



**Universidad
Continental**

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Eléctrica

Tesis

**Malla a tierra en un área arenosa y protección
S.E. HI del proyecto Renovandes
Chanchamayo**

Blademir Antonio Maita Cipriano

Huancayo, 2018

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Electricista



Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Obra protegida bajo la licencia de [Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Perú](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/peru/)

ASESOR
Dr. CÉSAR QUISPE LÓPEZ

AGRADECIMIENTO

A todos los Ingenieros de la Facultad por inculcarme sus conocimientos para lograr que sea un buen profesional.

A mi madre y hermanos por el apoyo
constante en mis estudios y en mi trabajo.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTO	iii
ÍNDICE.....	v
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT	xvi
INTRODUCCIÓN.....	xvii
CAPÍTULO I.....	19
PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO	19
1.1. Planteamiento y formulación del problema	19
1.1.1. Formulación del problema.....	21
1.2. Objetivos	22
1.2.1. Objetivo general.....	22
1.2.2. Objetivos específicos	22
1.3. Justificación e importancia.....	22
1.3.1. Justificación social.....	22
1.3.2. Justificación técnica.....	23
1.3.3. Justificación económica.....	23
1.4. Importancia	24
1.5. Hipótesis y descripción de variables	24
1.5.1. Hipótesis general	24
1.5.2. Hipótesis específicas.....	24
1.5.3. Descripción de variables.....	25
1.5.4. Operacionalización de las variables.....	26
CAPÍTULO II.....	27
MARCO TEÓRICO	27
2.1. Antecedentes del problema	27
2.1.1. Nacional.....	27
2.1.2. Internacional	28

2.2.	Bases teóricas	30
2.2.1.	Terminología utilizada.....	30
2.3.	Normas y estándares aplicables	33
2.4.	Resistividad del suelo o terreno	34
2.4.1.	Resistividad del suelo (ρ)	34
2.4.2.	Resistividad aparente (ρ_a).....	34
2.4.3.	Elementos que influyen en la resistividad del suelo.....	35
2.5.	Estructura del suelo	36
2.5.1.	Resistividad por su composición	36
2.5.2.	Tratamiento del terreno.....	37
2.6.	Métodos para determinar la resistividad aparente.....	38
2.6.1.	Dirección para mediciones de resistividad	39
2.6.2.	Método de tres puntos o método de variación de profundidad.....	39
2.6.3.	Método de cuatro puntos	40
2.6.4.	Sistema simétrico.....	43
2.7.	Modelo de suelo	44
2.7.1.	Modelo de suelo uniforme	44
2.7.2.	Modelo de suelo bicapa	45
2.7.3.	Modelo de suelo multiplaca.....	47
2.8.	Efecto de la corriente en el cuerpo humano	48
2.9.	Cálculos de diseño de malla de puesta a tierra.....	50
2.9.1.	Calculo de la corriente máxima a disipar por la malla (I_G)	50
2.9.2.	Corriente de falla de secuencia cero (I_0)	50
2.9.3.	Corriente simétrica de falla a tierra (I_F)	51
2.9.4.	Tiempo de falla (t_f) y tiempo de choque (t_s).....	51
2.9.5.	Factor de decremento (D_f).....	52
2.9.6.	Factor de crecimiento (C_p).....	53
2.9.7.	Factor de división de corriente (S_f).....	53
2.10.	Selección del Área del conductor ($AMCM$)	53
2.11.	Tensión de paso y de toque	55
2.11.1.	Tensión de paso (E_p)	55
2.11.2.	Tensión de toque (E_c)	55
2.11.3.	Resistividad de la capa superficial (ρ_s).....	56

2.11.4. Factor de disminución o aislamiento de la capa superficial (Cs).....	56
2.12. Cálculo de la resistencia de la malla	57
2.12.1. Cuadrícula de la malla.....	57
2.12.2. Resistencia de la malla (Rg).....	57
2.12.3. Resistencia de malla para suelo uniforme y bicapa.....	58
2.12.4. Cálculo de elevación de potencial de tierra (GPR)	60
2.13. Cálculo real de la tensión de paso y tensión de malla.....	60
2.13.1. Tensión máxima de malla (Em)	60
2.13.2. Tensión de paso (EP).....	62
2.14. Insumos y materiales para construcción de la malla.....	62
2.15. Medición de la resistencia de malla a tierra	65
2.15.1. Método de la caída de potencial.....	65
2.15.2. Método de la pendiente	67
2.15.3. Método de la intersección de curvas	68
2.16. Subestación eléctrica.....	71
2.17. Sistemas de protección en una subestación eléctrica	72
2.17.1. Apantallamiento	72
2.17.2. Relés de protección	73
2.18. Seguridad y procedimiento	75
2.18.1. Listado de equipos de protección personal	75
2.18.2. Secuencia de ejecución de malla a tierra.....	75
 CAPÍTULO III	 80
3. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN.....	80
3.1. Tipo y nivel	80
3.2. Método	81
3.3. Diseño y esquema de la investigación	81
3.4. Población, muestra y técnica de muestreo	82
3.4.1. Población	82
3.4.2. Muestra	82
3.4.3. Técnica de muestreo	82
3.5. Técnica e instrumento de acopio de datos.....	82
3.6. Técnicas de procesamiento de datos	83

