



# POSGRADOS

## MAESTRÍA EN \_\_\_\_\_

# ELECTRICIDAD

RPC-SO-30-No. 508-2019

OPCIÓN DE  
TITULACIÓN:

PROYECTO DE DESARROLLO

TEMA:

DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE PUESTA A  
TIERRA EN UNA SUBESTACIÓN DE MT 69/4.16 KV DE  
UNA PLANTA PROCESADORA DE ALIMENTOS.

AUTORES:

VICTOR MIGUEL LLERENA MERCHAN  
CHARLES GERARDO FUENTES MUÑOZ

DIRECTOR:

ING. CARLOS FERNANDO CHÁVEZ CÓRDOVA. MSC.

GUAYAQUIL - ECUADOR  
2024

*Autor: Autor: Dirigido por:*



***Víctor Miguel Llerena Merchán.***

Ingeniero Eléctrico.

Candidato a Magíster en Electricidad, Mención  
Sistemas Eléctricos de Potencia.

vllarena@est.ups.edu.ec



***Charles Gerardo Fuentes Muñoz.***

Ingeniero Eléctrico.

Candidato a Magíster en Electricidad, Mención Sistemas  
Eléctricos de Potencia.

cfuentes@est.ups.edu.ec



***Ing. Carlos Fernando Chávez Córdova.***

Máster en Administración de la Energía y sus fuentes  
Renovables

cchavez@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados. Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

**DERECHOS RESERVADOS**

©2024 Universidad Politécnica Salesiana.

GUAYAQUIL – ECUADOR – SUDAMÉRICA

VICTOR MIGUEL LLERENA MERCHAN - CHARLES GERARDO  
FUENTES MUÑOZ.

***DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE PUESTA A  
TIERRA EN UNA SUBESTACIÓN DE MT 69/4.16 KV DE  
UNA PLANTA PROCESADORA DE ALIMENTOS.***

# Índice general

<b>Índice de Figuras</b>	<b>IV</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>VI</b>
<b>Resumen</b>	<b>VI</b>
<b>Abstract</b>	<b>VI</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes . . . . .	4
1.2. Descripción general del problema . . . . .	6
1.3. Objetivos . . . . .	8
1.3.1. Objetivo general . . . . .	8
1.3.2. Objetivos específicos . . . . .	8
1.4. Contribuciones . . . . .	8
1.5. Organización del manuscrito . . . . .	9
<b>2. Marco teórico referencial</b>	<b>10</b>
2.1. Estado del Arte . . . . .	11
2.2. Marco Teórico Referencial . . . . .	13
<b>3. Metodología Propuesta</b>	<b>29</b>
3.1. DISEÑO Y SIMULACION . . . . .	31
<b>4. Análisis de Resultados</b>	<b>34</b>
<b>5. Conclusiones</b>	<b>49</b>
5.1. Glosario . . . . .	51
<b>Referencias</b>	<b>54</b>
5.2. Referencias . . . . .	54

# Índice de Figuras

2.1. Características de una Subestación Eléctrica Empresarial . . .	15
2.2. Transformador de Tensión y Transformador de Corriente . . .	16
2.3. Transformador de Tensión y Transformador de Corriente . . .	16
2.4. Transformador de Tensión y Transformador de Corriente . . .	17
2.5. Sistema de Protocolo y Monitoreo . . . . .	18
2.6. Resistividad del suelo . . . . .	19
2.7. Dependencia de la Composición del Suelo . . . . .	19
2.8. Técnica Wenner . . . . .	22
2.9. Cables de Conexión . . . . .	23
2.10. Cables de Conexión . . . . .	26
2.11. Electrodo de Tierra . . . . .	27
3.1. Industria Molinera S.A . . . . .	30
3.2. Proceso Metodológico según la Norma IEEE80-2000 . . . . .	33
4.1. Simulado de Industrial Molinera . . . . .	35
4.2. Interpretación de Cortocircuito . . . . .	37
4.3. Análisis de Resistencia de tierra, análisis de voltaje de paso y análisis de voltaje de toque . . . . .	38
4.4. Análisis de Impedancias Secuenciales . . . . .	39
4.5. Análisis de parámetros y configuraciones relacionados mediante un entramado de tierra . . . . .	40
4.6. Análisis del sistema de programa transitorio eléctrico . . . . .	41
4.7. Información de entrada referente a la red de conexión a tierra	42
4.8. Análisis de datos del suelo . . . . .	43
4.9. Análisis de Materiales Constantes . . . . .	44
4.10. Análisis de Datos de las Varillas Puesta a tierra . . . . .	45
4.11. Análisis de configuración de red . . . . .	46
4.12. Análisis de Costos . . . . .	47

*ÍNDICE DE FIGURAS*

V

4.13. Método de Cálculo a Tierra . . . . . 48

# Agradecimientos

Con gran alegría y agradecimiento en mi corazón, deseo expresar mi más profunda gratitud hacia cada uno de ustedes. Su apoyo incondicional ha sido fundamental en este viaje académico que hoy culmina. A mi querido profesor, gracias por su dedicación y guía constante. Su sabiduría ha sido inspiradora y me ha ayudado a alcanzar este logro. A mi familia y amigos, su apoyo y amor inquebrantables han sido mi mayor fortaleza. Este logro es de ustedes tanto como mío. Gracias a todos por formar parte de este importante capítulo en mi vida. Este logro no hubiera sido posible sin su aliento y apoyo continuo.

*Ingeniero. Víctor Miguel Llerena Merchán*

Me gustaría expresar mi más profundo agradecimiento primero a Dios y luego a mi familia por su apoyo inquebrantable durante mi travesía académica. Sin su amor, aliento y sacrificios, no habría sido posible completar mi maestría. Cada uno de ustedes ha sido mi fuente de inspiración, y este logro es tan suyo como mío. Gracias por estar a mi lado en cada paso del camino.

*Ingeniero. Charles Gerardo Fuentes Muñoz*

# Resumen

Un componente esencial en cualquier Sistema Eléctrico de Potencia es la conexión a tierra, que implica la presencia de uno o varios conductores conectados al entorno circundante, como instalaciones, equipos, estructuras metálicas, etc. Esta conexión a tierra establece un punto de referencia fundamental, conocido como potencial de tierra, desde el cual se evalúan y consideran todos los demás dispositivos, equipos, ubicaciones y niveles de voltaje en el sistema.

Los sistemas de conexión a tierra desempeñan un papel crucial en las redes de distribución eléctrica, especialmente en lo que respecta a la e integridad de la persona y del equipo. A pesar de que existen normativas que detallan la correcta instalación, uso y mantenimiento de estos sistemas, a menudo se subestima su importancia debido a la creencia errónea de que son simples de implementar. El objetivo primordial es diseñar y realizar una simulación de un sistema de conexión a tierra en una subestación de 69/4.16 kV de una planta procesadora de alimentos. Se busca demostrar, a través de una evaluación adecuada, que estos sistemas pueden ser beneficiosos para este tipo de empresas, cumpliendo con las normativas nacionales e internacionales.

Además, este documento tiene como objetivo utilizar la información técnica de la subestación de la planta procesadora de alimentos como punto de partida para dimensionar los elementos de conexión a tierra. Se aplicarán las fórmulas matemáticas estipuladas en IEEE Std. 80-2000 normativa para determinar los parámetros necesarios diseñar la malla de conexión a tierra. Para lograr este proceso, se emplearán todos los criterios definidos en la IEEE Std. 80-2000 mediante la herramienta GROUND GRID SYSTEM de ETAP, con la finalidad de conseguir las cuantificaciones de proporción necesarios para el sistema de conexión a tierra.

# Abstract

An essential component in any Electrical Power System is the ground connection, which implies the presence of one or several conductors connected to the surrounding environment, such as facilities, equipment, metal structures, etc. This ground connection establishes a fundamental reference point, known as ground potential, from which all other devices, equipment, locations, and voltage levels in the system are evaluated and considered.

Grounding systems play a crucial role in electrical distribution networks, especially regarding personnel safety and equipment integrity. Although there are regulations detailing the correct installation, use and maintenance of these systems, their importance is often underestimated due to the mistaken belief that they are simple to implement. The main objective is to design and carry out a simulation of a grounding system in a 69/4.16 kV substation of a food processing plant. The aim is to demonstrate, through an appropriate evaluation, that these systems can be beneficial for this type of companies, complying with national and international regulations.

Furthermore, this document aims to use the technical information of the food processing plant substation as a starting point for sizing the grounding elements. The mathematical formulas stipulated in IEEE Std. 80-2000 regulations will be applied to determine the parameters necessary to design the grounding mesh.

To achieve this process, all the criteria defined in IEEE Std. 80-2000 will be used using the ETAP GROUND GRID SYSTEM tool, in order to obtain the necessary configuration parameters for the grounding system.



# Capítulo 1

## Introducción

Un sistema de conexión a tierra, comúnmente conocido como "puesta a tierra", comprende una serie de procedimientos destinados a vincular elementos metálicos, equipos eléctricos y electrónicos con una conexión a tierra, con el fin de prevenir daños irreparables. Esta conexión a tierra se materializa mediante un conductor enterrado en el suelo o inmerso en un medio conductor que, a su vez, está eléctricamente conectado a la tierra.

La puesta a tierra posibilita la conexión de elementos metálicos, que podrían estar en riesgo de entrar en contacto con corriente eléctrica debido a fallas o defectos, a través de un cable conductor. En caso de ocurrir una falla, la descarga eléctrica resultante no supone una amenaza para las personas, ya que puede disiparse a través del suelo. Sin un mecanismo de puesta a tierra, las personas estarían expuestas a una tensión eléctrica que, dependiendo de su intensidad, podría ser mortal.[1]

Para este proyecto específico, se llevará a cabo un proceso integral de diseño y simulación del sistema de puesta a tierra de la subestación MT 69/4.16 kV, la cual se encuentra estratégicamente ubicada en las instalaciones de la prestigiosa planta procesadora de alimentos denominada "Industrial Molinera C.A.". Esta compañía se erige como una de las entidades más destacadas dentro del panorama industrial ecuatoriano, enfocada principalmente en el procesamiento de trigo y avena.

Es importante resaltar que la relevancia de esta empresa se consolida no solo a nivel local sino también internacional, dado que ostenta la licencia de Quaker Oats y ocupa una posición de liderazgo en el mercado de avena. Su

compromiso con la excelencia se evidencia en la importación de las mejores variedades de gramíneas desde países con una arraigada tradición productiva. Esta práctica les permite confeccionar productos de insuperable calidad, como harina y avena, satisfaciendo las demandas de un mercado exigente y buscando constantemente elevar el estándar de sus ofertas comerciales.

El diseño y simulación del sistema de puesta a tierra de la subestación MT 69/4.16 kV se alinea con los altos estándares de calidad y seguridad que caracterizan las operaciones de Industrial Molinera C.A". Esta iniciativa busca garantizar el funcionamiento óptimo y seguro de la infraestructura eléctrica de la subestación, contribuyendo así a la continuidad y eficiencia de sus procesos productivos. El enfoque estratégico en la implementación de este sistema de puesta a tierra demuestra el compromiso de la empresa no solo con la innovación técnica, sino también con la preservación de la integridad de sus instalaciones y el bienestar de sus colaboradores, reafirmando su posición como referente en la industria alimentaria y su compromiso con la excelencia operativa.

Este estudio permitirá obtener información esencial sobre las características del suelo, como su resistividad y resistencia, para planificar adecuadamente la infraestructura eléctrica futura. Esto simplificará el proceso de diseño de la conexión a tierra tanto para la empresa de distribución eléctrica como para el usuario, asegurando la seguridad y protección de las personas, equipos, instalaciones y activos en general. Además, garantizará la adecuada disipación de carga estática o descarga atmosférica., sin sobrepasar los límites de funcionamiento de la red eléctrica. También se asegurará que Valores de tensión de puesta a tierra para equipos o estructuras activados involuntariamente se mantengan dentro de rangos seguros y que los niveles de aislamiento sean fijados de manera apropiada, permitiendo que los dispositivos de protección aislen las fallas de forma rápida y eficiente [2].

