de conexión			Dyn1			
Impedancia [%]			8,27			

Tabla 3.1: Datos de la S/E La Primavera y sus alimentadores; Fuente: CNEL EP Unidad de Negocio El Oro.

3.1.2.2 Transformador

Mediante la siguiente gráfica se presentara los datos del transformador de potencia S/E LA PRIMAVERA.

The screenshot shows the 'Transformador con dos devanados' software interface. On the left is a library of transformers, with 'TR1_LA PRIMAVERA' selected. The main panel has tabs for 'General', 'Límites de carga', 'LTC', 'Fiabilidad', and 'Símbolo'. The 'General' tab is active, displaying the following data:

- Datos nominales:**
 - Tipo de transformador: Trifásico
 - Tipo de aislamiento: Inmerso en líquido
 - Tipo de devanado: Tipo acorazado
 - Capacidad nominal: 20000.0 kVA
 - Tensión primaria: 69.0 kVLL
 - Tensión secundaria: 13.8 kVLL
 - Pérdidas en vacío: 0.0 kW
 - Corriente magnetizante: 0.0 %
- Impedancias de secuencia:**
 - Z1: 8.27 %
 - Z0: 8.27 %
 - X1/R1: 10.0
 - X0/R0: 10.0
- Impedancias de puesta a tierra:**
 - Rg: 0.0
 - Xg: 0.0
 - Primario: 0.0
 - Secundario: 0.0

On the right, the 'Configuración' panel shows:

- Primario: [Symbol]
- Secundario: [Symbol]
- Desfase: Dyn1
- 30.0 grado
- Reversible: [Checked]

Figura 3.6: Transformador de potencia S/E La Primavera Fuente: CNEL EP Unidad de Negocio El Oro.

3.1.2.3 Corrientes de cortocircuito de las barras de 69 y 13,8 KV y la relación X/R

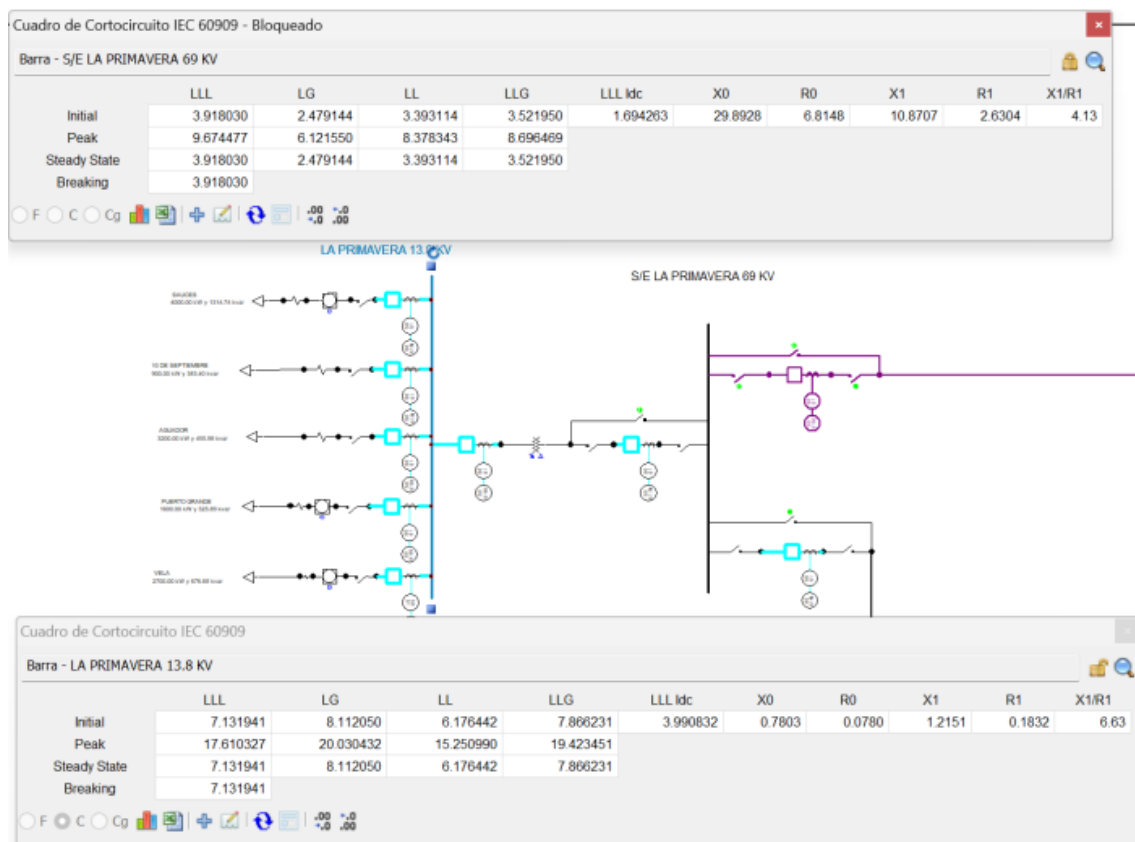


Figura 3.7: Corrientes de cortocircuito de las barras de 69 y 13,8 KV de la S/E La Primavera; Fuente: CNEL EP Unidad de Negocio El Oro.

CAPÍTULO 4

Diseño del sistema de puesta a tierra S/E "LA PRIMAVERA"

4.1 Norma IEEE 80-2000 Guide for Safety in A.C. Substation Grounding

El diseños de sistemas de puesta a tierra, son fundamentales para salvaguardar los equipos en una subestación eléctrica. Para asegurar su funcionamiento óptimo, es vital adherirse a las normativas precisas durante el diseño y la implementación de estos sistemas. Por lo tanto, se llevará a cabo un análisis para la implementación del sistemas de puesta a tierra, presentando de manera clara y estructurada el método de cálculo conforme a las normativas.

El procedimiento de diseño que se detallará, conforme a las normativas, garantiza niveles de tensión de paso y de toque seguros, tanto dentro de la subestación, como en sus alrededores.

Estas normas ofrecen fórmulas para realizar los cálculos obligatorios y una guía exhaustiva sobre aspectos prácticos, como la conexión de componentes del equipo y la disposición de cada electrodo. Además, definen los límites de diseño para garantizar tanto la seguridad del personal como la protección de las instalaciones.

Mediante la tabla 4.1 se mostrara valores de impedancias equivalentes aproximadas basadas en la norma IEEE Std 80-2000.

