

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Eléctrica

Tesis

**Influencia del sistema puesta a tierra tipo varilla para  
la protección de la subestación de 30 kVA en la  
Minera Zanja - Cajamarca 2021**

Jesús Anderson Morales Ramírez

Para optar el Título Profesional de  
Ingeniero Electricista

Huancayo, 2021

Repositorio Institucional Continental  
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

## **ASESOR**

Ing. César Quispe López

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco infinitamente a la Gerencia de la empresa Electrocentro por brindar acceso y facilidad para la obtención de datos del respectivo árbol eléctrico en general, así como su evaluación.

Además, manifestar mi más profundo agradecimiento a mi alma mater Universidad Continental, que fue la residencia donde se me impartieron los conocimientos para desempeñarme profesionalmente, de igual manera, mi agradecimiento va para todos los catedráticos y compañeros de estudios comprometidos con el desarrollo del país.

Mi agradecimiento al Ing. César Quispe López, por sus oportunas sugerencias y orientaciones en el campo metodológico de la Ingeniería Eléctrica en su cargo de asesor, que mediante su destreza y habilidades nos conduce por el camino exitoso de la investigación.

## **DEDICATORIA**

A Dios, quien es mi norte para toda trayectoria de mi vida, bendiciéndome y brindándome fuerzas para concluir todas mis metas trazadas. A mis padres, que me brindan su apoyo incondicional, amor y confianza; ingredientes que me permiten lograr culminar todas mis metas.

# ÍNDICE

Asesor .....	ii
Agradecimiento .....	iii
Dedicatoria .....	iv
Índice.....	v
Índice de figuras .....	viii
Índice de tablas .....	x
Resumen .....	xi
Abstract .....	xii
Introducción.....	xiii
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>15</b>
<b>PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO .....</b>	<b>15</b>
1.1. Planteamiento y formulación del problema .....	15
1.1.1. Formulación del problema .....	17
1.2. Objetivos .....	17
1.2.1. Objetivo general .....	17
1.2.2. Objetivo específicos .....	17
1.3. Justificación .....	18
1.3.1. Justificación social.....	18
1.3.2. Justificación técnica.....	18
1.3.3. Justificación económica.....	19
1.4. Importancia .....	19
1.5. Hipótesis y descripción de variables .....	20
1.5.1. Hipótesis.....	20
1.5.2. Descripción de variables .....	20
1.5.3. Operacionalización de variables.....	21
<b>CAPÍTULO II .....</b>	<b>22</b>
<b>MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>22</b>
2.1. Antecedentes del problema .....	22
2.2. Bases teóricas .....	28
2.2.1. Sistema de puesta a tierra tipo varilla.....	28
2.2.2. Protección de subestación .....	29

2.3. Definición de términos básicos .....	31
2.3.1. Sistema de puesta a tierra.....	31
2.3.2. Resistividad del terreno .....	34
2.3.3. Equipotencialidad de los sistemas a tierra .....	39
2.3.4. Método para la medición de resistividad del suelo .....	40
2.3.5. Electrodo de puesta a tierra .....	42
2.3.6. Resistencia de electrodos, puesta a tierra, líneas de transmisión ...	45
2.3.7. Mantenimiento de pozos a tierra .....	48
2.3.8. Resistencia de puesta a tierra en líneas de transmisión .....	52
2.3.9. Protección contra descargas atmosféricas.....	54
2.3.10. El sistema de protección .....	58
2.3.11. Dispositivos de protección.....	60
2.3.12. Subestación eléctrica .....	65
2.3.13. Condiciones anormales de operación .....	70
2.3.14. Efectos de la sobrecarga.....	72
2.3.15. Sistemas eléctricos de distribución .....	75
2.3.16. Estructura de un sistema eléctrico de distribución .....	75
2.3.17. Mina Zanja.....	77
<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>82</b>
<b>METODOLOGÍA .....</b>	<b>82</b>
3.1. Método, tipo y nivel de la investigación.....	82
3.1.1. Tipo .....	82
3.1.2. Nivel .....	82
3.1.3. Método .....	83
3.2. Diseño y esquema de la investigación .....	83
3.3. Población, muestra y técnica de muestreo .....	84
3.3.1. Población.....	84
3.3.2. Muestra .....	84
3.4. Técnica e instrumento de acopio de datos.....	84
3.5. Técnicas de procesamiento de datos .....	85
<b>CAPÍTULO IV.....</b>	<b>86</b>
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>86</b>
4.1 Resultados del tratamiento y análisis de la información .....	86
4.1.1. Sistema de puesta a tierra.....	86

4.1.2. Segundo diseño eléctrico de puesta a tierra tipo vertical en anillo ..	89
4.2. Simulación primera propuesta de sistema de puesta a tierra tipo malla ....	92
4.2.1. Simulación de segunda propuesta de malla a tierra tipo anillo.....	95
4.2.2. Pruebas estadísticas .....	97
4.3. Prueba de hipótesis .....	98
4.3.1. Hipótesis general.....	98
4.3.2. Hipótesis específicas.....	100
Discusión de resultados .....	104
Conclusiones.....	107
Lista de referencias .....	108
Anexos .....	112

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Componentes para una puesta a tierra .....	33
Figura 2. Variación de la resistividad en función de la humedad del terreno. 36	
Figura 3. Variación de la resistividad del terreno en función de la temperatura 37	
Figura 4. Variación de la resistividad del terreno en función de la salinidad ....	38
Figura 5. Red equipotencial de tierra creada conectando todas las puestas a tierra con conectores con igual potencial (PEC).....	39
Figura 6. Configuración geométrica del método Wenner .....	40
Figura 7. Configuración geométrica del método Schlumberger.....	42
Figura 8. Electrodo de puesta a tierra .....	43
Figura 9. Pletina de cobre para pozo horizontal .....	44
Figura 10. Capas cilíndricas del suelo alrededor del electrodo .....	44
Figura 11. Conductor horizontal enterrado .....	47
Figura 12. Cemento conductivo adherido a una barra .....	50
Figura 13. Curva de dos estratos de Orellana.....	52
Figura 14. Componentes de la resistencia puesta a tierra del electrodo .....	54
Figura 15. Distribución de las intensidades de caídas del rayo.....	55
Figura 16. Porta fusible L .....	61
Figura 17. Reconectador trifásico.....	62
Figura 18. Relés diferenciales .....	63
Figura 19. Circuito básico de operación de un sistema de protección contra sobrecorriente.....	64
Figura 20. PASS 75 kV Gas SF <sub>6</sub> , descripción eléctrica .....	66
Figura 21. Interruptor de 36 kV 800 A, 50/60 Hz, Gas SF <sub>6</sub> .....	67
Figura 22. Transformador de potencia 10 MVA.....	68
Figura 23. Transformadores de medida (corriente y tensión).....	69
Figura 24. Seccionador con cuchilla a tierra .....	69
Figura 25. Seccionador de 36 kV 800 A, modelo ONIII 30 W/8-2 .....	70
Figura 26. Tipos de cortocircuito .....	72
Figura 27. Topología de un circuito de medio voltaje o alimentador primario ..	77
Figura 28. Ubicación de la unidad minera Zanja, Perú.....	79
Figura 29. Foto diseño malla a tierra alta frecuencia.....	87
Figura 30. Diseño malla a tierra de la frecuencia. ....	88

Figura 31. Diseño de malla a tierra tipo anillo .....	90
Figura 32. Diseño de malla a tierra tipo anillo .....	90
Figura 33. Poza a tierra tipo vertical .....	91
Figura 34. Simulación análisis de suelo .....	92
Figura 35. Resultado de diagrama de contorno .....	93
Figura 36. Resultado de diagrama de contorno en 3D .....	94
Figura 37. Diagrama de Perfil de potencial .....	94
Figura 38. Simulación de análisis de suelo .....	95
Figura 39. Resultado de diagrama de contorno .....	96
Figura 40. Resultado diagrama de contorno en 3D .....	96
Figura 41. Diagrama de perfil de potencial .....	97

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resistividad según el tipo de terreno.....	35
Tabla 2. Valores medios de resistividad.....	35
Tabla 3. Accesibilidad .....	78
Tabla 4. Datos ingresados de la resistividad medida en campo.....	92
Tabla 5. Resultados de análisis del suelo .....	93
Tabla 6. Datos ingresados de la resistividad medida en campo.....	95
Tabla 7. Resultados de análisis del suelo .....	95
Tabla 8. Comparativo de resultados de la simulación .....	97
Tabla 9. Comparativo de resultados de la simulación .....	98
Tabla 10. Análisis estadístico .....	99
Tabla 11. Resistividad media tomada en la subestación de 30 kVA .....	101
Tabla 12. Análisis del perfil del potencial .....	101
Tabla 13. Resistividad del terreno medida con el instrumento (telurómetro) en la subestación de 30 kVA.....	102

## RESUMEN

La investigación “*Influencia del sistema puesta a tierra tipo varilla para la protección de la subestación de 30 kVA en la minera Zanja Cajamarca 2021*” responde a la siguiente interrogante ¿Cómo influye el sistema de puesta a tierra tipo varilla para la protección de la subestación de 30 kVA en la minera Zanja Cajamarca 2021? Como objetivo principal pretende determinar la influencia del sistema de puesta a tierra tipo varilla para la protección de la subestación de 30 kVA en la minera Zanja Cajamarca y como hipótesis se asume que el sistema de puesta a tierra tipo varilla influye positivamente para la protección de la subestación de 30 kVA en la minera Zanja Cajamarca 2021. El diseño fue el descriptivo correlacional, en la muestra del sistema de puesta a tierra tipo varilla en la minera Zanja de Cajamarca, donde se aplicó el sistema de puesta a tierra tipo varilla, basado en el análisis de criticidad que permitió mejorar la confiabilidad operacional de la subestación de 30 kVA en la minera Zanja de Cajamarca. Concluyendo que se evaluó la efectividad del sistema de puestas a tierra tipo varilla, combinando las metodologías que se utilizan para la protección de la subestación de 30 kVA con varillas de cobre de 20 mm x 2.40 metros, el estudio cuenta con las mismas características como conductores de cobre de 50 mm, y en cada retícula tiene unavarilla de cobre de 20 mm x 1.0 metros con soldadura exotérmica, obteniendo una resistividad óptima y aislando el sistema de puesta a tierra de tensiones de retorno que puedan existir en la capa 2 y capa 3 de la tierra.

**Palabras claves:** puesta a tierra, sistema de protección, subestación

## ABSTRACT

The investigation “*Influence of the rod-type earthing system for the protection of the 30 kVA substation in the Zanja Cajamarca 2021 mining company*” answers the following question: How does the rod-type earthing system influence the protection of the substation of 30 kVA in the mining Zanja Cajamarca 2021? The main objective is to determine the influence of the rod-type grounding system for the protection of the 30 kVA substation at the Zanja Cajamarca mining company, and as a hypothesis it is assumed that the rod-type grounding system has a positive influence on the protection of the 30 kVA substation in the Zanja Cajamarca 2021 mining company. The design was descriptive correlational, in the sample of the rod-type grounding system in the Zanja de Cajamarca mining company, where the rod-type grounding system was applied, based on the criticality analysis that allowed to improve the operational reliability of the 30 kVA substation at the Zanja de Cajamarca mine. Concluding that the effectiveness of the rod-type grounding system was evaluated, combining the methodologies used for the protection of the 30 kVA substation with copper rods of 20 mm x 2.40 meters, the study has the same characteristics as conductors. copper wire of 50 mm, and in each grid there is attached a copper rod of 20 mm x 1.0 meters with exothermic welding, obtaining an optimal resistivity and isolating the grounding system from return voltages that may exist in layer 2 and layer 3 of the earth.

**Keywords:** earthing, protection system, substation

# INTRODUCCIÓN

La investigación en ejecución sobre “*La influencia del sistema puesta a tierra tipo varilla para la protección de la subestación de 30 kVA en la minera Zanja Cajamarca*”, enfoca el problema del diseño de un sistema de utilización que se proyecta en base a un incremento de carga, ante esto se propone un análisis documentado, este debe ser bien elaborado, ya que servirá para determinar de manera óptima la localización, capacidad y tecnología al ser instalado un sistema de pozo a tierra tipo varilla, ya que de estos factores depende el monto de la inversión que se debe montar.

El objetivo general de la investigación fue determinar la influencia del sistema de puesta a tierra tipo varilla para la protección de la subestación de 30 kVA en la minera Zanja en Cajamarca 2021. El actual trabajo se justifica de manera principal en el aspecto técnico, donde se da prioridad a la contribución para las empresas concesionarias que buscan mejorar sus servicios en corte y reconexión, minimizando el tiempo de operación. Ahora, en cuanto a equipos, como forma de funcionamiento, es importante utilizar energías adecuadas al sistema que ayuden a mantener la vida útil y así evitar efectos por variaciones de tensión eléctrica de diversos orígenes, que genera falsas lecturas, mal funcionamiento y deterioro inmediato. Por ende, el trabajo que se presenta tiene como estructura lo siguiente:

Capítulo I, se presenta el planteamiento y formulación del problema, la definición del problema general y específicos; los objetivos general y específicos; las hipótesis general y específicas; justificación e importancia de la investigación, y los alcances de la investigación.

Capítulo II, trata de los antecedentes del problema, antecedentes nacionales e internacionales, el marco y bases teóricas de la investigación que comprenden temas relacionados a las variables del sistema de pozo a tierra tipo varilla para la protección de la subestación, aspectos generales del área de estudio, y definición de términos básicos.

Capítulo III, se describe la metodología de la investigación, con el tipo, nivel, método y diseño de la investigación; población y muestra, técnicas e instrumentos de recolección de datos: técnicas, instrumentos y técnica de procesamiento y análisis de datos.

Capítulo IV, se dan a conocer los resultados y la discusión; resultados del tratamiento y análisis de la información, contrastación de la hipótesis general y la prueba de hipótesis específicas y, finalmente, la discusión e interpretación de resultados de la subestación de 30 kVA en la minera Zanja, Cajamarca.

Finalmente, se presentan las conclusiones llegadas sobre las hipótesis, en relación al problema y objetivos de investigación, recomendaciones, lista de referencias y anexos que sirvieron para complementar el objetivo del trabajo de investigación.

# **CAPÍTULO I**

## **PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO**

### **1.1. Planteamiento y formulación del problema**

En las últimas décadas han surgido inconvenientes con respecto a la protección adecuadas de la subestación de 30 kVA que es de mucha importancia para los equipos eléctricos; con la gran pregunta que se hacen los proyectistas de una subestación eléctrica ¿el terreno influye o no? En el diseño de una puesta a tierra, la causa se relaciona con los distintos tipos de procedimientos existentes para el diseño de puesta a tierra.

Tras la revisión de trabajos de tesis de diferentes países se obtiene la respuesta del porqué se tienen que conectar todos los equipos eléctricos y electrónicos a un solo sistema de puesta a tierra (SPT), y no en puesta a tierra (PAT) diferentes.

Porque se trata de conseguir una equipotencialidad casi perfecta en todo el sistema, necesaria para evitar que surja diferencia de potenciales, inducidos por corrientes estáticas y atmosféricas, contribuyendo a la inseguridad del personal y equipo. El concepto válido es el uso de una tierra única y equipotencial, con la unión de todas las partes metálicas al sistema.

La equipotencialidad asegura que todos los objetos conductores, no vinculados eléctricamente, estén a un mismo potencial, manteniendo un nivel de seguridad requerido y necesario para el personal y equipo de trabajo. Sin la equipotencialidad apropiada, y el requerimiento mínimo del valor de la resistencia, los sistemas de protección no trabajan adecuadamente.

Una señal eléctrica de alimentación es comúnmente afectada por causas como ruido eléctrico, descargas electromagnéticas, descargas electrostáticas y atmosféricas, que interfieren con el funcionamiento de los equipos eléctricos y electrónicos, afectando a la fuente que los alimenta. Como ejemplo: una señal limpia es de gran importancia para la alimentación de equipos electrónicos que si no trabajan con su tensión nominal podrían variar su funcionamiento y, como consecuencia, los resultados darán falsas lecturas y un mal proceso de la planta industrial. Un buen sistema de puestas a tierra en conjunto con otros métodos, como la instalación de pasivos en paralelo, blindaje en el cableado y dispositivos DPS reducirían la deformación de las señales eléctricas que degradan el buen funcionamiento del sistema de control.

Estos fenómenos electromagnéticos son, en la mayoría de los casos, perturbaciones causadas por descargas electrostáticas y atmosféricas, ambas básicamente producto de cargas acumuladas ya sea por su presencia eléctrica estacionaria o a su interacción con otros equipos eléctricos. Esto lleva a diseñar y desarrollar un sistema de protección adecuado contra cualquier tipo de interferencia electromagnética que se presente en el sistema.

Con una mala instalación al SPT se pueden ocasionar daños irreparables en los equipos, o un mal funcionamiento entre ellos, pero lo más importante es que pueda ocasionar accidentes personales. De continuar operando en estas condiciones las empresas tendrán pérdidas económicas por el deterioro de sus equipos y pérdidas económicas por afectar la producción con un personal expuesto al riesgo.

Como podrá observarse, los sistemas de conexión a tierra requerida actualmente difieren de las épocas anteriores y requieren una actualización

constante tanto en su desarrollo tecnológico, de los especialistas y constructores.

Con la relación oportuna de datos e información proporcionada por los fabricantes de equipos e instituciones especializadas en esta actividad, es posible obtener resultados importantes en la protección de equipos electrónicos.

### **1.1.1. Formulación del problema**

#### **Problema general**

¿Cómo influye el sistema de puesta a tierra tipo varilla para la protección de la subestación de 30 kVA en la minera Zanja, Cajamarca 2021?

#### **Problema específico**

¿Cómo es el estado de protección sin el SPT tipo varilla en la subestación de 30 kVA de la minera Zanja, Cajamarca 2021?

¿Cómo es el estado de protección con el SPT tipo varilla en la subestación de 30 kVA de la minera Zanja, Cajamarca 2021?

¿Cómo es el nivel de resistividad del sistema de puesta a tierra tipo varilla en la minera Zanja, Cajamarca 2021?

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

Determinar la influencia del sistema de puesta a tierra tipo varilla para la protección de la subestación de 30 kVA en la minera Zanja, Cajamarca 2021.

### **1.2.2. Objetivo específicos**

Identificar el estado de protección sin el SPT tipo varilla en la subestación de 30 kVA de la minera Zanja, Cajamarca 2021.

Identificar el estado de protección con el SPT tipo varilla en la subestación de 30 kVA de la minera Zanja, Cajamarca 2021.

Evaluar el nivel de resistividad del sistema de puesta a tierra tipo varilla en la minera Zanja, Cajamarca 2021.

### **1.3. Justificación**

#### **1.3.1. Justificación social**

La seguridad humana en la subestación eléctrica es un requisito primordial para cualquier institución seria que se interesa por la seguridad de personas ante cualquier eventualidad que signifique un riesgo para la salud. Un riesgo que fácilmente podría causar la muerte si no se piensa en un buen SPT, que proteja de estos fenómenos electromagnéticos que, en la mayoría de los casos, son perturbaciones causadas por descargas electroestáticas o atmosféricas.

Contribuir a un mejor desempeño de los sistemas de protección, evita incendios provocados por cortocircuitos más materiales volátiles o la combustión de gases; al proveer un camino efectivo y seguro, para la circulación de corrientes de falla, descargas atmosféricas, estáticas, arcos eléctricos y elevadas temperaturas en los equipos eléctricos; que pueden provocar tales incendios, ocasionando pérdidas humanas y materiales.

#### **1.3.2. Justificación técnica**

La investigación tiene como fin contribuir con las empresas concesionarias que buscan mejorar sus servicios en corte y reconexión minimizando el tiempo de operación.

En cuanto a equipos, como forma de funcionamiento, es importante utilizar energías adecuadas al sistema que ayuden a mantener la vida útil de estos y evitar efectos por variaciones de tensión eléctricas de diversos orígenes, que ocasionan falsas lecturas, mal funcionamiento, deterioro inmediato, y para la sustitución de algún equipo eléctrico

deteriorado o defectuoso, ocasionado por diferentes errores en el voltaje o potencial. Para evitar todo lo descrito anteriormente se tiene que realizar un buen sistema de puesta a tierra tipo varilla.

### **1.3.3. Justificación económica**

La presente investigación contribuye, de manera significativa, con la concesionaria que busca una mejora en su sistema de carga, permitiendo que el proceso de conexión o puesta de servicio se realice en menor tiempo mediante el buen funcionamiento de los alimentadores eléctricos, esto le permite reducir las paradas de mantenimiento y tiempo de respuesta, siendo que, todo esto se refleja en la reducción de costos.

## **1.4. Importancia**

**Continuidad:** garantizar la continuidad de la instalación sin interrupción alguna durante fallas en los equipos de potencia, especialmente en interruptores y barrajes.

**Flexibilidad:** para que la instalación pueda acomodarse a las diferentes condiciones que se puedan presentar por cambios operativos en el sistema.

**Confiabilidad:** para que la subestación pueda suministrar energía durante un periodo de tiempo dado, bajo las condiciones de que al menos un componente de la subestación no pueda recuperarse durante la operación.

**Seguridad:** para que dentro de la instalación toda persona con el equipo de protección personal adecuado pueda operar el sistema dentro de sala de control, casa de máquinas y patio de llaves.

## **1.5. Hipótesis y descripción de variables**

### **1.5.1. Hipótesis**

#### **Hipótesis general**

El sistema de puesta a tierra tipo varilla influye positivamente para la protección de la subestación de 30 kVA en la minera Zanja, Cajamarca 2021.

#### **Hipótesis específicas**

El estado de protección sin el SPT tipo varilla en la subestación de 30 kVA de la minera Zanja, Cajamarca 2021, es deficiente.

El estado de protección con el SPT tipo varilla en la subestación de 30 kVA de la minera Zanja, Cajamarca 2021, es eficiente.

El nivel de resistividad del sistema pozo a tierra tipo varilla en la minera Zanja, Cajamarca 2021, es bajo.

### **1.5.2. Descripción de variables**

#### **Variable independiente (x):**

Sistema de puesta a tierra tipo varilla

#### **Variable dependiente (y):**

Protección de la subestación

### 1.5.3. Operacionalización de variables

Tabla 1. Operacionalización de variables

Variable independiente	Definición	Dimensión	Indicadores	Valor
Sistema de puesta a tierra tipo varilla	Está constituido por una conexión fija y removible desde el equipo o parte del sistema eléctrico, con un cable conductor hasta una varilla de metal conductor denominado electrodo, donde también es fijado por una conexión fija y removible.	Resistividad del terreno	Ohmios	Numérico
		Equipotencialidad del sistema a tierra	Voltios	Numérico
		Resistencia de electrodos	Ohmios	Numérico
		Medida de resistividad eléctrica del terreno	Ohmios	Numérico
		Resistencia de puesta a tierra	Ohmios	Numérico
		Mantenimiento de pozos a tierra	Ohmios	Numérico
		Protección contra descargas atmosféricas	Amperios	Numérico
Variable dependiente	Definición	Dimensión	Indicadores	Valor
Protección de la subestación	Las protecciones eléctricas son dispositivos cuyo propósito es identificar condiciones de falla en la operación de un sistema eléctrico y tomar automáticamente las medidas necesarias para restituir su operación normal.	Dispositivo de protección	Amperios	Numérico
		Subestación eléctrica	Voltios	Numérico
		Cortocircuito	Amperios	Numérico
		Subestación de distribución	Voltios	Numérico
		Efectos de la sobrecarga	Voltios	Numérico

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Antecedentes del problema**

Se revisaron diferentes tesis de páginas webs como Alicia, Scielo, Redalyc acerca del tema, para así obtener más información y ver los diferentes puntos de vista de distintas personas, a nivel nacional e internacional.

En el artículo “*Análisis de resistencia de puesta a tierra en redes de distribución urbanas usando distribuciones de probabilidad*” (1) se estudió la medida de tendencia central de la resistencia de mallas a tierra en redes de distribución de baja tensión de la ciudad de Copiapó (Chile) usando distribuciones de probabilidad continua de sesgo positivo, para evaluar si es necesario modificar el diseño original de las mallas a tierra estudiadas. Se probaron los modelos Exponencial, Weibull y Log Normal, siendo este último el que mejor ajustó los datos de campo, con menor criterio de información de Akaike (244,14) y menor criterio de información Bayesiano (247,67). Se determinó que la probabilidad de cumplir con el valor de resistencia de puesta a tierra exigido por la norma eléctrica chilena de baja tensión es de un 44,34%, por lo tanto, es necesario modificar el diseño original de las mallas analizadas en este trabajo para aumentar esta probabilidad. Finalmente, se concluye que estudiar la variabilidad de la resistencia de puesta a tierra por medio de distribuciones de probabilidad continuas, es una alternativa útil para determinar acciones correctivas de mejoramiento del diseño de las mallas a tierra (1).

En el artículo “*Calidad de la energía eléctrica bajo la perspectiva de los sistemas de puesta a tierra*” (2), se demostró que la calidad de energía depende de las condiciones normales de operación de los sistemas eléctricos en cuanto a estabilidad (voltaje y frecuencia), distorsión de las señales y la continuidad del servicio. Asegurar altos niveles de calidad requiere del estudio de la influencia del conexionado adecuado de los sistemas de puesta a tierra, a lo largo de toda la cadena de valor (generación, transmisión, distribución), bajo la perspectiva de su contribución en la estabilidad, disminución de perturbaciones e interrupciones del servicio eléctrico. En este orden de ideas, en el presente trabajo se realiza una revisión bibliográfica centrada en teorías e investigaciones científicas de las mejores prácticas para el diseño, construcción y mantenimiento de los sistemas de puesta a tierra, complementándose con un análisis exploratorio de los datos históricos de un caso particular del sistema eléctrico venezolano, donde se demuestra que alrededor del 30% de los problemas de interrupciones y perturbaciones en las líneas de transmisión son producto de las altas resistencias en los sistemas de puesta a tierra o por la falta de continuidad entre los sistemas de protección contra descargas atmosféricas (2).