En un procedimiento de conexión a tierra, se deben discurrir tanto las corrientes como los voltajes generados por las cargas eléctricas, así como los efectos de las posibles fallas que pueden dar lugar a sobretensiones severas. La severidad de este evento La influencia se verá condicionada por una serie de elementos variables, entre los cuales se encuentra el tipo específico de alteración o perturbación, la gravedad del daño y la duración del evento, etc. Estos factores pueden reducir significativamente la vida útil del aislamiento del equipo eléctrico y, por lo tanto, afectar su

funcionamiento. Los esfuerzos a los que se someten los equipos se pueden clasificar en Permanentes de Frecuencia Industrial, Temporarios, Transitorios y Combinados. Es importante destacar que las corrientes eléctricas que operan a frecuencias de 50 Hz y 60 Hz pueden ser potencialmente letales para las personas[3].

La determinación de la corriente que la mayoría de las personas puede manejar se basa en investigaciones previas. Supongamos que alrededor del 99,5

En subestaciones grandes, la resistencia de la máscara debe ser igual o menor a 4 para lograr el objetivo de mantener el sistema de puesta a tierra a potencial cero o al mismo potencial que tierra[4]. Cuando se trata de modelar sistemas de puesta a tierra, se deben tener en cuenta varios parámetros técnicos. Para este proyecto se utilizó el software ETAP como una herramienta computacional que permite realizar cálculos matemáticos mediante programación, involucrando matrices y condiciones lógicas matemáticas. El software GAMS que utiliza lenguaje algebraico (AML) se utiliza para la optimización del modelo. Debido a su capacidad para resolver problemas con una gran cantidad de variables y restricciones, puede construir eficientemente un conjunto de ecuaciones que resuelva todas las variables y restricciones de manera sólida.

## 1.1. Antecedentes

La conexión a tierra es esencial para asegurar tanto el funcionamiento adecuado como la seguridad de los equipos, siendo particularmente crucial en las subestaciones eléctricas, tanto de transmisión como de distribución. La correcta implementación de la conexión a la tierra se alcanza a través de la creación de una malla de conductores de tierra o mediante una combinación de elementos. La elección de parámetros para esta malla se basa en dos condiciones principales: mantener una baja impedancia de tierra y asegurar un aumento uniforme del potencial de tierra. Para subestaciones de gran tamaño (con una superficie superior a 210,000 ft<sup>2</sup>), la resistencia de la malla de tierra debe ser inferior a 1, mientras que para subestaciones más pequeñas (con una superficie inferior a 9,600 ft<sup>2</sup>) debe ser inferior a 5[5]. Las mediciones de impedancia se realizan sin aislar el cable de tierra y las conexiones de contrapeso, lo que refleja la impedancia equivalente de todo el sistema de conexión a tierra ( $Z_{eq}$ ), que es la combinación paralela de resistencia de red y resistencia de cable estático.

Es crucial tener en cuenta la utilización de varillas de puesta a tierra al diseñar la red de conexión al suelo, ya que su cantidad influye en la resistencia total. Se requiere el uso de dos varillas de tierra distintas y separadas para garantizar la seguridad. Otra estrategia implica dirigir corriente desde la red hacia capas profundas del suelo, caracterizadas por tener baja resistividad, con el fin de disminuir el aumento de potencial de tierra (GPR).

La eficiencia de la conexión al suelo y la consistencia del terreno se analizan considerando el aumento en el potencial de tierra (GPR), el voltaje de contacto y el voltaje de paso en una red de tierra instalada a una profundidad de 0.5 metros, tanto en terreno uniforme como en terreno compuesto por dos capas distintas. Estos estudios se realizan en dos partes: la primera considera características de suelo uniforme, mientras que la segunda se enfoca en la conexión a tierra entre cuadrículas cuadradas y rectangulares con la misma área de cobertura.

En la construcción y operación de instalaciones eléctricas, es esencial mantener todas las partes metálicas a un potencial bajo para evitar riesgos en caso de contacto con personas. Esto se logra mediante una conexión a tierra o sistema de malla de tierra, que debe tener una resistencia lo suficientemente baja como para prevenir potenciales peligrosos[6].

Se ha realizado un estudio sobre el impacto de un esquema de protección denominado Neutralizador de falla a tierra (GFN) en la confiabilidad de una red de distribución, con resultados exitosos que superan a los sistemas convencionales más costosos. Además, se emplea una ruta de ingeniería simultánea y software de ingeniería para evaluar el rebote y la diafonía en conductores cercanos al diseño de la malla BGA (Bola Lógica Mixta).

En una subestación de tracción, se ha implementado un sistema de conexión a tierra para comprender y mitigar las sobretensiones transitorias, lo que ha contribuido a proteger las máquinas eléctricas de los rayos y mejorar la fiabilidad del suministro de energía para el sistema de tracción.

Debido a estos motivos, se procederá con la planificación y diseño de la red de conexión a tierra en la planta de procesamiento de alimentos para canalizar las corrientes parasitas generadas por los equipos rotativos hacia el punto de descarga, evitando así retornos no deseados en los tableros eléctricos, el Centro de Control de Motores (CCM), la subestación de MT y el Switchgear [7].

## 1.2. Descripción general del problema

La malla de conexión a tierra es la unión eléctrica directa de una sección específica del circuito eléctrico o de una parte conductora independiente con electrodos enterrados en el suelo. En un centro de producción de alimentos precocinados, se estableció una malla de conexión a tierra en forma de anillo cerrado que cubre todo el edificio. Estas conexiones se llevaron a cabo de manera segura y confiable mediante soldadura aluminotérmica o autógena.

Los sistemas eléctricos conectados a tierra a menudo tienen vulnerabilidades, como la susceptibilidad a cambios abruptos en las condiciones de operación o a fenómenos eléctricos transitorios. Para mitigar estos riesgos y garantizar la estabilidad, continuidad y protección de los equipos eléctricos, se utilizan dispositivos que evitan la entrada de estos transitorios en el sistema y los dispersan a través del sistema de conexión a tierra. Esto no solo protege equipos costosos, sino que también salvaguarda vidas humanas.

Un sistema de conexión a tierra efectivo debe ser capaz de dispersar corrientes sin elevar de manera riesgosa los niveles de potencial en la superficie del suelo como consecuencia de un fallo. Con el tiempo, las mallas de tierra pueden corroerse debido a la humedad, las sales del suelo y las altas temperaturas. Por esta razón, la NETA (International Electrical Testing Association) recomienda inspeccionar, revisar y sustituir los electrodos de conexión a tierra cada tres años para asegurar que el sistema se mantenga en condiciones óptimas.

Cuando se diseñan sistemas de conexión a tierra en subestaciones con suelos no uniformes, se utiliza el software MATLAB<sup>®</sup>, siguiendo las normativas IEEE Std. 80-2000, que incluyen parámetros como la resistencia de la red ( $R_g$ ), el aumento del potencial de la red (GPR), Los valores del voltaje de malla ( $E_m$ ) y el voltaje de paso ( $E_s$ ) pueden ser contrastados con los resultados obtenidos a través del software CDEGS.

Un estudio sobre la resistividad del suelo y el diseño de la malla de conexión a tierra en una subestación de 110 kilovoltios investigó la relación entre la resistencia de dispersión y las tensiones de contacto y de paso en relación con la resistividad del suelo. Se determinó que la resistencia de dispersión está estrechamente relacionada con las características del suelo, especialmente su resistividad[8].

Se describe que se ha realizado un cálculo o estimación sobre cuánto tiempo pueden funcionar los transformadores de potencia considerando la influencia de la temperatura ambiente en su vida útil, la superficie y el devanado. Esto se llevó a cabo para proteger los transformadores contra sobrecargas y armónicos, utilizando parámetros como el THD(I) y el factor K para reducir la potencia del transformador.

Dado que no se ha realizado ninguna prueba de campo, es fundamental realizar una evaluación y diagnóstico para medir la resistencia de conexión a tierra en la subestación. Este proceso proporcionará información detallada sobre el estado actual de la red de conexión a tierra. Esta evaluación es crucial para verificar si la malla de conexión a tierra cumple con los estándares de protección y seguridad establecidos por la norma IEEE Std. 3003.1-2019. La necesidad de realizar esta evaluación, diagnóstico y diseño de un sistema de conexión a tierra efectivo, junto con su mantenimiento, radica en prevenir posibles daños en general[9].

## 1.3. Objetivos

### 1.3.1. Objetivo general

Diseñar un sistema de puesta a tierra en una Subestación MT 69/4.16 kV de una procesadora de alimentos, a partir de los parámetros de campo aplicando ETAP, con el fin de obtener los niveles de protección necesarias que garanticen la seguridad de personas y equipos.

### 1.3.2. Objetivos específicos

- Utilizar la memoria técnica de la subestación de la planta procesadora de alimentos, como referencia inicial de datos para dimensionar elementos de descarga.
- Determinar las propiedades de los componentes que forman parte del diseño de la red de puesta a tierra empleando las fórmulas matemáticas establecidas en la normativa IEEE Std. 80-2000 con el fin de adquirir la información necesaria para el diseño.
- Aplicar los criterios de la normativa IEEE Std. 80-2000 mediante la herramienta GROUND GRID SYSTEM de ETAP para obtener los parámetros de configuración del sistema de puesta a tierra.
- Efectuar el modelo de la malla de puesta a tierra mediante un programa de diseño asistido por computadora para presentar el diseño del sistema de puesta a tierra.

## 1.4. Contribuciones

La contribución de este proyecto de desarrollo radica en el diseño y simulación del sistema de puesta a tierra en una Subestación de MT 69/4.16 Kv en la planta procesadora de alimentos Industrial Molinera C.A. Esta empresa se destaca por ser una de las más prominentes en Ecuador, especialmente en el ámbito de la molinería de trigo y avena, siendo la principal en el país. Además, es licenciataria de Quaker Oats y líder en el mercado de hojuelas de avena. Este estudio servirá como referencia para otras empresas que deseen implementar sistemas similares en el futuro.



## 1.5. Organización del manuscrito

La estructura de este proyecto de desarrollo se compone de la siguiente manera:

En la fase 1, que corresponde al primer capítulo, se aborda la descripción del problema a evaluar y los objetivos de esta investigación, incluyendo el objetivo general y los objetivos específicos.

El segundo capítulo abarca el estado actual de los Sistemas de puesta a tierra en una subestación de mt 69/4.16 kv.

El tercer capítulo detalla la formulación del problema y su resolución mediante la utilización de ETAP, una solución empresarial ampliamente reconocida y utilizada para sistemas de energía en diversos ámbitos.

El capítulo 4 se centra en los indicadores y el análisis de los resultados obtenidos.

Finalmente, el Capítulo 5 contiene las conclusiones derivadas de este trabajo.

## Capítulo 2

# Marco teórico referencial

El marco de referencia proporcionado al segundo capítulo tiene como objetivo presentar un panorama general sobre los sistemas de conexión a tierra en una subestación de MT 69/4.16 kV. Este panorama se llevará a cabo con el propósito de enriquecer la información y la aplicación de dicho conocimiento en el proceso de diseño y simulación que se abordará en este documento.

Este trabajo se enfocará principalmente en detallar todas las especificaciones técnicas relacionadas con los sistemas de conexión a tierra. Estos sistemas tienen como finalidad establecer la conexión de equipos eléctricos y electrónicos con la tierra, con el fin de prevenir daños en los equipos en caso de que ocurra una corriente transitoria peligrosa.

## 2.1. Estado del Arte

El diseño adecuado del sistema de puesta a tierra en una subestación eléctrica es esencial para garantizar la seguridad del personal, proteger los equipos contra sobretensiones y asegurar la continuidad del suministro eléctrico. Investigaciones de autores como Barría [10] y Álava y Bravo[11] han destacado la importancia de una puesta a tierra eficaz en subestaciones eléctricas para evitar accidentes y daños en los equipos.

El diseño de la puesta a tierra en subestaciones de MT 69/4.16 kV en plantas procesadoras de alimentos presenta desafíos específicos debido a las condiciones ambientales y operativas particulares de estas instalaciones. Autores como Blasco [12] han abordado las características específicas de las subestaciones eléctricas en entornos industriales, destacando la importancia de la resistencia a la corrosión y la humedad en el diseño de sistemas de puesta a tierra en plantas procesadoras de alimentos.