Figura 4.1: Impedancias equivalentes (Z_{eq}), para diferentes configuraciones de líneas de transmisión y neutros de distribución [8]

4.2 Normativa IEEE Std 80-2013

En la Tabla 4.2 se especifican los valores máximos permitidos de resistencia para una puesta a tierra, de acuerdo con la norma IEEE Std 80-2013.

Descripción	Tensión	Resistencia [Ω]
Subestaciones	Alta o muy alta tensión	1
	Media tensión	10
Neutro de acometida	Baja tensión	25
Descargas electrostáticas		25
Protección contra rayos		4
Alta sensibilidad de equipos electrónicos		5

Tabla 4.1: Resistencias para diferentes condiciones de operación [10].

Las normas establecen criterios y valores mínimos que deben cumplir los diseños y equipos del sistema de potencia.

4.3 Diseño de la malla puesta a tierra para el nuevo castillo de 13,8 KV en la Subestación La Primavera

4.3.1 Procedimiento

Se ha llevado a cabo el procedimiento de medición y diseño de la malla de puesta a tierra para el nuevo castillo de 13.8 kV.

4.3.1.1 Determinación del área del terreno

Se determinó que las dimensiones del terreno para la malla de puesta a tierra en el nuevo patio de 13.8 kV sean de 20 m de largo y 8 m de ancho, proporcionando un área total de 160 m².

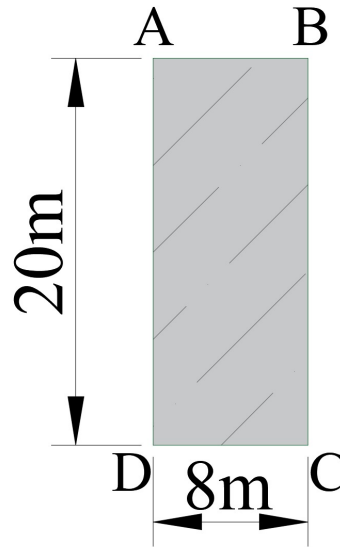


Figura 4.2: Dimensión del terreno; Fuente: Autores.

La normativa indica que la malla debe ser enterrada a una profundidad que oscile entre 0.5 m y 1.5 m. En consecuencia, para este diseño se ha determinado que la malla de puesta a tierra se ubicará a 0.5 m de profundidad.

4.3.2 Resistividad del área de 13,8 KV

Para medir la resistividad del terreno en el nuevo pórtico de 13.8 kV, se utilizará el Método de Wenner, que emplea cuatro electrodos dispuestos en línea recta y equidistantes entre sí.

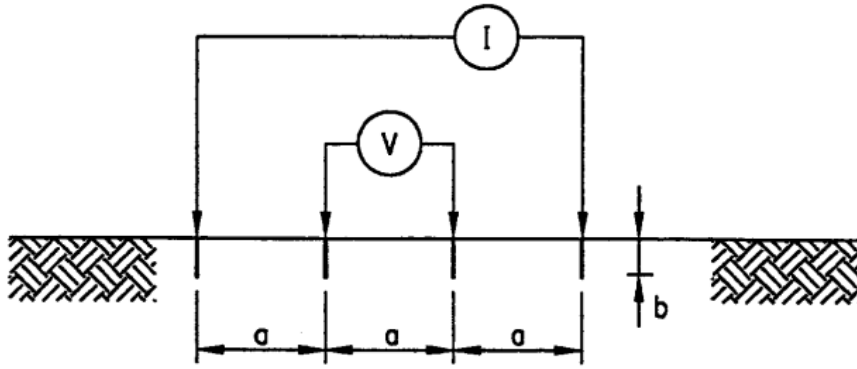


Figura 4.3: Método de Wenner [8].

En el gráfica 4.2 se muestra de manera esquemática la disposición de los electrodos, donde la corriente se introduce a través de los electrodos exteriores y se mide el potencial entre los electrodos interiores.

La resistividad aparente está dada por la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{4 * \pi * A * R}{1 + \frac{2*A}{(A^2+4*B^2)^{0.5}} - \frac{2*A}{(4*A^2+4*B^2)^{0.5}}} \quad (4.1)$$

Donde:

- ρ : Es la resistividad promedio en ohm*m.
- A: Es la distancia entre los electrodos en metros.
- B: Profundidad enterrada de los electrodos.
- R: Lectura del Telurómetro dado en ohm.

Si la profundidad de enterrado es pequeña en comparación con la distancia entre los electrodos, se utilizará la fórmula simplificada que se presenta a continuación:

$$\rho = 2 * \pi * A * R \quad (4.2)$$

4.3.2.1 Mediciones en campo sobre la resistividad del terreno

Las mediciones se realizaron en el área donde se llevará a cabo la ampliación del pórtico de 13.8 kV, como se podrá visualizar mediante las siguientes gráficas.

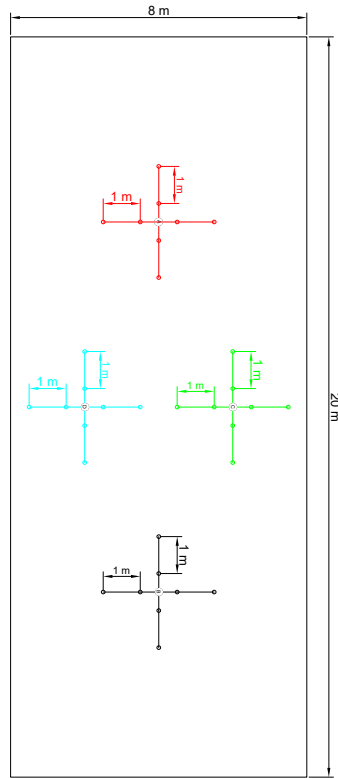


Figura 4.4: Medición a 1 m: Fuente: Autores.

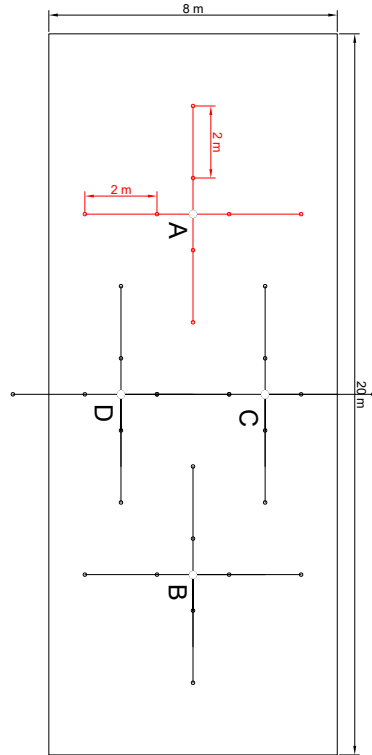


Figura 4.5: Medición a 2 m: Fuente: Autores.