En el artículo “*Implementación de redes de Petri para el diseño de mallas a tierra de subestaciones eléctricas*” (3), se demostró que la malla de puesta a tierra en una subestación debe proporcionar seguridad contra descargas eléctricas al personal que labore. Para ello, en todo punto de la subestación se debe garantizar un camino de descarga DC baja impedancia. En la actualidad se hacen mallas de tierra para subestaciones, de acuerdo con normativas internacionales de seguridad, pero los algoritmos usados en estos diseños rara vez consideran una metodología de optimización que involucre una combinación adecuada de seguridad y de costos. En este artículo se presenta una solución al problema de diseño óptimo de malla de tierra usando redes de Petri, quienes modelan los estados concurrentes, para así lograr un desempeño adecuado del algoritmo de diseño. El objetivo fundamental es encontrar un diseño que combine adecuadamente parámetros de seguridad y costos de construcción. (3)

En el artículo “*Modelación de sistemas de puesta a tierra para evaluación de sobretensiones transitorias*” (4), se demostró que en las plantas generadoras

y en subestaciones se requieren sistemas de puesta a tierra (SPT) espaciosos, con configuraciones complejas como parte del sistema de protección contra rayos. Las corrientes provocadas por una descarga atmosférica pueden causar altas tensiones en los cables de señales ubicados cerca de los SPT. Estas tensiones transitorias pueden causar falsas señales, que provocan un mal funcionamiento de la instrumentación electrónica. Determinar medidas de protección contra rayos requiere del conocimiento de la máxima elevación de la tensión entre el SPT y la tierra remota. El presente trabajo propone una metodología para analizar el comportamiento transitorio de redes de tierra. La técnica se basa en considerar los diferentes segmentos de la malla de tierra como elementos de líneas de transmisión. Para desarrollar esta metodología se utilizó el software Matlab-Simulink. Los resultados se validan por comparación con modelos basados en la teoría del campo electromagnético publicados (4).

En el artículo “*Identificación de pérdidas técnicas en redes de baja tensión con sistemas de puesta a tierra*” (5), se demostró que en este trabajo se propone una aplicación para observar el impacto del neutro y sistemas de puesta a tierra en el cálculo de pérdidas técnicas, usando un flujo de carga radial trifásico tetrafilar. Para asegurar y acelerar la convergencia de este algoritmo, se hace uso de la técnica *Anderson mixing scheme*, dando robustez y eficiencia a la metodología. Para validar la metodología propuesta se emplea un sistema de distribución colombiano, con el cual se establece un análisis comparativo considerando diversos escenarios, con respecto a la metodología empleada tradicionalmente, que considera sistemas sólidamente aterrizados. Los resultados obtenidos indican la necesidad de involucrar en el cálculo de pérdidas técnicas las ocasionadas por el sistema de puesta a tierra, con el fin de calcular con mayor precisión este valor, ya que pueden incidir en los planes de reducción de pérdidas y esquemas tarifarios, entre otros (5).

En la tesis “*Influencia del sistema de puesta a tierra en la descarga eléctrica en la institución educativa Juanita del Carmen Sánchez Rojas de Tarapoto, 2019*” (6), el objetivo general fue determinar la influencia de las dos variables mencionadas. El método fue cuantitativo y diseño no experimental, para la cual se ha tomado una muestra de 12 pozos para realizar las respectivas

evaluaciones. Además, se ha recogido información referente a cada una de las mediciones realizadas en los pozos. Se obtuvo como resultados que los electrodos de tierra vertical influyen significativamente con la descarga eléctrica en la institución educativa; asimismo, la conexión mecánica influye significativamente con la descarga eléctrica y se logró determinar que el sistema de puesta a tierra instalada en la entidad influye positivamente en la descarga eléctrica. Concluyendo que se ha identificado cuatro componentes que determinaron los prototipos, de tal modo que, tomando en cuenta los tiempos de electrodos, las conexiones, los insumos y las dimensiones del pozo se ha diseñado 12 prototipos. En cuanto a la selección de alternativa óptima, se ha realizado la valoración técnica y económica de cada uno de los prototipos, determinando el prototipo 8 como la más óptima, teniendo una dimensión de 40 cm de radio y 2.70 m de profundidad. Por último, se determinó que el sistema de puesta a tierra instalada en la entidad influye positivamente en la descarga eléctrica, ya que, de acuerdo con los diversos cálculos se ha identificado un alto índice de resistividad (6).

En la tesis "*Criterios para el diseño de sistemas de puesta a tierra en subestaciones industriales*" (7), se presentan, en forma consolidada, aspectos teóricos y prácticos que deben ser considerados para el apropiado diseño de un sistema de puesta a tierra aplicado en instalaciones de tipo industrial. El desarrollo del trabajo se basa en la descripción y aplicación de los conceptos y recomendaciones definidos en publicaciones, normativas y prácticas de la industria orientadas a que, en caso de falla a tierra de tipo industrial (60 Hz), el sistema de puesta a tierra asegure la integridad física a las personas y a las instalaciones, así como la apropiada operación de equipos y sistemas de protección. Los elementos de diseño toman en cuenta los aspectos que influyen en un dimensionamiento económicamente aceptable del sistema (7).

Son descritos y comparados los distintos métodos de conexión a tierra del neutro en sistemas eléctricos industriales, su influencia en la limitación de las corrientes de falla, así como los efectos y riesgos existentes para las personas expuestas a la circulación de la corriente de falla por el sistema de tierra. Son analizadas las técnicas de medición de resistividad del suelo, se hace

modelación del terreno mediante dos técnicas distintas y se comparan los resultados, con el objetivo de apreciar la importancia que tiene para la concepción del sistema de tierra el disponer de un modelo confiable de suelo. Igualmente, se toman en cuenta los efectos divisores de la corriente de falla introducidos por conductores de guarda instalados en líneas eléctricas aéreas, así como la interconexión entre redes de tierras remotas. Son presentados los criterios de diseño y de auditoría de sistemas de puesta a tierra (7).

En la tesis "*Diseño del sistema de puesta a tierra de la subestación eléctrica del nuevo campus de la Universidad Politécnica Salesiana- sede Guayaquil*" (8), las condiciones del terreno, del medio ambiente o temperatura y principalmente de la estacionalidad del año influyen directamente en el valor medido de la resistividad del suelo, es decir, se comporta muy variable con respecto a estas características, así en días calurosos (valores altos), con humedad o lluviosos (valores bajos). El sector del nuevo campus tiene suelos con valores de resistividad relativamente medios, con un promedio de resistividad de  $61\Omega\cdot m$ , determinados en 3 casos de mediciones distribuidos alrededor de la orilla del río Guayas. Al efectuar las mediciones de resistividad se pudo observar también que mientras se aumentó la distancia entre cada pica de medición, disminuyó la resistividad del terreno, esta acción es inversamente proporcional. Con la finalidad de disminuir los picos de voltaje (ya sean de contacto o de paso), reduciendo así el peligro en el área de la malla se aumentan el número de varillas, elevándose al mismo tiempo los costos de diseño, es así como, en este caso, los costos son sumamente superiores a los calculados para pequeñas puestas a tierra (8).

En la tesis "*Diagnóstico y mejora del sistema de protección de puesta a tierra del campus de la Universidad César Vallejo – Trujillo*" (9), se da a conocer el estado actual del sistema de protección de puesta a tierra en la Universidad César Vallejo - Trujillo, para saber si está en condiciones óptimas, necesita cumplir con un conjunto de normas, términos dados por el Código Nacional de Electricidad y normas técnicas vigentes para brindar una protección adecuada a los equipos eléctricos que están operando y evitar los riesgos electrocución (9).

Para que los pozos a tierra cumplan con las normas anteriormente señaladas deben tener un valor mínimo de resistividad, 5 ohm en centros de cómputo, 4 ohm en ascensores y según sea la derivación, que se da con una buena instalación, las cuales se suman a propiedades del suelo, humedad, calidad del cobre, etc. Además, se recomienda implementar un sistema de puesta a tierra exclusivo para los sistemas de cómputo (9).

Se recogieron los datos de cada pozo a tierra mediante el método de Wenner, haciendo uso de un telurómetro, elaborando una ficha de observación, obteniendo cuáles son los pozos a tierra en buen estado, los que necesitan mantenimiento y cuales se deben volver a instalar (9).

De los 54 pozos existentes se tomó la medida de 35 de ellos de las cuales se revisó y comparó con las normas, donde la minoría cumplían con estas, 20 están operativos, dentro de estas, 10 cumplen con las normas y 10 necesitan bajar su resistividad, los restantes 15 no tienen funcionalidad. También se propuso un sistema de protección de puesta a tierra a los sistemas de cómputo, ya que, como los equipos electrónicos son más sensibles, es necesario mejorar su integridad. Luego se propuso cómo mejorarlos y que estén a la par las normas anteriormente mencionadas, haciendo un presupuesto estimado de valoración (9).

En la tesis *“Diseño e implementación de diferentes sistemas de puestas a tierra para los laboratorios de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la UNA- Puno”* (10), se realizó el análisis comparativo de la reducción de la resistencia de puesta a tierra de los diferentes métodos de instalación a partir del diseño de un sistema de puesta a tierra, método “varilla vertical enterrada directamente” cuya resistencia de puesta a tierra final medida fue 11.14 ( $\Omega$ ), para un terreno con resistividad promedio de 34.97 ( $\Omega$ -m). Agregando tres acoplamientos radiales a una varilla del método antes mencionado, no se obtuvo reducción en la resistencia, sin embargo, la adición de tratamientos químicos sobre la varilla como el cemento conductor, gel y cemento conductor más bentonita, sí ofrecieron resultados favorables con reducciones en la resistencia de puesta a tierra del 62%, 59.61% y 69.30% respectivamente. Así mismo, se implementó

en la escuela profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica un sistema de puesta a tierra, método de varillas con tratamiento químico en paralelo, con una resistencia de puesta a tierra de 2.38 ( $\Omega$ ), donde los estudiantes de la escuela antes mencionada podrán realizar mediciones como parte de las prácticas de laboratorio, como también podrán ser conectadas en paralelo a las puestas a tierra existentes en la escuela profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la UNA – Puno (10).

## **2.2. Bases teóricas**

### **2.2.1. Sistema de puesta a tierra tipo varilla**

La puesta a tierra comprende toda la ligazón metálica directa sin fusible ni protección alguna, de sección suficiente entre determinados elementos o partes de una instalación y un grupo de electrodos, enterrados en el suelo, con objetivo de conseguir que entre el conjunto de instalaciones, edificios y superficie próxima al terreno no existan diferencias de potencial peligrosas y que permita el paso a tierra de las corrientes de falla o de una descarga de origen atmosférico. La forma en que se conecta el sistema a tierra tiene efecto sobre las magnitudes de voltaje de línea, que deben ser mantenidos en condiciones normales y bajo condiciones transitorias. El sistema de puesta a tierra ayuda a evitar la contaminación del equipo con señales de frecuencias diferentes a la deseada, mediante blindajes de todo tipo conectado a la referencia cero. Los dispositivos de protección conectados entre los conductores activos y la referencia, disminuye el riesgo de destrucción de los elementos semiconductores por causa del aumento de voltaje. Canalizando los rayos y cargas electroestáticas a tierra sin mayores daños a personas y equipos del sistema.

La puesta a tierra se ocupa del eficiente, seguro y económico traspaso de corrientes eléctricas, de distintas naturalezas, hacia la tierra en los diferentes tipos de instalaciones donde se utiliza la energía eléctrica (11). El correcto diseño del sistema de tierras y su posterior conexión es primordial para la seguridad de las personas y de los equipos eléctricos y electrónicos, además de un buen desarrollo de los procesos

a seguir, tanto a nivel industria, como a nivel doméstico. Otras razones importantes para que se deban tomar en cuenta la existencia de los sistemas de tierra son evitar que se produzcan diferencias de potencial entre distintos puntos de la instalación, a ocurrir cualquier falla eléctrica. Aunado a esto, los sistemas de tierra deben estar planteados de acuerdo a las normas y reglamentos públicos en vigor. La puesta a tierra del neutro del sistema permite la operación de diversos sistemas de protección basados en la detección de corrientes que circulan por este conductor, aislándose así la falla para evitar dañar al equipo que se encuentre operando en el momento de la falla y que esta se propague (11).

Los sistemas de puesta a tierra son elementos muy importantes en los sistemas eléctricos, porque además de permitir de forma segura la conducción hacia el suelo de cargas eléctricas originadas por rayos, anomalías del sistema o electricidad estática, poseen la capacidad de dispersión y disipación de fallas, sin la presencia en la superficie de potenciales peligrosos (12). Según el Reglamento Técnico de las Instalaciones Eléctricas, toda instalación eléctrica que esté citada en este, debe contar con un sistema de puesta a tierra, que asegure que cualquier punto exterior o interior por donde puedan estar o transitar personas sea considerado seguro desde el punto de vista del Diseño de malla a tierra y sometimiento de estas a tensiones de paso, de contacto o transferidas; esto por el hecho de que no se deben superar los umbrales de soportabilidad del ser humano cuando se presente una falla (12).

### **2.2.2. Protección de subestación**

El sistema de protección es el conjunto de equipos necesarios para la detección y eliminación de cualquier tipo de faltas mediante el disparo selectivo de los interruptores que permiten aislar la parte del circuito de la red eléctrica donde se haya producido la falta (13). El número y duración de las interrupciones en el suministro de energía eléctrica junto con el mantenimiento de la tensión y frecuencia dentro de unos límites es lo que determina la calidad del servicio. Por lo tanto, la calidad del servicio en el suministro y gran parte de la seguridad de todo el sistema dependen del

sistema de protección. Estos sistemas de protección se instalan en todos los elementos que componen el sistema eléctrico provocando la excitación o alarma de un dispositivo de apertura cuando detectan una perturbación. También se ocupa tanto de la protección de las personas como de las instalaciones contra los efectos de una perturbación, aislando las faltas tan pronto como sea posible, evitando el deterioro de los materiales y limitando el daño a las instalaciones y los esfuerzos térmicos, dieléctricos y mecánicos en los equipos provocados por cualquier tipo de falta.

Los equipos de medida y los relés de protección, utilizados en las instalaciones eléctricas, generalmente no están contruidos para soportar altas tensiones ni elevadas intensidades de corriente (14). Además, los equipos deben estar aislados de las altas tensiones para prevenir accidentes. Por estas razones, los equipos de medida y dispositivos de protección se conectan en las instalaciones a través de los denominados transformadores de medida y protección. En las condiciones normales de operación y las condiciones de falla, estos dispositivos de medida y protección están referidos siempre a la detección de los niveles de voltaje y corriente (14).

Las protecciones eléctricas son parte fundamental de los sistemas de distribución y tienen como objetivo evitar un posible daño a los equipos o dispositivos interconectados en el sistema que cumplen una función determinada en caso de una falla eléctrica, esta falla o desperfecto podría iniciarse de manera simple y después extenderse por todo el sistema de forma desencadenada causando un deslastre. El sistema de protección debe aislar la parte donde se ha producido la falla buscando alterar lo menos posible el sistema y que su porcentaje de afectación sea el mínimo posible (15).

## **2.3. Definición de términos básicos**

### **2.3.1. Sistema de puesta a tierra**

El pozo a tierra, hilo a tierra o toma tierra es un sistema de seguridad que está incluida en las instalaciones eléctricas, radica en conducir o drenar accidentales desvíos de corriente hacia el terreno, evitando que el usuario se ponga en contacto con la electricidad. Este desvío se da por medio de una barra metálica enterrada en el suelo conocido como, electrodo o jabalina que según norma del Código Nacional Electricidad en la sección 060-000. Esta debe brindar poca resistencia y se conecta a toda la instalación mediante un conductor aislante.

Este sistema protege de diversas corrientes peligrosas, las que se pueden presentar en dos asuntos, por empalmes indirectos o por corrientes estáticas acumuladas. Los dos asuntos se consideran contactos indirectos, hay corriente donde no correspondería tener, a continuación, se exponen estos dos asuntos detalladamente.

Cuando se observa sobre un circuito eléctrico común o estándar, la corriente sigue su recorrido a través del conductor de fase, línea energizada o línea viva hasta cualquier aparato que requiera electricidad, por ejemplo, una lavadora, y retorna por el otro conductor denominado neutro.

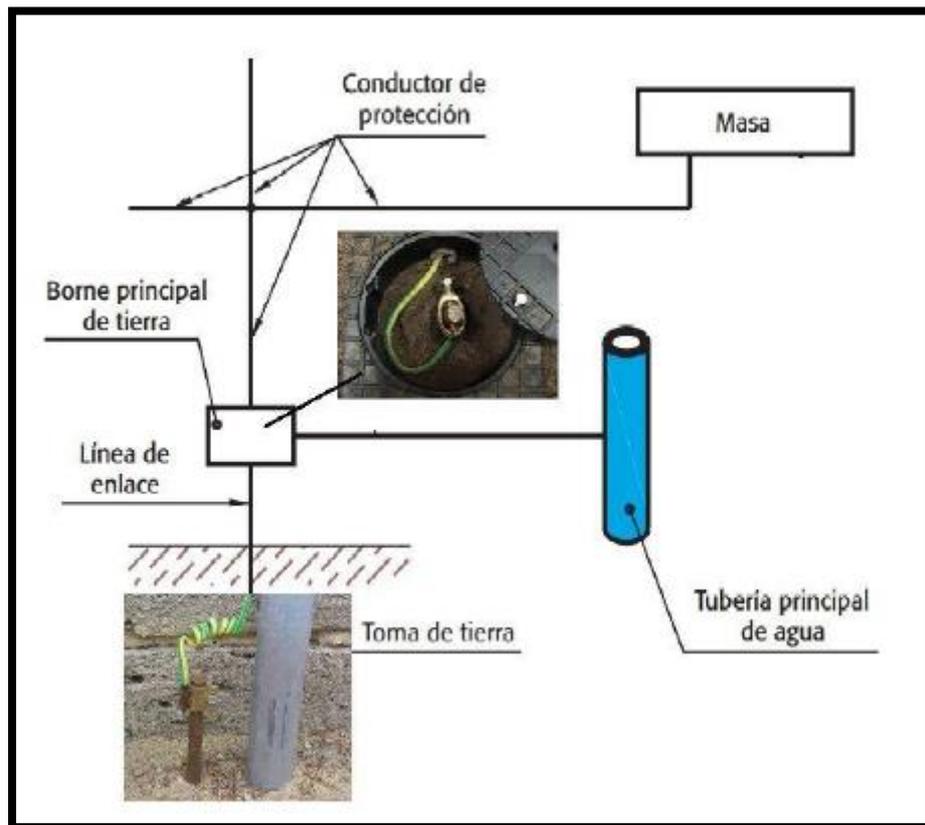
En ese periodo de paso de corriente, el conductor se topa con cualquier imperfecto en su aislamiento (cable pelado), además choca o llega a contactar con una zona metálica de un artefacto, por un supuesto, una refrigeradora o una lavadora, la corriente del conductor podría desviarse por la zona metálica si alguien la toca, es decir, la zona metálica pasa a estar bajo tensión o corriente. Si cualquiera la toca, brinda a la corriente la vía más corta y con baja resistencia para desviarse, produciéndose una descarga a través del individuo.

### **2.3.1.1. Composición de una instalación de puesta a tierra**

- Electrodo empotrado en tierra: estructura metálica interconectada a otras piezas metálicas que cumplen con la misma función, enterrarlas en el terreno y con ello ponerlo en contacto eléctrico con el mismo (o encajadas en concreto que esté en contacto con la tierra en una gran superficie) encargada de concentrar las corrientes de fuga que procedan de la instalación o de descargas eléctricas.
- Línea de enlace con tierra: están hechas por conductores que nacerán desde el inicio de la puesta a tierra y las cuales serán conectadas las derivaciones necesarias para la puesta a tierra de las masas, generalmente, a través de los conductores de protección.
- Conductores de tierra: tienen la función de unir eléctricamente los cuerpos de una instalación a dichos cuerpos, con el propósito de certificar una protección que se puede dar por contactos indirectos. Por ejemplo, en un circuito de puesta a tierra, los conductores de protección unirán las masas (enchufes) a la línea de enlace o principal de tierra.
- Borne principal de puesta a tierra: el borne primordial de tierra es una barra metálica, empotrada a cualquier parte fija o en el suelo a través de tornillos, a la cual se le conectan los demás conductores por medio de bornes. Se pueden incluir bornes de puesta a tierra secundario, constituyendo así puntos de unión entre los conductores de toma de tierra y el borne principal de puesta a tierra (16).

Como se observa en la figura 1, todos los componentes que forman una instalación de puesta a tierra, tienen una función específica, estos requieren un cuidado y revisión periódica, puesto que la mayoría están al aire libre, exponiéndolos a las condiciones

ambientales, deteriorando y empobreciendo sus propiedades con el paso del tiempo, para evitar esto, se utiliza una lista de materiales que se dedican a proteger la integridad de estos componentes, viendo su función, el valor monetario de estos, viendo sus ventajas, desventajas y evaluando cuál resulta más factible económica y técnicamente.



**Figura 1. Componentes para una puesta a tierra**

Las resistencias de puesta a tierra se pueden dividir en tres componentes:

- La resistencia del conductor conectado al sistema de puesta a tierra, que es función de su resistividad, longitud y sección.
- La resistencia que se da entre el contacto de la superficie, el electrodo y el suelo, esta medida la mayoría de las veces es poca, depende mucho del estado del electrodo, si está libre de pintura o grasa, esto se suprime verificando un buen contacto entre el electrodo y tierra.

- La resistencia de la tierra alrededor del electrodo, que es la resistencia principal que influirá en la resistencia total de la puesta a tierra.

### **2.3.2. Resistividad del terreno**

La resistividad describe el comportamiento de todos los materiales sean conductores o no conductores frente al paso de la corriente eléctrica, es decir, ofrece una idea de lo buen o mal conductor del material (17).

La resistividad de terreno equivale a la resistencia que ofrece al paso de la corriente eléctrica un cubo de terreno de 1 m de arista. El símbolo de la resistividad es la letra griega rho ( $\rho$ ) y se lo expresa en  $\Omega.m$ .

#### **Elementos que influyen en la resistividad del terreno**

La resistividad del terreno varía ampliamente a lo largo y ancho del globo terrestre, esta se ve afectada por varios factores, estos son:

- Naturaleza del terreno
- Humedad
- Temperatura
- Salinidad
- Estratigrafía
- Variaciones estacionales y del medio ambiente
- Factores de naturaleza química
- Compactación

#### **2.3.2.1. Naturaleza del terreno**

Los terrenos son buenos, regulares o malos conductores en función de su naturaleza. El conocimiento de su naturaleza es el primer paso para la implantación de una adecuada puesta a tierra.

**Tabla 2. Resistividad según el tipo de terreno**

Naturaleza del terreno	Resistividad ( $\Omega.m$ )
Terrenos pantanosos	De algunas unidades a 30
Limo	20 a 100
Humus	10 a 150
Turba húmeda	5 a 100
Arcilla plástica	50
Margas y arcillas compactadas	100 a 200
Margas del jurásico	30 a 40
Arena arcillosa	50 a 500
Arena silíceas	200 a 3000
Suelo pedregoso cubierto de césped	300 a 500
Suelo pedregoso desnudo	1500 a 3000
Calizas blandas	100 a 300
Calizas compactadas	1000 a 5000
Calizas agrietadas	500 a 1000
Pizarras	50 a 300
Rocas de mica y cuarzo	800
Granitos y gres procedentes de alteración	1500 a 10000
Granitos y gres muy alterados	100 a 600

Para cálculos aproximados de la resistencia de puesta a tierra se pueden utilizar los siguientes medios:

**Tabla 3. Valores medios de resistividad**

Naturaleza del terreno	Valor medio de la resistividad ( $\Omega.m$ )
Terrenos cultivables, fértiles, terraplenes compactos y húmedos	50
Terraplenes cultivables poco fértiles, terraplenes	500
Suelos pedregosos desnudos, arenas secas permeables	3000

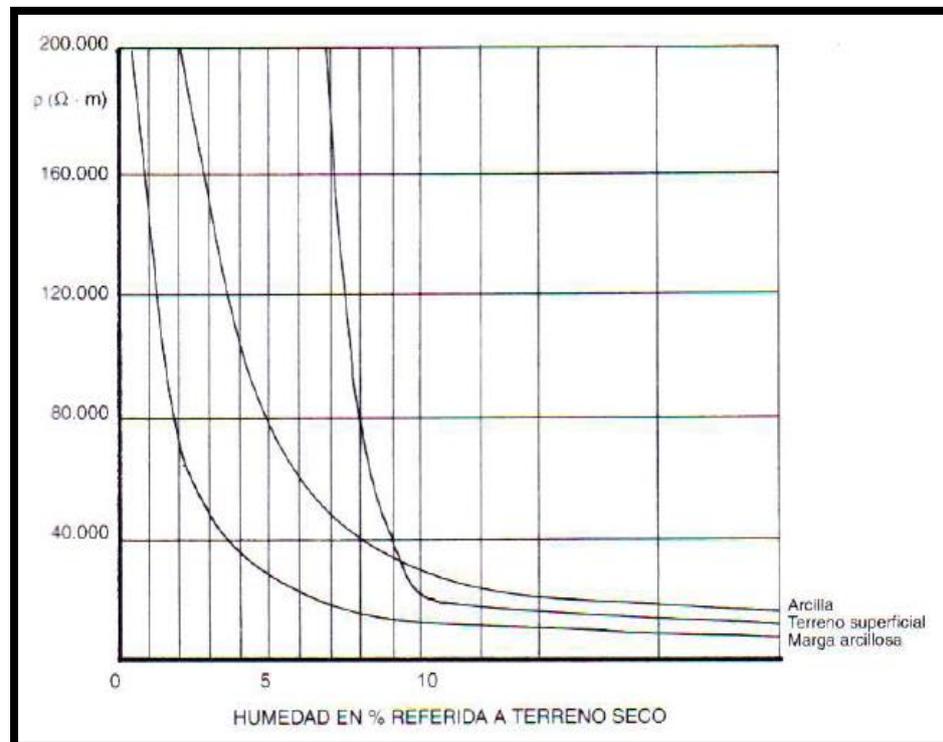
Se puede observar que a medida que el material del suelo es más compacto y antiguo, su resistividad es mayor (grosor de los granos de la partícula).