Para el diseño y la simulación del sistema de puesta a tierra en una subestación de MT 69/4.16 kV, se utilizan diversas herramientas y técnicas. Investigaciones de autores como Cai [13] han demostrado la eficacia de los modelos computacionales avanzados para analizar el comportamiento del sistema de puesta a tierra en diferentes condiciones operativas y escenarios de falla. Estas herramientas permiten evaluar la distribución de potenciales, las corrientes de falla y otros parámetros eléctricos clave para garantizar un diseño seguro y confiable del sistema de puesta a tierra.

En el diseño del sistema de puesta a tierra en una subestación de MT 69/4.16 kV, es fundamental cumplir con las normativas y estándares eléctricos aplicables. La norma IEEE 80-2000 proporciona directrices específicas para el diseño de sistemas de puesta a tierra en subestaciones eléctricas, asegurando la seguridad y eficacia de estos sistemas. Autores [14] han investigado sobre la aplicación de normativas y estándares en el diseño de sistemas de puesta a tierra, destacando la importancia del cumplimiento normativo para garantizar un diseño seguro y confiable del sistema de puesta a tierra en subestaciones eléctricas.

Avances en materiales y técnicas de conexión a tierra han mejorado la eficiencia y confiabilidad de los sistemas de puesta a tierra en subestaciones eléctricas. Investigaciones de autores como [15] han explorado nuevas tecnologías, como la soldadura aluminotérmica y los sistemas de puesta

a tierra redundantes, que ofrecen soluciones innovadoras para mejorar la resistencia y durabilidad de los sistemas de puesta a tierra en entornos industriales exigentes.

El diseño y simulación del sistema de puesta a tierra en una subestación de MT 69/4.16 kV en una planta procesadora de alimentos debe tener en cuenta las características únicas de este entorno, como la presencia de sustancias corrosivas y la necesidad de mantener altos estándares de higiene. Autores como [16] han investigado sobre métodos avanzados de caracterización del suelo para optimizar el diseño del sistema de puesta a tierra en entornos industriales, incluidas las plantas procesadoras de alimentos.

## 2.2. Marco Teórico Referencial

### 2.2.1. Consideraciones Básicas de la Resistividad Eléctrica

En esta sección se abordan los aspectos fundamentales que impactan en la resistividad eléctrica del suelo y su relevancia en los sistemas de conexión a tierra. Autores como [16] han realizado investigaciones significativas en el campo de la tomografía eléctrica, que permite obtener información detallada sobre la distribución de la resistividad del suelo. Las consideraciones básicas relacionadas con la resistividad eléctrica se enfocan en aspectos fundamentales que impactan en la capacidad de un material o área específica para conducir electricidad. Estos aspectos abarcan el tipo de suelo, la humedad presente en el terreno, la profundidad en la que se sitúa el electrodo de conexión a tierra, la temperatura ambiente, la posible presencia de contaminantes o salinidad en el suelo, y la geología subyacente.

El tipo de suelo, su nivel de humedad y su composición química determinan su capacidad para conducir electricidad. La profundidad a la que se coloca un electrodo en el suelo también desempeña un papel importante, ya que, a mayor profundidad, la resistividad suele ser menor. Además, la temperatura y la presencia de contaminantes pueden influir en la resistividad eléctrica del suelo, al igual que la geología subyacente de la zona. Estas consideraciones son fundamentales al diseñar sistemas de conexión a tierra eficientes, ya que la resistividad del suelo afecta directamente la eficacia y seguridad de estos sistemas.

### 2.2.2. Normativas y Estándares

Se discuten las normativas y estándares relevantes en el diseño de sistemas de puesta a tierra, como la norma IEEE 80-2000. Además de IEEE, [17] han investigado sobre normativas internacionales y su aplicación en sistemas de puesta a tierra. En el diseño de sistemas de puesta a tierra, es esencial tener en cuenta las normativas y estándares relevantes. En este contexto, se destacan las normas de seguridad eléctrica, como las establecidas por el IEEE (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos), que proporcionan directrices específicas para la puesta a tierra en subestaciones eléctricas [16].

### 2.2.2.1. NORMA IEEE 80-2000

Autores como [14] han profundizado en las características y elementos de una subestación eléctrica, destacando la importancia de la transformación de tensión y corriente, así como la función de los interruptores y transformadores en estos sistemas. La norma IEEE generalmente ofrece una guía detallada sobre los aspectos técnicos fundamentales para el aterrizaje en subestaciones y sistemas eléctricos. Incluye formulaciones necesarias para realizar cálculos relacionados con el sistema de puestas a tierra. El propósito primordial de esta normativa es proporcionar directrices e información relevante para asegurar sistemas de tierra seguros en el diseño de subestaciones. Los principales objetivos específicos de la norma son:

- Establecer límites seguros, como base para el diseño, para las diferencias de potencial que puedan existir en una subestación durante condiciones de falla, entre los puntos que podrían estar en contacto con personas.
- Evaluar y mejorar las prácticas de aterrizaje en subestaciones y sistemas eléctricos, con un enfoque especial en la seguridad, y desarrollar criterios para un diseño seguro.
- Ofrecer un procedimiento para el diseño de sistemas prácticos de puesta a tierra basados en estos criterios.
- Desarrollar métodos analíticos que sirvan como herramientas para comprender y resolver los problemas comunes relacionados con los gradientes de potencial.

### 2.2.3. Características y elementos de una Subestación Eléctrica

Se examinan las diversas influencias en la resistividad del suelo, como la composición del suelo, la variabilidad espacial y la estacionalidad. Investigadores han inquirido sobre técnicas geofísicas avanzadas para la estimación de la resistividad del suelo. El estado del arte debe abordar las características específicas de la subestación de MT 69/4.16 kV en una planta procesadora de alimentos. Esto incluye aspectos como la capacidad de carga, la distribución de energía y las particularidades de seguridad relacionadas con esta infraestructura[9].

Una subestación eléctrica es una parte esencial de la infraestructura eléctrica que desempeña un papel crucial en la distribución, transformación y control de la energía eléctrica. A continuación, se mencionan y desarrollan las principales características de una subestación:

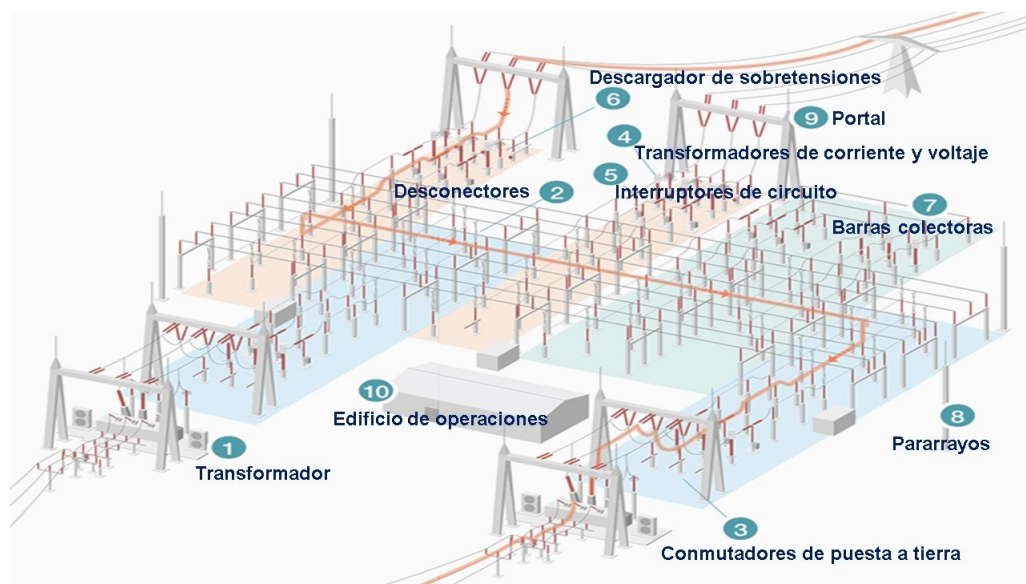


Figura 2.1: Características de una Subestación Eléctrica Empresarial

### 2.1.3.1. Transformación de Tensión y Corriente

Autores como [8] han destacado la importancia de la resistividad del suelo en la eficiencia y seguridad de los sistemas de puesta a tierra, enfatizando su papel en la disipación de corriente de falla y la reducción de tensiones peligrosas. Una de las funciones fundamentales de una subestación es transformar la tensión y la corriente eléctrica. Esto implica cambiar los niveles de voltaje de energía eléctrica procedente de redes de alta tensión a niveles más bajos adecuados para su distribución y uso en instalaciones industriales, comerciales y residenciales.



Figura 2.2: Transformador de Tensión y Transformador de Corriente

### 2.1.3.2. Aislamiento y Seguridad

Las subestaciones están diseñadas con aislamiento adecuado para garantizar la seguridad del personal y la protección de los equipos. Componentes eléctricos en la subestación. deben estar aislados de manera efectiva para prevenir descargas eléctricas y cortocircuitos. Estos dispositivos permiten controlar y gestionar el flujo de energía eléctrica. Los interruptores se utilizan para abrir y cerrar circuitos, mientras que los seccionadores permiten aislar secciones de la subestación para fines de mantenimiento y seguridad.



Figura 2.3: Transformador de Tensión y Transformador de Corriente



#### 2.1.3.4. Transformadores

Los transformadores son componentes clave en una subestación y se utilizan para elevar o reducir el voltaje. Esto es esencial para la transferencia y distribución eficiente del abastecimiento eléctrico a través de diferentes niveles de tensión. Las subestaciones a menudo cuentan con celdas de distribución que son compartimentos separados para alojar equipos de control y protección. Estas celdas permiten una gestión más efectiva de la energía eléctrica.



Figura 2.4: Transformador de Tensión y Transformador de Corriente

#### 2.1.3.6. Sistemas de Protección

La seguridad es una prioridad en las subestaciones. Se instalan sistemas de protección que monitorean y detectan condiciones anormales, como sobrecargas o cortocircuitos, y toman medidas para evitar daños a los equipos y garantizar la continuidad del suministro eléctrico. Se detallan las técnicas de medición de la resistividad del suelo, como la prueba de Wenner, y su relevancia en el diseño de sistemas de conexión a tierra. Investigadores como [18] han trabajado en el desarrollo de métodos avanzados de caracterización del suelo. Las subestaciones están equipadas con sistemas de medición y

monitoreo que recopilan datos sobre calidad de suministro eléctrico, el flujo de corriente y otros parámetros eléctricos. Estos datos son esenciales para el control y la gestión de la subestación.



Figura 2.5: Sistema de Protocolo y Monitoreo

#### 2.1.3.8. Sistemas de Enfriamiento

Debido a la generación de calor por parte de los equipos eléctricos, es común que las subestaciones cuenten con sistemas de enfriamiento para mantener temperaturas seguras de funcionamiento. La resistividad eléctrica del suelo es un elemento fundamental en la concepción de sistemas de conexión a tierra. Estudios en este ámbito han investigado las variaciones de la resistividad del suelo según diversas ubicaciones geográficas, y su impacto en el diseño y desempeño de las conexiones a tierra. La resistividad del suelo, una característica eléctrica del terreno ejerce influencia en la efectividad de los sistemas de conexión a tierra y en la distribución de corriente eléctrica en el suelo[4].

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

Donde

- $\rho$  : Resistividad promedio a la profundidad (A) en ohm-m  
 A : Distancia entre electrodos en metros.  
 B : Profundidad de enterrado de los electrodos en metros  
 R : Lectura del terrómetro en ohms.

Figura 2.6: Resistividad del suelo

#### 2.1.4.1. Dependencia de la Composición del Suelo

La resistividad del suelo está estrechamente relacionada con su composición química. y física. Los suelos con mayor contenido de minerales conductores, como arcilla y sal, tienden a tener una resistividad más baja, lo que significa que son mejores conductores eléctricos.

$$R_{MIE.RAT-13} = \frac{\rho}{4 \cdot r} + \frac{\rho}{L} \quad (\Omega)$$

$$R_{UNE, IEEE Std 80-2000} = \rho \cdot \left[ \frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20} \cdot A} \cdot \left( 1 + \frac{1}{1 + h \cdot \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (\Omega)$$

Siendo:

- R**: Resistencia de puesta a tierra del electrodo ( $\Omega$ ).  
 **$\rho = \rho_s$** : Resistividad superficial aparente del terreno (para terrenos recubiertos con una capa adicional de elevada resistividad (hormigón, grava, etc.).  
**L**: Longitud del electrodo enterrado (m).  
**r**: Radio de un círculo de la misma superficie del área cubierta por la malla de PaT (m).  
**A**: Área cubierta por la superficie de la malla (m<sup>2</sup>).  
**h** = **hs**: Espesor de la capa superficial de elevada resistividad (m).