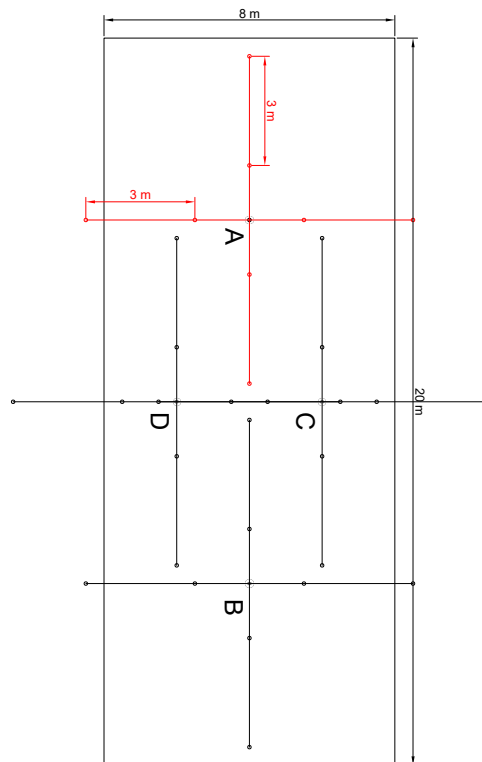


Figura 4.6: Medición a 3 m: Fuente Autores.

En la tabla 4.3 se presentan los valores medidos. En nuestro caso para el calculo de la resistividad se empleara la ecuación simplificada 4.2, ya que nuestra profundidad enterrada de electrodos es menor a la distancia.

DATOS DE RESISTIVIDAD DEL TERRENO PROYECTADO PARA EL DISEÑO DEL NUEVO CASTILLO DE LA SUBESTACION LA PRIMAVERA						
	Direccion	Distancia (m)	Resistencia teluometro (Ω)	Resistividad (Ωm)	Promedio en cada Tramo y direccion	
PUNTO 1		1	1,8880	11,8627	7,3995	
		2	0,5660	7,1126		
		3	0,1710	3,2233		
		1	1,9240	12,0888	7,7493	
		2	0,5340	6,7104		
		3	0,2360	4,4485		
PUNTO 2		1	1,1460	7,2005	5,3449	
		2	0,3880	4,8758		
		3	0,2100	3,9584		
		1	1,4770	9,2803	6,8110	
		2	0,4900	6,1575		
		3	0,2650	4,9951		
PUNTO 3		1	1,7580	11,0458	7,2634	
		2	0,4590	5,7680		
		3	0,2640	4,9763		
		1	1,8650	11,7181	8,0844	
		2	0,5790	7,2759		
		3	0,2790	5,2590		
PUNTO 4		1	1,7810	11,1904	6,8780	
		2	0,4680	5,8811		
		3	0,1890	3,5626		
		1	1,4380	9,0352	5,8706	
		2	0,3570	4,4862		
		3	0,2170	4,0904		
Promedio General de resistividad en todos los puntos					6,9251	(Ωm)
Promedio de la resistividad de todos los puntos a 1 metro					10,4277	(Ωm)
Promedio de la resistividad en todos los puntos a 2 metros					6,0334	(Ωm)
Promedio de la resistividad en todos los puntos a 3 metros					4,3142	(Ωm)

Tabla 4.2: Valores medidos de resistencia y resistividad del terreno; Fuente: Autores

La resistividad medida para el nuevo pórtico de 13,8 kV presentó un promedio general de 6,9251 $\Omega \cdot m$. El valor promedio más alto registrado a una distancia de 1 metro fue de 10.4277 $\Omega \cdot m$ el cual se tomar  como referencia esta resistividad del

terreno para el diseño.

4.3.2.2 Corrientes de cortocircuito

Las corrientes de cortocircuito fueron calculadas utilizando el software Cymdist, implementado por la empresa CNEL EP EL ORO. En la simulación, se consideró la inclusión de un transformador de potencia de 20/24 MVA. A continuación, se presentan los datos obtenidos con las siguientes características eléctricas:

Equivalente de Thevenin S/E La primavera					
R0 ()	X0 ()	R1=R2 ()	X1=X2 ()	Relación X1/R1	Relación X/R
6,8148	29,8928	2,6304	10,87	4,1325	4,2758

Tabla 4.3: Equivalente de Thevenin de la S/E La primavera; Fuente: CNEL EP Unidad de Negocio El Oro..

L/ST Los pinos - La Primavera		
Conductor	ACSR 266.8 MCM, 26/7 HILOS	
Longitud	5,84	km
R1=R2	0,1732	/Km
X1=X2	0,4109	/Km
R0	0,3865	/Km
X0	1,202	/Km

Tabla 4.4: Datos de la línea de transmisión L/ST Los pinos - La Primavera; Fuente: CNEL EP Unidad de Negocio El Oro.

Datos del transformador Potencia Existente		
Transformador de Potencia	20/24	MVA
Relación de transformación	69/13,8	kV
Tipos de conexión	DYN1	
Impedancia	7	%

Tabla 4.5: Datos del transformador de potencia existente; Fuente: CNEL EP EL ORO.

Valores de Cortocircuito a 69 KV				
LLL (KA)	LLG (KA)	LL (KA)	LG (KA)	Relación X/R
3,91803	3,52192	3,393114	2,479144	4,27579582

Tabla 4.6: Tabla de valores de cortocircuito a 69 KV; Fuente: CNEL EP Unidad de Negocio El Oro.

Valores de Cortocircuito a 13,8 KV				
LLL (KA)	LLG (KA)	LL (KA)	LG (KA)	Relación X/R
7,1319	7,86623	6,176442	8,11205	6,63

Tabla 4.7: Tabla de valores de cortocircuito a 13,8 KV; Fuente: CNEL EP Unidad de Negocio El Oro.