De manera a razón que aumenta de esta manera a razón que aumenta el tamaño de las partículas aumenta el valor de la resistividad, por ello, la grava tiene mayor receptividad que la arena, ahí existe mayor resistividad que la arcilla.

### 2.3.2.2. Humedad

El agua que contiene el terreno no hidrométrico influye de forma apreciable sobre la resistividad, ya que, al aumentar humedad, disminuye la resistividad y al disminuir la humedad, en

cualquier caso, siempre que se añada agua en un terreno, disminuye su resistividad respecto a la que tendría en seco. Se dice que un terreno está “saturado de agua” cuando todos sus intersticios están llenos de agua.



**Figura 2. Variación de la resistividad en función de la humedad del terreno**

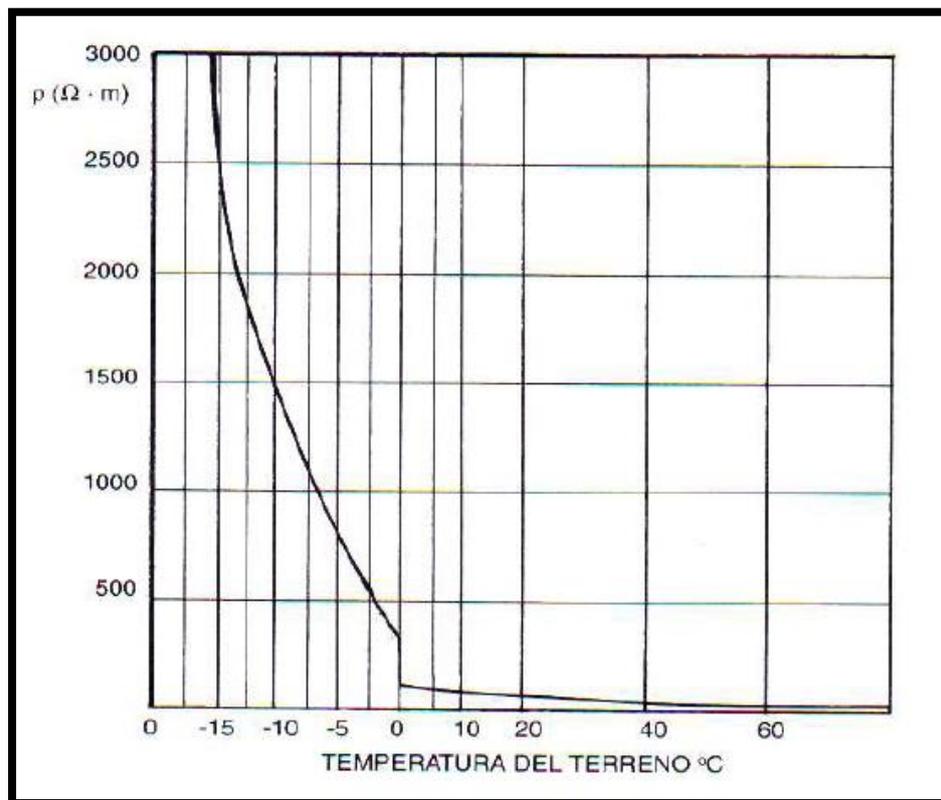
Por efecto de la evaporación natural de la superficie del terreno se produce un empobrecimiento del agua contenida en los agregados, fenómenos que se propagan lentamente desde la superficie hacia los estratos más profundos y tiene mayor importancia cuanto más seco sea el clima del lugar y cuanto más superficial es la colocación del electrodo de tierra.

En los lugares de lluvias estacionales hay que tener muy en cuenta estos fenómenos, ya que en la época de lluvias el terreno presenta una resistividad muy baja, mientras que en la época seca la resistividad es muy alta. En algunas regiones donde estas oscilaciones son muy acentuadas, se deben fijar valores de

máximos admisibles de resistividad de los terrenos, uno para la época de lluvias y otro para la época seca.

### 2.3.2.3. Temperatura del terreno

Las características térmicas del terreno dependen de su composición, de su grado de compactación y del grado de humedad.



**Figura 3. Variación de la resistividad del terreno en función de la temperatura**

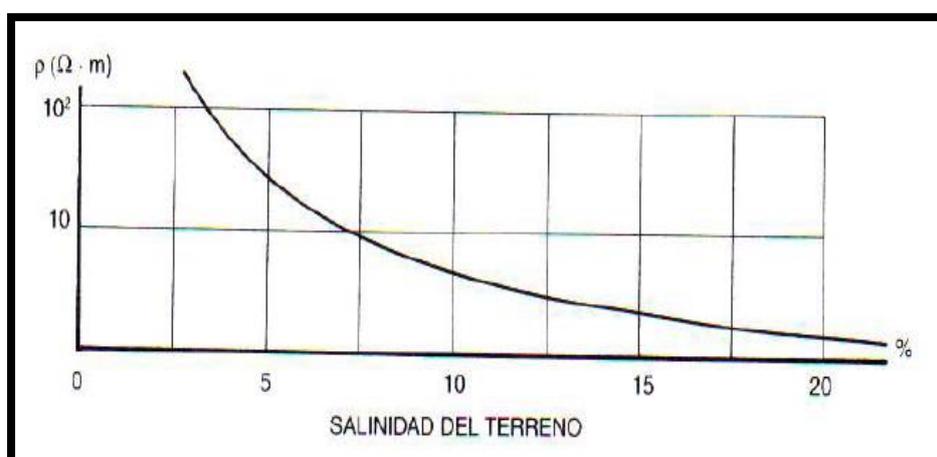
La resistividad del terreno aumenta al disminuir la temperatura, pero cuando el terreno se enfría por debajo de cero grados centígrados, la resistividad aumenta muy rápidamente, como se puede observar en la figura.

Si un terreno está a una temperatura inferior a 0  $^{\circ}C$  el agua se congela, formándose hielo, que es aislante desde el punto de vista eléctrico, ya que la movilidad de los iones del terreno a través del agua se ve detenida al congelarse esta.

#### 2.3.2.4. Salinidad del terreno

Un terreno puede mejorar sensiblemente su valor de resistividad aparente o incluso puede hacerse bueno un terreno de alta resistividad simplemente añadiéndose sales, es decir, al aumentar la salinidad del terreno disminuye su resistividad.

Para mejorar la resistividad del terreno se añade sal en las arquetas de los puntos de puesta a tierra o cerca de los electrodos si son accesibles, y luego se los riega con agua.



**Figura 4. Variación de la resistividad del terreno en función de la salinidad**

El agua hace que las sales penetren a lo profundo del terreno, y ya sea un riego excesivo o lluvias en gran cantidad, lavan el suelo, arrastrando la sal que rodea los electrodos de puesta a tierra, aumentando su resistividad. Por esta razón, no es aconsejable colocar las tomas de tierra en sitios cercanos a ríos, tanto superficiales como subterráneos, pues suelen ser terrenos muy depurados y por ende más resistivos de lo normal.

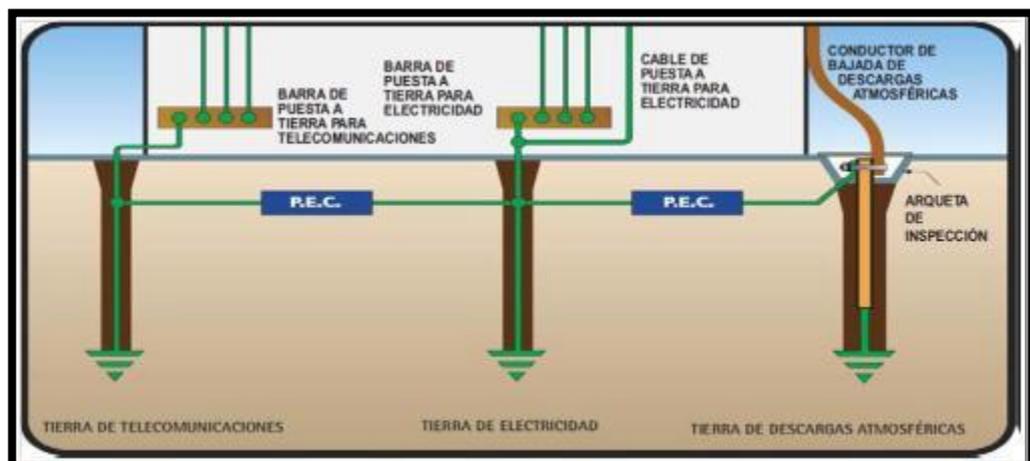
La resistividad del suelo es determinada principalmente por su cantidad de electrolitos, esto es, por la cantidad de minerales y sales disueltas. Como, por ejemplo, para valores de 1% (por peso de sal) o mayores, la resistividad es prácticamente la misma, pero para valores menores de esa cantidad, la resistividad es muy alta.

### 2.3.3. Equipotencialidad de los sistemas a tierra

La creación de una red equipotencial de tierra para condiciones de sobretensiones transitorias es esencial para la seguridad de personas y equipos. No obstante, en los edificios y otras instalaciones suele haber puestas a tierra separadas para descargas atmosféricas, red eléctrica, equipos informáticos y de comunicaciones (18).

Los conectores de equalización de potencial (PEC *Potential Equal Connectors*) suelen actuar como un eficaz circuito abierto. No obstante, una vez que la diferencia de potencial excede la tensión de ruptura del PEC (en condiciones de corrientes transitorias), el circuito se cierra inmediatamente y el potencial de tierra queda con igual potencial, protegiendo así a personas y equipos.

La unión equipotencial garantiza que cualquier incremento de potencial como consecuencia de la inyección de corriente de descargas eléctricas en la impedancia de la red de puesta a tierra sea experimentado por todos los servicios conductivos del edificio. Así, los incrementos de potencial serán uniformes, evitándose cualquier peligrosa diferencia de potencial.



**Figura 5. Red equipotencial de tierra creada conectando todas las puestas a tierra con conectores con igual potencial (PEC)**

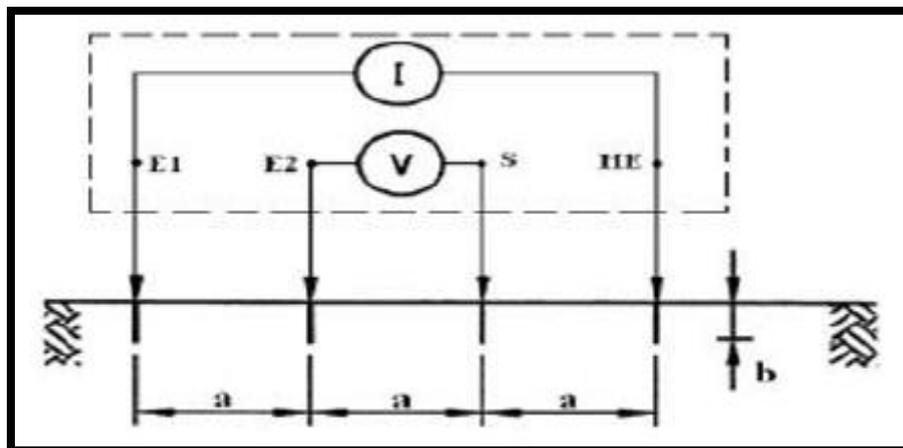
En Colombia, toda instalación eléctrica cubierta por el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas, excepto donde se indique

expresamente lo contrario, debe disponer de un Sistema de Puesta a Tierra (SPT), de tal forma que cualquier punto del interior o exterior, normalmente accesible a personas que puedan transitar o permanecer allí, no estén sometidos a tensiones de paso, de contacto o transferidas, que superen los umbrales de soportabilidad del ser humano cuando se presente una falla.

#### 2.3.4. Método para la medición de resistividad del suelo

##### Método de Wenner

Es el más útil para diseños eléctricos. Es un caso particular del método de los cuatro electrodos, solo que aquí se disponen en línea recta y equidistantes una distancia "a", simétricamente respecto al punto en el que se desea medir la resistividad del suelo, no siendo necesario que la profundidad de los electrodos auxiliares sobrepase los 30 cm. El aparato de medida es un telurómetro clásico con cuatro terminales, siendo los dos electrodos extremos los de inyección de la corriente de medida (I) y los dos centrales los electrodos de medida del potencial (V). En esta metodología se asume que el suelo es homogéneo (18).



*Figura 6. Configuración geométrica del método Wenner*

El principio de funcionamiento se da de la siguiente manera: al introducir una intensidad  $I$  en el terreno a través de los electrodos de corriente "E1" y "HE", aparecerá en los electrodos de tensión "E2" y "S" una diferencia de potencial "V" que se medirá con el aparato.

La relación entre la “V” y la “I” (Ley de Ohm), es el valor de la resistencia variable que se registra en el medidor:

$$R = \frac{V}{I}$$

Entonces el valor de la resistividad aparente que se calculará para un estrato de terreno será:

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

**Donde:**

$\rho$ : resistividad aparente del suelo [ $\Omega$ -m]

R: resistencia medida [ $\Omega$ ]

a: distancia entre electrodos adyacentes [m]

b: profundidad a la que son enterrados los electrodos [m]

Si b es pequeña comparada con “a”, en los casos donde los electrodos solo penetraron una corta distancia en el suelo, la ecuación 2 se puede reducir a:

$$\rho = 2\pi aR$$

La formulación que originalmente hizo Wenner en 1915 de su método establece, además de los espaciamientos entre electrodos ya mencionados, las siguientes consideraciones:

- El diámetro de los orificios donde se colocan los electrodos no debe ser mayor del 10% de la distancia entre los electrodos.
- La profundidad a la cual deben estar enterrados los electrodos debe ser la misma, y debe ser a/20.
- El electrodo debe estar conectado con la tierra únicamente en el fondo del orificio.

## Método de Schlumberger

Es una versión modificada del método de Wenner; este método da una mejor sensibilidad para pruebas a mayores distancias (18).

El proceso de medición de campo consiste en separar progresivamente los electrodos de corriente dejando fijos los de potencial alrededor del punto fijo del arreglo. La profundidad de estudio de las resistividades aparentes del suelo está determinada por la mitad de la separación entre los electrodos de corriente.

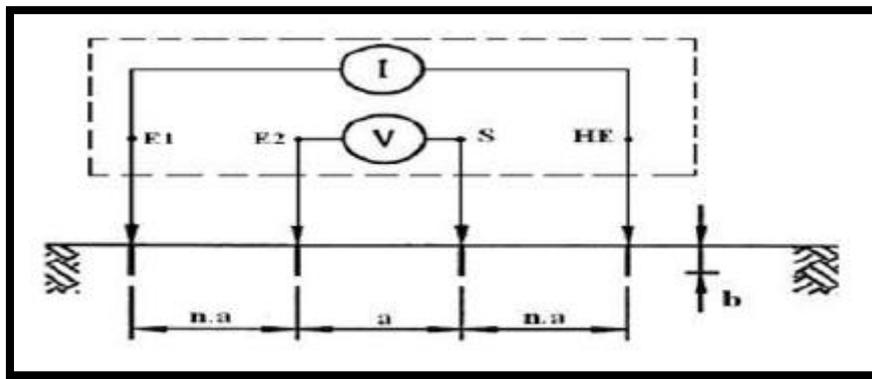


Figura 7. Configuración geométrica del método Schlumberger.

$$\rho = \pi * n * (n + 1) * a * R$$

**Donde:**  $n > 2$

$\rho$ : resistividad aparente del suelo [ $\Omega$ -m]

R: resistencia medida [ $\Omega$ ]

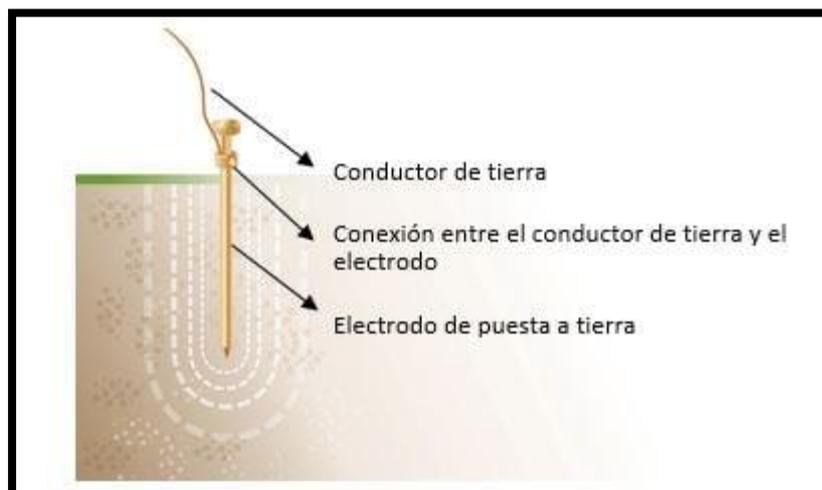
a: distancia entre electrodos adyacentes [m]

### 2.3.5. Electrodo de puesta a tierra

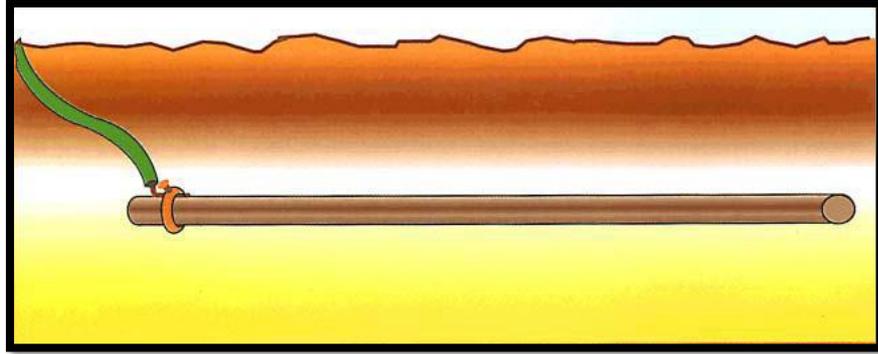
El electrodo de tierra es el componente del sistema de puesta a tierra que está en contacto directo con el terreno, de tal forma que proporciona un medio para botar o recoger cualquier tipo de corrientes de fuga a tierra (19). En sistemas puestos a tierra se requerirá normalmente llevar una corriente de falla bastante grande por un corto período de tiempo y, en consecuencia, se necesitará tener una sección suficientemente grande como para ser capaz de llevar esta corriente en

forma segura. Los electrodos deben tener propiedades mecánicas y eléctricas adecuadas para continuar respondiendo las sollicitaciones durante un periodo de tiempo relativamente largo, en el cual es difícil efectuar ensayos reales o inspección. El material debe tener buena conductividad eléctrica y no corroerse dentro de un amplio rango de condiciones de suelo. Los materiales usados incluyen cobre, acero galvanizado, acero inoxidable y fierro fundido. El cobre generalmente es el material preferido, por las razones que se describirán posteriormente. El aluminio se usa, algunas veces, para conexiones fuera del terreno, pero la mayoría de los estándares prohíben su uso como electrodo de tierra, debido al riesgo de corrosión acelerada. Corrosivo, una capa de óxido deja de ser conductivo y reduce la efectividad de la puesta a tierra. El electrodo puede tomar diversas formas: barras verticales, placas y conductores horizontales. En la figura 8 se observa un conductor de cobre denominado "electrodo" de puesta a tierra, usado generalmente para pozo de tipo vertical (19).

Del mismo modo, en la figura 9 Se muestra una placa conductora (pletina) de cobre desnudo, que se usa generalmente para la instalación de pozo a tierra horizontal.

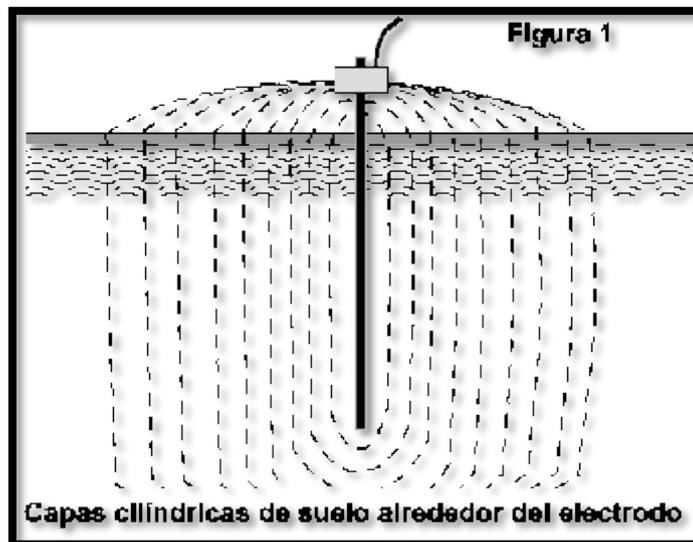


**Figura 8. Electrodo de puesta a tierra**



**Figura 9. Pletina de cobre para pozo horizontal**

La conductividad de los suelos está dada principalmente por los elementos químicos que lo componen y el grado de humedad imperante. Estos valores se encuentran registrados para distintas regiones del país, pero debido a que los mismos presentan grandes variaciones en pequeñas distancias entre dos puntos, es aconsejable medir la resistividad del suelo antes de realizar la proyección de la instalación y luego verificar los valores obtenidos.



**Figura 10. Capas cilíndricas del suelo alrededor del electrodo**

Podemos apreciar cómo la resistencia eléctrica de una puesta a tierra depende especialmente del tipo de suelo, si se considera el suelo en capas cilíndricas que tengan igual espesor circundando al electrodo y presumiendo que el mismo tiene una resistividad eléctrica uniforme, se puede ver claramente que la primera capa alrededor del electrodo es la

que ofrece la mayor resistencia, esto se debe a que posee la menor sección normal al flujo de corriente, cada capa siguiente tiene una sección cada vez mayor y, por lo tanto, menos resistencia eléctrica. A una distancia entre 2,5 o 3,0 metros, la superficie de la capa es tan grande que la resistencia de esta es despreciable si se compara con la de la primera capa.

Como se ha demostrado, la resistencia en el suelo varía inversamente con la sección y, por lo tanto, la resistividad del suelo es un factor preponderante en las primeras capas que se encuentran alrededor del electrodo. Mediciones efectuadas muestran que el 90% de la resistencia eléctrica de los suelos se encuentra en un radio comprendido entre 1,5 a 3,0 metros del electrodo. De lo anterior es que se basa toda la teoría de realizar mejoramiento de los suelos alrededor de los electrodos con productos químicos para disminuir sustancialmente esta resistencia cuando presentan grandes valores de resistencia.

### **2.3.6. Resistencia de electrodos de puesta a tierra en líneas de transmisión**

#### **2.3.6.1. Electrodo o varillas verticales**

Por lo general, esta alternativa de solución se aplica en líneas de transmisión construidas en terrenos de resistividad relativamente baja. De los electrodos verticales el más común es la varilla, muy usado en puestas a tierra de torres de transmisión. El valor de resistencia para varilla vertical se obtiene mediante la siguiente ecuación (17).

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left[ \ln \left( \frac{4L}{r} \right) - 1 \right]$$

**Donde:**

$R$  : resistencia en  $\Omega$

$L$  : largo de la varilla bajo tierra en m

$\rho$  : resistividad del suelo en  $\Omega.m$

$r$  : radio de la varillas en m

De la fórmula se desprende que la resistencia de puesta a tierra del electrodo vertical de varilla depende directamente de la resistividad del suelo y de las dimensiones de los electrodos (longitud y diámetro).

En la práctica, lo más usual es que las varillas de tierra generalmente están hechas de acero galvanizado o de cobre de 2.4 a 3 metros, menos de 25 mm de diámetro, si se aumenta más la profundidad del pozo, los resultados no varían mucho y la instalación resultará más costosa. Al aumentar el diámetro de los electrodos la resistencia de puesta a tierra disminuye, pero a partir de un diámetro de unos 20 milímetros, la variación de la resistencia no es significativa.

### **2.3.6.2. Electrodo horizontales**

Los electrodos horizontales o contrapesos son conductores de acero galvanizado o del tipo Copperweld de gran longitud enterrados longitudinal y radialmente dentro de la franja de servidumbre, como se describe en la figura 11. La utilización de contrapesos es el método más empleado en las líneas de transmisión, porque tienen mayor área de contacto con el terreno, la resistencia disminuirá con el aumento de la longitud y diámetro del contrapeso, los contrapesos se entierran usualmente a una profundidad de 0.6 m y es recomendable que la sección del conductor sea el mismo que el del cable de guarda instalada en la línea de transmisión.

La resistencia al pie de la torre se calcula de acuerdo a la ecuación:

$$R = \frac{\rho}{\pi L} * \left[ \ln \left( \frac{2L}{\sqrt{2rh}} \right) - 1 \right] \quad h \ll L$$

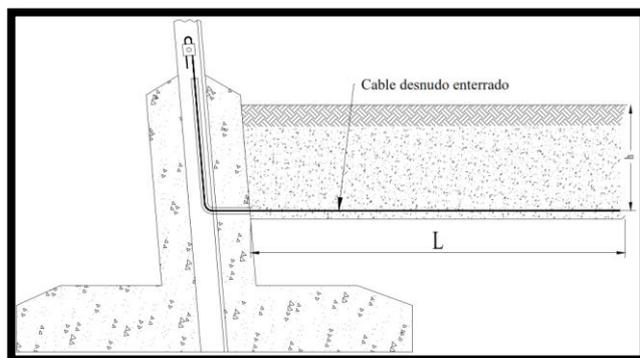
**Donde:**

$\rho$  : resistividad el suelo en  $\Omega.m$

$L$  : longitud total del contrapeso en m, en forma independiente de en cuántas formas divide

$r$  : radio del conductor del contrapeso en m

$h$  : profundidad a la que se entierra el contrapeso en m



**Figura 11. Conductor horizontal enterrado**

Los contrapesos son de uso común y uno de los mejores métodos de puesta a tierra para proteger al sistema de las descargas atmosféricas, ya que ayudan a reducir la impedancia inicial de impulso que se crea en la base de la torre. Esta impedancia de impulso es reducida a su resistencia de dispersión en un período de tiempo dependiendo de la longitud del contrapeso y de la velocidad de propagación de impulso. Se recomienda utilizar varios contrapesos cortos que uno solo de gran longitud, sin embargo, el uso de contrapesos es muy discutible ya que los voltajes creados sobre el piso pueden poner en riesgo a personas que circulen por las cercanías de la torre. De modo que se debe prestar atención con los voltajes de paso que se puedan generar en este tipo de sistemas.