Figura 2.7: Dependencia de la Composición del Suelo

#### 2.1.4.2. Variabilidad Espacial

La resistividad del suelo puede variar significativamente en diferentes ubicaciones geográficas y dentro de una misma área. Esta variabilidad se debe a diferencias en la composición del suelo, la humedad y otros factores geológicos.

#### 2.1.4.3. Dependencia de la Humedad

La humedad presente en el suelo influye en su resistividad. Los suelos húmedos son mejores conductores eléctricos que los suelos secos. La cantidad de lluvia, la estación del año y la ubicación geográfica afectan la humedad del suelo. La resistividad del suelo puede cambiar a diferentes profundidades. Por lo general, a mayor profundidad, la resistividad tiende a ser menor debido a que los suelos más profundos tienen una composición más compacta y menos aire, lo que mejora la conducción eléctrica.

La resistividad del suelo puede cambiar a lo largo del año debido a las variaciones estacionales en la humedad y la temperatura. Los cambios estacionales pueden influir en la capacidad del suelo para conducir electricidad.

La resistividad del suelo juega un papel fundamental en la planificación de sistemas de conexión a tierra. Un suelo con baja resistividad permite una mejor disipación de la corriente de falla y proporciona una conexión segura a tierra. La importancia de la resistividad del suelo es un elemento fundamental en la ingeniería y seguridad eléctricas debido a diversas razones importantes:

Eficiente Disipación de Corriente de Falla, la cual consiste en una baja resistividad del suelo permite una eficiente disipación de la corriente de falla en un sistema eléctrico en caso de un cortocircuito o una falla. Esto garantiza que la corriente fluya rápidamente hacia la tierra, evitando daños a los equipos y reduciendo el riesgo de lesiones eléctricas.

Por otro lado, la reducción de Tensiones Peligrosas, la cual menciona que una resistividad baja del suelo contribuye a reducir el potencial de tierra, es decir, el voltaje presente en relación con la tierra. Esto minimiza el

riesgo de tensiones peligrosas en equipos y estructuras metálicas, lo que podría representar un peligro para las personas. Asimismo, un suelo con baja resistividad facilita la operación efectiva de dispositivos de protección, como interruptores y disyuntores. Estos equipos tienen la capacidad de identificar y reaccionar con prontitud ante posibles fallos eléctricos, lo que contribuye a evitar gastos elevados por daños y a asegurar la continuidad del suministro eléctrico.

También, La resistividad del suelo también desempeña un papel en la prevención de sobretensiones, especialmente durante eventos como descargas atmosféricas. Un suelo con buena conductividad ayuda a disipar la energía de las sobretensiones de manera efectiva, evitando daños en equipos y sistemas. Y Por último, entender la resistividad del suelo en un lugar particular posibilita un diseño más exacto y efectivo de sistemas de puesta a tierra. Esto abarca la elección adecuada de electrodos de tierra y la disposición óptima de la red de conexión a tierra.

#### **2.1.5.6. Mantenimiento Efectivo**

La resistividad del suelo puede cambiar con el tiempo debido a factores como la humedad y las condiciones climáticas. Realizar mediciones periódicas de resistividad del suelo es esencial para mantener y ajustar de manera apropiada los sistemas de conexión a tierra y garantizar su eficacia continua. Para determinar la resistividad del suelo en una ubicación específica, se realizan mediciones utilizando técnicas como la prueba de Wenner o la prueba de Schlumberger. Estas mediciones son esenciales para la configuración apropiada de sistemas de conexión a tierra[19].

El medir y evaluar la resistividad del suelo son procesos críticos para comprender las características eléctricas del terreno en una ubicación particular. Estos datos son esenciales para realizar el diseño, la instalación y el mantenimiento correctos de sistemas de conexión a tierra eficaces y seguros.

La prueba de Wenner es un método geofísico utilizado para medir la resistividad del suelo varía según la separación entre electrodos, además de las mediciones de voltaje y corriente. Este enfoque se fundamenta en la premisa de que la resistividad del suelo influye en la resistencia eléctrica

entre cuatro electrodos dispuestos en línea recta en el suelo. En esta técnica, se ubican cuatro electrodos en el suelo, formando un cuadrilátero. Uno de los electrodos se utiliza como fuente de corriente, mientras que los otros tres se utilizan para medir la caída de voltaje. Se aplica una corriente continua al electrodo de entrada y se mide la caída de voltaje en los tres electrodos restantes.

Basándose en las mediciones de corriente y voltaje, se puede calcular la resistividad del suelo utilizando la fórmula de Wenner. Esta fórmula relaciona la resistividad aparente con la resistencia eléctrica medida y la geometría de los electrodos[3] .

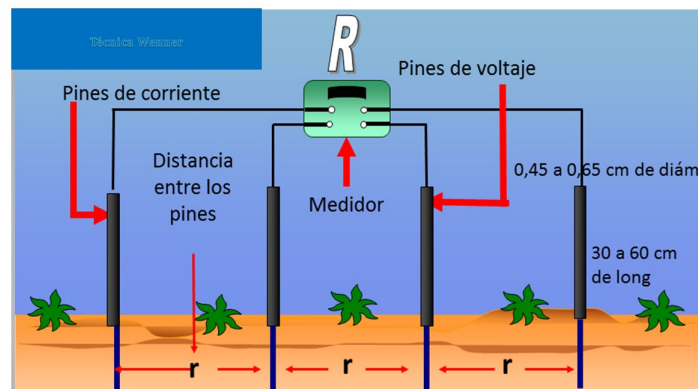


Figura 2.8: Técnica Wenner

Autores como Flores [18] han investigado sobre materiales y técnicas innovadoras para la conexión a tierra, como la soldadura aluminotérmica y los sistemas de puesta a tierra redundantes. Esto puede abarcar desde tipos de electrodos y materiales de conductores hasta técnicas de soldadura y métodos de medición. Los materiales y técnicas de conexión a tierra son fundamentales para garantizar un sistema de conexión a tierra confiable y eficaz en instalaciones eléctricas. Aquí se presentan algunos de los materiales y técnicas comunes utilizados en la conexión a tierra: Son elementos metálicos enterrados en el suelo para establecer una conexión eléctrica con la tierra. Los electrodos más comunes incluyen barras de cobre o acero galvanizado, placas metálicas y varillas de tierra.

### 2.1.7.2. Cables de Conexión

Se utilizan cables de cobre o aluminio de alta conductividad para conectar los componentes de los componentes del sistema de conexión a tierra, tales como electrodos de tierra, equipos y estructuras metálicas. Estos conductores se emplean para enlazar equipos y estructuras al sistema de conexión a tierra. Son fundamentales para asegurar la continuidad eléctrica y la disipación segura de corrientes en situaciones de fallo.



Figura 2.9: Cables de Conexión

### 2.1.7.4. Soldadura Aluminotérmica

Se trata de un proceso de soldadura empleado para unir conductores fabricados con cobre o aluminio con electrodos de tierra. Proporciona conexiones seguras y duraderas. Este sistema está conformado por una red de electrodos conectados entre sí y por conductores enterrados en el suelo. Se utiliza en áreas grandes o donde se requiere una resistencia de tierra extremadamente baja. Se utilizan electrodos largos y profundos para alcanzar capas de suelo con una resistividad más baja. Esto es beneficioso en áreas donde el suelo superficial tiene una alta resistividad.

### 2.1.7.7. Anillo de Puesta a Tierra

Es una configuración que rodea una estructura o equipo con electrodos enterrados en forma de anillo. Se utiliza para proteger equipos críticos y estructuras contra sobretensiones. Para mejorar la confiabilidad y seguridad, se emplean sistemas de puesta a tierra redundantes que incorporan varios

electrodos y conductores para asegurar una conexión sólida al suelo. Estos dispositivos se utilizan para determinar la resistencia del suelo y garantizar que cumpla con los estándares de seguridad eléctrica. Se realizan mediciones periódicas para verificar la integridad del sistema de conexión a tierra. Se instalan en el sistema de conexión a tierra para proteger equipos y estructuras contra sobretensiones causadas por rayos atmosféricos u otros eventos.

Se establece una conexión equipotencial entre Todos los elementos metálicos y conductores de una instalación para garantizar que tengan el mismo potencial eléctrico y minimizar el riesgo de corrientes parásitas. El mantenimiento regular del sistema de conexión a tierra, que incluye la limpieza de electrodos y conexiones, es esencial para garantizar su eficacia a lo largo del tiempo.

La elección de los materiales y técnicas de conexión a tierra depende de varios factores, como la ubicación geográfica, las condiciones del suelo, la aplicación específica y las regulaciones eléctricas aplicables. Un diseño y una implementación adecuados son esenciales para garantizar un sistema de conexión a tierra seguro y confiable en infraestructuras eléctricas.

#### **2.2.4. Simulación y Modelado**

Se discute el papel de la simulación y modelado en el diseño y evaluación de sistemas de conexión a tierra. Investigadores como Bustos [5] han desarrollado modelos computacionales avanzados para analizar el comportamiento de estos sistemas en diferentes condiciones. Las herramientas de simulación y modelado tienen una función crucial en el diseño y la evaluación de sistemas de conexión a tierra. Esto incluye el uso de software de ingeniería, como ETAP y otros, para realizar análisis de resistividad del suelo, distribución de potencial y otros cálculos relevantes.

La simulación y modelado de un sistema de puesta a tierra implica la representación detallada de los componentes eléctricos y geométricos del sistema, así como de las propiedades del suelo en un entorno virtual. Los componentes clave que conlleva la simulación y modelado de un sistema de conexión a tierra son los siguientes:



#### 2.2.4.1. Geometría del Sistema

La representación precisa de la disposición y la forma de los elementos del sistema de conexión a tierra, como electrodos, conductores, estructuras y equipos. Esto implica la disposición específica de los electrodos al suelo y la ubicación de las estructuras y equipos dentro del entorno. La modelación de los electrodos de tierra, que son elementos metálicos enterrados en el suelo para establecer la conexión eléctrica con la tierra. Esto incluye la especificación de su forma, tamaño, material y ubicación. La representación de los conductores que conectan los electrodos de tierra con equipos y estructuras. Se debe modelar las medidas de longitud, diámetro, material y la disposición de estos conductores.

#### 2.2.4.2. Propiedades del Suelo

La inclusión de información sobre las propiedades del suelo en el área, como la resistividad eléctrica del suelo a diferentes profundidades y ubicaciones. Esto es fundamental para calcular la resistencia de conexión a tierra y otros parámetros. La inclusión de fuentes de corriente y voltaje que imiten las situaciones regulares y de fallo en el sistema eléctrico. Estas fuentes emulan la carga eléctrica y las circunstancias operativas del sistema. La formulación de un modelo matemático que describa las relaciones eléctricas y geométricas entre los componentes del sistema. Este modelo puede incluir ecuaciones que representen la resistencia, la capacitancia y la inductancia de los elementos del sistema. La aplicación de programas informáticos especializados en simulación para sistemas de conexión a tierra, como por ejemplo, software de análisis de elementos finitos (FEM) o programas de modelado electromagnético. Estas herramientas permiten realizar cálculos precisos y representar el comportamiento del sistema en diversas condiciones.

La tabla proporciona datos de resistividad del suelo obtenidos a través de mediciones realizadas en tres perfiles (X, Y, Z) dentro de una planta procesadora de alimentos. Cada perfil se evaluó utilizando tres espaciados diferentes entre electrodos (1m, 2m y 4m). Los valores de resistividad del suelo se calcularon a partir de las mediciones de resistencia eléctrica, y se determinó un promedio para cada perfil y espaciado. Estos datos son esenciales para comprender la variación de la resistividad del suelo en diferentes direcciones y profundidades, lo que a su vez es crucial para el

diseño efectivo del sistema de puesta a tierra en la subestación, asegurando así la seguridad de los trabajadores y la protección de los equipos eléctricos.