4.3.3 Dimensionamiento del conductor de la malla

El conductor de la malla de tierra debe ser lo suficientemente resistente para soportar los esfuerzos térmicos y mecánicos. Por eso, al elegir el tamaño adecuado del conductor, es fundamental tener en cuenta la máxima corriente de cortocircuito que podría presentarse durante el funcionamiento de la subestación, tanto en alta como en media tensión.

4.3.3.1 Corriente máxima a disipar de la malla

El valor máximo de corriente de falla a tierra que circula a través de la malla hasta la tierra viene expresado por la siguiente ecuación:

$$I_g = (I_f) * (D_f) * (C_p) \quad (4.3)$$

Donde:

I_f :Corriente de falla simétrica a tierra (LG) tomada de la tabla 4.8.

D_f :Factor de Decremento DC.

C_p :Factor de crecimiento de la subestación a futuro lo cual se toma un valor de 1.

Para el calculo del factor de decremento D_f , se debe considerar la siguiente ecuación:

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T}{t_f} \left(1 - e^{-\frac{2t_f}{T}}\right)} \quad (4.4)$$

Donde:

t_f : Es la duración de la falla, medida en segundos, esta debe ajustarse según la normativa IEEE Std 80-200. De acuerdo con esta normativa, se recomienda considerar un intervalo de tiempo de entre 0,25 y 1 segundo. Para nuestro cálculo, se ha optado por un valor de 0,5 segundos.

t_α : Constante de tiempo en DC.

Para el calculo de la constante de tiempo se realiza de la siguiente manera:

$$t_\alpha = \frac{X}{R} * \frac{1}{2 * \pi * f} \quad (4.5)$$

Donde:

X/R : es la impedancia subtransitoria de la falla, la obtenemos en la tabla 4.8 .

Dado el siguiente procedimiento se ha procedido a realizar los cálculos , obteniendo los siguientes resultados a continuación:

$$t_\alpha = 6,63 * \frac{1}{2 * \rho * 60} = 0,01758662 \quad (4.6)$$

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{0,01758662}{0,5} \left(1 - e^{-\frac{2*0,5}{0,01758662}}\right)} = 1,01743464 \quad (4.7)$$

El resultado de la corriente máxima a disipar por la malla es la siguiente :

$$I_g = 8,11205 * 1,017434 * 1 = 8253,4806A \quad (4.8)$$

4.3.3.2 Determinación de la sección transversal del conductor

Para determinar la sección transversal del conductor utilizaremos la siguiente ecuación:

$$Amcm = I_g * \frac{197,4}{\sqrt{\frac{TCAP}{t_f * \alpha_r * \rho_r} * \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}} \quad (4.9)$$

Se ha considerado una temperatura ambiente de $T_a = 40^\circ\text{C}$, la temperatura máxima de fusión T_m , factor α_r , capacidad térmica TCAP, K_0 y ρ_r se le tomo de la tabla 2.4 . Además, se utilizo un tiempo de duración de la falla considerando el escenario de despeje de $t_f = t_c = 0,5$ s.

Por consiguiente se procede a realizar el calculo de la sección transversal del conductor:

$$Amcm = 8253,4806 * \frac{197,4}{\sqrt{\frac{3,42}{0,5 * 0,00381 * 1,78} * \ln\left(\frac{242 + 1084}{242 + 40}\right)}} = 41232,63863 \quad (4.10)$$

$$Amcm = 41,232639 \text{ kcmil} = 20,89257799 \text{ mm}^2$$

El conductor de cobre calibre 2/0 AWG ($67,44 \text{ mm}^2$) cumple perfectamente con el área del conductor calculado para la malla. Sin embargo, debido a las condiciones de esfuerzos mecánicos (como la presión ejercida por diversas máquinas), se procede a diseñar la malla con un conductor trenzado #4/0 AWG (107.2 mm^2 ; con un diámetro de 11.7 mm). Estos datos se han tomado sobre el conductor de cobre comercial, trenzado duro de la tabla 2.5 , "Dimensiones típicas de los conductores."

4.3.3.3 Tensiones tolerables de paso y contacto

La norma IEEE Std. 80-2000 define los límites máximos de tensión de toque y de paso que una persona puede soportar antes de que se produzca una falla y el sistema sea desenergizado. Estos límites se establecen en función de pesos corporales de 50 kg y 70 kg.

Los valores máximos admisibles de tensión de paso E_p y de contacto E_t para una persona de 70 kg se calculan mediante las ecuaciones siguientes:

$$E_p = (1000 + 6 * C_s * \rho_s) * \left(\frac{0,157}{\sqrt{T_s}}\right) \quad (4.11)$$

$$E_t = (1000 + 1.5 * C_s * \rho_s) * (\frac{0,157}{\sqrt{T_s}}) \quad (4.12)$$

Donde:

ρ_s : Resistividad de la capa superficial lo cual se tomara en cuenta suelo pedregoso que tiene un valor de $3000 \Omega^*m$, estos los valores se encuentran en la tabla 2.3 "Resistividad según el tipo de terreno".

T_s :Duración de la corriente de choque (0,5 s).

ρ :Resistividad de terreno ($10,4277 \Omega^*m$).

C_s :Factor de disminución de la capa superficial

El calculo para la el factor disminución de la capa superficial se da mediante la siguiente ecuación:

$$C_s = 1 - \frac{0,09 * (1 - \frac{\rho}{\rho_s})}{2 * h_s + 0,09} \quad (4.13)$$

Consideramos un capa superficial del suelo pedregoso de $h_s=0,15$ m. Reemplazando, se obtiene lo siguiente:

$$C_s = 1 - \frac{0,09 * (1 - \frac{10,4277}{3000})}{2 * 0,15 + 0,09} = 0,7700329 \quad (4.14)$$

Con el valor del factor de disminución de la capa superficial C_s , procedemos a sustituir en las ecuaciones 4,11 y 4,12, obteniendo así los valores máximos tolerables de tensión de paso y de contacto.