### **2.3.7. Mantenimiento de pozos a tierra**

Un mantenimiento para pozos a tierra es una serie de procesos que ayudan para recobrar sus condiciones óptimas, para que pueda ofrecer la menor resistencia al paso de la corriente eléctrica, de falla o desfogue, esto se refiere al ohmiaje que tuvo al momento de instalarlo (9).

Se explica con un ejemplo simple, una puesta a tierra al momento de su instalación llegó a 7 ohm, esta medida se dio inmediatamente luego de fabricarlo, pero por efecto del tiempo, las condiciones del terreno, etc. Entonces, el mismo pozo a tierra obtiene como resultado un ohmiaje mayor, por ejemplo, 18 ohm, por el valor que da, se entiende que se ha degradado, el dato inicial ya no puede recuperarse por un mantenimiento simple, es decir, si se efectúa el mantenimiento del pozo a tierra, el valor de ohmiaje llegará, por ejemplo, a 8 ohmios, es decir, no se recuperó el valor inicial, pero sí se disminuyó considerablemente de 17 ohm a 8 ohm, siendo un buen resultado del mantenimiento al pozo a tierra aplicado.

El mantenimiento de pozos a tierra es una necesidad habitual, puesto que la protección de las personas y la integridad de las máquinas siempre deben estar a un máximo de rendimiento, de lo contrario, podría afectar la integridad de las personas y perjudicar el funcionamiento de los equipos electrónicos delicados.

En las inspecciones que hace Indeci y en el informe de observaciones eléctricas que formulan los inspectores de esta entidad, regularmente recomiendan la presentación del protocolo de pruebas de pozos a tierra con una antigüedad no mayor de 8 meses.

Por la conveniencia del beneficiario se pueden realizar mantenimientos con un periodo de tiempo más corto, según el estado de preservación de los componentes del pozo a tierra, la humedad del terreno y su PH, el factor de salinidad y la corrosión.

### **2.3.7.1. Soldadura exotérmica**

El problema más relevante en un sistema de puesta a tierra es el aumento de la resistencia al contacto, en la mayoría por empalmes defectuosos, tanto entre los mismos conductores, entre conductores y barras o entre conductores y la superficie.

El incremento de la resistencia por estos empalmes aumenta visiblemente en pocos meses 4 o 5, en un 50% o a veces más, debido a las sulfataciones que se producen por el paso de corriente a través de estos empalmes (20). Para solucionar estos problemas de conexiones se han investigado distintas soluciones, siendo la mejor en muchos aspectos la soldadura exotérmica, con muchísimas ventajas que se presentan a continuación.

### **2.3.7.2. Cemento conductor**

Es un polvo suave, higroscópico conductor, tiene la propiedad de retener una gran parte de la humedad del suelo que lo rodea, luego lo consolida hasta que esta es una y se hace parte del electrodo a tierra (21). Mantiene su estructura como mortero en su área circundante, también disminuye y fija la resistencia del medio, además, también protege a los electrodos de las condiciones ambientales, en especial de los efectos corrosivos, sin perjudicar el medio ambiente.



**Figura 12. Cemento conductivo adherido a una barra**

Como se observa en la figura, el cemento conductivo se instala alrededor de la barra de cobre, protegiéndola y creándose la capa de cemento que la rodeó completamente, con esto se evita la corrosión y otros factores que afectan la integridad de la barra a tierra.

### **2.3.7.3. Mallas a tierra**

Es una forma de instalar un sistema de puesta a tierra, consiste en la unión de varias barras de cobre mediante otro conductor de cobre con el fin de bajar considerablemente la resistencia del sistema (22).

#### **Selección del conductor de la malla**

Para calcular la sección del conductor se aplica la siguiente ecuación:

$$Ac = \left( \frac{33t}{\log \left( \frac{Tm - Ta}{234 + Ta} + 1 \right)} \right)^{\frac{1}{2}}$$

**En donde:**

Ac = sección del conductor (CM)

I = corriente máxima de falla (Amperios)

Tm = temperatura máxima en los nodos de la malla (450 °C con soldadura y 250 °C con amarre pernado)

Ta = temperatura ambiente (°C)

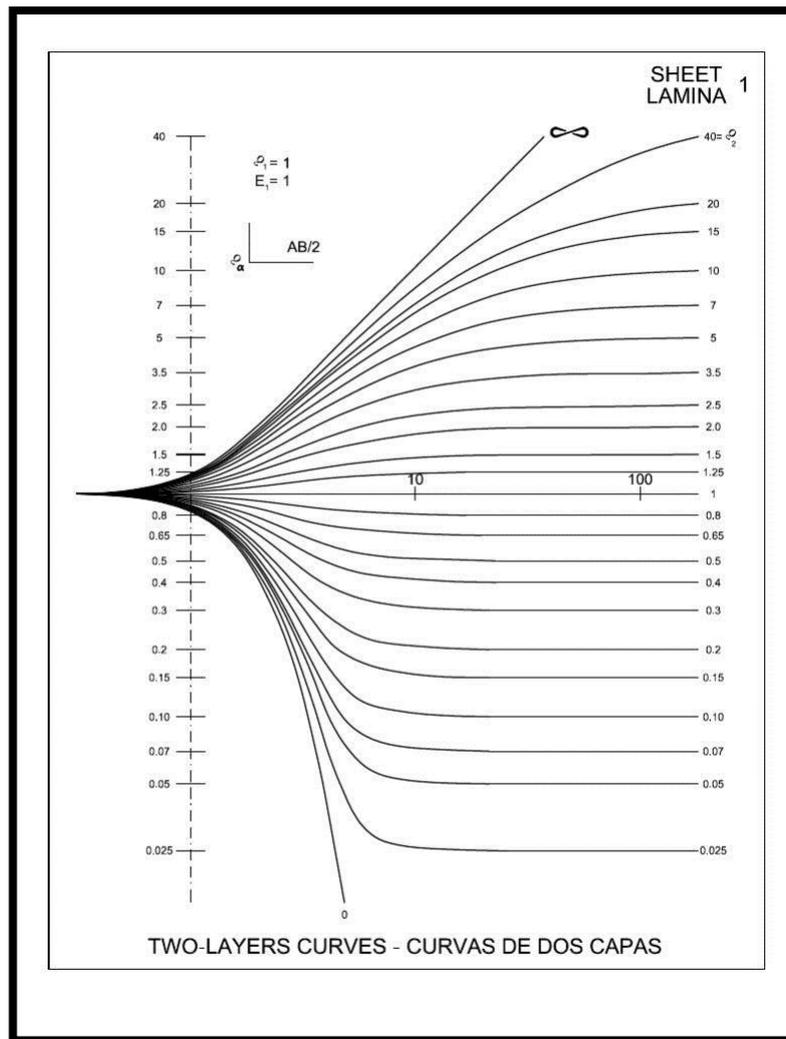
t = tiempo máximo de despeje de la falla (seg)

**2.3.7.4. Curvas de Orellana**

Son una familia de curvas obtenidas a partir de la resistividad del terreno, estas dan una idea más concreta de la calidad geo-eléctrica que tiene el suelo, además es un método comparativo de las diferentes capas o estratos que puede llegar a tener un tipo determinado de terreno y, según esto, se puede calcular con mucha más precisión la resistividad a mucha más profundidad.

Las curvas en general son un modelo matemático, es decir, que las diferentes resistividades encontradas en los diferentes estratos en un determinado terreno se modelaron tomando como ejes la distancia entre los electrodos, medido por el método de Wenner o el de Schlumberger, este sería el eje “x”; las diferentes resistividades ordenadas de menor a mayores medidas en ohm-m, sería el eje “y”.

En la figura 13 se muestran dos curvas, una proyectándose al infinito y otra hacia la resistividad 0, esta gráfica se compara con la curva obtenida por diferentes mediciones del terreno.



**Figura 13. Curva de dos estratos de Orellana**

### 2.3.8. Resistencia de puesta a tierra en líneas de transmisión

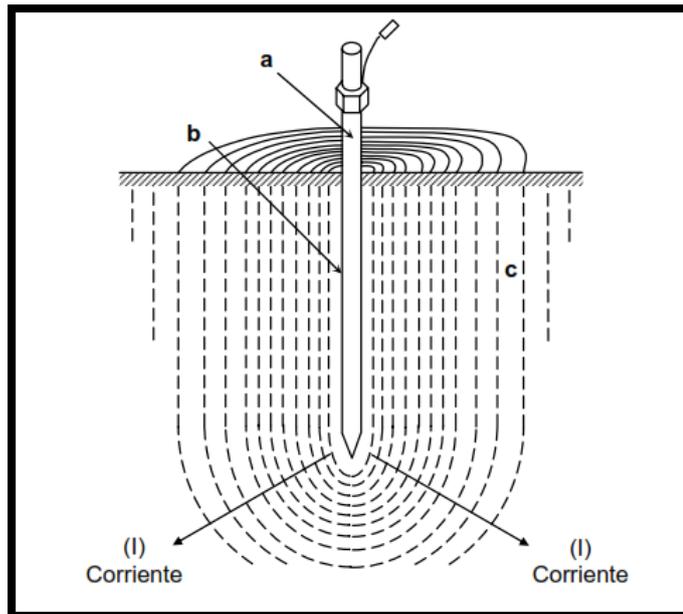
La resistencia de puesta a tierra al pie de la torre resulta un parámetro importante que se tiene en cuenta para el diseño de una línea de transmisión (17). El valor y el comportamiento de resistencia de puesta a tierra está directamente relacionada con la composición natural del suelo, es decir, que el suelo será de resistencia baja cuando sea altamente húmedo, con composición arcillosa y con un alto contenido de minerales conductores. Al contrario, se presentará una alta resistencia de puesta a tierra cuando el suelo sea de composición seca y altamente rocosa, lo que implica que la resistencia de puesta a tierra puede variar con la época del año.

Un sistema de puesta a tierra se comporta como una resistencia cuando el terreno recibe una corriente de falla a frecuencia industrial. El valor de resistencia de puesta a tierra que representa un electrodo o arreglo de electrodos está constituido y afectado, por lo general, por los siguientes factores:

- La resistencia de los conductores que la componen (electrodo de puesta a tierra, cable de tierra, etc.) y la resistencia de las conexiones o empalmes (conectores, soldadura, etc.).
- La resistencia de contacto entre el electrodo y el suelo.
- La resistividad del suelo.

De los factores mencionados el más influyente es la resistividad del suelo que está ligada a la composición natural del suelo, ya que de acuerdo a sus cualidades, puede variar su capacidad conductiva, la resistencia propia del electrodo es muy baja debido a que los electrodos son fabricados de un material muy conductivo. En cuanto a la resistencia de contacto del electrodo con el terreno, también es baja siempre y cuando se garantice que el electrodo se encuentre limpio, libre de cualquier material aislante (pintura, grasa, etc.) y que se encuentre perfectamente enterrado.

Como se observa en la figura 14, la resistencia total es la suma de todos los factores antes mencionados y de todas las capas de suelo en serie. A medida que aumenta la distancia desde el electrodo, el área transversal de las capas es mayor, lo que produce menor resistividad al paso de la corriente, entonces, se deduce que la resistencia de puesta a tierra radica esencialmente en las capas de suelo más próximas al electrodo.



**Figura 14. Componentes de la resistencia puesta a tierra del electrodo**

Para corrientes menores a frecuencia industrial y con valores de resistividad del suelo baja, los efectos capacitivos y la ionización del suelo son despreciables; por lo tanto, la puesta a tierra se comporta con una resistencia.

Para el caso de corrientes de altas frecuencias, es necesario considerar el efecto capacitivo, principalmente, en suelos de altas resistividades. Ondas de impulso, sufren igualmente la oposición de la reactancia inductiva de las conexiones al penetrar en el suelo; por lo tanto, no se debe hablar de una resistencia sino de una impedancia que más adelante se discutirá detalladamente.

### **2.3.9. Protección contra descargas atmosféricas**

Las sobretensiones se deben al efecto inductivo y conductivo de la descarga sobre las líneas de distribución eléctrica cuando cae un rayo en forma directa o en su entorno cercano.

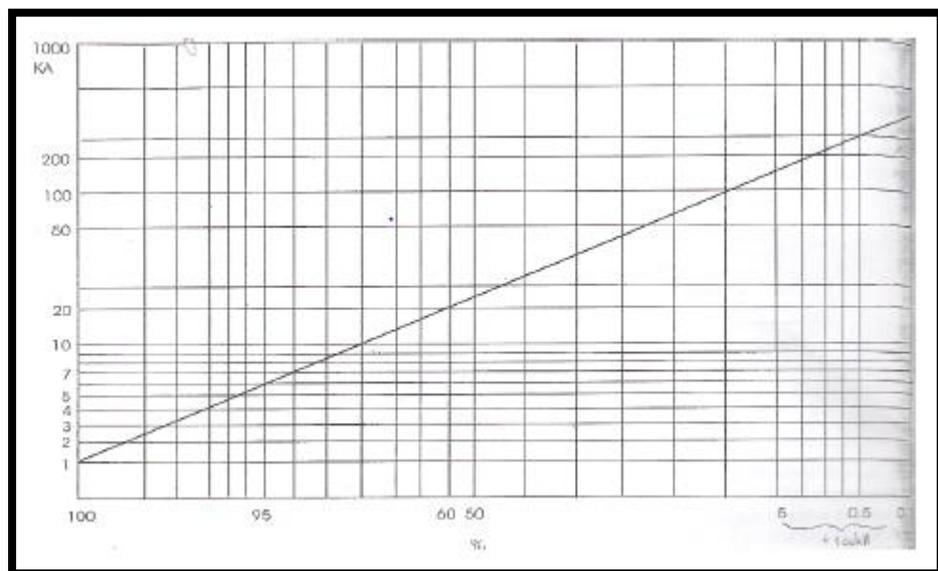
Dada la gran variabilidad de la trayectoria y el valor de las descargas eléctricas de los rayos, que pueden alcanzar 200 kA, cualquier dispositivo de protección frente a ellos es prohibido. La mayor amenaza

de los efectos inducidos y radiados del rayo cubren un espacio considerablemente más amplio que el punto de caída. Los efectos secundarios de un rayo a cierta distancia (1 km a la redonda) del punto de caída también son considerables.

### 2.3.9.1. Características de las descargas atmosféricas

Los rayos pueden alcanzar intensidades de 200 kA (ocasionalmente 500 kA) con una energía media disipada por el canal de descarga de 10 J/m.

No es factible ni rentable proteger un circuito contra la caída de un rayo directo, pero si es factible la protección de circuitos contra los efectos del 95% de las descargas y contra sus efectos secundarios que se estiman en voltajes de más de 5 kV y corrientes de unos 6 kA (23). La figura muestra las distintas intensidades de campo a diferentes distancias del punto de caída.



**Figura 15. Distribución de las intensidades de caídas del rayo**

Con la finalidad de asegurar el funcionamiento confiable del equipo electrónico, las computadoras, los equipos médicos computarizados, los enlaces de computadoras (LAN), los sistemas de voz/datos y otro delicado dispositivo electrónico, se debe

proveer protección efectiva contra rayos, especialmente en áreas de alto índice de descarga.

Un buen sistema de protección contra descargas atmosféricas debe drenar la energía del rayo a tierra para evitar que circule por los cables y a través del equipo electrónico sensible. Tanto el equipo como el edificio, o en el caso de un sitio de telecomunicaciones, la torre y los equipos ubicados en ella, deben estar correctamente protegidos de acuerdo con las normas del Código.

#### **2.3.9.2. Sistema de protección contra descargas atmosféricas**

Los sistemas de protección contra rayos consisten en las siguientes partes básicas para proporcionar la baja impedancia requerida (23).

- Antenas de captación (varillas pararrayos) ubicadas sobre el techo y otras puertas elevadas.
- Un sistema de electrodos de tierra
- Un sistema de conductores que se conectan al sistema de electro de tierra.

Estos tres componentes del sistema de protección, al interceptar, conducir y disipar la descarga principal del rayo, no aseguran que no habrá posibles efectos secundarios de la descarga. Por lo tanto, se requieren conductores secundarios para interconectar los objetos metálicos y mantenerlos al mismo potencial a fin de evitar el salto del arco.

También es necesario utilizar dispositivos de protección contra los sobrevoltajes transitorios producidos por los rayos, para la protección de conductores y el equipo conectado a estos. Asimismo, se pueden usar las piezas metálicas de estructuras como parte del sistema de protección, como ocurre en una torre de comunicaciones.

El objetivo principal del sistema es interceptar la descarga inmediatamente encima del objeto o estructura que tienen más probabilidades de estar expuestos al impacto, a fin de proporcionar un camino directo a tierra, es decir, el objetivo es dar a la descarga un camino a tierra en lugar de que busque direcciones diferentes a la natural.

Es importante destacar que una baja resistividad del suelo es deseable, pero no esencial. Si se compara un sistema en suelo de arcilla con baja resistividad y el otro en suelo rocoso, se puede establecer que en los dos hay un buen sistema. Para el primero, un esquema simple proporciona los medios para coleccionar y disipar la energía del rayo. Para el sistema en suelo rocoso el método más práctico es colocar una red de conductores extendidos sobre la roca, alrededor del edificio, y conectados al conductor bajante. Este sistema produce los mismos resultados que el primero, ya que también se encuentra sobre suelo conductivo.

En la actualidad, es posible establecer una clasificación de niveles de protección contra efectos de las descargas atmosféricas, tanto directos como indirectos: el nivel primario lo constituyen las varillas pararrayos, el sistema de interconexión y conductores bajante, lo mismo que la puesta a tierra; el nivel secundario es el equipo o sistema y, el terciario, emplea tarjetas de circuito integrado.

Los sistemas de protección contra rayos más utilizados están clasificados así:

- Sistema de conducción
- Sistema de atracción
- Sistema de disipación

Los sistemas de conducción y atracción tratan de atraer la descarga del rayo. Para lograrlo proveen una trayectoria de

descarga de baja impedancia a tierra que mantienen lejos la estructura que protegen.

El sistema de conducción usa varillas de pararrayos y el de atracción emplea un isótopo radiactivo o un indicador iónico para atraer el rayo. El sistema de disipación usa gran cantidad de pequeños puntos metálicos para crear un campo pasivo ionizado con el fin de tratar de descargar continuamente el campo eléctrico creado por la tormenta. El objetivo es mantener este campo en el área del disipador para que no alcance el punto de centello, y así prevenir una descarga a la estructura protegida.

### **2.3.10. El sistema de protección**

Se define al sistema de protección como una combinación de equipos de protección destinados a la obtención, bajo condiciones predeterminadas, por lo general anormales, de la desconexión de un elemento de un sistema de energía, o para dar una señal de alarma, o ambos.

#### **2.3.10.1. Características de un sistema de protección**

Un sistema de protecciones en grupo, así como cada uno de los elementos de protección que lo constituyen debe cumplir ciertas características para su correcto funcionamiento, que son explicadas a continuación (24).

##### **Sensibilidad**

La protección debe ser capaz de detectar condiciones de operación anormales en los equipos de potencia, por más incipientes que estas sean.

##### **Selectividad**

La protección debe ser capaz de detectar todas las fallas que ocurran en su zona de operación, sin embargo, requiere una

debida coordinación con las protecciones ubicadas en las zonas adyacentes.

### **Rapidez**

Una vez detectada la falla, esta debe ser despejada lo más pronto posible, con el fin de reducir los daños que se producirán en los diferentes elementos del sistema de potencia, al disminuir el tiempo de permanencia bajo condiciones anómalas.

### **Confiabilidad**

Es la probabilidad que la protección responda siempre correctamente.

No se debe confundir respuesta con operación, puesto que una protección al no operar durante condiciones normales significa que está respondiendo correctamente.

La función objetivo del ajuste y la coordinación de la protección, será la total selectividad con la máxima sensibilidad y velocidad. Sin embargo, en la realidad, estas características no pueden ser todas maximizadas de manera independiente, ya que están relacionadas entre sí.

Cuando se incremente una de ellas lo más probable es que se disminuyan las otras dos.

#### **2.3.10.2. Objetivo de las protecciones**

Los dispositivos de protección deben cumplir los siguientes objetivos dentro de un sistema eléctrico (25):

- Resguardar de manera efectiva a los equipos y al sistema eléctrico.
- Cubrir de manera total e interrumpida al sistema, supervisándolo todo del tiempo, evitando dejar zonas sin protección.

- Minimizar la influencia negativa de los efectos producidos por las fallas sobre los equipos.
- Monitorear continuamente las variables del sistema (V, I, P, f, Z) a fin de detectar condiciones de falla.

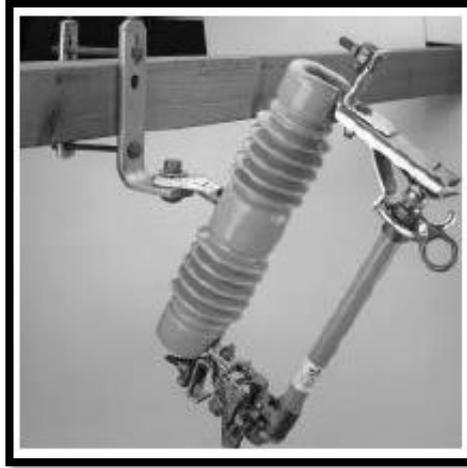
### **2.3.11. Dispositivos de protección**

#### **2.3.11.1. Fusibles**

Se puede decir que es uno de los dispositivos de protección más utilizado y confiable dentro del sistema de protección (3). Realizan diferentes funciones como:

- Sentir cualquier subida de corriente en el sistema protegido.
- Interrumpir sobrecorrientes.
- Soportar voltajes transitorios de recuperación para no permitir reignición (extinción controlada del arco).

Cuando por el fusible circula una sobrecorriente, el intervalo de tiempo desde que se detecta, hasta que empieza a fundirse se denomina “tiempo mínimo de fusión”, y el intervalo de tiempo que termina en fundirse todo el fusible se denomina “tiempo máximo de despeje”. La principal limitación de un fusible es, siempre que esté sometido a una corriente superior a su mínima corriente de fusión, se funde y queda sin servicio la parte del sistema más allá de este, esta interrupción se da hasta que un técnico llegue y analice el tipo de falla y reponga dicho fusible.



*Figura 16. Porta fusible L*

### **2.3.11.2. Reconectores**

Los reconectados son dispositivos automáticos de recierre de un circuito cuando se produce una falla temporal en el mismo. Son diseñados para soportar corrientes de cortocircuito, también poseen un sistema de control capaz de medir la corriente de línea que están protegiendo en caso de que se produzca una falla abren o cierran circuito en una secuencia predeterminada. Si la falla persiste después de ejecutada la secuencia de apertura y cierre, el reconectado se encarga de aislar el resto del sistema (26).

Los reconectados se clasifican de acuerdo a la técnica de extinción del arco utilizado, existen los demás hilos de aceite mineral y el tipo de control que utilizan para ejecutar la secuencia control para ser hidráulico electrónico.



**Figura 17. Reconectador trifásico**

### **2.3.11.3. Relés diferenciales**

Es el único dispositivo ideado para la protección de personas y protección contra contactos indirectos, debe tener una correcta toma de tierra para garantizar su óptimo funcionamiento. Su misión es detectar de una intensidad de defecto ( $I_{def}$ ), que es una intensidad que surge cuando ocurre un defecto en la instalación, ya que en ninguna circunstancia debe circular corriente por el conductor de tierra, este dispositivo es capaz de detectar la diferencia entre la intensidad de entrada y la de salida, abriendo sus contactos cuando los valores de estas intensidades no coinciden (26). Una de las características principales es la sensibilidad que tiene para detectar el mínimo valor de intensidad de defecto.



*Figura 18. Relés diferenciales*

#### **2.3.11.4. Batería de alimentación**

Garantiza la continuidad del suministro de la energía necesaria para el funcionamiento de la protección. Por tanto, los requerimientos que se deben asegurar en este elemento son la confiabilidad y la autonomía, lo cual se logra con baterías permanentemente conectadas a través de un cargador a la línea de corriente alterna de los servicios auxiliares de la subestación (27).

#### **2.3.11.5. Transformadores de medida para protección**

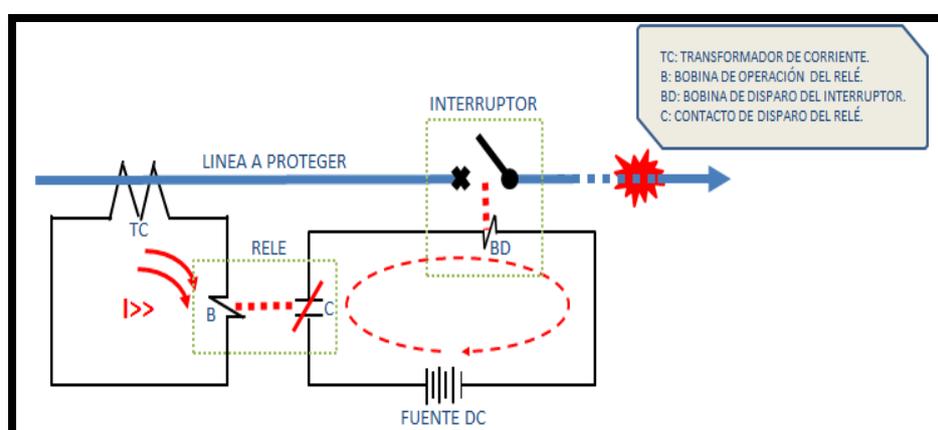
Un relevador de protección necesita señales de entrada para evaluar en cada instante el comportamiento del sistema que está protegiendo. Dichas señales pueden ser corrientes o tensiones. Sin embargo, teniendo en cuenta las magnitudes elevadas que pueden alcanzar estos parámetros durante fallas en el sistema eléctrico, se utilizan transformadores de medición con el fin de lograr una atenuación de estas señales (27).

La señal se atenúa en el secundario del transformador de medición, con un determinado error de precisión. Una característica que representa este error es la clase de precisión del transformador.