MEDICIONES		Perfil 1 X		Perfil 2 Y		Perfil 3 Z		Resistividad promedio
Espaciamiento "a" (m)	R1 (Ω) X	$\rho_1$ (Ω*m) X	R2 (Ω) Y	$\rho_2$ (Ω*m) Y	R3 (Ω) Z	$\rho_3$ (Ω*m) Z	$\rho$ =( $\rho_1+\rho_2+\rho_3$ )/3	
1	11,72	73,63	8,26	51,88	12,02	75,50	67,00	
2	1,60	20,09	1,50	18,84	1,49	18,72	19,22	
4	0,36	9,14	0,23	5,80	0,29	7,24	7,39	
							31,20	

Figura 2.10: Cables de Conexión

#### 2.1.8.8. Resultados y Análisis

La ejecución de la simulación para obtener resultados que incluyan parámetros como la resistencia de conexión a tierra, el potencial de tierra, las corrientes de falla y otros datos relevantes. Estos resultados se analizan para evaluar la seguridad y la eficiencia del sistema de conexión a tierra. En función de los resultados de la simulación, se pueden realizar ajustes y optimizaciones en la planificación del sistema de conexión a tierra para satisfacer los estándares de seguridad y desempeño.

#### 2.2.5. Seguridad y Protección

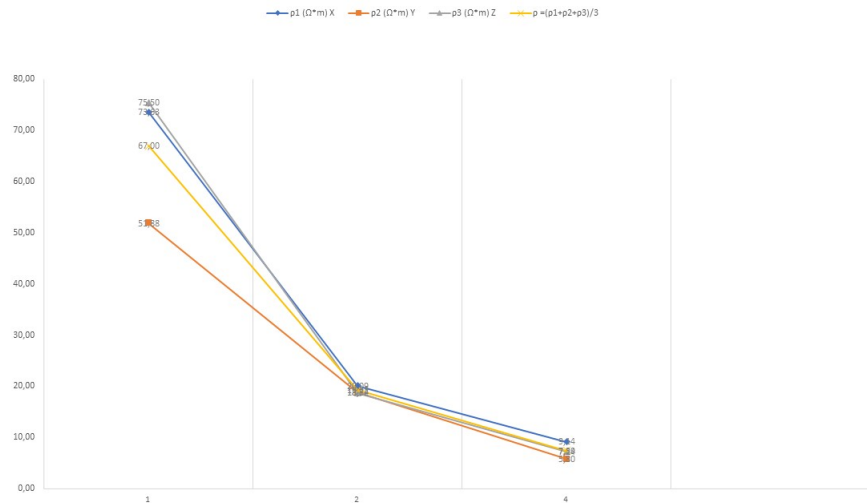


Figura 2.11: Electrodo de Tierra

Se abordan las consideraciones de seguridad en la conexión a tierra, incluyendo dispositivos de protección contra sobretensiones y protocolos de seguridad para el personal. Autores como Devarakonda y otros [8] han investigado sobre estrategias de protección contra sobretensiones en subestaciones eléctricas. El estado del arte debe abordar las consideraciones de seguridad asociadas con la puesta a tierra en subestaciones eléctricas. Esto incluye la protección contra sobretensiones, la prevención de descargas eléctricas y la seguridad del personal involucrado. La seguridad y protección en el contexto de la conexión a tierra en subestaciones eléctricas son componentes esenciales que deben ser considerados cuidadosamente. Aquí se presentan algunas de las consideraciones y componentes clave relacionados con la seguridad y protección en la conexión a tierra en subestaciones eléctricas:

### 2.2.5.1. Varistores y Supresores de Transitorios

La seguridad y protección en una subestación eléctrica son cruciales para

prevenir accidentes, proteger al personal y garantizar el funcionamiento confiable de los equipos. Para ello, es fundamental contar con dispositivos como varistores y supresores de transitorios, que protegen los equipos y sistemas de puesta a tierra contra sobretensiones transitorias causadas por descargas atmosféricas, maniobras de conmutación u otras perturbaciones eléctricas. Además, es necesario garantizar que todas las partes metálicas y conductivas en la subestación estén conectadas de manera equipotencial para evitar diferencias de potencial peligrosas. Proporcionar a los trabajadores equipo de protección personal (EPP) adecuado, como guantes, botas y ropa aislante, es esencial para protegerlos contra descargas eléctricas. Asimismo, la aplicación de protocolos de bloqueo y etiquetado asegura que los equipos y sistemas estén desconectados y seguros durante las labores de mantenimiento.

La implementación de sistemas de alarma que alerten al personal sobre condiciones peligrosas, así como el empleo de sistemas de monitoreo en tiempo real para vigilar la integridad del sistema de conexión a tierra y detectar posibles irregularidades o fallas, son medidas adicionales para garantizar la seguridad. Cumplir con normativas y estándares de seguridad eléctrica, realizar evaluaciones periódicas de la seguridad del sistema de conexión a tierra y llevar a cabo mantenimiento preventivo regular en todos los componentes del sistema son acciones imprescindibles para asegurar su eficacia y seguridad a lo largo del tiempo.

Además, la implementación de medidas de protección contra incendios, como sistemas de extinción de incendios, ayuda a prevenir incendios que puedan ocurrir debido a fallas eléctricas. En conjunto, estas consideraciones contribuyen a un entorno de trabajo más seguro y a la mitigación de riesgos eléctricos.

## Capítulo 3

# Metodología Propuesta

En esta metodología, en primer lugar, se recopilará la información necesaria y la memoria técnica de la subestación de la planta procesadora de alimentos para dimensionar adecuadamente los elementos de descarga del sistema de conexión a tierra. Esto implica computar diversas características de los componentes del diseño utilizando las fórmulas matemáticas de la IEEE Std. 80-2000 con la intención de conseguir los datos esenciales para el diseño. Luego, se ingresarán los datos de los equipos y se creará la arquitectura eléctrica en la plataforma Etap Electrical, que incluye un módulo de sistemas de malla de conexión a tierra (GROUND GRID SYSTEM) para aprobar el diseño y análisis de protecciones y parámetros de configuración. Esto incluye consideraciones como la resistividad del terreno, la corriente de cortocircuito del sistema en Media Tensión, y extensión de potencial de la malla (GPR). La resistividad del suelo es crucial, ya que se evalúa en campo y se debe asegurar que sea adecuada para el correcto funcionamiento del sistema de conexión a tierra. Este sistema es primordial para la protección contra sobretensiones y descargas eléctricas, garantizando el rendimiento óptimo de los equipos conectados y la seguridad de los usuarios. Además, se utiliza el Técnica de Wenner para computarizar la resistividad aparente del suelo, lo que proporciona datos precisos para el diseño del sistema de conexión a tierra.

En este proyecto, se realizará la planificación o la creación y la simulación de un procedimiento de conexión a tierra en una subestación de MT 69/4.16 kV ubicada en la planta procesadora de alimentos "Industrial Molinera C.A.", que es una de las compañías más destacadas en Ecuador en el ámbito de la molinería de trigo y avena. Reconocida por ser licenciataria de Quaker

Oats y líder en la comercialización de hojuelas de avena, importa las mejores variedades de granos de países con experiencia en la producción, generando productos de primera calidad como harinas y avenas, entre otros

Este estudio permitirá obtener información esencial sobre las características del suelo, como su resistividad y resistencia, para planificar adecuadamente la infraestructura eléctrica futura. Esto simplificará el proceso de diseño de la conexión a tierra tanto para la empresa de distribución eléctrica como para el usuario, asegurando la seguridad y protección de las personas, equipos, instalaciones y activos en general. Además, garantizará la adecuada forma de disipar las cargas estáticas o las descargas atmosféricas, manteniéndose dentro de los límites operativos de la red eléctrica. También se busca mantener los valores de tensión a tierra de equipos o estructuras accidentalmente energizados en rangos seguros, y establecer niveles adecuados de aislamiento para permitir que los dispositivos de protección aislen las fallas de manera efectiva y oportuna.



Figura 3.1: Industria Molinera S.A

### 3.1. DISEÑO Y SIMULACION

#### **EDISEÑO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE CONEXIÓN A TIERRA EN UNA SUBESTACIÓN DE MT 69/4.16 KV DE UNA PLANTA PROCESADORA DE ALIMENTOS.**

Para el diseño y análisis del sistema eléctrico de la subestación de media tensión en la planta procesadora de alimentos, se utilizó ETAP (Electrical Transient Analyzer Program). ETAP es una herramienta de software ampliamente utilizada en la industria eléctrica para la simulación y análisis de sistemas de potencia.

El proceso de creación del modelo de la subestación en ETAP involucró la importación de los datos de diseño de la planta procesadora de alimentos y la configuración detallada de los componentes eléctricos. Se modelaron transformadores, interruptores, seccionadores, bancos de capacitores y otros dispositivos según las especificaciones del diseño.

Se definió la topología de la red eléctrica de la subestación, incluyendo la conexión de componentes y la configuración de buses y ramas. Se establecieron los parámetros eléctricos de cada elemento, como voltajes nominales, corrientes de cortocircuito, impedancias de línea, etc.

Los datos de entrada incluyeron la carga de la subestación, la capacidad de generación, la demanda de potencia de los equipos de la planta procesadora, entre otros. Se configuraron análisis de flujo de potencia, cortocircuito y estabilidad para evaluar el comportamiento del sistema en diferentes condiciones de operación.

Para los fines de este documento, el proceso de planificación de sistemas de conexión a tierra se llevó a cabo siguiendo las directrices establecidas en el RETIE. Este reglamento, a su vez, reconoce como válida la metodología detallada en la norma IEEE80-2000. Además, se proporciona un análisis detallado para diversas configuraciones de sistemas de conexión a tierra, especialmente para las rejillas y las rejillas con electrodos verticales, que son las más comunes en subestaciones de alta tensión.

El análisis de cualquier configuración de un sistema de conexión a tierra, que involucra la conexión y enterramiento de electrodos en un suelo homogéneo o de dos capas, tanto de forma horizontal como vertical con respecto a la superficie del suelo, incluye los siguientes cálculos:

- Análisis de las mediciones de resistividad del terreno, ya sea que este sea homogéneo (una sola capa) o heterogéneo (varias capas).
- Evaluación de los flujos de corriente por cortocircuito y fallos en el punto dentro de la subestación, que generalmente son proporcionadas por el operador de la red eléctrica, especialmente en subestaciones de alta tensión.
- Determinación del calibre del conductor que se utilizará para formar la rejilla y los diferentes electrodos que se enterrarán de forma vertical.
- Implementación de la metodología de cálculo conforme a lo establecido en la normativa IEEE80-2000, con la automatización de los valores de área de la cuadrícula, para encontrar la rejilla mínima necesaria y garantizar el cumplimiento de los niveles aceptables de voltaje de contacto y de voltaje de paso, previos a la conclusión del diseño.

En caso de no cumplir con los niveles aceptables de voltaje de contacto y de voltaje de paso, se podrían contemplar las siguientes medidas correctivas:

- Incrementar la resistividad del suelo mediante la aplicación de tratamientos químicos, por ejemplo, utilizando agentes adecuados como el Hidrosolta u otros productos similares.
- Instalar contrapesos, que son extensiones de conductores posicionadas horizontalmente con respecto al suelo, en los bordes o esquinas de la rejilla.

Si se logran cumplir los niveles aceptables de voltaje de contacto y de voltaje de paso, entonces se puede considerar que se ha completado la metodología y se ha seleccionado el diseño adecuado.

La norma IEEE80-2000 proporciona una metodología de cálculo para determinar el diseño final que cumple con los criterios de niveles aceptables de voltaje de contacto y de voltaje de paso para el cuerpo humano. En la Imagen a continuación se muestra de manera resumida los 12 pasos



secuenciales descritos en la norma IEEE-80-2000. A partir de este diagrama, se ha desarrollado una herramienta informática que agiliza y automatiza estos cálculos.