$$E_p = (1000 + 6 * 0,7700329 * 3000) * (\frac{0,157}{\sqrt{0,5}}) \quad (4.15)$$

$$E_p = 3299,52 \text{ V}$$

$$E_t = (1000 + 1,5 * 0,7700329 * 3000) * (\frac{0,157}{\sqrt{0,5}}) \quad (4.16)$$

$$E_t = 991,40366 \text{ V}$$

4.3.3.4 Diseño preliminar de la malla

Según la norma IEEE Std. 80-2000, se sugiere que la malla de tierra se instale a una profundidad de entre 0,5 m y 1,5 m, con una distancia entre los conductores que oscile entre 3 m y 15 m. En este diseño se contemplaran 6 varillas de 2,40 m de largo, con una distancia entre los conductores de 4 m y una profundidad de 0,5 m. La longitud total del conductor horizontal enterrado de la malla es:

$$L_c = 6 * 8 + 3 * 20 = 108m. \quad (4.17)$$

La longitud total de las varillas de aterramiento es:

$$L_r = 6 * 2,40 = 14,4m. \quad (4.18)$$

Por lo tanto, la longitud total de los conductores enterrados es:

$$L_T = L_C + L_R = 122,4m. \quad (4.19)$$

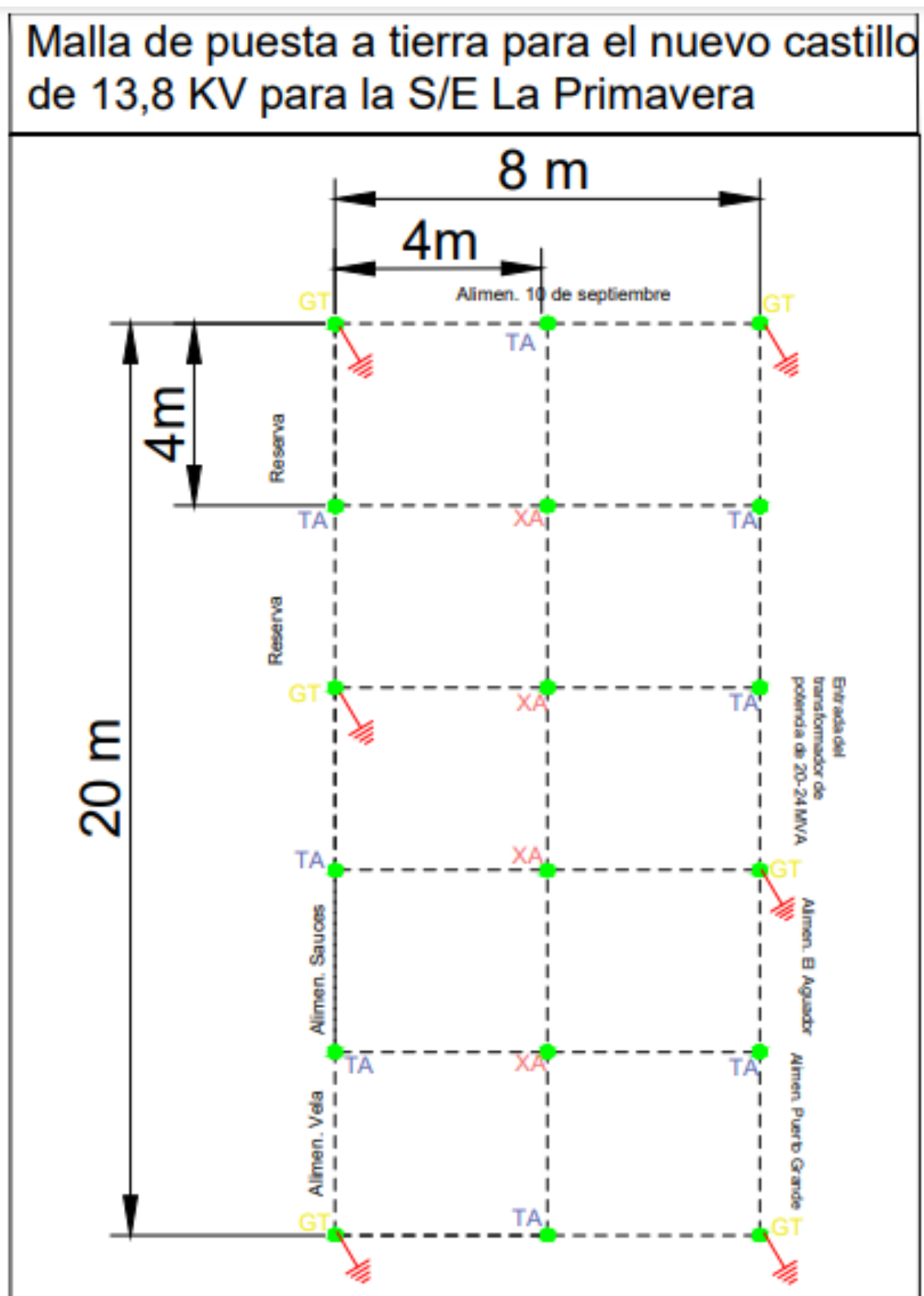


Figura 4.7: Diseño de la malla de puesta a tierra para el nuevo castillo de 13,8 KV de la S/E La Primavera; Fuente: Autores

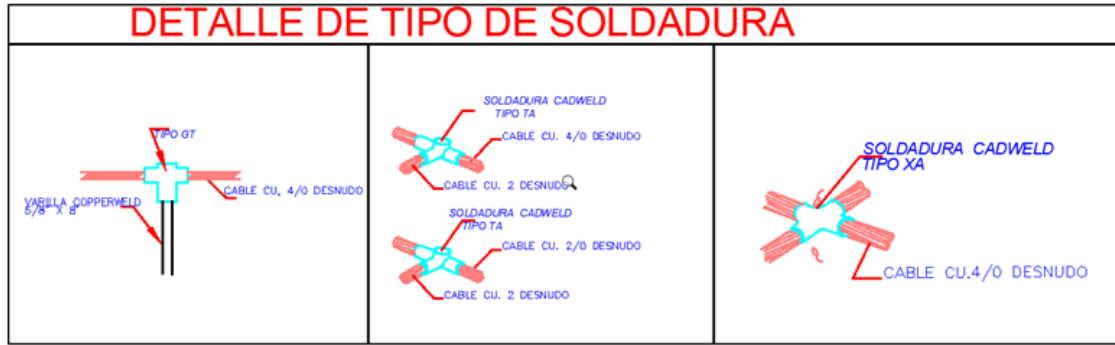


Figura 4.8: Tipos de Soldaduras;Fuente: Autores

4.3.3.5 Resistencia de la malla

Para calcular la resistencia de la malla "R_g", se utiliza la ecuación simplificada propuesta por Sverak. Esta ecuación permite determinar de manera práctica y eficiente la resistencia del sistema de puesta a tierra, considerando factores clave que afectan el rendimiento de la malla.