### 2.3.11.6. Interruptor automático

Es el elemento que permite abrir o cerrar un circuito bajo tensión, interrumpiendo o estableciendo una circulación de intensidad de corriente. Opera bajo el control de la protección y su apertura, coordinada con la de otros interruptores, permite aislar el punto en que se ha producido la falla (27). Está conformado por:

- ✓ Circuito de control, gobernado por la protección correspondiente.
- ✓ Contactos principales, que al separarse o juntarse implican, la apertura o cierre del interruptor, respectivamente.
- ✓ Contactos auxiliares, que reflejan el estado en que se encuentra el interruptor. Mediante ellos se realimenta a la protección y a otros equipos con la información de si el interruptor está abierto o cerrado y, por tanto, permiten conocer si el interruptor ha operado correctamente siguiendo la orden dada por la protección.
- ✓ Cámara de extinción, en la que se crea un ambiente de alta rigidez dieléctrica, necesaria para la extinción del arco que se genera durante la separación de los contactos del interruptor, los cuales se encuentran inmersos en ella. Actualmente se emplea el aceite, el gas hexafloruro de azufre ( $\text{SF}_6$ ) o el vacío, como medios dieléctricos.



**Figura 19. Circuito básico de operación de un sistema de protección contra sobrecorriente**

### **2.3.12. Subestación eléctrica**

Una subestación eléctrica es una parte de un SEP, nace con la finalidad de encontrar una solución de transporte a la energía eléctrica trasladado a grandes distancias, puede ser de transmisión, transformación o distribución. La subestación debe establecer y modificar parámetros y niveles de tensión para que pueda ser transportada y distribuida garantizando suministro constante, confiabilidad y estabilidad. También se dice del conjunto de equipos primarios concentrados en un espacio geográfico suficientemente distribuido de acuerdo a su nivel de tensión que son operados, controlados y protegidos por intermedio de dispositivos automáticos.

#### **2.3.12.1. Equipamiento primario utilizado**

Se entiende por equipos primarios a los equipamientos robustos y mejorados con aleaciones para reducir peso y costo, con alta durabilidad y mejor presentación estética de los dispositivos, de preferencia que su operación y ubicación los sitúe en el patio de maniobras (28). Las definiciones de los términos más empleados se presentan a continuación.

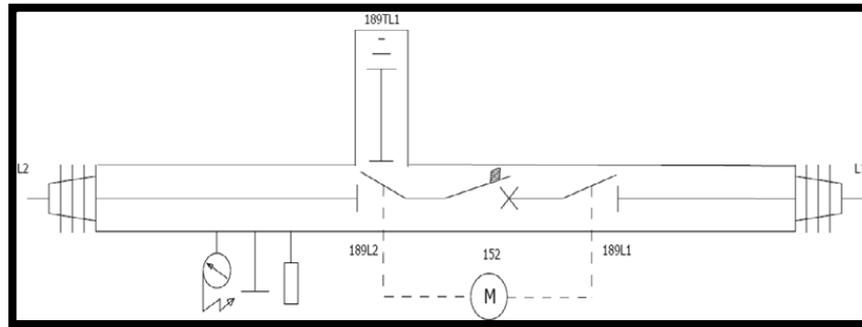
##### **a) Equipos de maniobra**

Son aquellos conjuntos que presentan los cambios de situación operativa para abrir o cerrar los equipamientos o instalaciones, con igual o diferente nivel de tensión y se encuentran en un mismo sector del patio de maniobras.

##### **b) Interruptor de tipo híbrida PASS**

El PASS es un dispositivo eléctrico encapsulado con hexafluoruro de azufre conocido como gas SF<sub>6</sub> tiene numerosas configuraciones, incluida una barra colectora, una barra colectora doble, un interruptor automático doble, una aplicación ferroviaria, un compartimento de conmutador configurado en H preensamblado y otras configuraciones personalizadas posibles. Internamente está compuesto por interruptor, seccionadores de

línea y cuchilla a tierras, incluye todas las funciones de un compartimento de distribución completo en un solo módulo.



**Figura 20. PASS 75 kV Gas SF<sub>6</sub>, descripción eléctrica**

### c) Interruptores de potencia

Dispositivo electromecánico, su funcionamiento es el seccionamiento de circuitos (cierre y apertura) sea por operación o a la protección ante fallas, con capacidad de tener *recierres*, también podrán aislar componentes de un sistema para realizar mantenimientos.

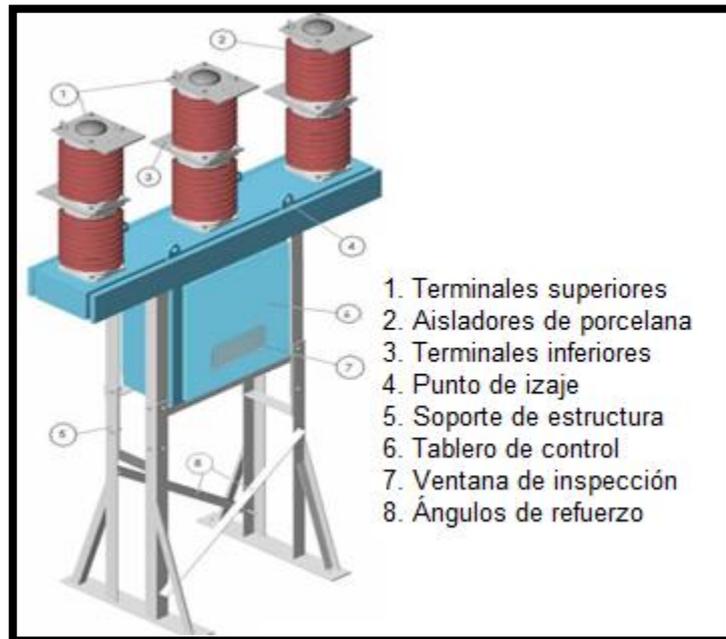
Su infraestructura de control está diseñada y habilitada para:

- Iluminación y calefacción
- Alimentación del motor
- Alarma y bloqueo por baja SF<sub>6</sub>
- Selector local/ remoto/desconectado
- Circuito para cierre y supervisión
- Circuito para apertura y de disparos con supervisión

Dentro de sus principales características es la forma de la extinción del arco eléctrico, según su cámara extintora se puede diferenciar los distintos tipos:

- Interruptores de intemperie (aire)
- Interruptores de aceite
- Interruptores de gas SF<sub>6</sub> (hexafluoruro de azufre)

- Interruptores de vacío



**Figura 21. Interruptor de 36 kV 800 A, 50/60 Hz, Gas SF<sub>6</sub>**

La operación de un interruptor es por dos maneras; puede ser de manera manual o accionada por unas bobinas preparadas para el mando de apertura y cierre.

#### **d) Transformador de potencia**

Es una máquina eléctrica estática mediante un campo magnético, que permite elevar o reducir la tensión sin modificar su potencia y a una misma frecuencia. Son sumergidos en aceite, están constituidos por 4 partes; los aisladores, el tanque de expansión, la cuba y los radiadores. La siguiente figura muestra a un transformador de potencia pudiendo distinguirse las partes indicadas. Todos los sistemas auxiliares asociados al transformador que operan con alimentación para el control serán definidos como equipamiento secundario y estos serán:

- Protecciones propias del transformador
- Alimentación auxiliar
- Refrigeración
- Control del cambiador de tomas



**Figura 22. Transformador de potencia 10 MVA**

Su principio de funcionamiento está basado en la inducción electromagnética por dos y hasta 3 bobinas o devanadas sobre una plataforma cerrada de hierro silicio, la potencia que ingresa es la potencia que sale en un transformador ideal, pero las máquinas reales presentan un pequeño porcentaje de pérdidas, según diseño.

#### **e) Transformadores de medida o instrumentación**

La finalidad de estos transformadores es simplemente reducir los altos rangos de corriente y tensión que son llamado como valor primario en valor secundario, y estos pueden ser en el caso de los TC de 1 o 5 A, y en las TT de  $100\sqrt{3}$  o  $115\sqrt{3}$  V, por lo tanto, esos valores son más fáciles de poder operarlos en los equipos de protección y medida.

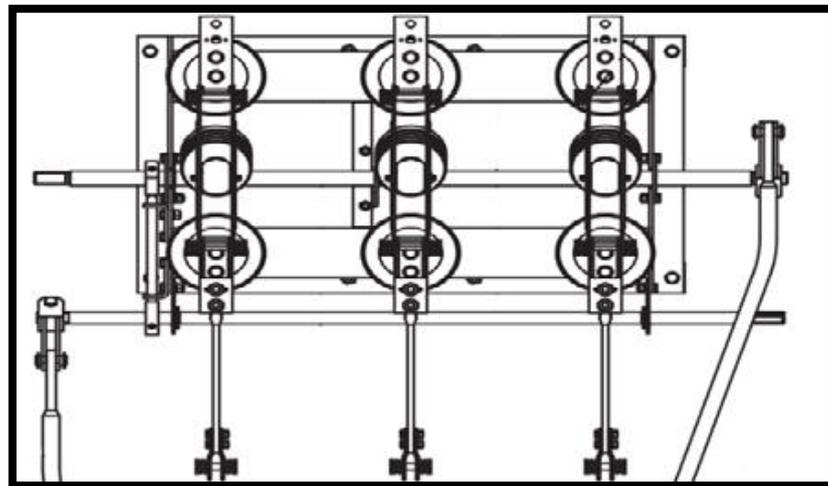
Estos transformadores de medida para tensión y corriente son dispositivos determinantes y fundamentales en todo sistema de protección, la precisión que recoge la tensión y corriente es básica para tener una correcta operación.



**Figura 23. Transformadores de medida (corriente y tensión)**

#### **f) Seccionadores con puesta a tierra (SPT)**

Equipo de seccionamiento para cortocircuitos o aterramiento por necesidad de operación y seguridad. Estos seccionadores solo deberán operar bajo dos condiciones, cuando el interruptor está abierto y exista ausencia de tensión en la línea, se recomienda operar manualmente. Su equipamiento de control está diseñado para ser implementado por un sistema de bloqueo manual y bobina en 125 Vcc., sistema anticondensación 220 Vac.



**Figura 24. Seccionador con cuchilla a tierra**

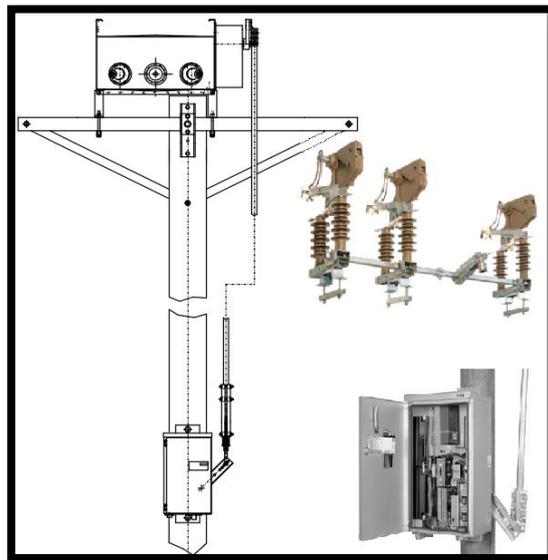
#### **Seccionadores de barra y línea (SB, SL)**

Al igual que los SPT su construcción facilita visualizar el corte del circuito al ser operado. Son construidos de fierro acerado. Los seccionadores esta diseñados para maniobrase sin carga, ya

que su velocidad de operación es lenta, están previstos para poder abrir y cerrar circuitos con corrientes residuales. Su operación es para aislar componentes de un sistema para realizar un mantenimiento.

Estos son los circuitos en los seccionadores vinculados al sistema de control y protección:

- Circuito de mando
- Alimentación del motor
- Bobina de bloqueo local (opcional)
- Selector desconectado/ remoto/ local
- Iluminación y calefacción



*Figura 25. Seccionador de 36 kV 800 A, modelo ONIII 30 W/8-2*

### **2.3.13. Condiciones anormales de operación**

Son condiciones donde los dispositivos de protección deben operar si existe variación de los parámetros eléctricos en su valor nominal y se consideran un peligro para la estabilidad y la vida útil de los componentes eléctricos del sistema.

Las condiciones anormales más frecuentes son: sobrecargas, cortocircuitos y descargas atmosféricas (29).

### 2.3.13.1. Sobrecargas

Las sobrecargas se definen como corrientes que son mayores que el flujo de corriente nominal de la línea o equipo. Están confinadas a la trayectoria normal de circulación de corriente, que pueden causar sobrecalentamiento del conductor o equipo si se permite que continúe circulando.

Las principales causas que producen una sobrecarga son las siguientes:

- Fugas de corriente por malas condiciones de aislamiento.
- Excesos de carga, ya sea por picos de cargas posibles.

### 2.3.13.2. Cortocircuitos

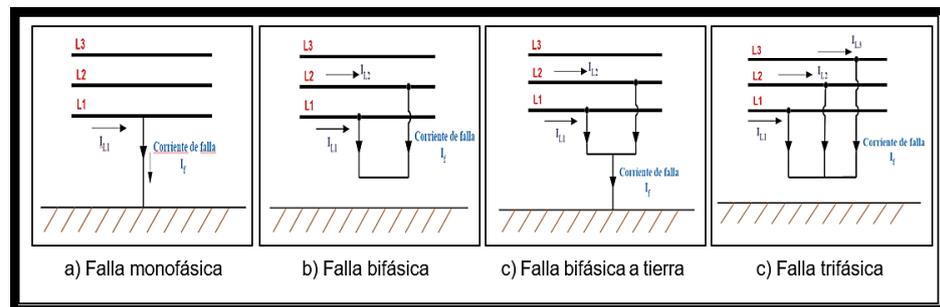
Son fenómenos eléctricos ocasionados por la unión accidental o intencional de muy baja resistencia entre dos o más puntos de diferente potencial de un mismo circuito. Este puente de conducción que se forma induce un incremento enorme en la corriente, provocando mucho daño y un deterioro en todos los elementos del sistema eléctrico (30).

Además, los sistemas eléctricos pueden ocurrir de diferentes tipos de fallas por cortocircuito, representados en la figura siguiente y se dividen en:

**Cortocircuito monofásico a tierra:** este tipo de cortocircuito es el más común (aproximadamente del 80%) y se produce cuando un conductor de fase energizado entra en contacto con tierra.

a) **Cortocircuito bifásico:** el cortocircuito tiene lugar cuando los conductores de dos fases distintas hacen contacto entre sí, su probabilidad de ocurrencia es del 8%.

- b) **Cortocircuito bifásico a tierra:** la condición de falla tiene lugar cuando los conductores de dos fases distintas hacen contacto entre sí y tierra. El porcentaje de ocurrencia es del 5%.
- c) **Cortocircuito trifásico:** este tipo de cortocircuito se origina cuando los tres conductores de fases entran en contacto entre sí. Son los cortocircuitos menos frecuentes (aproximadamente el 2% o menos).



**Figura 26. Tipos de cortocircuito**

### 2.3.13.3. Descargas atmosféricas

Los rayos o descargas atmosféricas pueden originar sobretensión que termina provocando un fallo en la línea aérea afectada o su propagación por la línea hasta provocar una avería en un dispositivo eléctrico.

### 2.3.14. Efectos de la sobrecarga

La aplicación de cargas que exceden el nivel de las especificaciones de placa (sobrecarga) involucra cierto grado de riesgo. A continuación, se enumeran las áreas de riesgo que hay que tomar en consideración cuando se carga grandes transformadores por encima del nivel de las especificaciones de placa.

- a) La evolución de gas libre proveniente del aislamiento del bobinado y de los conductores terminales (conductores aislados) calentados por la carga y por las corrientes de Foucault, pueden hacer peligrar la integridad dieléctrica.

- b) La evolución de gas libre proveniente del aislamiento adyacente a las partes metálicas vinculadas por el flujo electromagnético producido por el devanado o corrientes inducidas puede también reducir la rigidez dieléctrica.
- c) La operación a una alta temperatura causará una disminución en la resistencia mecánica. Tanto del aislamiento del conductor como de la estructura. Estos efectos son más preocupantes durante los períodos de sobrecorriente transitoria (en falla) cuando los esfuerzos mecánicos alcanzan sus niveles más altos.
- d) La expansión térmica de conductores, materiales aislantes, o partes estructurales a altas temperaturas; puede dar como resultado deformaciones permanentes que podrían contribuir a ocasionar fallas mecánicas o dieléctricas.
- e) La presión acumulada en los *bushings*, para corrientes por encima del nivel especificado, pueden dar como resultado el filtrado / goteo de empaquetaduras, pérdida de aceite y, finalmente, una falla dieléctrica.
- f) Un incremento en la resistencia de contactos en los cambiadores de TAP, puede dar como resultado el acumulamiento de productos de la descomposición del aceite en una región de alta temperatura localizada en el punto de contacto cuando el cambiador de TAP es sobrecargado. En caso extremo, esto puede dar como resultado una condición de embalsamiento térmico con formación de arcos en los contactos y una evolución violenta de gas.
- g) El equipo auxiliar interno dentro del transformador como los reactores y transformadores de medida pueden también estar sujetos a algunos de los riesgos identificados anteriormente.
- h) Cuando la temperatura de la parte superior del aceite excede los 105 °C, existe la posibilidad de que la expansión del aceite sea mayor que la capacidad contenedora del tanque y puede también dar como resultado una presión que ocasione que entre en operación el dispositivo de desahogo de presión expulsando al aceite. La pérdida de aceite puede igualmente crear problemas en el sistema de conservación del aceite o exponer partes eléctricas durante el enfriamiento.

### **2.3.14.1. Efectos de la temperatura en los cambiadores de TAP**

#### **Cambiadores de TAP para una operación en vacío**

La elevación de temperatura dependerá del diseño de los contactos y de la condición de estos cuando ocurre una carga (31).

A pesar de que tienen una cierta capacidad de sobrecarga cuando son nuevos, esta capacidad puede ir disminuyendo debido a la formación de una película fina en los contactos que ocurre durante un servicio normal.

Una vez que un contacto alcance una temperatura crítica, puede producirse una condición de embalsamiento térmico. Los contactos se sobrecalientan y se forma un depósito alrededor de ellos, incrementando su resistencia hasta que, finalmente, alcanza una temperatura que genera gas. Esto producirá una alarma de gas en el mejor de los casos. Sin embargo, el gas puede ocasionar la interrupción dieléctrica del transformador.

#### **Cambiador de TAP en carga**

Las especificaciones actuales para un LTC incluyen lo siguiente:

- Límite de elevación de temperatura de 20 °C para cualquier corriente que lleva contacto con aceite cuando opera a 1.2 veces la corriente nominal máxima del LTC.
- Capacidad de soportar 40 operaciones de ruptura a dos veces la corriente y kVA máximos. Los oscilogramas graficados en cada operación indicarán que en ningún caso el momento de producir arcos es tal que haga peligrar la operación del aparato.

Las normas permiten a los contactos de los cambiadores de TAP funcionar en aceite a 100 °C con una elevación de temperatura de 20 °C a 1.2 veces las especificaciones nominales. Además, la experiencia ha demostrado que comienza a formarse carbono en los contactos en el aceite a temperaturas elevadas (del

orden de 120 °C). La gravedad de esta formación de carbono depende de la acción de fricción de los contactos de conmutación, de la frecuencia con que tiene lugar la operación de conmutación, y del tiempo en que persiste esta temperatura.

#### **2.3.15. Sistemas eléctricos de distribución**

El sistema eléctrico lo comprende la generación, la transmisión y la distribución. El sistema eléctrico de distribución permite el transporte de energía eléctrica desde una subestación de distribución hasta los puntos de consumo, con equipos eléctricos que trabajan con voltajes desde los 120 V hasta los 13800 V. Por razones de economía y simplicidad de protección, los sistemas de distribución generalmente se disponen en forma radial, es decir, con un flujo de energía unidireccional desde la subestación hacia las cargas (32).

La distribución de energía eléctrica debe realizarse de tal manera que el cliente reciba un servicio continuo, sin interrupciones, con un valor de voltaje adecuado que le permita operar sus equipos de forma eficiente y con redes bien diseñadas que soporten el crecimiento propio de cargas y que, además, sus componentes sean de la mejor calidad para que resistan el efecto del campo eléctrico y los daños de la intemperie a las que se verán sometidas durante su vida útil (33).

#### **2.3.16. Estructura de un sistema eléctrico de distribución**

Básicamente un sistema de distribución de energía eléctrica consta de equipamientos eléctricos como: subestación de distribución, circuitos de medio voltaje, transformadores de distribución, circuitos de bajo voltaje, acometidas y medidores (29).

##### **2.3.16.1. Subestaciones de distribución**

Están conformadas por transformadores, interruptores, seccionadores, relés, entre otros, cuya función es reducir los niveles de alto voltaje de las líneas de transmisión o

subtransmisión hasta niveles de medio voltaje para su ramificación en múltiples salidas.

### **Circuitos de medio voltaje**

Son circuitos eléctricos que parten de las subestaciones de distribución y proporcionan la potencia eléctrica a los transformadores de distribución, también llamados alimentadores primarios cuyo nivel de voltaje es de (13,8 kV o 22 kV), conformados por una troncal principal y derivaciones.

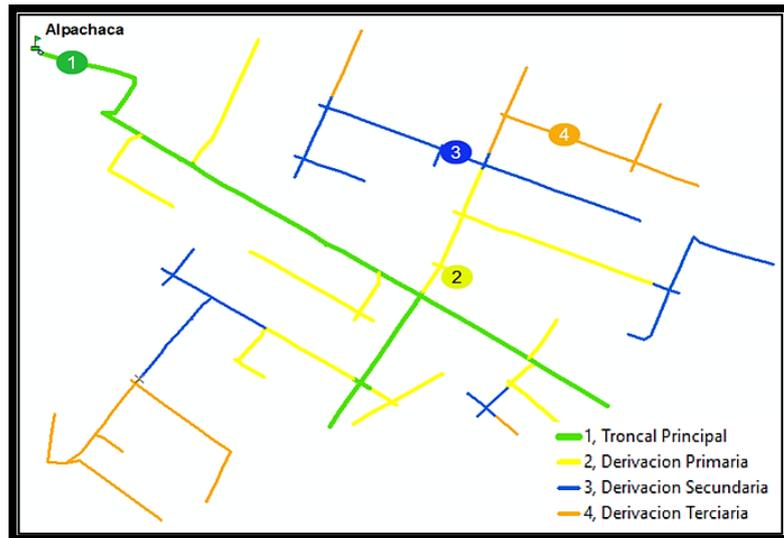
### **Troncal**

La troncal principal se define como el circuito primario trifásico de mayor extensión que parte desde la subestación y distribuye la energía a lo largo de su recorrido hacia las derivaciones, se procura que esté lo más despejado posible ya que únicamente estará protegido por el relé de la subestación y reconectores, de ser el caso.

### **Derivaciones**

Las derivaciones son los tramos monofásicos o trifásicos del alimentador primario energizados desde la troncal principal, las que pueden ser derivaciones primarias, secundarias y terciarias, en las que van conectados los transformadores de distribución y acometidas en medio voltaje.

En la figura se muestra la estructura de un alimentador primario, que consta de una troncal principal y derivaciones primarias, secundarias y terciarias.



**Figura 27. Topología de un circuito de medio voltaje o alimentador primario**

### **Transformadores de distribución**

Son los equipos encargados de reducir el voltaje de los alimentadores primarios a niveles de voltaje de utilización (120/240 V monofásico o 127/220 V trifásico) de los consumidores. El transformador de distribución es el elemento que enlaza la red primaria (alimentadores) con la red secundaria de distribución.

### **Circuitos de bajo voltaje**

Se denomina circuitos de distribución de bajo voltaje o alimentadores secundarios a las líneas que distribuyen la energía del circuito secundario del transformador de distribución a los usuarios o servicios a través de acometidas y medidores de energía, que conectan con la instalación eléctrica del receptor.

#### **2.3.17. Mina Zanja**

##### **Ubicación y acceso**

La minera Zanja S. R. L. está localizada en los Andes occidentales del norte del Perú, a 48 km en línea recta al NW de la mina Yanacocha S. R. L., comprende una vasta zona de alteración hidrotermal, relacionada principalmente a yacimientos epitermales de oro en ambientes de alta sulfuración y también sistemas profundos con mineralización tipo pórfidos

de Cu-Au-Mo, desarrollados principalmente alrededor de un centro volcánico denominado “Depresión San Pedro” (34).

La minera Zanja S. R. L se ubica entre los caseríos de Pisit y Zanja, distritos de Tongod y Pulán, provincias de San Miguel de Pallaqués y Santa Cruz de Succhubamba, departamento de Cajamarca. Se ubica alrededor de las siguientes coordenadas UTM:

- Norte: 9 245,500
- Este: 732,250

El área de las operaciones de la minera Zanja comprende las zonas altas del distrito de Pulan, a una elevación que varía entre los 2800 y 3620 m s. n. m. y en los límites con los distritos de Catache de la misma provincia de Santa Cruz y el distrito de Catilluc de la provincia de San Miguel.

Sus altitudes varían de 3,000 a 3,800 m s. n. m.

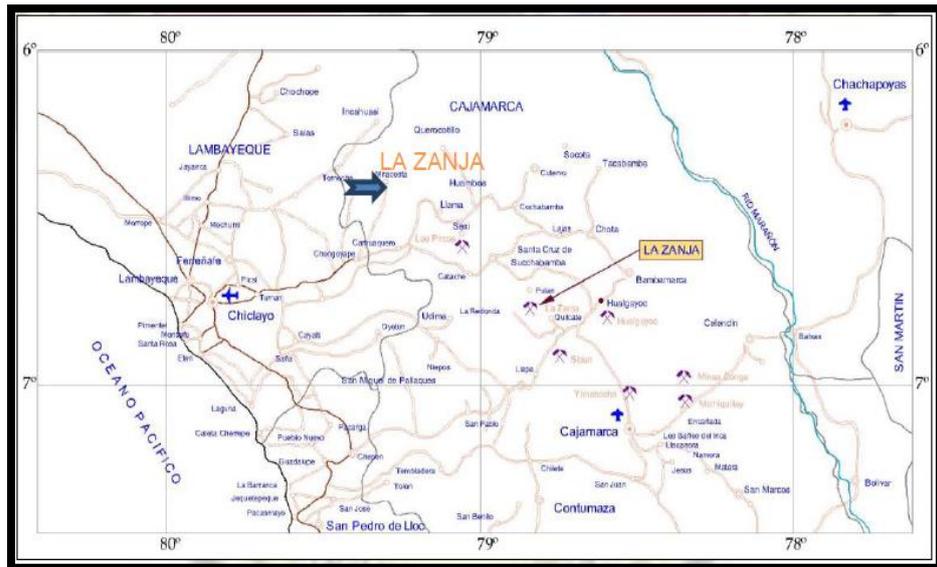
El acceso se realiza de acuerdo a la siguiente ruta:

**Tabla 4. Accesibilidad**

<b>Origen - destino</b>	<b>Distancia (km)</b>	<b>Estado de la carretera</b>
<b>Lima- Pacasmayo</b>	741	Panamericana Norte - asfaltada
<b>Pacasmayo - Cajamarca</b>	180	Carretera asfaltada
<b>Cajamarca- El Empalme</b>	70	Carretera asfaltada
<b>El Empalme - mina</b>	32	Afirmada - trocha
<b>Total</b>	1,023	

*Nota:* tomada de Optimización y reducción de costos en el sistema de riego del PAD lixiviación de minera Zanja (34)

El tiempo aproximado para llegar a destino es de 16 horas.