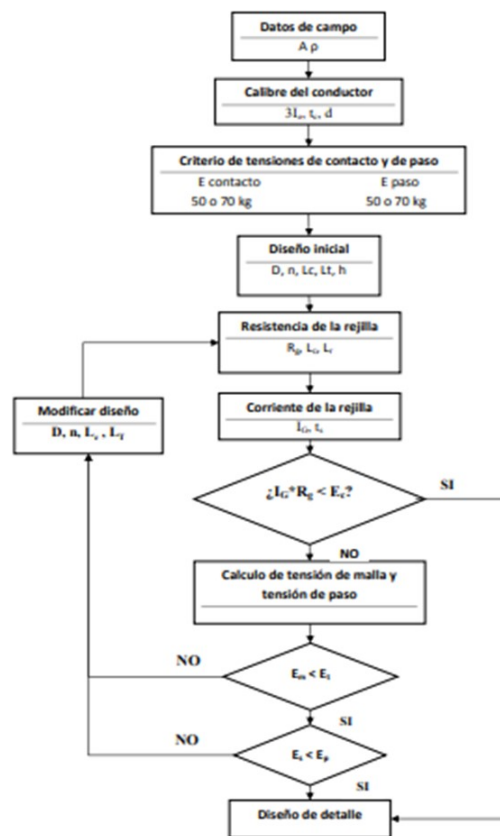


Figura 3.2: Proceso Metodológico según la Norma IEEE80-2000

## Capítulo 4

# Análisis de Resultados

El proyecto se ejecutó en INDUSTRIA MOLINERA S.A., donde se llevó a cabo una simulación a través del empleo del software ETAP. Esta herramienta se caracteriza por ser accesible y se utilizará con el propósito de explorar la disposición de protecciones y los sistemas de conexión a tierra en la empresa. La recopilación de datos se efectuará a través de diversas visitas técnicas, durante las cuales se evaluará el estado de las instalaciones eléctricas y se analizará el estudio y evaluará su impacto en el desempeño de una red de conexión a tierra en diversos contextos. También se llevará a cabo la representación del diseño de la red de puesta a tierra con la simulación. La Industrial Molinera C.A. ha destacado como una de las empresas más prominentes de Ecuador, especialmente en el sector de la molienda de trigo y avena, siendo líder en el país en este ámbito. Esta empresa, con licencia de Quaker Oats, se posiciona como líder en la comercialización de hojuelas de avena. Importamos las mejores variedades de granos provenientes de países con larga tradición en la producción, lo que nos permite ofrecer harinas, avenas y una amplia gama de alimentos de alta calidad. La validación del modelo de simulación desempeña un papel fundamental en la garantía de la precisión y fiabilidad de los resultados obtenidos. La validación del modelo se ha llevado a cabo mediante un proceso de comparación entre los resultados simulados en ETAP y datos reales recopilados de la planta procesadora de alimentos. Esta validación se ha realizado con el fin de verificar la capacidad del modelo para representar de manera precisa el comportamiento del sistema eléctrico en la subestación bajo diversas condiciones de operación. A través de esta validación, se busca asegurar que las conclusiones y recomendaciones derivadas de la simulación sean sólidas y confiables, respaldando así la toma de decisiones informada en el diseño de la subestación. lscape

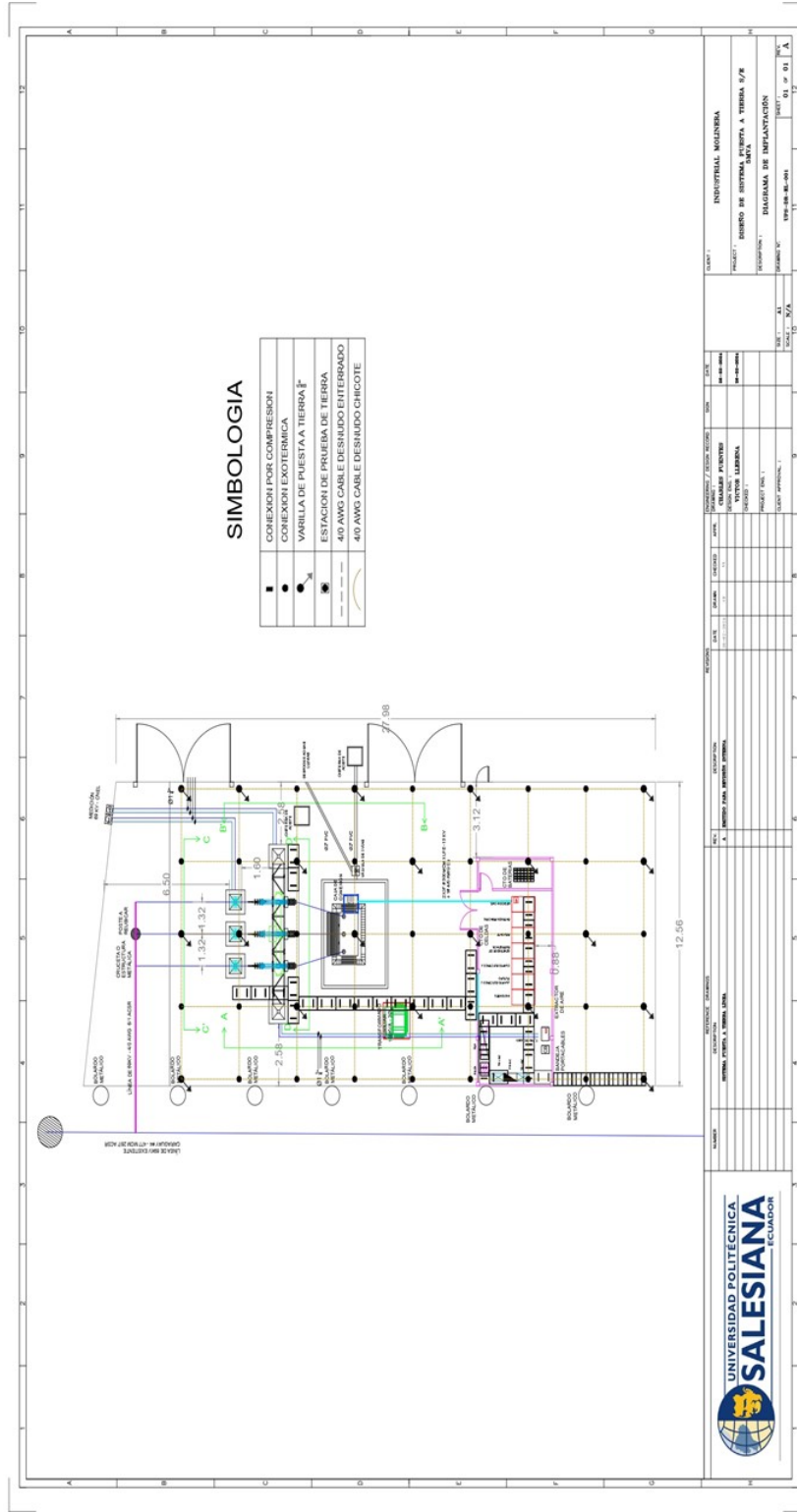


Figura 4.1: Simulado de Industrial Molinera

Para el proyecto, se llevó a cabo un detallado proceso de modelado de la subestación utilizando el software ETAP (Electrical Transient Analyzer Program). Este software proporciona una plataforma robusta y precisa para simular y analizar sistemas eléctricos complejos, lo que permitió una representación fiel de la infraestructura de la subestación. En el proceso de modelado, se consideraron una serie de aspectos clave para garantizar la precisión y la integridad del modelo. En primer lugar, se importaron los datos de diseño de la subestación, que incluían información sobre la disposición y especificaciones técnicas de los equipos eléctricos, como transformadores, interruptores, seccionadores y bancos de capacitores. Luego, se procedió a configurar la red eléctrica, definiendo la topología del sistema, estableciendo conexiones entre los componentes y asignando parámetros eléctricos como voltajes nominales, corrientes de cortocircuito y características de protección. Además, se incorporaron datos de carga de la subestación, que permitieron simular diferentes escenarios operativos y evaluar el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones de carga. Se realizaron análisis de flujo de potencia, cortocircuito y estabilidad para verificar el desempeño del sistema y garantizar su seguridad y confiabilidad. Finalmente, se llevaron a cabo pruebas de validación del modelo, comparando los resultados de la simulación con datos reales de la subestación para verificar la precisión del modelo. Este exhaustivo proceso de modelado en ETAP aseguró que el diseño y la operación de la subestación se llevaran a cabo con un alto grado de precisión y confiabilidad, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones informada y la optimización continua del sistema eléctrico.

### **Análisis de Cortocircuito**

La tabla presenta una serie de datos que describen las corrientes de falla en dos buses específicos dentro de la subestación. Cada fila corresponde a un tipo particular de falla, incluyendo cortocircuitos trifásicos, de fase a tierra, de fase a fase y combinaciones de estos. Los valores proporcionados, expresados en kA RMS, indican tanto la magnitud como la parte real e imaginaria de las corrientes de falla. Estos datos son esenciales para evaluar la capacidad del sistema eléctrico para manejar situaciones de cortocircuito y para diseñar dispositivos de protección adecuados que puedan garantizar la seguridad y confiabilidad del sistema. Además, permiten identificar áreas de potencial riesgo y tomar medidas preventivas para mitigar posibles daños a equipos y garantizar la continuidad del suministro eléctrico en la planta procesadora de alimentos.

**Interpretación general:**

- Las corrientes de falla se presentan en valores simétricos de medio ciclo (rms kA), lo que indica las magnitudes de corriente efectivas durante la primera mitad de un ciclo de corriente después de la ocurrencia del cortocircuito.

- Para cada tipo de falla (trifásica, fase a tierra, fase a fase y fase a fase a tierra), se presentan las corrientes de cortocircuito resultantes.

- Las magnitudes de las corrientes de cortocircuito proporcionan información sobre la capacidad de los dispositivos de protección para interrumpir el flujo de corriente en condiciones de falla y pueden influir en el diseño y la selección de equipos de protección adecuados para el sistema eléctrico.

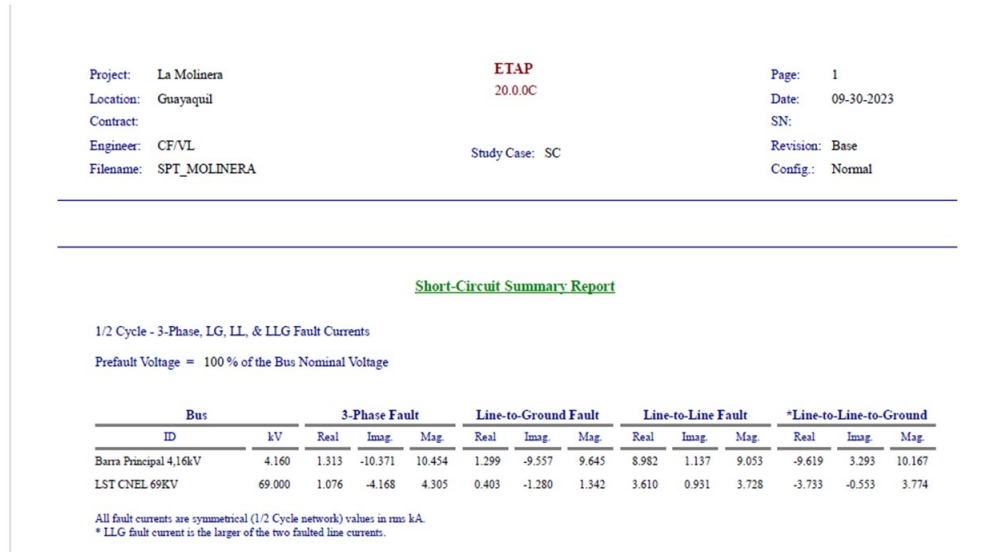


Figura 4.2: Interpretación de Cortocircuito

**Análisis de Resistencia de tierra, análisis de voltaje de paso y análisis de voltaje de toque**

Los datos proporcionados ofrecen una visión detallada de la seguridad eléctrica en una subestación de media tensión (MT) de 69/4.16 kV, específicamente en una planta procesadora de alimentos. La baja resistencia

a tierra de 0.864 ohmios indica una conexión eficiente con el suelo, crucial para disipar corrientes de falla y evitar riesgos eléctricos. El voltaje de toque, calculado en el diseño, es de 957.2 volts, con un margen de tolerancia del 98.0

**Ground Grid Summary Report**

Rg Ground Resistance ohm	GPR Ground Potential Rise Volts	Touch Potential			Step Potential		
		Tolerable Volts	Calculated Volts      %		Tolerable Volts	Calculated Volts      %	
0.864	8937.9	976.4	957.2	98.0	3239.4	942.6	29.1

Total Fault Current:	10.160 kA	Reflection Factor (K):	-0.976
Maximum Grid Current:	10.339 kA	Surface Layer Derating Factor (Cs):	0.871
		Decrement Factor (Df):	1.018

Figura 4.3: Análisis de Resistencia de tierra, análisis de voltaje de paso y análisis de voltaje de toque

**Análisis de Impedancias Secuenciales**

Al observar los valores de resistencia y reactancia en cada ubicación o bus del sistema, podemos evaluar la capacidad del sistema para resistir el flujo de corriente eléctrica. Una resistencia baja y una reactancia adecuada indican una ruta de baja impedancia para la corriente, lo que es crucial para limitar la pérdida de energía y garantizar la eficiencia del sistema.