$$R_g = \rho \left(\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20 * A}} * \left(1 + \frac{1}{1 + h * \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right) \quad (4.20)$$

Donde:

ρ : Resistividad del terreno (10,4277 Ω *m)

L_T :Longitud total de conductores (122,4)

h : Profundidad de los conductores en la malla (0,5m)

A : Área cubierta por la malla (160 m²)

Reemplazando nuestros valores en la ecuación 4.20 , se tiene el siguiente valor de resistencia de la malla R_g :

$$R_g = 10,4277 * \left(\frac{1}{122,4} + \frac{1}{\sqrt{20 * 160}} * \left(1 + \frac{1}{1 + 0,5 * \sqrt{\frac{20}{160}}} \right) \right) \quad (4.21)$$

$$R_g = 0,426 \Omega$$

4.3.3.6 Corriente máxima disipada por la malla

Según la norma IEEE Std. 80-2000, el valor de la corriente máxima disipada por la malla en una subestación se determina mediante la siguiente ecuación:

$$I_G = I_F * D_F * S_F \quad (4.22)$$

Donde:

I_f : Corriente de falla a tierra L_G (8,11205 KA), tomada de la Tabla 4.8 "Corrientes de cortocircuito de 13,8 KV".

D_f : Factor de Decremento DC (1,01743464),” tomada de la ecuación 4.7 ”.

S_f : Factor de división de corriente entre la malla y la tierra circundante con los neutros de la S/E.

Cabe recalcar que la norma establece, para calcular I_G , se debe considerar la corriente de cortocircuito (I_F) en el lado de alta tensión (69 kV) en subestaciones de distribución con transformadores de potencia conectados en Δ/Y . Esto se debe a que la conexión en estrella con neutro aterrizado en el lado de baja tensión provoca que la corriente I_G sea insignificante, ya que no se introduce en la malla de tierra, y por lo tanto, su retorno sera por el conductor de protección.

Para el calculo del factor de división de corriente se expresará con la mediante la siguiente ecuación:

$$S_f = \left| \frac{(Z_{eq})_{X/Y}}{R_G + (Z_{eq})_{X/Y}} \right| \quad (4.23)$$

Donde:

$Z_{(eq)x/y}$: Impedancia equivalente de X cables de guarda de L/ST e Y neutros de alimentadores de distribución, lo cual para nuestro caso se ha considerado X=1, Y=8.

La norma IEEE Std 80-2000 presenta valores de impedancia equivalentes aproximadas, estos valores se encuentran en la tabla 4.1 .

R_g : Resistencia de la malla a tierra de la subestación (0,426 Ω) tomada de la ecuación 4.21 .

Reemplazando estos valores obtenemos el siguiente resultado de factor de división de corriente.

$$S_f = \frac{0,15 + 0,11i}{0,426 + 0,15 + 0,11i} = 0,3170 \quad (4.24)$$

Finalmente se tiene el valor de la corriente máxima a disipar por la malla a tierra:

$$I_g = 8,11205 * 0,3170 * 1,01743464 = 2617,1457A \quad (4.25)$$

4.3.3.7 Potencial máximo de la malla(GPR)

$$I_g = 0,426 * 2617 = 1115,3709V \quad (4.26)$$

Anteriormente nuestra tensión de contacto se obtuvo un valor de:

$$E_t = 991,4036 \text{ V}$$

Sin embargo se tiene que $GPR > E_t$, por lo tanto, el diseño no es aceptado desde el punto de vista de la seguridad de las personas. Se procede a realizar la evaluación de la malla de tierra a fin de determinar la tensión de malla y la tensión real de paso.

4.3.3.8 Cálculo de tensiones de malla y paso reales

Para calcular el valor real de la tensión de la malla se aplica la siguiente ecuación:

$$E_m = \frac{\rho * I_G * K_m * K_i}{L_m} < E_{toque-max} \quad (4.27)$$

Donde:

ρ : Resistividad del terreno (10,4277 Ω)

L_m : Longitud enterrada (m).

I_g : Corriente máxima que pasa por la malla (2617,1457 A).

K_m : Factor geométrico de la malla.

K_i : Factor de irregularidad.

El factor K_m se calculo de acuerdo a la siguiente formula:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left(\ln \left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} * \ln \left(\frac{8}{\pi(2n-1)} \right) \right) \quad (4.28)$$

Siendo:

D : Máxima separación entre conductores paralelos, considerar en ambos sentidos (4m).

h : Profundidad de enterramiento entre conductores (0,5 m).

d : Diámetro de conductor de la malla a tierra (0,0117 m).

K_{ii} : Su valor es de 1 para el caso de malla con varillas a lo largo del perímetro, en las esquinas y en el interior de la misma.

Para el calculo de K_h se da con la siguiente formula:

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}}; h_0 = 1m \quad (4.29)$$

n : Para el calculo del factor geométrico se considera $n=n_a n_b n_c n_d$, siendo para una malla rectangular, como en nuestro caso el nuevo castillo 13,8 KV de la subestación La Primavera.

$$n_a = \frac{2L_c}{L_p}; \text{ para todos los casos} \quad (4.30)$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{A}}} \quad (4.31)$$

$$n_c = n_d = 1 \quad (4.32)$$

Siendo:

L_c : Longitud total del conductor horizontal enterrado (108 m).

L_p : Perímetro de la malla rectangular (56 m).

A : Área cubierta por la malla (160 m²) .

Para el calculo del factor K_i se da con la siguiente ecuación.

$$K_i = 0,644 + 0,148n \quad (4.33)$$

El factor L_m se calcula de acuerdo a la siguiente formula para mallas con varillas a lo largo del perímetro en las esquinas:

$$L_m = L_c + (1,55 + 1,22 * (\frac{L_r}{\sqrt{(L_x)^2 + (L_y)^2}})) \quad (4.34)$$

donde:

L_r : Longitud de la varilla (2,4 m).

L_x : Máxima longitud de la malla en dirección "X" (8 m).

L_y : Maxima Longitud de la malla en direccion "Y" (20 m).

L_R : Longitud total de todas las varillas de las malla (14,4 m).