**Figura 28. Ubicación de la unidad minera Zanja, Perú**

### 2.3.17.1. Fisiografía

#### Relieve

Se ubica en los Andes centrales, los que se caracterizan por la presencia de numerosas quebradas cuyas laderas presentan gradientes pronunciadas y las altas planicies, situados a más de 3500 m de altitud y que han recibido el nombre de la región de la Puna o Altiplano (35).

#### Clima

La zona presenta una temperatura promedio mensual que fluctúa entre 7 – 8.2 °C. El periodo de menor precipitación ocurre en los meses de mayo a septiembre y el de mayor precipitación se da entre los meses de octubre y abril.

### 2.3.17.2. Geología

Dentro del área de estudio, afloran rocas de origen volcanoclástico, que consiste en una secuencia de tufos, tobas y lavas, de naturaleza andesítica, dacítica y riolítica, pertenecientes a las formaciones Llama, Porculla y Volcánicos Huambo, con intrusiones tardías del Batolito de la costa y domos con edades que

varían desde el Eoceno Superior al Mioceno Superior y Plioceno Tardío (36).

### **2.3.17.3. Hidrología**

El sistema de drenaje superficial del área de estudio se puede subdividir en dos sistemas de microcuencas principales (35):

- La microcuenca de la quebrada El Cedro drena hacia el norte e incluye las quebradas Bancuyoc, La Cuchilla, La Playa, La Mina, Bramadero, Cocán y El Hornazo.
- La microcuenca del río Pisit que también drena hacia el norte e incluye las quebradas San Lorenzo, Del Panteón y Vizcachas.

La quebrada El Cedro recibe posteriormente el nombre de río Pulán, que se une con el río Pisit para constituir el río Cañad tributario del río Chancay. El río Chancay aporta aguas al río Reque y este vierte finalmente sus aguas en el océano Pacífico (35).

En el área de la mina, los cursos de agua son permanentes, pero sus caudales son mínimos si se comparan con los caudales obtenidos aguas debajo de Pulán y Pisit (35).

### **2.3.17.4. Clima y vegetación**

El clima, por lo general, es templado y húmedo durante casi la mayor parte del año, con temperatura promedio anual que varía entre 7 °C y 9 °C, presentándose entre los meses de junio a agosto las menores temperaturas.

Muestra un microclima caracterizado por la presencia casi constante de neblina y precipitaciones pluviales moderadas en los meses de mayo a setiembre y se acentúan en los meses de octubre a abril; este clima es influenciado por la presencia de bosques muy tupidos en las zonas de depresión. La zona muestra escasos recursos, el relieve esta principalmente cubierto por

pastos naturales "*ichu*" en las partes altas y cimas de los cerros, usado como forraje para la escasa población ganadera. En las partes profundas la vegetación es tupida y boscosa (quebrada El Cedro).

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA**

#### **3.1. Método, tipo y nivel de la investigación**

##### **3.1.1. Tipo**

La investigación científica en el presente trabajo es de tipo *aplicado*, utilizando el enfoque *cuantitativo*, pues considera conocimientos existentes sobre la influencia del sistema de puesta a tierra tipo varilla; entonces, se está utilizando resultados de investigación para buscar nuevos conocimientos para aplicaciones prácticas que permitan plantear alternativas de protección de la subestación de 30 kVA en la minera Zanja, Cajamarca 2021.

##### **3.1.2. Nivel**

El nivel de investigación en el presente trabajo de investigación es descriptivo - correlacional, ya que parte de las características del sistema de puesta a tierra tipo varilla en la minera Zanja, Cajamarca 2021 resulta en una investigación asociativa que trata de hallar correspondencia entre el sistema tipo varilla y la subestación de 30 kVA de la minera Zanja.

### 3.1.3. Método

#### Método general

El método de investigación fue el científico, ya que se inicia por la identificación de las partes que caracterizan una realidad y a partir de ello se establece la relación entre los elementos que componen el objeto de investigación. En este caso se identificaron y caracterizaron el sistema de puesta a tierra tipo varilla para establecer su influencia en la subestación de 30 kVA en la minera Zanja, Cajamarca.

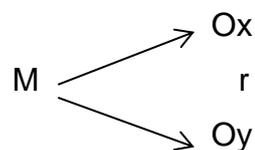
#### Método específico

Como método específico se eligió el método descriptivo, hipotético y estadístico, porque consiste en analizar e interpretar sistemáticamente un conjunto de hechos o fenómenos y sus variables que les caracterizan en su estado actual.

### 3.2. Diseño y esquema de la investigación

El diseño utilizado fue el descriptivo correlacional, en la medida que los resultados obtenidos en la medición de las variables han sido tratados, para determinar el grado de influencia que existe entre las variables estudiadas.

Los datos cuantitativos y las observaciones de muestreo del sistema de puesta a tierra tipo varilla en la minera Zanja, Cajamarca, responde al siguiente modelo:



M: muestra

O: representa a las observaciones o mediciones realizadas

X: representa la variable

Y: representa a la variable

R: representa la relación hipotética de las variables

### **3.3. Población, muestra y técnica de muestreo**

#### **3.3.1. Población**

La población está constituida por la subestación de 30 kVA en la compañía minera Zanja, Cajamarca, en sus zonas de vida, ubicados en diferentes frentes y con diferentes características de operación.

#### **3.3.2. Muestra**

La muestra estuvo constituida por la subestación de 30 kVA en la minera Zanja, Cajamarca.

Se identificó el equipo de carga de minerales a quien se le realizó el estudio de funcionamiento con el motor de corriente alterna, también se colectó una muestra de producción de la pala eléctrica en funcionamiento con corriente continua.

#### **Tipo de muestreo**

Se realizó muestreo no probabilístico por conveniencia debido a que las unidades muestrales no se seleccionaron al azar, sino que fue elegida por el investigador por encontrarse a mayor alcance. Esto se evidencia al elegir el sistema de puesta a tierra tipo varilla a quien se le hizo una comparación de su funcionamiento con la protección de la subestación de 30 kVA.

### **3.4. Técnica e instrumento de acopio de datos**

#### **A. Técnica de fichaje**

Esta técnica se utilizó con el fin de recoger información teórica tanto al momento de realizar el diseño como el informe final, dentro de ella se tiene:

- Ficha bibliográfica: se utilizó al momento de elaborar las referencias bibliográficas.
- Ficha de resumen: se utilizó para elaborar las bases teóricas.
- Ficha documental: esta técnica se utilizó al momento de revisar la influencia del sistema de puesta a tierra tipo varilla.

## **B. Técnica de registros**

Se aplicó esta técnica debido a que la información sobre el fenómeno u objeto de estudio, solo es posible obtenerla a través de archivos o registros dentro del trabajo diario de la mina en determinadas instituciones, para ello en la investigación se utilizaron frecuentemente las hojas de reporte de mediciones eléctricas.

### **3.5. Técnicas de procesamiento de datos**

La tabulación de los datos estadísticos se realizó a través de cuadros unidimensionales y bidimensionales según se indicó.

Se utilizaron estadísticos descriptivos como la media aritmética y desviación estándar.

Para la contratación de la hipótesis se empleó la prueba de  $r_s$  de Spearman para probar independencia de variables.

Todas las pruebas estadísticas de significación tuvieron el 95% de confiabilidad.

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **4.1 Resultados del tratamiento y análisis de la información**

##### **Sistema de puesta a tierra**

Para el presente capítulo se describe el funcionamiento del sistema puesta a tierra tipo varilla en la minera Zanja, Cajamarca, para ello se han analizado los parámetros de análisis de suelos, análisis de malla, análisis perfil de potencial, análisis de contorno de tensión de operación, a fin de entender el cambio creado gracias a la operación del sistema de puesta a tierra de alta frecuencia tipo malla y sistema de puesta a tierra en malla tipo anillo, para ello, primero se realiza un análisis descriptivo acerca de la protección de la subestación de 30 kV , luego se pasarán a mostrar los resultados; finalmente, la contrastación estadística acerca de las hipótesis general y específica.

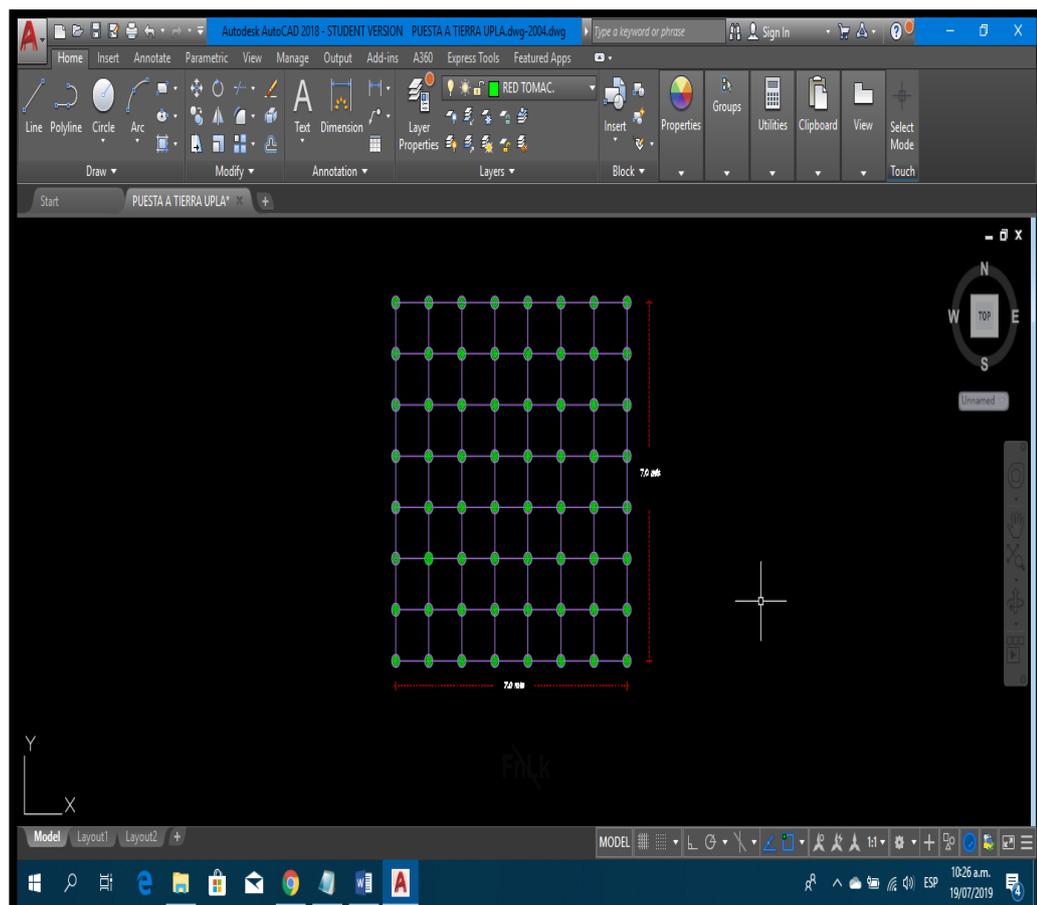
##### **4.1.1. Sistema de puesta a tierra**

###### **Primer diseño eléctrico de sistema de puesta a tierra tipo malla**

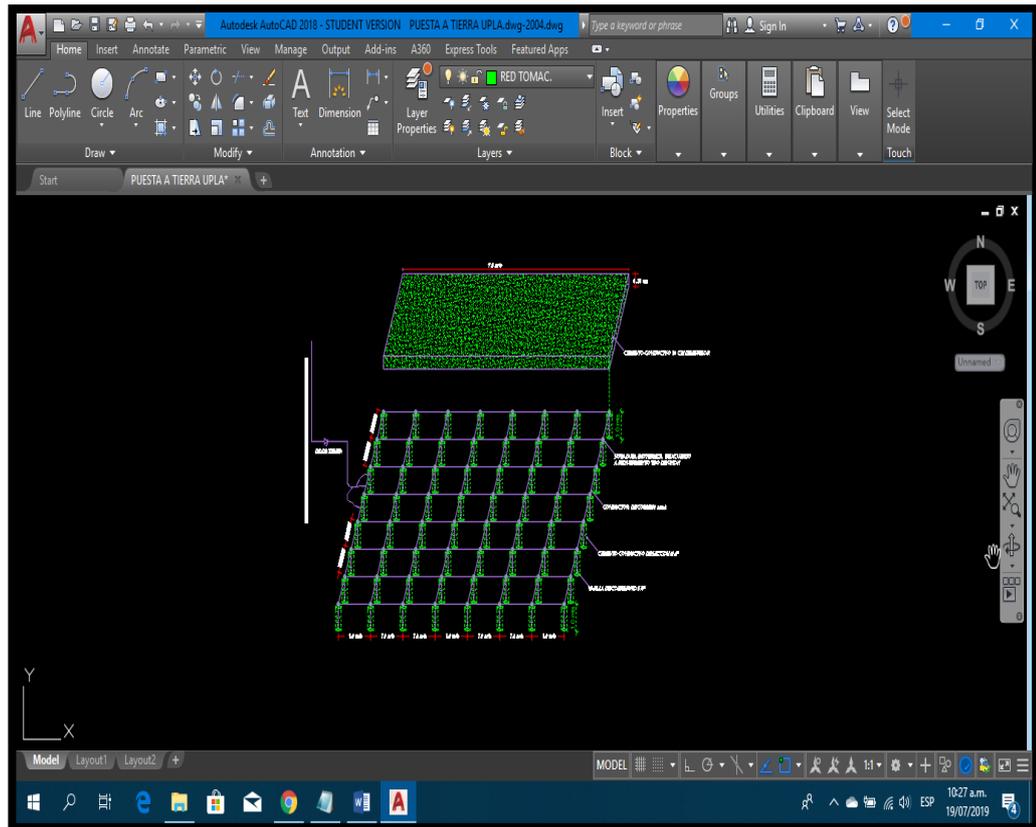
El sistema de puesta a tierra de baja resistividad e impedancia es capaz de disipar ondas de 30 MHz, compuesto de conductores eléctricos y varilla de cobre puro, soldados entre sí con soldadura exotérmica, construido bajo las normas IEEE-80 y JSTD - 607A.

En el presente diseño se unieron los dos sistemas de puesta a tierra conocidos, los sistemas de puesta a tierra tipo malla con puestas a tierra convencionales y las mallas a tierra elaboradas con conductores de cobre, realizando un nuevo diseño de una malla a tierra combinando los dos sistemas conocidos y elaborados con conductor de cobre electrolítico de sección de  $50 \text{ mm}^2$ , con la que se forma un cuadrado de  $7 \times 7$  metros, con retículas uniformes de  $1 \text{ m}$  de separación cada una, tanto en el eje "X" y en el eje "Y", en cada unión de las retículas se colocaron varillas de cobre puro de  $5/8"$  x  $1.0$  metros de longitud, las que fueron unidas a la malla mediante soldadura exotérmica.

Se propone implementar un diodo Zener al ingreso al sistema de puesta a tierra tipo malla, con este diseño se delimita el ingreso de las tensiones de retorno indeseados que existen en la capa 2 y 3 de la tierra.



**Figura 29. Foto diseño malla a tierra alta frecuencia**



**Figura 30. Diseño malla a tierra de la frecuencia.**

Cálculo matemático de la malla a tierra de alta frecuencia por el método Schwarz.

Fórmulas para el diseño de la malla:

$$R_M = \frac{\rho_e}{\pi \times L} \times \left[ \text{Ln} \left( \frac{2 \times L}{\sqrt{h \times d}} \right) + \frac{K_1 \times L}{\sqrt{S}} - K_2 \right] \Omega$$

$$K_1 = 1.43 - \frac{2.3 \times h}{\sqrt{S}} - 0.044 \times \left[ \frac{A}{B} \right]$$

$$K_2 = 5.5 - \frac{8 \times h}{\sqrt{S}} + 0.15 - \frac{h}{\sqrt{S}} \times \left[ \frac{A}{B} \right]$$

**Donde:**

$\rho_e$  = Resistividad equivalente del terreno ( $\Omega$ -m)

L = largo total del conductor de la malla (m)

h = profundidad de enterramiento de la malla (m)

S = área total de la malla ( $\text{m}^2$ )

A = lado mayor del reticulado (m)

B = lado menor del reticulado (m)

Datos para el cálculo de la malla:

- ✓ Resistividad de terreno: 47.5  $\Omega$ - m
- ✓ Largo: 7 m
- ✓ Ancho: 7 m
- ✓ Área: 49 m<sup>2</sup>
- ✓ Reticulado: 1.0 m x 1.0 m
- ✓ Longitud del conductor: 112 m
- ✓ Conductor desnudo: Cu de 50 mm<sup>2</sup> (diámetro 8.9 mm)
- ✓ Profundidad de aterramiento: 1.5 m
- ✓ Unión: termofusión
- ✓ Aditivo: cemento conductor

Valores calculados de las constantes  $K_1$  y  $K_2$

$$K_1 = 0.8931$$

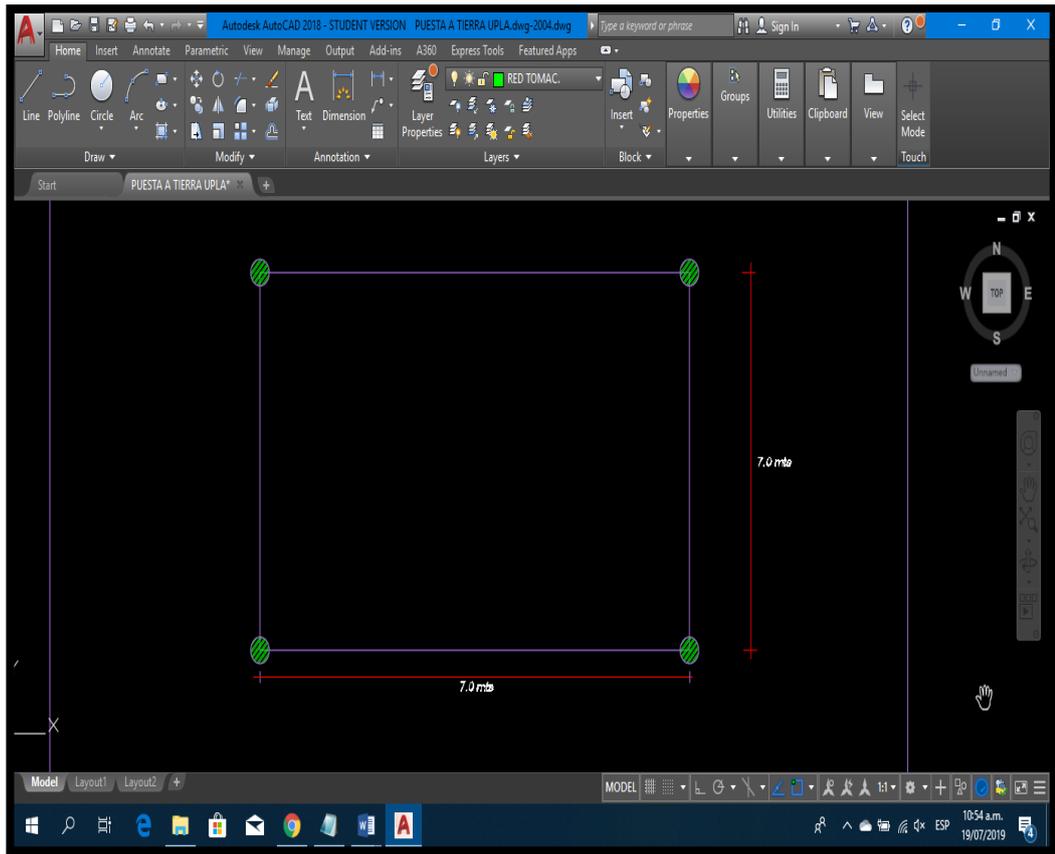
$$K_2 = 3.7214$$

Valor matemático de malla después de remplazar los valores calculados:

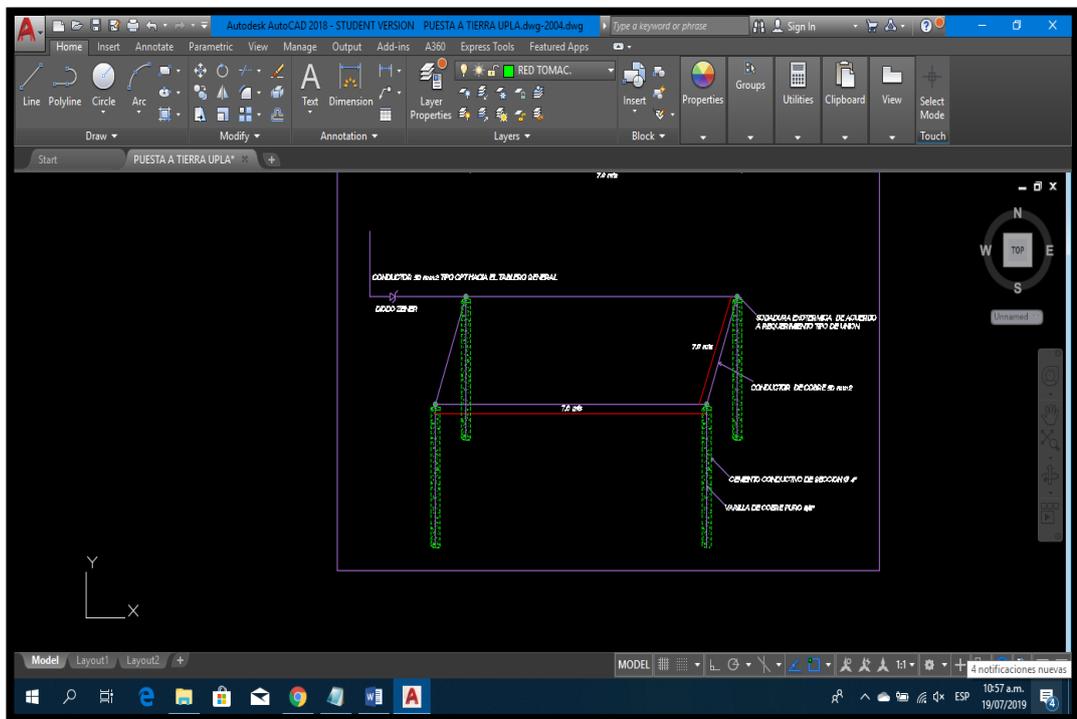
$$R_M = 1.98 \Omega$$

#### **4.1.2. Segundo diseño eléctrico de puesta a tierra tipo vertical en anillo**

Sistema de puesta a tierra tipo vertical, son pozas a tierra profundas de 1 x 3 metros, las que usan electrodos de 2.40 metros para poder conseguir en la profundidad menor resistividad y humedad en la tierra. Que implementan el perímetro de la edificación, se instalan en las esquinas de la edificación para proteger el ingreso de tensiones no deseadas y se unen con conductores de cobre eléctrico de 50 mm, que se fijarán a las varillas de cobre con soldadura exotérmica.