Además, al analizar las impedancias secuenciales positivas, negativas y de secuencia cero, podemos entender cómo responde el sistema a diferentes tipos de desequilibrios y fallas. La impedancia secuencial positiva es relevante para condiciones normales de operación, mientras que la negativa y la de secuencia cero son importantes durante situaciones de desequilibrio y fallas. Si las impedancias están dentro de rangos aceptables y coherentes con las características del sistema, se concluye que el sistema está diseñado

adecuadamente para manejar condiciones adversas de manera segura.

Project:	La Molinera	<b>ETAP</b>	Page:	2
Location:	Guayaquil	20.0.0C	Date:	09-30-2023
Contract:			SN:	
Engineer:	CF/VL	Study Case: SC	Revision:	Base
Filename:	SPT_MOLINERA		Config.:	Normal

---

Sequence Impedance Summary Report

Bus	kV	Positive Seq. Imp. (ohm)			Negative Seq. Imp. (ohm)			Zero Seq. Imp. (ohm)			Fault Zf (ohm)		
		Resistance	Reactance	Impedance	Resistance	Reactance	Impedance	Resistance	Reactance	Impedance	Resistance	Reactance	Impedance
Barra Principal 4,16kV	4.160	0.02885	0.22793	0.22975	0.02885	0.22793	0.22975	0.04288	0.28441	0.28762	0.00000	0.00000	0.00000
LST CNEL 69KV	69.000	2.31219	8.96079	9.25430	2.31219	8.96079	9.25430	22.11158	66.99809	70.55258	0.00000	0.00000	0.00000

Figura 4.4: Análisis de Impedancias Secuenciales

**Análisis de parámetros y configuraciones relacionados mediante un entramado de tierra**

Los datos proporcionados sobre el sistema de malla de tierra permiten realizar un análisis detallado de su configuración y características clave. Aquí está la interpretación de los resultados:

Con 14 conductores de tierra en el sistema, se garantiza una distribución adecuada de la corriente y una baja resistencia de tierra. Este número de conductores puede ser suficiente para cubrir eficazmente el área de la subestación y proporcionar una disipación eficiente de la corriente de falla. La utilización de 20 varillas de tierra indica una estrategia robusta para mejorar la dispersión de la corriente y reducir la resistencia del sistema. El uso de múltiples varillas ayuda a aumentar la superficie de contacto con el suelo, mejorando así la capacidad de disipación de corriente.

La longitud total de 228.00 metros para los conductores de tierra y 48.00

metros para las varillas de tierra muestra un diseño bien dimensionado que asegura una cobertura efectiva del área de la subestación. Esta longitud se ha calculado teniendo en cuenta la resistividad del suelo y otros factores ambientales relevantes. El tiempo total de cálculo de 0.00 minutos indica que el proceso de diseño y evaluación del sistema de malla de tierra se realizó de manera eficiente y rápida. Esto sugiere una implementación efectiva de las herramientas de cálculo y análisis, lo que resulta en un diseño óptimo en menos tiempo.

La frecuencia del sistema de 60.0 Hz y el uso del sistema métrico para las unidades son estándares comunes en la industria eléctrica, lo que garantiza la coherencia y la compatibilidad con otras normativas y prácticas de diseño. Estos resultados indican que el sistema de malla de tierra ha sido diseñado de acuerdo con las directrices de la norma IEEE Std 80-2000/2013, asegurando una protección efectiva contra riesgos eléctricos y una operación segura y confiable de la subestación.

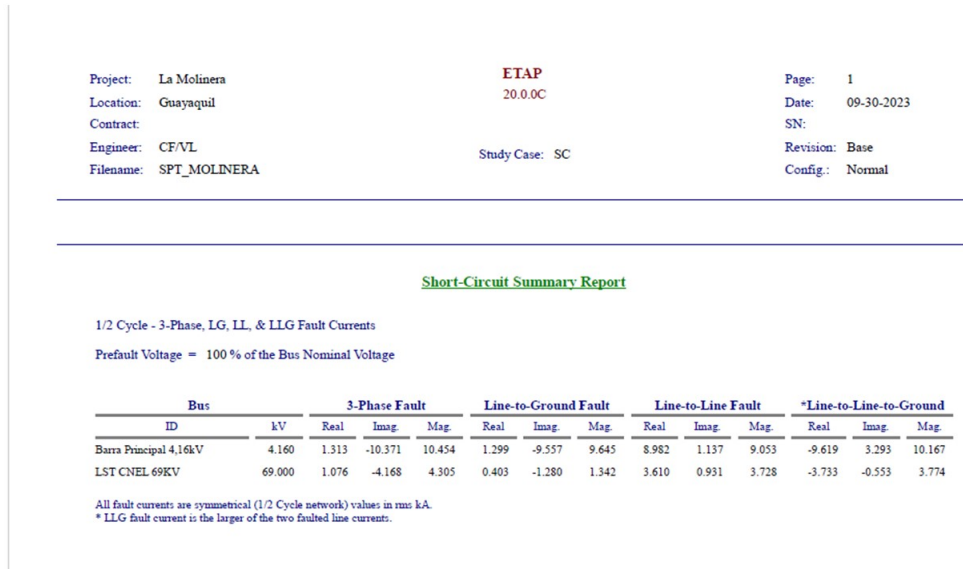


Figura 4.5: Análisis de parámetros y configuraciones relacionados mediante un entramado de tierra



### Análisis del sistema de programa transitorio eléctrico

El análisis del sistema de programa transitorio eléctrico (SEP) proporciona una visión integral de la eficacia y seguridad del sistema de puesta a tierra, destacando el número adecuado de conductores y varillas de tierra, así como la longitud total de estos elementos, lo que garantiza una conexión robusta con el suelo y una dispersión eficiente de corriente en caso de fallas eléctricas. Además, el tiempo de cálculo bajo sugiere una implementación efectiva de las herramientas de simulación, mientras que la frecuencia estándar de 60.0 Hz y el uso del sistema métrico para las unidades aseguran la coherencia y compatibilidad con las prácticas y normativas en sistemas eléctricos.

Electrical Transient Analyzer Program

Ground Grid Systems

IEEE Std 80-2000/2013

Number of Ground Conductors:	14
Number of Ground Rods:	20
Total Length of Ground Conductors:	228.00 m
Total Length of Ground Rods:	48.00 m
Total Computational Time:	0.00 minutes

Frequency:	60.0
Unit System:	Metric
Project Filename:	SPT_MOLINERA
Output Filename:	C:\ETAP 2000\FUENTES\Grid1_Unitled.GR15

Figura 4.6: Análisis del sistema de programa transitorio eléctrico

### Información de entrada referente a la red de conexión a tierra

Este resumen engloba los datos fundamentales del sistema de malla de tierra (conocido también como sistema de puesta a tierra) y sirve como base esencial para la evaluación detallada y el diseño adecuado del sistema. Adicionalmente, incluye información crucial sobre la resistividad del suelo,

la disposición y características de los electrodos de tierra, así como otros elementos relevantes que son considerados primordiales en el análisis y la configuración efectiva del sistema de conexión a tierra.

El análisis de los resultados revela una serie de parámetros importantes para comprender el comportamiento y la capacidad de respuesta del sistema eléctrico. La frecuencia operativa está en línea con los estándares comunes de 60.0 Hz, mientras que el peso, posiblemente utilizado en cálculos de la malla de tierra, es de 70. La corriente de cortocircuito disponible de 10.160 kA indica la máxima corriente posible en caso de un cortocircuito, y la relación entre la parte reactiva y resistiva de esta corriente (X/R) es del 100.0

### Ground Grid Input Data

#### System Data

Freq. Hz	Weight kg	Ambient Temp. °C	Short-Circuit Current				Fault Duration (Seconds)		
			Total Fault Current kA	X/R	Sf Division Factor %	Cp Projection Factor %	Tf for Total Fault Duration	Tc for Sizing Ground Conductors	Ts for Available Body Current
60.0	70	29.00	10.160	6.70	100.0	100.0	0.50	0.50	0.50

Figura 4.7: Información de entrada referente a la red de conexión a tierra

#### **Análisis de datos del Suelo**

Este análisis del suelo proporciona datos cruciales sobre su resistividad, que es fundamental para el diseño efectivo del sistema de puesta a tierra. La resistividad del suelo se evalúa en dos capas distintas: la capa superior, con una resistividad de 31.2 ohmios por metro y compuesta de suelo húmedo,

ubicada a una profundidad de 5 metros, y la capa inferior, que exhibe una resistividad significativamente mayor de 2600.0 ohmios por metro. Aunque no se especifica la profundidad de la capa inferior, esta información revela la variabilidad en las propiedades del suelo, lo que sugiere la necesidad de consideraciones específicas en el diseño del sistema de puesta a tierra para garantizar su eficacia y seguridad.

### Soil Data

Surface Material			Upper Layer Soil			Lower Layer Soil	
Material Type	Resistivity ohm.m	Depth m	Material Type	Resistivity ohm.m	Depth m	Material Type	Resistivity ohm.m
Clean limestone	2600.0	0.300	Moist soil	31.2	5.00	Moist soil	31.2

Figura 4.8: Análisis de datos del suelo

### Análisis de Materiales Constantes

Este análisis detalla las propiedades eléctricas y térmicas de dos materiales conductores, cobre recocido suave y cobre comercial duro. Se observa que el cobre recocido suave, utilizado como punto de referencia con una conductividad eléctrica del 100 %, exhibe una conductividad de 0.00393 S/cm y una resistividad de 234.0  $\cdot$ cm, mientras que el cobre comercial duro muestra una conductividad ligeramente menor del 97 %, con valores de 0.00381 S/cm y 242.0  $\cdot$ cm, respectivamente.

Aunque la diferencia en la conductividad es mínima, sugiere una ligera

disminución en la capacidad de conducción eléctrica del cobre comercial duro en comparación con el recocido suave. En términos de capacidad térmica, ambos materiales muestran valores similares, con el cobre recocido suave y el cobre comercial duro teniendo capacidades de 1083.0 J/(cm<sup>3</sup>·°C) y 1084.0 J/(cm<sup>3</sup>·°C), respectivamente.

Estos datos proporcionan una comprensión detallada de las propiedades eléctricas y térmicas de los materiales conductores, lo que es fundamental para seleccionar el material más adecuado en aplicaciones específicas.

Material Constants

Conductor/Rod	Type	Conductivity %	α <sub>r</sub> Factor		Fusing Temperature °C	Resistivity of	Thermal
			@ 20 °C 1/°C	K0 @ 0 °C		Ground Conductor @ 20°C micro ohm.cm	Capacity Per Unit Volume J/(cm <sup>3</sup> ·°C)
Conductor	Copper, annealed soft-drawn	100.0	0.00393	234.0	1083.0	1.72	3.42
Rod	Copper, commercial hard-drawn	97.0	0.00381	242.0	1084.0	1.78	3.42

Figura 4.9: Análisis de Materiales Constantes

**Análisis de Datos de las Varillas Puesta a tierra**

Este análisis detalla las propiedades eléctricas y térmicas de dos materiales conductores, cobre recocido suave y cobre comercial duro. El cobre recocido suave, tomado como referencia con una conductividad eléctrica del 100 %, exhibe una conductividad de 0.00393 S/cm, mientras que el cobre comercial duro tiene una conductividad ligeramente menor del 97 %, con valores de 0.00381 S/cm. Esto indica que el cobre comercial duro es un poco menos

conductor que el cobre recocido suave. En términos de resistividad eléctrica, el cobre recocido suave tiene 234.0  $\cdot$ cm, mientras que el cobre comercial duro tiene una resistividad ligeramente mayor de 242.0  $\cdot$ cm. Sin embargo, ambos materiales muestran capacidades térmicas similares, con el cobre recocido suave y el cobre comercial duro teniendo capacidades de 1083.0 J/(cm<sup>3</sup>·°C) y 1084.0 J/(cm<sup>3</sup>·°C), respectivamente.