Reemplazando todos los valores dados obtenemos lo siguiente:

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{0,5}{1}} = 1,2447 \quad (4.35)$$

$$n_a = \frac{2 * 108}{56} = 3,8571 \quad (4.36)$$

$$n_b = \sqrt{\frac{56}{4\sqrt{160}}} = 1,0520 \quad (4.37)$$

$$n = 1,2447 * 3,8571 * 1,0520 * 1 = 4,0578 \quad (4.38)$$

$$K_i = 0,644 + 0,148 * 4,0578 = 1,2445 \quad (4.39)$$

$$L_m = 108 + (1,55 + 1,22 * (\frac{14,4}{\sqrt{(8)^2 + (20)^2}})) = 132,2773m \quad (4.40)$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left(\ln \left(\frac{4^2}{16 * 0,5 * 0,0117} + \frac{(4 + 2 * 0,5)^2}{8 * 4 * 0,0117} - \frac{0,5}{4 * 0,0117} \right) + \frac{1}{1,2247} * \ln \left(\frac{8}{\pi(2 * 4,0578 - 1)} \right) \right) \quad (4.41)$$

$$K_m = 0,7298$$

Finalmente con los valores ya obtenidos, procedemos a calcular la tensión de la malla real.

$$E_m = \frac{10,4277 * 2617,146 * 0,7298 * 1,2445}{132,2774} = 187,4170V \quad (4.42)$$

Anteriormente en la ecuación 4.16 nuestro valor obtenido de tensión de toque fue de 991,4036 V por lo que tenemos lo siguiente:

$$E_m = 187,4170 V < 991,4036 V$$

Se cumple que la tensión de la malla es menor a la tensión de contacto que podría soportar una persona de 70 kg con una falla de 0.5 s de duración.

4.3.3.9 Tensión de paso real

Para calcular la tensión de paso real utilizamos la siguiente ecuación lo cual es válida para mallas enterradas a una profundidad entre 0.25 m y 2.5 m.

$$E_{p-real} = \frac{\rho * I_G * K_s * K_i}{L_s} < E_{paso-max} \quad (4.43)$$

Para el calculo de la longitud efectiva del conductor enterrado se utilizar la siguiente ecuación, lo cual es valido mallas con o sin varillas.

$$L_s = 0,75L_c + 0,85L_R \quad (4.44)$$

Mientras tanto para el calculo de K_s se procede de la siguiente manera.

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0,5^{n-2}) \right) \quad (4.45)$$

Los valores correspondientes de los parámetros K_i , n, L_R y L_c ; calculados anteriormente, son los mismos para el calculo de la tensión de paso real.

Reemplazando los valores, se tiene:

$$L_s = 0,75 * 108 + 0,85 * 14,4 = 93,24 \quad (4.46)$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{2 * 0,5} + \frac{1}{4 + 0,5} + \frac{1}{D} (1 - 0,5^{4,0578-2}) \right) = 0,4495 \quad (4.47)$$

Por ultimo calculamos la tensión de paso real y obtenemos lo siguiente:

$$E_{p-real} = \frac{10,4277 * 2617,146 * 0,4495 * 1,2445}{93,24} = 163,7472 \quad (4.48)$$

$$E_{p-real} = 163,7472 \text{ V} < 3299,52 \text{ V}$$

Se cumple que la tensión de paso real es menor a la tensión de paso calculado que podría soportar una persona de 70 kg en contacto con una falla de 0.5 s de duración.

Por lo tanto el diseño es aceptado.

4.3.3.10 Resultados del diseño de la malla de puesta a tierra para el nuevo castillo de 13,8 KV de la subestación La Primavera

La siguiente tabla 4.9 presenta los resultados de la implementación de la malla puesta a tierra en la subestación La Primavera.

Descripción	Valores Calculados	Observaciones
Resistividad del terreno	10,4277 $\Omega \cdot m$	Método simplificado
Conductor de la malla	#2/0 AWG de cobre comercial	Normativa IEEE Std 80-2000
Tensión de paso tolerable E_p	3299,52 V	
Tensión de contacto tolerable E_t	991,40365 V	Para una persona de 50 kg de peso
L_c	108 m	Longitud total del conductor
NR	6 unidades	Cantidad de varillas de tierra 5/8" * 2,40 m
RG	0,4261 Ω	Resistencia de la malla
IG	2617,1457 A	Corriente máxima a disipar por la malla
Em-real	187,4170 V	
Ep-real	163,7472 V	Cumplen con las normativas
Nota: Cumplen con las normativas de seguridad por lo tanto el diseño se considera apropiado		

Tabla 4.8: Valores calculados y observaciones de la malla de puesta a tierra; Fuente: Autores.

El proyecto de implementación de la malla de puesta a tierra para la subestación La Primavera ha sido diseñado de acuerdo con las normas establecidas por IEEE Std 80-2000 e IEEE Std 80-2013, de acuerdo con estos estándares la seguridad y eficiencia han sido alcanzados. El diseño de la malla garantiza la seguridad del personal y de los equipos en la subestación, reduciendo los riesgos asociados con la operación y mantenimiento de la infraestructura eléctrica. La configuración de la malla ha sido cuidadosamente planeada para adaptarse a las necesidades específicas del sitio. La implementación de la malla debe ir interconectada a la malla actual.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Con base en las implementaciones realizadas en campo, las mediciones efectuadas y el análisis de los resultados obtenidos durante este proyecto, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

Las mediciones en campo sobre la resistividad se empleo el método de Wenner, realizadas en cuatro puntos y con separaciones de 1m, 2m y 3m entre las picas, tanto en dirección vertical como horizontal en un área de 160 m² .

Los resultados obtenidos en el diseño de la malla de puesta a tierra para el nuevo castillo de 13,8 kV en la subestación La Primavera cumplen con los parámetros establecidos por la normativa IEEE 80-2000, lo que asegura la efectividad y seguridad del sistema.

La resistividad del terreno, medida en 10,4277 Ω *m, y la resistencia de la malla de 0,4261 Ω son adecuadas para las condiciones específicas del sitio, garantizando que las corrientes de falla sean disipadas de manera segura sin poner en riesgo la integridad del equipo ni la seguridad del personal. Las tensiones de paso y contacto reales y de contacto tolerables están dentro de los límites seguros para una persona de 70 kg de peso, lo que minimiza el riesgo de accidentes eléctricos en la subestación.

La malla principal proyectada para el nuevo castillo de 13,8 KV sera de cobre desnudo de 4/0 AWG, utilizando 6 varillas de cobre de 5/8 x 2,40m. Todos los cruces entre conductores, así como las uniones entre conductores y varillas de cobre, se deberá realizar mediante soldadura exotérmica. Los conductores hacia las bases para estructuras y equipos deben ser de cobre desnudo 2/0 AWG, con una longitud aproximada de 2 m. A lo largo de todo el recorrido de las trincheras se deberá instalar un conductor de cobre 2/0 AWG.