**Figura 31. Diseño de malla a tierra tipo anillo**



**Figura 32. Diseño de malla a tierra tipo anillo**



Valor matemático de malla tipo anillo después de remplazar los valores calculados:

$$R_M = 3.15 \Omega$$

#### 4.2. Simulación primera propuesta de sistema de puesta a tierra tipo malla

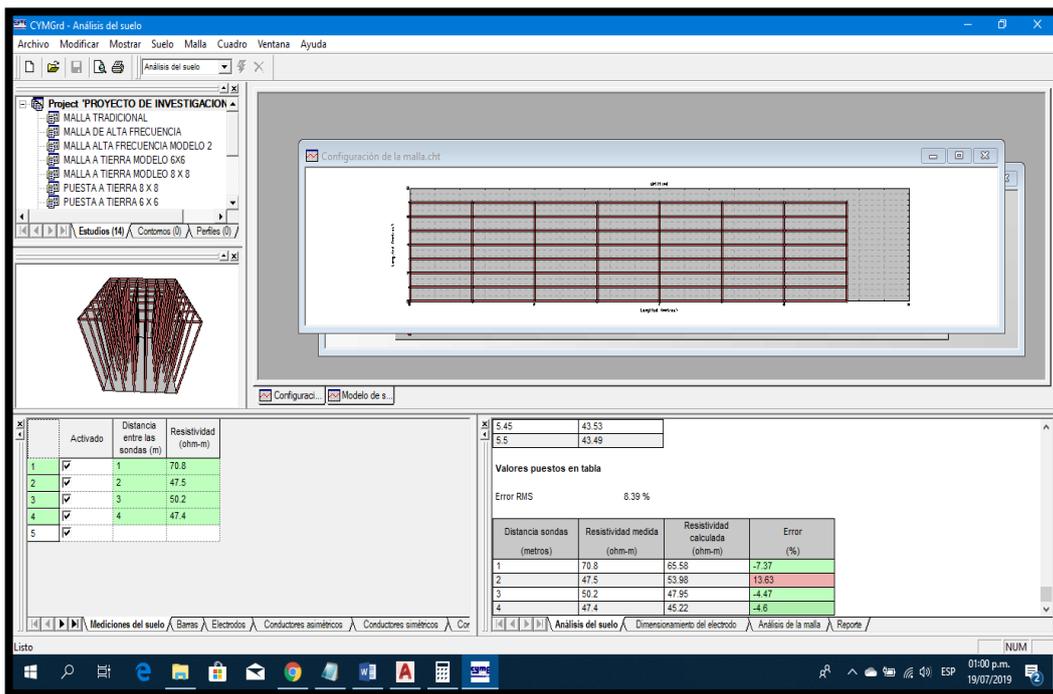


Figura 34. Simulación análisis de suelo

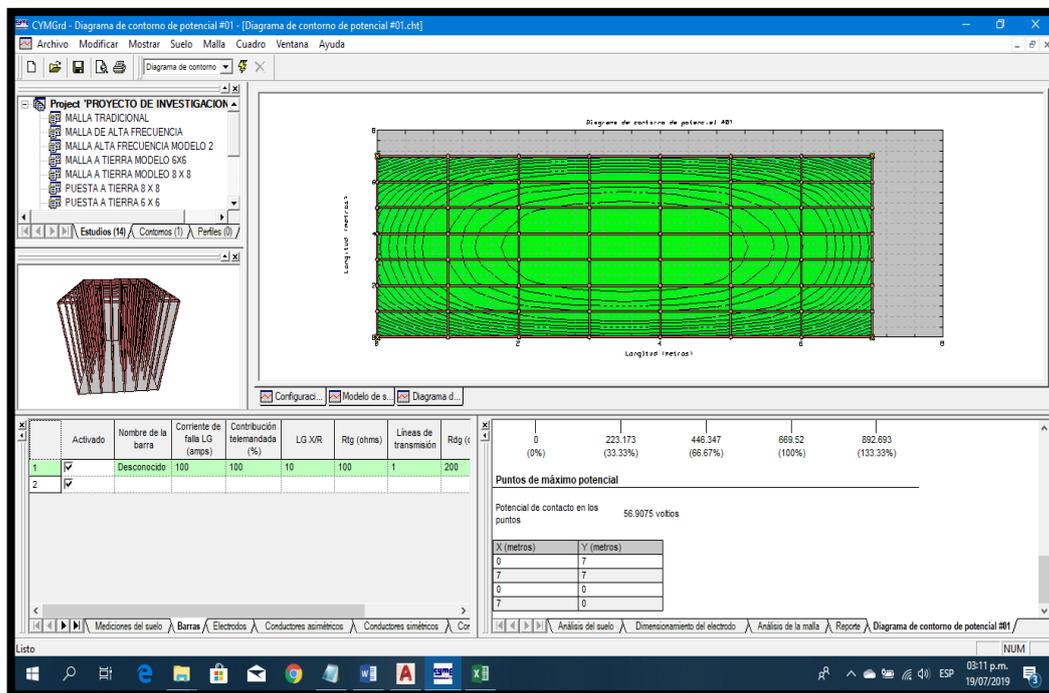
Tabla 5. Datos ingresados de la resistividad medida en campo

Distancia entre las sondas (m)	Resistividad (ohm-m)
1	70.8
2	47.5
3	50.2
4	47.4

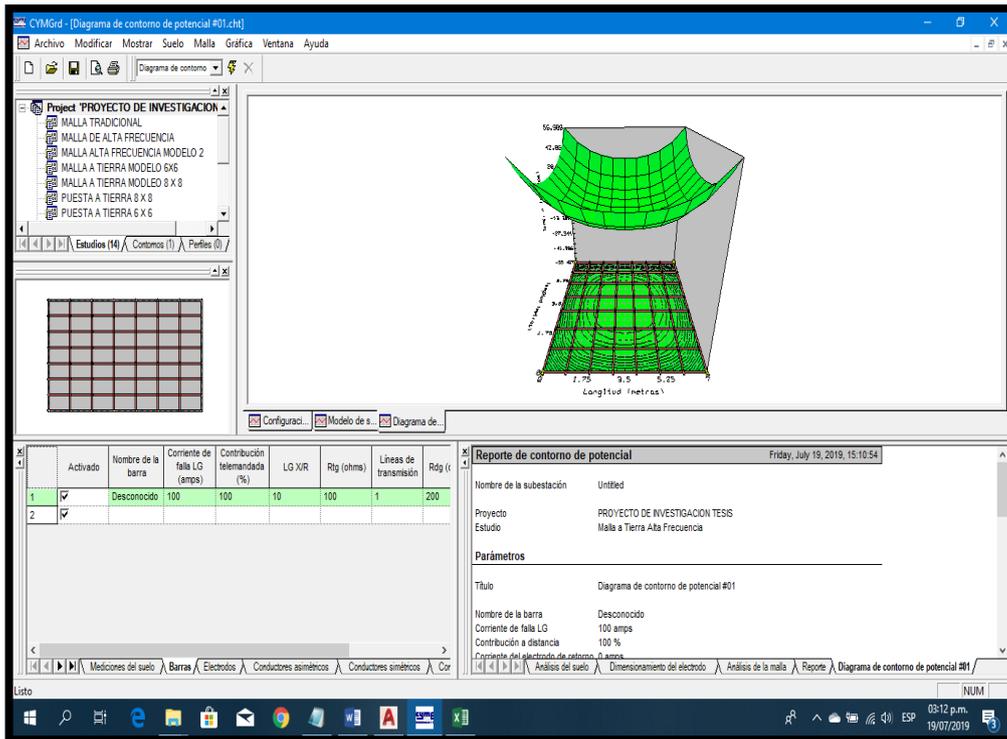
**Tabla 6. Resultados de análisis del suelo**

Valores puestos en tabla

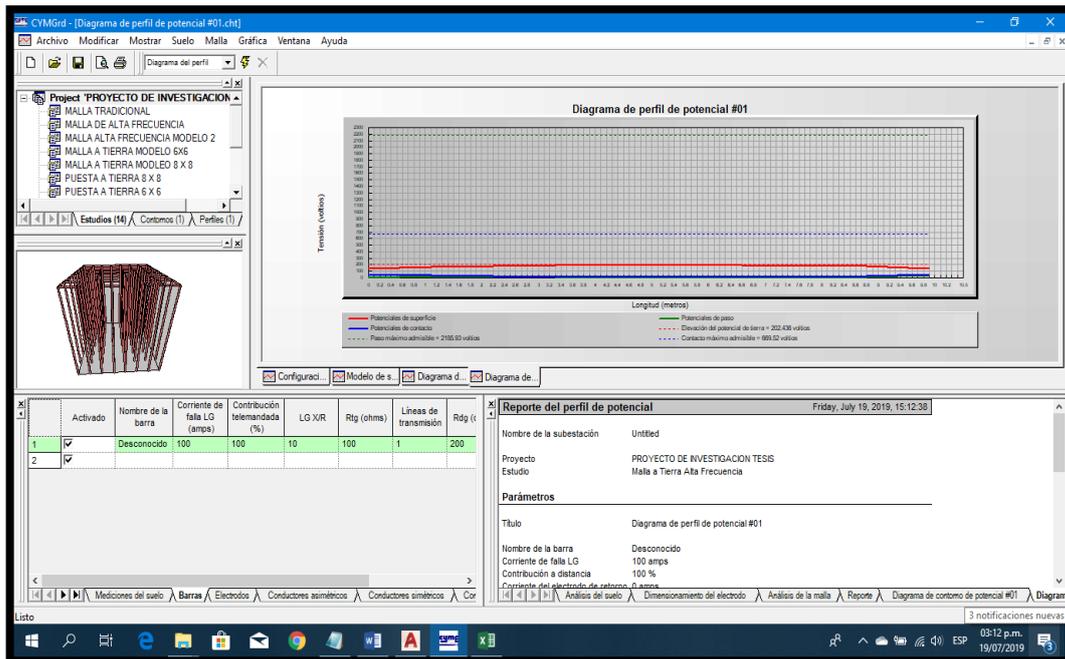
Error RMS		8.39%		
Distancia sondas (metros)	Resistividad medida (ohm-m)	Resistividad calculada (ohm-m)	Error (%)	
1	70.8	65.58	-7.37	
2	47.5	53.98	13.63	
3	50.2	47.95	-4.47	
4	47.4	45.22	-4.6	



**Figura 35. Resultado de diagrama de contorno**



**Figura 36. Resultado de diagrama de contorno en 3D**



**Figura 37. Diagrama de perfil de potencial**

## 4.2.1. Simulación de segunda propuesta de malla a tierra tipo anillo

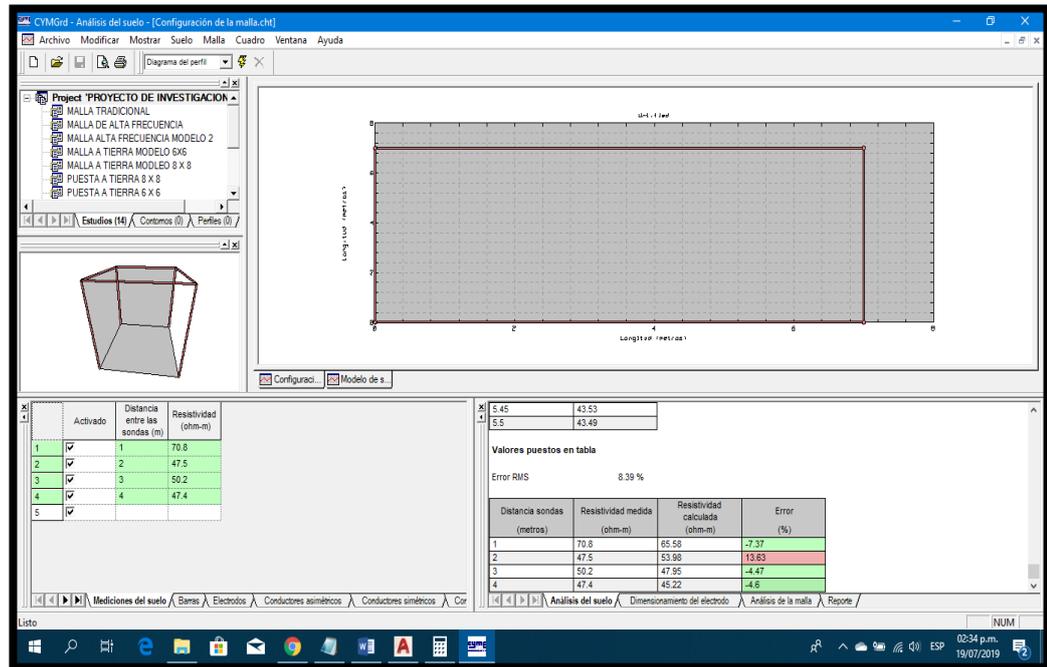


Figura 38. Simulación de análisis de suelo

Tabla 7. Datos ingresados de la resistividad medida en campo

Distancia entre las sondas (m)	Resistividad (ohm-m)
1	70.8
2	47.5
3	50.2
4	47.4

Tabla 8. Resultados de análisis del suelo

Valores puestos en tabla			
Error RMS		8.39%	
Distancia sondas (metros)	Resistividad medida (ohm-m)	Resistividad calculada (ohm-m)	Error (%)
1	70.8	65.58	-7.37
2	47.5	53.98	13.63
3	50.2	47.95	-4.47
4	47.4	45.22	-4.6

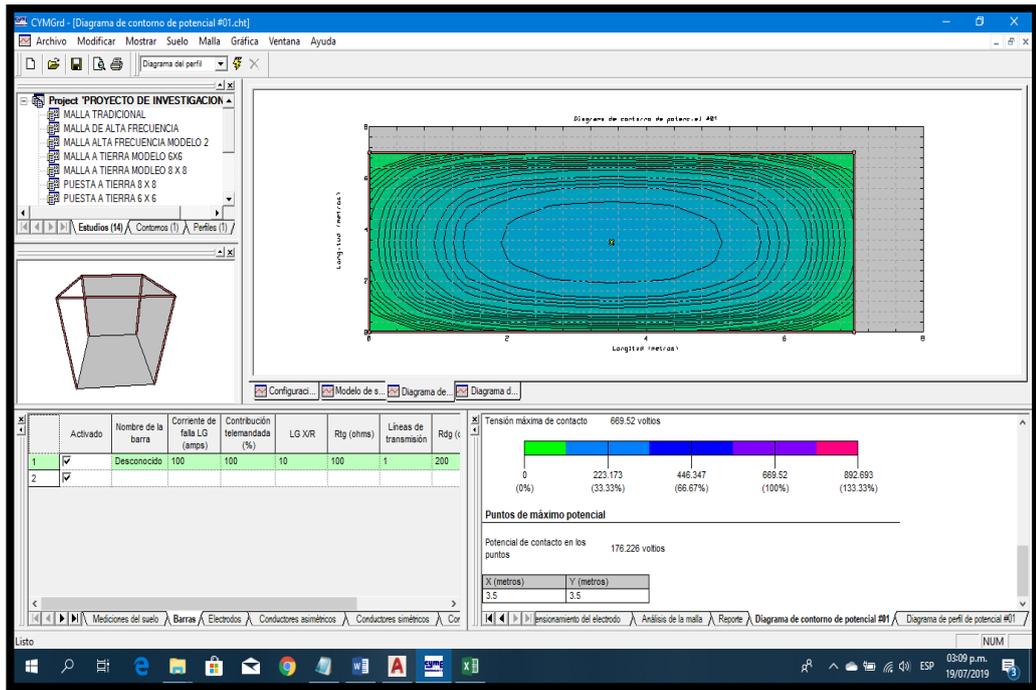


Figura 39. Resultado de diagrama de contorno

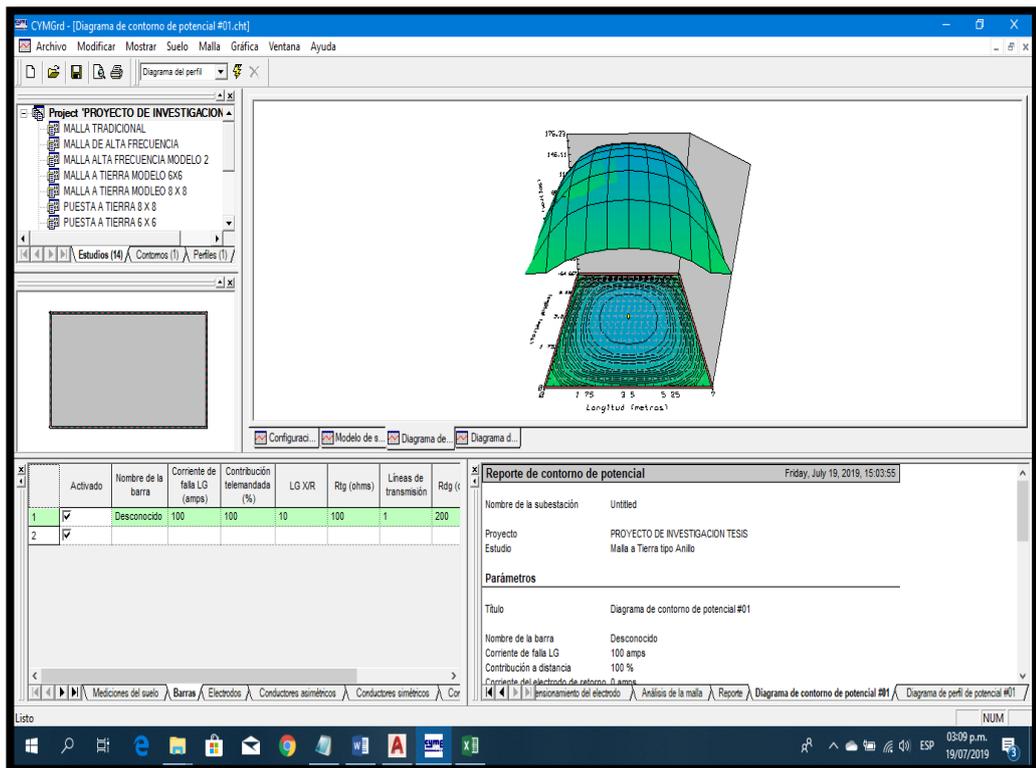


Figura 40. Resultado diagrama de contorno en 3D

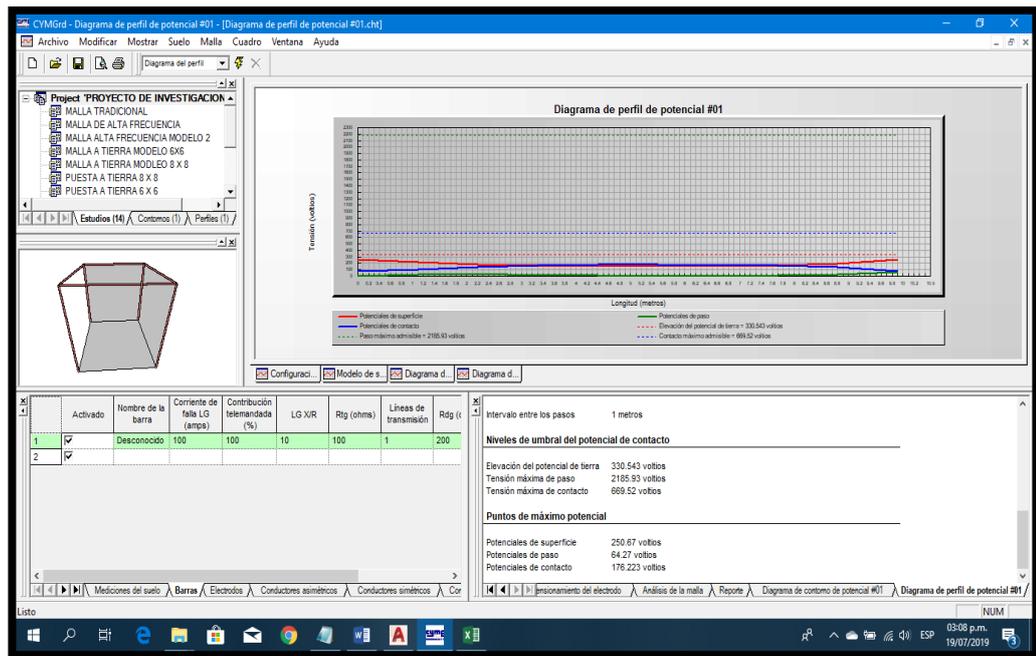


Figura 41. Diagrama de perfil de potencial

## 4.2.2. Pruebas estadísticas

Tabla 9. Comparativo de resultados de la simulación

Análisis de resultados				
Análisis con software	Sistema de puesta a tierra de alta frecuencia tipo malla		Sistema de puesta a tierra en malla tipo anillo	
Análisis de suelo	Error RMS	8.39%	Error RMS	8.39%
	Distancia 1 m	-7.37%	Distancia 1 m	-7.37%
	Distancia 2 m	13.63%	Distancia 2 m	13.63%
	Distancia 3 m	-4.47%	Distancia 3 m	-4.47%
	Distancia 4 m	-4.60%	Distancia 4 m	-4.60%
Análisis de malla	Longitud total de los conductores primarios	112 m	Longitud total de los conductores prima	28 m
	Longitud de las varillas primarias	64 m	Longitud de las varillas primarias	9.6 m
	Número de elementos	176	Número de elementos	12
	Elevación del potencial de tierra	2024.36 voltios	Elevación del potencial de tierra	2024.36 3305.43 voltios
	Resistencia de tierra calculada	1.97	Resistencia de tierra calculada	3.22
Análisis de perfil de potencial	Impedancia equivalente	1.97	Impedancia equivalente	3.22
	Elevación del potencial de tierra	202.436 voltios	Elevación del potencial de tierra	330.543 voltios
	Tensión máxima de paso	2185.93 voltios	Tensión máxima de paso	2185.93 voltios
	Tensión máxima de contacto	669.52 voltios	Tensión máxima de contacto	669.52 voltios

	Potenciales de superficie	190.46 voltios	Potenciales de superficie	250.67 voltios
	Potenciales de paso	33.09 voltios	Potenciales de paso	64.27 voltios
	Potenciales de contacto	56.90 voltios	Potenciales de contacto	176.22 voltios
Análisis de contorno	Tensión máxima de contacto	669.52 voltios	Tensión máxima de contacto	669.52 voltios
	Potencial de contacto en los dos puntos	56.90 voltios	Potencial de contacto en los dos puntos	176.22 voltios

### 4.3. Prueba de hipótesis

#### 4.3.1. Hipótesis general

Para la prueba de hipótesis general se sometió a una prueba estadística denominada Coeficiente de correlación (“ $r_s$ ” de Spearman), con la finalidad de determinar la influencia del sistema de puesta a tierra tipo varilla en la minera Zanja, Cajamarca a través de los datos generales.

**Tabla 10. Comparativo de resultados de la simulación**

	Análisis de suelo	Análisis de malla	Análisis perfil de potencial	Análisis de contorno
<b>Sistema de puesta a tierra de alta frecuencia tipo malla</b>	8.39%	1.97 ohm	33.09 V	56.90 V
<b>Sistema de puesta a tierra en malla tipo anillo</b>	8.39%	3.22 ohm	64.27 V	176.22 V

#### Estadístico de la Rho de Spearman

Para obtener este estadístico se eligió el programa SPSS con el enlace de Estadísticas > Tablas > Tabulación cruzada y Rho Spearman.

Se utilizó la Rho de Spearman para evaluar la asociación entre dos variables que tienen categorías ordinales, estas categorías ordinales tienen un orden natural, el coeficiente puede variar de -1 a +1. Mientras mayor sea el valor absoluto del coeficiente, más fuerte será la relación entre las variables y, por lo tanto, una influirá en la otra. Un valor absoluto de 1 indica una relación perfecta y un valor de cero indica ausencia de una relación ordinal. El hecho de que un valor intermedio se interprete como débil, moderado o fuerte depende de sus metas y requisitos.

#### Planteamiento de hipótesis general

### Hipótesis nula

H<sub>0</sub>: el sistema de puesta a tierra tipo varilla no influye positivamente para la protección de la subestación de 30 kVA en la minera Zanja, Cajamarca 2021.

### Hipótesis alterna

H<sub>1</sub>: el sistema de puesta a tierra tipo varilla influye positivamente para la protección de la subestación de 30 kVA en la minera Zanja, Cajamarca 2021.

#### a. Análisis estadístico

Al tratar de correlacionar los valores del cambio hacia la influencia del sistema de puesta a tierra tipo varilla para la protección de la subestación de 30 kVA, se decide hacer uso del estadístico Rho de Spearman, el cual calcula que tan correlacionados están estos dos tipos de variables que generará dependencia. Así, se puede apreciar en el cuadro de correlaciones que el coeficiente de correlación Rho de Spearman tiene un valor de 0.88 para el caso de la confiabilidad y para el caso de la optimización es de 0.255, donde ambos tienen una significancia al 5% y un p-valor de esta prueba igual a 0.

**Tabla 11. Análisis estadístico**

		Correlaciones		
			Automatización	Optimización
Rho de Spearman	Puesta a tierra tipo varilla	Coeficiente de correlación	1	.355**
		Sig. (bilateral)	.	0
		N	371	371
	Protección de la subestación	Coeficiente de correlación	.255**	1
		Sig. (bilateral)	0	.
		N	371	371

\*\* La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral)

Correlaciones

		Automatización	Confiabilidad	
Rho de Spearman	Puesta a tierra tipo varilla	Coeficiente de correlación	1	.790**
		Sig. (bilateral)	.	0
		N	371	371
	Protección de la subestación	Coeficiente de correlación	.880**	1
		Sig. (bilateral)	0	.
		N	371	371

\*\* La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral)

Para la validación de la hipótesis general se considera un nivel de confiabilidad 95%, siendo la significancia 5% (0.05), entonces, para aceptar la hipótesis alterna el valor de p (sigma) debe ser menor de 0.05 ( $p < 0.05$ ). Teniendo de esta manera que el valor de  $p = 0.000 < 0.05$ , aceptando la hipótesis alterna. Del mismo modo, se determinó el nivel de relación entre las variables teniendo un valor de Rho de Spearman de 0.790; es decir, sí existe una relación alta y directa entre las variables puesta a tierra tipo varilla y protección de la subestación con un nivel de relación de 79% y 35.5% respectivamente.

#### **b. Conclusión estadística**

Se concluye que el sistema de puesta a tierra tipo varilla influye positivamente en la protección de la subestación de 30 kVA en la minera Zanja, Cajamarca 2021.

#### **4.3.2. Hipótesis específicas**

##### **Hipótesis específica 1**

Ho: el estado de protección sin el SPT tipo varilla en la subestación de 30 kVA de la minera Zanja, Cajamarca 2021, no es deficiente.

Hi: el estado de protección sin el SPT tipo varilla en la subestación de 30 kVA de la minera Zanja, Cajamarca 2021, es deficiente.

**Tabla 12. Resistividad media tomada en la subestación de 30 kVA**

	Resistividad (ohm-m)	%
Resistividad de sistema de puesta a tierra tipo varilla	47,5	46.40
Resistividad de sistema de puesta a tierra tipo actual	50,2	49.04
Total	97,7	100

En la tabla 12 se observa que, en la subestación de la minera Zanja de Cajamarca, respecto al estado de protección, la resistividad del sistema de puesta a tierra con SPT tipo varilla es de 47, 5 ohm el cual representa el 46,40% de protección, mientras que 50,2 ohm, que representa 49.04% es la resistividad del sistema de puesta a tierra actual de carga.

De acuerdo a los datos encontrados se rechaza la hipótesis nula (Ho) y se acepta la hipótesis alterna (Hi); la cual menciona que:

El estado de protección sin el SPT tipo varilla en la subestación de 30 kVA de la minera Zanja, Cajamarca 2021, es deficiente.

### **Hipótesis específica 2**

Ho: el estado de protección con el SPT tipo varilla en la subestación de 30 kVA de la minera Zanja, Cajamarca 2021, no es eficiente.

Hi: el estado de protección con el SPT tipo varilla en la subestación de 30 kVA de la minera Zanja, Cajamarca 2021, es eficiente.

**Tabla 13. Análisis del perfil del potencial**

	Potencial de contacto	%
Potencial de contacto de sistema de puesta a tierra tipo varilla	56,90	24.41
Potencial de contacto de puesta a tierra tipo actual	176,22	75.59
Total	233.12	100

En la tabla 13 se observa que, en la subestación de la minera Zanja, Cajamarca, respecto al estado de protección con la puesta a tierra tipo varilla se tiene un potencial de contacto de 56,90 V que representa, un 24.42% mientras que el potencial de contacto con la puesta a tierra tradicional es de 176.22 V que representa el 75.59%

De acuerdo a los datos encontrados, se rechaza la hipótesis nula  $H_0$ , y se acepta la hipótesis alterna  $H_1$ ; la cual menciona que:

El estado de protección con el SPT tipo varilla en la subestación de 30 kVA de la minera Zanja, Cajamarca 2021, es eficiente.