### **Rod Data**

<b>Diameter</b> cm	<b>Length</b> m	<b>No. of</b> <b>Rods</b>	<b>Arrangement</b>	<b>Cost</b> \$/Rod
1.580	2.40	20	Rods Throughout Grid Area	20.00

Figura 4.10: Análisis de Datos de las Varillas Puesta a tierra

### **Análisis de configuración de red**

Este fragmento detalla la configuración de una cuadrícula de tierra o sistema de conexión a tierra, incluyendo diversos parámetros clave. La cuadrícula utiliza conductores con un área transversal de 120 mm<sup>2</sup>, dispuestos en una cuadrícula de dimensiones 24.00 metros en la dirección X y 12.00 metros en la dirección Y. Los conductores están enterrados a una profundidad de 3.0 metros y tienen una separación de 3.0 metros tanto en la dirección X como en la dirección Y. La cuadrícula abarca un total de 10.00 metros en su longitud. Se utilizan 9 conductores en la dirección Y y un número no especificado de conductores en la dirección X. El costo por metro de la cuadrícula de tierra es de 10.00 dólares por metro. Esta información es crucial para el diseño y la

implementación eficientes de sistemas de conexión a tierra en instalaciones eléctricas.

Grid Configuration

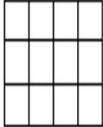
Conductor		Grid Length m		Number of Conductor		Separation m		Cost \$/m	 Shape: Rectangular
Size mm <sup>2</sup>	Depth m	Lx	Ly	in X Direction	in Y Direction	in X Direction	in Y Direction		
120	0.80	24.00	12.00	5	9	3.0	3.0	10.00	

Figura 4.11: Análisis de configuración de red

**Análisis de Costos**

La información proporcionada detalla el costo global de los conductores y varillas utilizados en el sistema de conexión a tierra. Con un total de 14 conductores y una longitud combinada de 228 metros, el costo total de los conductores asciende a \$2,280.00. Asimismo, se emplean 20 varillas con una longitud combinada de 48 metros, con un costo total de \$400.00. Por lo tanto, el gasto completo del sistema de puesta a tierra, considerando tanto los conductores como las varillas, alcanza los \$2,680.00. Estos costos son fundamentales en la planificación y ejecución del sistema, ya que afectan significativamente el presupuesto y la viabilidad del proyecto.

**Cost**

<b>Conductor</b>			<b>Rod</b>			<b>Total Cost</b>
<b>Total No.</b>	<b>Total Length m</b>	<b>Cost \$</b>	<b>Total No.</b>	<b>Total Length m</b>	<b>Cost \$</b>	
14	228	2280.00	20	48	400.00	2680.00

Figura 4.12: Análisis de Costos

### Método de Cálculo a Tierra

La información proporcionada en los informes de análisis del método de conexión a tierra es fundamental para llevar a cabo el diseño y la evaluación de la efectividad y seguridad del sistema en una subestación eléctrica. Los informes incluyen información detallada sobre las corrientes de falla en diversas condiciones, las impedancias secuenciales del sistema, los parámetros de diseño, como el número de conductores y varillas, la resistividad del suelo, la configuración del sistema eléctrico y las características de los materiales empleados en el sistema de conexión a tierra. Todos estos datos son cruciales para comprender cómo el sistema responderá a las fallas, distribuirá las corrientes peligrosas y garantizará la salvaguarda de los equipos y la garantía de seguridad para el personal dentro de la subestación eléctrica.

La información proporcionada en los informes de análisis del método de conexión a tierra es fundamental para llevar a cabo el diseño y la evaluación de la efectividad y seguridad del sistema en una subestación eléctrica. Los informes incluyen información detallada sobre las corrientes de falla en diversas condiciones, las impedancias secuenciales del sistema, los parámetros de diseño, como el número de conductores y varillas, la resistividad del suelo, la configuración del sistema eléctrico y las características de los materiales empleados en el sistema de conexión a tierra. Todos estos datos son cruciales

para comprender cómo el sistema responderá a las fallas, distribuirá las corrientes peligrosas y garantizará la salvaguarda de los equipos y la garantía de seguridad para el personal dentro de la subestación eléctrica.

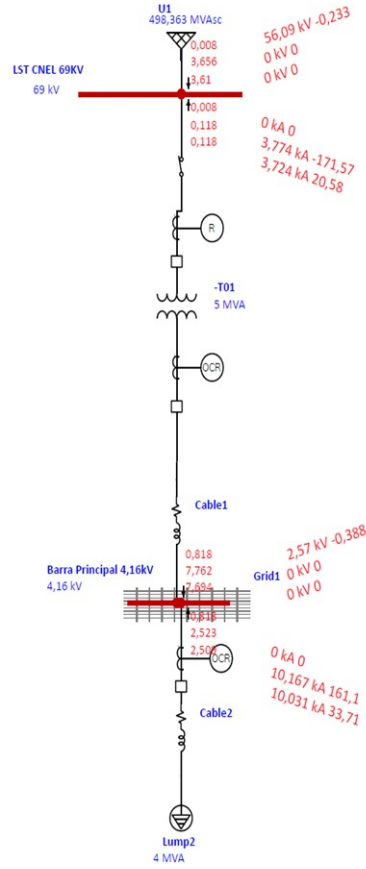


Figura 4.13: Método de Cálculo a Tierra



## Capítulo 5

# Conclusiones

Después de llevar a cabo el diseño del sistema de puesta a tierra para la Subestación MT 69/4.16 kV de la planta procesadora de alimentos, utilizando ETAP y siguiendo los objetivos específicos establecidos, se han obtenido conclusiones significativas que garantizan la seguridad eléctrica en el entorno industrial.

La información recopilada de la memoria técnica de la subestación proporcionó una base sólida para entender los requerimientos eléctricos específicos de la planta procesadora de alimentos. Esta referencia inicial permitió dimensionar de manera precisa los elementos de descarga necesarios para proteger tanto a las personas como a los equipos en caso de fallas eléctricas.

La utilización de las fórmulas matemáticas y normativas, en particular la IEEE Std. 80-2000, fue crucial para determinar las propiedades de los componentes del sistema de puesta a tierra. Esto aseguró que el diseño cumpliera con los estándares de seguridad eléctrica y proporcionara una protección adecuada contra descargas eléctricas.

La aplicación de los criterios de la normativa IEEE Std. 80-2000 mediante la herramienta GROUND GRID SYSTEM de ETAP permitió obtener los parámetros de configuración del sistema de puesta a tierra de manera eficiente y precisa. Esto garantiza que el diseño del sistema cumpla con los estándares de seguridad y proporcione niveles óptimos de protección.

El modelo de la malla de puesta a tierra creado con un programa de

diseño asistido por computadora proporcionó una representación visual detallada y comprensible del diseño del sistema. Esta representación facilita la comunicación del diseño a todas las partes interesadas y asegura una implementación efectiva y precisa del sistema de puesta a tierra.

El diseño del sistema de puesta a tierra realizado mediante ETAP, en línea con los objetivos específicos establecidos, garantiza la seguridad eléctrica en la Subestación MT 69/4.16 kV de la planta procesadora de alimentos. Este diseño cumple con los estándares de seguridad eléctrica y proporciona una solución confiable y eficiente para proteger tanto a las personas como a los equipos en el entorno industrial.

## 5.1. Glosario

### C.

#### **Conductividad:**

La capacidad de un material para conducir la electricidad.

#### **Corriente máxima a disipar por la malla:**

La corriente máxima que la malla de puesta a tierra debe ser capaz de disipar.

#### **Corriente simétrica de falla a tierra:**

La corriente que fluye durante una falla a tierra.

#### **Calidad del Servicio Comercial:**

Grado de cumplimiento de los lapsos establecidos en esta Resolución, en la atención de los requerimientos y reclamos de los usuarios.

### D.

#### **Duración de la falla y duración del choque:**

Tiempos relevantes para el análisis.

#### **Distribución:**

Es una de las actividades del sistema eléctrico que consiste en el suministro de electricidad desde los puntos de entrega de los generadores o la red de transmisión, hasta la acometida en el punto de suministro, mediante el uso de subestaciones, líneas, transformadores, equipos de control, así como otros necesarios para su operación y mantenimiento.

### E.

#### **Electricidad:**

Conjunto de fenómenos físicos derivados del efecto producido por el

movimiento y la interacción entre cargas eléctricas positivas y negativas. Forma de energía que puede traducirse en fenómenos mecánicos, luminosos, térmicos, fisiológicos y químicos.

**Energía:**

Capacidad que tiene un cuerpo de producir trabajo.

**Energía Eléctrica:**

Es la potencia eléctrica producida, transmitida o consumida en un período determinado. Se mide y se expresa en vatio hora (Wh) o en sus múltiplos: kilovatio hora (kWh), megavatio hora (MWh), gigavatio hora (GWh), teravatio hora (TWh). Se transmite por medio de ondas electromagnéticas p () p (), g (), gg (), teravatio hora (TWh). Se transmite por medio de ondas electromagnéticas.

**F.****m Factor de decremento:**

Un parámetro que ajusta la corriente de falla a tierra.

**m Factor de crecimiento:**

Un parámetro que ajusta la corriente de puesta a tierra.

**T.****G.****m Geometría de la malla:**

La disposición espacial de los conductores de puesta a tierra.

**I.****m Investigación de la estructura del suelo:**

Análisis de las características del suelo.

**M.****m Modelo de suelo multicapas:**

Representación matemática de las capas del suelo.

**R.**

**m Resistividad de la capa superficial:**

La resistividad del suelo en la capa superior.

**Resistividad del terreno ():**

La resistividad promedio del suelo.

## 5.2. Referencias

- [1] Avila, «Equipos de Puesta a Tierra y Aislamiento,» Elvatron, vol. 1, n<sup>o</sup> 1, p. 1, 2019.
- [2] Gasulla, «Medida de la resistividad eléctrica del subsuelo,» Tesis Doctoral, [En línea]. Available: <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6316/05capitulo2.PDF>.
- [3] Bustos, «Sistema de conexión a tierra,» Espol, vol. 1, n<sup>o</sup> 1, pp. 23-46, 2010.
- [4] Hurtado, «Para garantizar un funcionamiento efectivo del sistema de conexión a tierra, es esencial establecer las conexiones adecuadas para cada sistema en particular. Estos sistemas deben tener una resistencia de malla suficientemente baja para reducir el Potencia,» UPS, vol. 1, n<sup>o</sup> 1, p. 39, 2010.
- [5] Samaniego, «La conexión a tierra es esencial para asegurar tanto el funcionamiento adecuado como la seguridad de los equipos, siendo particularmente crucial en las subestaciones eléctricas, tanto de transmisión como de distribución. La correcta implementación de la c,» EPN, 2018.
- [6] Lopez, «Puesta a tierra, Principales Normas y Reglamentos de práctica,» Electricistas C.L, vol. 1, n<sup>o</sup> 1, pp. 1-12, 2023.
- [7] M. G. Unde y B. E. Kushare, «Cost Effective Design of Grounding Grid using Ground Rods - a Case Study,» vol. 1, n<sup>o</sup> 1, pp. 1-6, 2022.
- [8] G. Enríquez Harper, «Elementos de Diseño de Subestaciones Eléctricas,» Limusa, vol. 22, n<sup>o</sup> 1, pp. 20-34, 2022.
- [9] Paguay, «Diseño de sistemas de puesta a tierra utilizando electrodos,» EPN, vol. 1, n<sup>o</sup> 1, pp. 1-45, 2022.
- [10] Universidad Catolica Santiago de Guayaquil, «NORMA IEEE 80-2000,» UCSG, 2015.
- [11] Barrado, «Conjunto de instalaciones eléctricas de un centro de producción de alimentos precocinados,» Valencia: Universidad de Sevilla,

vol. 1, n<sup>o</sup> 1, pp. 34-67, 2018.

[12] Fuentes, Resistividad en suelos con el Método Wenner (4Pines), 2020.

[13] J. M. y. A. Wood, «Evaluation of Ground Grid Resistance for Inservice Substation.» Institute of Electrical and Electronics Engineers, vol. 1, n<sup>o</sup> 1, pp. 1-4, 2010.