5.2 Recomendaciones

Es crucial asegurarse de que todos los parámetros calculados, como la resistividad del terreno, la tensión de paso y contacto tolerables, y la resistencia de la malla, cumplan con las normativas aplicables (por ejemplo, IEEE Std 80-2000).

Es importante establecer un programa de mantenimiento preventivo periódico para las mallas de puesta a tierra, tanto las ya existentes como las nuevas. Este mantenimiento debe incluir inspecciones detalladas, mediciones precisas de resistencia y una revisión completa de las conexiones. Con estas prácticas, se asegurará un funcionamiento óptimo y una protección duradera del sistema de puesta a tierra.

Al utilizar el método de Wenner para medir la resistividad del suelo, se recomienda espaciar las picas al menos a 1m, 2m y 3m. Para obtener mediciones precisas y evitar la influencia de elementos metálicos enterrados, es conveniente realizar las mediciones en cuatro direcciones diferentes alrededor del centro del terreno. Además, la presencia de objetos enterrados cerca de las picas puede afectar las mediciones de la resistencia de puesta a tierra con el método de caída de potencial. Por lo tanto, se aconseja realizar tres mediciones, variando la posición de las picas de corriente y voltaje, para asegurar la obtención de datos más exactos.

Para garantizar la seguridad y la eficiencia del sistema de puesta a tierra en la subestación, es fundamental que la nueva malla del castillo de 13,8 kV esté conectada adecuadamente con la malla existente para asegurar el correcto funcionamiento del sistema de puesta a tierra en toda la subestación. Se recomienda realizar esta interconexión utilizando conductores de alta capacidad y asegurando una buena conexión eléctrica en los puntos de unión para evitar caídas de tensión y pérdidas de eficiencia en el sistema.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. TRASHORRAS MONTECELOS, *Subestaciones eléctricas*. Ediciones Parainfo, SA, 2015.
- [2] S. X. Cárdenas Tapia and P. I. Moreno Gutiérrez, “Implementación de la subestación vilcabamba al sistema scada de la empresa eléctrica regional del sur sa, segunda etapa. loja, 2011,” B.S. thesis, Universidad Politecnica Salesiana, 2012.
- [3] R. A. Chiriboga Guaras, “Proyecto de un sistema de puesta a tierra normalizada para centros de transformación en el sector del nuevo aeropuerto de quito parroquia de tababela,” B.S. thesis, QUITO/EPN/2008, 2008.
- [4] C. N. D. Marín, “Simulación de la malla de tierra en subestaciones de alta tensión aisladas en aire,” *Ciencia unisalle*, Bogota, 2014.
- [5] J. A. Bustamante Cuenca, “Evaluación y diagnóstico de la malla de puesta a tierra de la subestación obrapía con niveles de tensión de 69kv y 13.8 kv perteneciente a la eerssa para cumplir con los parámetros establecidos por la norma ieee std. 80-2000 (guide for safety in ac substation grounding),” B.S. thesis, Universidad Politecnica Salesiana, 2011.
- [6] G. A. Intriago Monserrate and L. G. Sucunota Gía, “Diseño nuevo de un sistema de puesta a tierra para mejorar las condiciones de operación de la subestación cartorama a 69kv,” B.S. thesis, Universidad Politecnica Salesiana, 2023.
- [7] E. E. Godoy González, *Análisis de la red de puesta a tierra en base a la Norma IEEE STD 80-2000 y coordinación y mantenimiento de la subestación Guatemala Sur*. PhD thesis, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2016.
- [8] “Ieee guide for safety in ac substation grounding,” *IEEE Std 80-2000*, pp. 1–192, Aug 2000.
- [9] P. M. de Electricidad, “Plan de expansión de la transmisión,” *Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables*, 2020.

- [10] “Ieee guide for safety in ac substation grounding,” *IEEE Std 80-2013 (Revision of IEEE Std 80-2000/ Incorporates IEEE Std 80-2013/Cor 1-2015)*, pp. 1–226, 2015.
- [11] J. Montaña, *Teoría de puestas a tierra*. Universidad del Norte, 2004.
- [12] D. F. Beltrán Espinoza and E. G. Luna López, “Diseño de un sistema puesta a tierra para aplicación en una industria utilizando la normativa ieee 80–2000,” B.S. thesis, Ecuador: Guayaquil: Universidad Politécnica Salesiana-sede Guayaquil(UPS)., 2023.
- [13] E. L. Guagua L., “Análisis y rediseño del sistema de puesta a tierra para la subestación palestina mediante matlab,” *Universidad Politécnica Salesiana*, pp. 1–84, 2021.
- [14] J. A. Celi Espinoza José Pablo, “Estudio del sistema de puesta a tierra de la subestación de 5 mva a 69/13.8 kv, a implementarse en la universidad católica de santiago de guayaquil,” B.S. thesis, Universidad Catolica Santiago de Guayaquil, 2011.
- [15] A. R. V. SANCHEZ, *EXAMEN DE GRADO (COMPLEXIVO) “DISEÑO DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA EN LA SUBESTACIÓN TERMINAL TERRESTRE*. PhD thesis, ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL, 2015.
- [16] R. Daza Guzmán, “Diseño del sistema de puesta a tierra de la universidad de la costa aplicando las reglamentaciones vigentes,” Master’s thesis, UNIVERSIDAD DE LA COSTA, 2012.
- [17] H. W. Colman Ortega, “Diseno de mallas de tierra de media y baja tension en subestaciones de distribucion,” *LYRASIS*, 2020.

ANEXOS



Figura 5.1: Subestación Eléctrica La Primavera



Figura 5.2: Explicación del funcionamiento del Telurómetro por parte del Ing. Javier Arichábala.



Figura 5.3: Instrucciones por parte del Ing. Javier Arichábala.



Figura 5.4: Medición de la Distancia.



Figura 5.5: Removiendo la tierra para enterrar las picas. Fuente: Autores.



Figura 5.6: Medición de la Resistencia del Suelo.



Figura 5.7: Telurómetro



Figura 5.8: Medición del teluometro



Figura 5.9: Toma de mediciones en la S/E La Primavera.



Figura 5.10: Culminación de la Medición en la S/E La Primavera.