### Hipótesis específica 3

$H_0$ : el nivel de resistividad del sistema de pozo a tierra tipo varilla en la minera Zanja, Cajamarca 2021, no es bajo.

$H_1$ : el nivel de resistividad del sistema de pozo a tierra tipo varilla en la minera Zanja, Cajamarca 2021, es bajo.

**Tabla 14. Resistividad del terreno medida con el instrumento (telurómetro) en la subestación de 30 kVA**

	Resistividad (ohm-m)	%
El nivel de resistividad del sistema de pozo a tierra tipo varilla	47,5	46.40
El nivel de resistividad del sistema convencional	50,2	49.04
Total	97,7	100

En la tabla 14 se observa que, en la subestación de la minera Zanja de Cajamarca, respecto al nivel de resistividad; la resistividad del sistema de puesta a tierra con SPT tipo varilla es de 47,5 ohm el cual representa el 46,40%, mientras que 50,2 ohm representa 49.04% es el nivel de resistividad del sistema convencional.

De acuerdo a los datos encontrados se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se acepta la hipótesis alterna ( $H_1$ ); la cual menciona que:

El nivel de resistividad del sistema de pozo a tierra tipo varilla en la minera Zanja, Cajamarca 2021, es bajo.

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

- En la tesis “*Seguridad de centros de cómputo con diseño y aplicación mediante sistemas de puesta a tierra*” (37), se concluye que para evacuar grandes corrientes a tierra que provienen de las descargas atmosféricas, existe mayor peligro para las personas, entonces la resistencia de la puesta a tierra deberá ser menor o igual a 2 Ohmios.

En la investigación se demuestra que la resistividad del sistema de puesta a tierra es de 1.97 Ohmios, valor requerido para la disipación de descargas atmosféricas.

- En la tesis “*Diseño de redes de puesta a tierra en subestaciones de corriente alterna*” (38), se concluye que para reducir la alta resistividad en los suelos es necesario el uso de rellenos neutros y de baja resistividad y disminuir tanto la resistencia de dispersión como los potenciales de toque y paso. Concluyendo también que el cobre es un material resistente a la humedad y la corrosión al contacto directo de la tierra.

En la investigación se llega a la misma conclusión y se utilizan conductores de cobre recocido por las bondades de su dureza y durabilidad, en el contacto directo de la tierra se empleó relleno neutro a base de grafito y cemento para evitar el desgaste prematuro de las varillas de cobre en el sistema de puesta a tierra.

- En la tesis “*Análisis de la malla de un sistema de puesta a tierra de una subestación de potencia (Teotihuacán) para su mejoramiento*” (39), se concluye que los sistemas convencionales no están diseñados para las corrientes y tensiones inducidas por otros sistemas cercanos a la malla de puesta a tierra como las interferencias de radio frecuencia (IRF) y las interferencias electromagnéticas (IEM), además, el sistema de electrodo unidireccional cubre los aspectos antes mencionados y reduce también las distorsiones armónicas, bloquea todas las altas frecuencias provenientes de

la tierra o subsuelo y bloquea corrientes parásitas provenientes de otros sistemas y las regresa a tierra para que no afecte el sistema a proteger.

En la investigación se demuestra que los sistemas convencionales en malla tipo anillo, tiene una resistividad de 3.3 Ohmios, y no pueden disipar las descargas atmosféricas y frecuencias altas en un menor tiempo, demostrando que el umbral de la tensión de paso y toque se van a la superficie de la tierra y pueden provocar un accidente eléctrico por tensión de paso y toque.

- En la tesis “*Diseño integral de sistemas de puesta a tierra en telecomunicaciones*” (40), se concluye que para realizar un sistema de protección a tierra tipo malla se debe realizar bajo la normatividad americana IEEE-80 y el código eléctrico nacional.

En la investigación el sistema de puesta a tierra tipo varilla se simuló con el software CYM grd, que se elaboró en los términos de la normatividad IEEE-80., STD-607, para el diseño de mallas a tierra con distintas configuraciones.

- En la tesis “*Sistema de puesta a tierra y protección equipotencial para sistemas de cómputo*” (41), se concluye que es indispensable conocer el valor de la resistividad del terreno para desarrollar un sistema eficiente de puesta a tierra. Concluye también que el uso de electrodos es indispensable para toda puesta a tierra porque se puede introducir en cualquier terreno seco, rocoso o húmedo, además se puede acoplar a cualquier configuración.

En la investigación se realizó la medición de la resistencia del terreno en donde se implementa el sistema de puesta a tierra tipo varilla.

El diseño del sistema puesta a tierra tipo varilla está compuesto con conductores de cobre electrolítico con jabalinas de 1 metro de cobre puro de 5/8” unidas con soldadura exotérmica.

- En la tesis “*Diseño del sistema de puesta a tierra de una subestación eléctrica mediante dos metodologías*” (42), se concluye que el diseño de una red a tierra tipo malla es de gran utilidad con el estudio de suelos, estudio de la malla, así como, los diagramas de contorno de potencial y de perfil potencial permite conocer a un mayor grado el funcionamiento de la malla.

En la investigación se realizaron las simulaciones con el CYM grd y se obtuvo el estudio de suelos, estudio de la malla, así como los diagramas de contorno de potencial y de perfil potencial, para poder determinar la efectividad del sistema de puesta a tierra tipo varilla.

## CONCLUSIONES

- Se realizaron las mediciones de resistencia del terreno por el método Wernner, para realizar un diseño óptimo para el sistema tipo varilla.
- Se evaluó la efectividad del sistema de puestas a tierra tipo varilla, combinando las metodologías que se utilizan para la protección de la subestación de 30 kVA con varillas de cobre de 20 mm x 2.40 metros, el estudio cuenta con las mismas características como conductores de cobre de 50 mm, y en cada retícula tiene unida una varilla de cobre de 20 mm x 1.0 metro con soldadura exotérmica, obteniendo una resistividad óptima y aislando el sistema de puesta a tierra de tensiones de retorno que puedan existir en la capa 2 y capa 3 de la tierra.
- Se comprobó la resistividad e impedancia de 1.97 Ohmios en un área reducida de 49 metros, el valor obtenido es óptimo para la protección de la subestación de 30 kVA.
- Se comprobaron las tensiones de toque y paso de 33 V al contacto accidental de una persona, con una falla de 100 amperios, protegiendo a todas las personas dentro de las instalaciones de la subestación de 30 kVA.
- La simulación permite que el sistema de puesta a tierra tipo varilla permite que el diseño de la malla y la distribución de las retículas, las distancias entre retículas, obteniendo una funcionalidad óptima y reduciendo gastos en el tiempo del diseño.
- Se comprobó que el sistema de puesta a tierra tipo varilla brinda más seguridad para la protección de la subestación de 30 kVA en la minera Zanja.

## LISTA DE REFERENCIAS

1. **ASTORGA GÓMEZ, Juan M., IRIARTE SALINAS, Yuri A. y PERALTA MURÚA, Lisandro D.** *Análisis de resistencia de puesta a tierra en redes de distribución urbanas usando distribuciones de probabilidad.* 2, 2015, Ingeniería Energética, Vol. XXXVI, págs. 146-154.
2. **MERCADO, PEÑA y PACHECO.** *Calidad de la energía eléctrica bajo la perspectiva de los sistemas de puesta a tierra.* 2, Venezuela : Universidad de los Andes, 2017, Ciencia e Ingeniería, Vol. 38.
3. **SÁNCHEZ ACEVEDO, Santiago, RESTREPO, Carlos A. y RESTREPO GRISALES, Yov Steven.** *Implementación de redes de Petri para el diseño de mallas a tierra de subestaciones eléctricas.* 20, 2007, Tecnura, Vol. 10, págs. 103-114.
4. **GALLEGO y otros.** *Modelación de sistemas de puesta a tierra para evaluación de sobretensiones transitorias.* s.l. : Ingeniería Energética, 2014.
5. **ACOSTA.** *Identificación de pérdidas técnicas en redes de baja tensión con sistemas de puesta a tierra.* 181, 2013, Dyna, Vol. 80, págs. 40-50. ISSN: 0012-7353.
6. **PAREDES y PEZO.** *Influencia del sistema de puesta a tierra en la descarga eléctrica en la institución educativa Juanita del Carmen Sánchez Rojas de Tarapoto, 2019.* Universidad Cesar Vallejo. Perú : s.n., 2019.
7. **MOLINA.** *Criterios para el diseño de sistemas de puesta a tierra en subestaciones industriales.* Universidad Simón Bolívar. Venezuela : s.n., 2005.
8. **FIERRO y FLORES.** *Diseño del sistema de puesta a tierra de la subestación eléctrica del nuevo campus de la Universidad Politécnica Salesiana- sede Guayaquil.* Universidad Politécnica Salesiana Guayaquil. Guayaquil-Ecuador : s.n., 2010.
9. **GALARRETA.** *Diagnóstico y mejora del sistema de protección de puesta a tierra del campus de la Universidad César Vallejo – Trujillo.* Universidad César Vallejo. Trujillo-Perú : s.n., 2018.

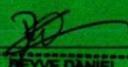
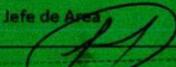
10. **QUISPE y GUTIÉRREZ.** *Diseño e implementación de diferentes sistemas de puestas a tierra para los laboratorios de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la UNA- Puno.* Universidad Nacional del Altiplano. Puno-Perú : s.n., 2018.
11. **HERNÁNDEZ, RODRÍGUEZ y ZAMUDIO.** *Sistema de tierras para equipo eléctrico-electrónico.* Universidad Nacional Autónoma de México. México : s.n., 2009.
12. **DAZA, GÓMEZ y PEÑA.** *Diseño del sistema de puesta a tierra de la Universidad de La Costa aplicando las reglamentaciones vigentes.* Universidad de La Costa. Barranquilla-Colombia : s.n., 2012.
13. **BARRANTES.** *Diseño del sistema de protección y control de subestaciones eléctricas.* Universidad Carlos III de Madrid. Leganés : s.n., 2011.
14. **ESPIÑOZA y ESTUPIÑÁN.** *Guía de selección de sistema de protección en subestación por medio de relés basados en microprocesadores aplicado en subestaciones de transmisión.* Universidad Politécnica Salesiana. Guayaquil : s.n., 2010.
15. **SOSA y RIMAPA.** *Implementación de protección eléctrica en media tensión 10/22.9. kV. Para prevenir fallas en campo de simulación UCV-Chiclayo.* Universidad Cesar Vallejo. Chiclayo-Peru : s.n., 2019.
16. **SEBASTIÁN, José y GONZÁLEZ, Pedro.** *Instalaciones eléctricas interiores.* España : Altamar S. A., 2012.
17. **QUISPE.** *Diseño y evaluación del sistema de puesta a tierra capacitivo para estudio de transitorios electromagnéticos en la línea de transmisión Cajamarca norte - Cáclic en 220 kV.* Universidad Nacional de San Agustín. Arequipa-Perú : s.n., 2018.
18. **MOSQUERA y GIRALDO.** *Inspección de los sistemas de puesta a tierra de las instalaciones del Instituto Técnico Superior de Pereira.* Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira : s.n., 2014.
19. **GARCÍA, B. y SOTO, J. D.** *Método alternativo para la medición de grandes sistemas de puesta a tierra. Modelo de prueba .* Alambique : s.n., 2002.
20. **ROJAS, Gregor.** *Manual de sistemas de puesta a tierra.* 2006, Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.
21. **ELECTRO CASTILLO.** *Ferretería Industrial y Eléctrica.* 2017.
22. **HERRERA, John Asdrúbal y CASTRO HERNÁNDEZ, Omar.** *Cálculo de la malla de puesta a tierra de una subestación.* España : s.n., 2003.

23. **CÁCERES.** *Diseño del sistema de puesta a tierra de la subestación eléctrica del nuevo campus de la Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, Ecuador.* Universidad Politécnica Salesiana. Guayaquil, Ecuador : s.n., 2010.
24. **Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional.** *Criterios de ajuste y coordinación de los sistemas de protección del SEIN.* 2014.  
<http://www.coes.org.pe/wcoes/coes/infoperativa/estudios/operacion/default.aspx>.
25. **RAMÍREZ, S.** *Protección de sistemas eléctricos.* Universidad Nacional de Colombia. Manizales, Colombia : s.n., 2005.
26. **SÁNCHEZ.** *Estudio de coordinación de protecciones en alta y media tensión en la subestación “Machala” propiedad de la corporación Nacional de Electricidad S. A.-Regional de Oro.* Universidad Politécnica Salesiana. Quito-Ecuador : s.n., 2010.
27. **JARA.** *Optimización de la protección eléctrica de la subestación tierra colorada.* Universidad de Piura. Piura-Perú : s.n., 2015.
28. **ATENCIA.** *Diseño e implementación de sistema de control y mando de la subestación en la mina Huarón 50/22.9 kV 10 MVA.* Universidad Tecnológica del Perú. Lima : s.n., 2020.
29. **PERUGACHI.** *Estudio de la coordinación de protecciones de los alimentadores de la subestación Alpachaca de la empresa eléctrica regional norte S.A. Emelnorte.* Universidad Técnica del Norte. Ibarra-Ecuador : s.n., 2019.
30. **ÁLVAREZ JIMÉNEZ, J. A.** *Estudio e implementación del sistema de protecciones eléctricas de los alimentadores primarios de la subestación La Carolina de Emelnorte S. A.* Escuela Politécnica Nacional. 2013.
31. **BASTOS.** *Implementación del sistema de control de paralelismo de la subestación de Heredia.* Instituto Costarricense de Electricidad ICE. Cartago : s.n., 2003.
32. **CRUZ TENEMPAGUAY, C. J.** *Diseño de la coordinación del sistema de protecciones eléctricas en los alimentadores interconectados urbanos de la Eersa.* Escuela Politécnica Nacional, facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Quito : s.n., 2015.

33. **YEBRA MORÓN, J. A.** *Sistemas eléctricos de distribución*. México, D. F. : Editorial Reverté, 2009.
34. **RODRÍGUEZ.** *Optimización y reducción de costos en el sistema de riego del PAD lixiviación de minera Zanja*. Universidad Nacional de San Agustín. Arequipa-Perú : s.n., 2014.
35. **CHÁVEZ.** *Optimización de la fragmentación en los proyectos de voladura primaria en la zona norte del taje San Pedro Sur, minera Zanja*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima-Perú : s.n., 2014.
36. **JURADO.** *Diseño piloto de sistema de tratamiento pasivo de infiltraciones provenientes del depósito de material inadecuado de minera Zanja, Perú*. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona : s.n., 2016.
37. **ROMÁN; PEÑA .** *Seguridad de centros de cómputo con diseño y aplicación mediante sistemas de puesta a tierra*. 2003.
38. **YANQUE.** *Diseño de redes de puesta a tierra en subestaciones de corriente alterna*. 2006.
39. **VITELA, Marcos.** *Análisis de la malla de un sistema de puesta a tierra de una subestación de potencia (Teotihuacán) para su mejoramiento*. 2010.
40. **VIERA.** *Diseño integral de sistemas de puesta a tierra en telecomunicaciones*. 2012.
41. **MANANI.** *Sistema de puesta a tierra y protección equipotencial para sistemas de cómputo*. 2013.
42. **VÁSQUEZ.** *Diseño del sistema de puesta a tierra de una subestación eléctrica mediante dos metodologías*. 2016.
43. **HUETE.** *Sistema de puesta a tierra y protección para sistemas de telecomunicaciones*. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala : s.n., 2008.

## **ANEXOS**

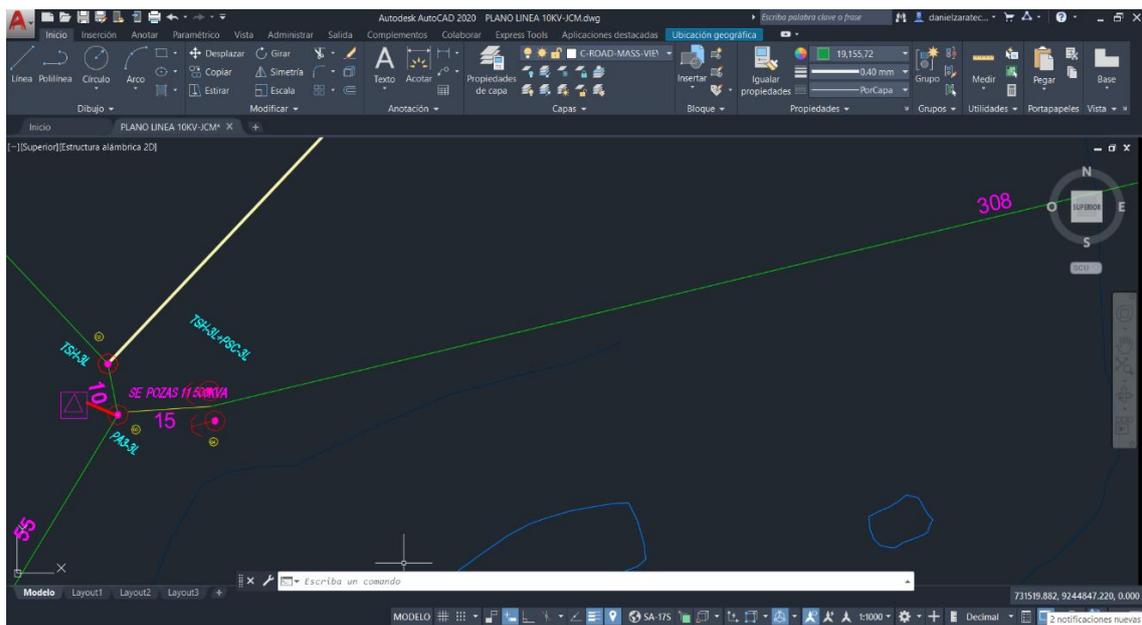
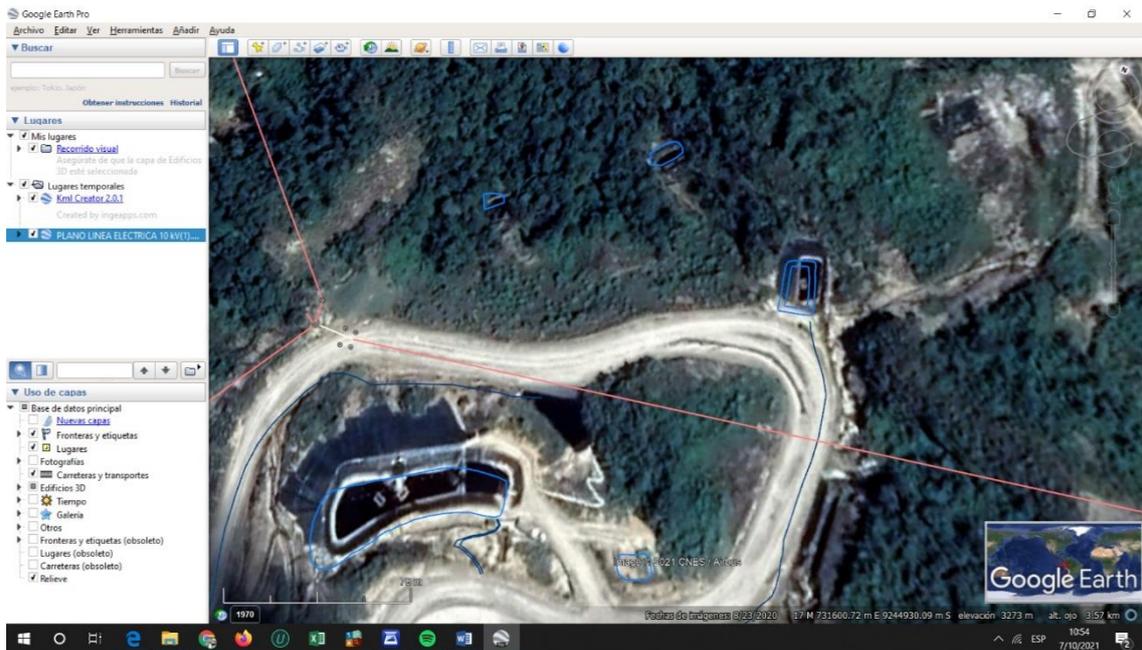
## Permiso para excavaciones y zanjas

 <b>JCM PERU S.R.L.</b> <small>COMERCIALIZADORA DE MATERIALES DE CONSTRUCCION</small>		<b>PERMISO PARA EXCAVACIONES Y ZANJAS - PETAR</b> <b>FE-COR-SIB-07.05-01</b>		V-01	
Área: <u>MANTENIMIENTO</u>	Lugar: <u>Subo Poto 11</u>	Fecha: <u>17-02-21</u>			
Hora Inicio: <u>7:00 AM</u>	Hora Final: <u>18:00</u>	Número: <u>176-JC07-018-02-21</u>			
Descripción del Trabajo: <u>Excavación DE hoyo y construcción DE S-PAT</u>					
Dimensiones: Largo: <u>2</u> (m) Ancho: <u>1</u> (m) Profundidad: <u>1,2</u> (m)					
Procedimiento/Plan de Trabajo: <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Inspección visual del Área de Trabajo</li> <li>2. Evaluación de riesgos y peligro.</li> <li>3. Asegura que el personal cumple con el permiso de aislamiento /Excavación</li> <li>4. Utilizar el cuaderno de operación segura.</li> <li>6. Preguntar que el personal se mantenga alejado de la malla</li> <li>7. Supervisión constante.</li> </ol>					
Responsables del Trabajo / Personal Autorizado:					
Ocupación	Nombres y Apellidos	Firma Inicio	Firma Término	S	T
1. OP.	1. <u>Daniel Ambrogio Ramirez</u>	1. <u>[Firma]</u>	1. <u>[Firma]</u>	/	/
2. OP.	2. <u>Ezequiel Goicoechea Medina</u>	2. <u>[Firma]</u>	2. <u>[Firma]</u>		
3. OP.	3. <u>Robert D. Naranjo Lopez</u>	3. <u>[Firma]</u>	3. <u>[Firma]</u>		
4. OP.	4. <u>San Andres de Pando Ramirez</u>	4. <u>[Firma]</u>	4. <u>[Firma]</u>		
Equipo de Protección Requerido					
<input checked="" type="checkbox"/> Casco con carrilera	<input type="checkbox"/> Arnés de seguridad	<input checked="" type="checkbox"/> Mameluco	<input type="checkbox"/> Correa para lámpara		
<input checked="" type="checkbox"/> Guantes de jebe	<input type="checkbox"/> Botas de jebe	<input type="checkbox"/> Morral de lona	<input checked="" type="checkbox"/> Protector de oídos		
<input checked="" type="checkbox"/> Respirador c/gases, polvo	<input checked="" type="checkbox"/> Protector visual	<input checked="" type="checkbox"/> Otros: <u>Guantes de cuero</u>			
Herramientas, Equipos y Material: <u>pico, Palano, Barreta, casco con barbiguillo, Mameluco, guantes de cuero, protección de oídos, respirador de gases.</u>					
Suelo y Sostenimiento					
Suelo: <input checked="" type="checkbox"/> Estable (Muy Cohesiva:90°) <input type="checkbox"/> Tipo A(Cohesivo,Estable:53°) <input type="checkbox"/> Tipo B(Estabilidad Media:45°) <input type="checkbox"/> Tipo C (Estabilidad Baja:34°)					
Sostenimiento: <input checked="" type="checkbox"/> No necesita <input type="checkbox"/> Inclinado <input type="checkbox"/> Banqueado <input type="checkbox"/> Apuntalado					
Descripción del sostenimiento: <u>NO APLICA</u>					
Controles					
Instalaciones subterráneas	SI <input type="checkbox"/>	N/A <input checked="" type="checkbox"/>	Perímetro cercado y con letreros	SI <input checked="" type="checkbox"/>	N/A <input type="checkbox"/>
Instalaciones aéreas	SI <input checked="" type="checkbox"/>	N/A <input type="checkbox"/>	Vigias para trabajos con equipos	SI <input type="checkbox"/>	N/A <input checked="" type="checkbox"/>
Edificaciones y estructuras vecinas	SI <input type="checkbox"/>	N/A <input checked="" type="checkbox"/>	La excavación se declaró espacio confinado	SI <input type="checkbox"/>	N/A <input checked="" type="checkbox"/>
Accesos con escaleras o rampas	SI <input type="checkbox"/>	N/A <input checked="" type="checkbox"/>	Charlas diaria de 5 m. sobre peligros	SI <input checked="" type="checkbox"/>	N/A <input type="checkbox"/>
Puentes cada 10 metros	SI <input type="checkbox"/>	N/A <input checked="" type="checkbox"/>	Diseño aprobado por Ing. Civil	SI <input type="checkbox"/>	N/A <input checked="" type="checkbox"/>
Avenidas de agua previstas y controladas	SI <input type="checkbox"/>	N/A <input checked="" type="checkbox"/>	Iluminación para trabajos nocturnos	SI <input type="checkbox"/>	N/A <input checked="" type="checkbox"/>
Autorizado por: Ingeniero Supervisor  <b>DEYVE DANIEL ZARATE CALIXTO</b> Ingeniero Electricista CIP N° 246914			Autorizado por: Superintendente / Jefe de Área  <b>Eduardo Rubio Valle</b> SUPERVISOR DE MANTENIMIENTO MINERA LA ZANJA S.R.L.		
Firma: _____			Firma: _____		
Fecha: <u>17/02/21</u> Inicio: <u>13/02/21</u> Fin: <u>17/02/21</u>			Fecha: <u>17/02/21</u>		

## Ubicación de la unidad minera Zanja, Cajamarca



## Ubicación de los pozos a tierra – subestaciones



## Mi presencia en el lugar de trabajo



## Evidencia de la construcción de los pozos a tierra



## Terminación del pozo a tierra



## Pozo a tierra terminado y tapado



## Las pruebas para la resistividad del pozo a tierra