CAPÍTULO IV	84
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	84
4.1. Procedimiento de análisis de malla a tierra.....	84
4.2. Datos de entrada para el cálculo de la malla a tierra en condiciones de suelo actual y modificado para hoja de cálculo o software CYMGrd	85
4.3. Análisis de resistividad y tensiones tolerables del terreno actual	86
4.3.1. Medición de la resistividad del terreno actual en condiciones naturales.....	86
4.3.2. Modelamiento del terreno actual	87
4.3.3. Resultados de la estratificación del terreno actual	88
4.3.4. Cálculo de la sección del conductor	89
4.3.5. Reticulado de la malla	90
4.3.6. Cálculo de la tensión de paso y contacto admisible	91
4.3.7. Cálculo de la resistencia de puesta a tierra de conductores enterrados en combinación de mallas y picas (varillas verticales)	92
4.3.8. Cálculo de IG y GPR	93
4.3.9. Cálculo de la tensión de malla y de paso tolerables	94
4.3.10. Tensión de malla y de paso tolerable	95
4.4. Análisis resistividad de suelo uniforme y suelo de dos capas modificado	95
4.4.1. Medición de la resistividad del suelo uniforme.....	95
4.4.2. Modelamiento del terreno uniforme	96
4.4.3. Modelamiento del terreno de dos capas modificado (suelo actual y suelo uniforme)	97
4.4.4. Resultados de la estratificación del terreno de dos capas modificado.....	99
4.4.5. Resultados de la estratificación del terreno de dos capas modificado.....	99
4.4.6. Cálculo de la sección del conductor	99
4.4.7. Reticulado de la malla	100
4.4.8. Cálculo de la tensión de paso y contacto admisible	101
4.4.9. Cálculo de resistencia de puesta a tierra con conductores enterrados mallas y picas (varillas verticales)	102
4.4.10. Cálculo de IG y GRP.....	102
4.4.11. Cálculo de la tensión de malla y de paso tolerables.....	103
4.4.12. Tensión de malla y de paso tolerables.....	103
4.5. Prueba de hipótesis.....	104
4.5.1. Hipótesis general	104

4.5.2. Hipótesis específicas.....	105
4.5.3. Diferencia entre la resistencia de malla en condiciones naturales y modificada	110
4.5.4. Diferencia entre el GRP en terreno natural y terreno modificado	111
4.5.5. Discusión de los resultados.....	111
CONCLUSIONES.....	115
RECOMENDACIONES	118
ANEXOS	119
A. Ubicación y planos del proyecto	119
B. Reporte fotográfico del proyecto	129
BIBLIOGRAFÍA	132

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Operación de variantes	26
Tabla 2. Resistividad de suelo promedio.....	36
Tabla 3. Efectos de la corriente a frecuencia industrial sobre el cuerpo humano ($1.0\text{ s} < t < 3.0\text{ s}$).....	50
Tabla 4. Factores de decremento	52
Tabla 5. Constante de material de conductores	54
Tabla 6. Dimensiones de conductores	55
Tabla 7. Configuración de picas según la profundidad del electrodo Fuente manual fluke 1625	67
Tabla 8. Medición de la resistividad del terreno actual eje 1 y eje 2.....	86
Tabla 9. Resultado de resistividad aparente del terreno actual.....	88
Tabla 10. Cálculo de la sección del conductor	89
Tabla 11. Longitud del conductor de la malla a ser enterrado	90
Tabla 12. Tensiones de paso y contacto admisible.....	91
Tabla 13. Calculo de resistencia de puesta a tierra.....	92
Tabla 14. Cálculo del IG y GRP	93
Tabla 15. Tensión de malla y paso tolerable	94
Tabla 16. Análisis final de tensión de malla y paso tolerable en suelo actual.....	95
Tabla 17. Mediciones de la resistividad en dos direcciones utilizando el método de Wenner.....	95
Tabla 18. Resultado de resistividad de suelo uniforme	97
Tabla 19. Datos para insertar al software CYMGrd.....	98
Tabla 20. Resultados de suelo estratificado de dos capas	99
Tabla 21. Cálculo de la sección del conductor	99
Tabla 22. Análisis de la geometría de la malla.....	100
Tabla 23. Tensiones de paso y contacto admisible.....	101
Tabla 24. Resistividad de la malla a tierra en terreno de dos capas	102
Tabla 25. Calculo del IG y GPR.....	102
Tabla 26. Tensiones de malla y paso tolerables	103

Tabla 27. Análisis de la tensión de malla y paso tolerable en suelo de dos capas modificado	103
Tabla 28. Pruebas de chi-cuadrado de Pearson	104
Tabla 29. Resistividad del terreno en condiciones naturales.....	105
Tabla 30. Medidas tomadas en eje 1 y eje 2 en terreno uniforme	106
Tabla 31. Protección en condiciones naturales.....	108
Tabla 32. Protección en un terreno de dos capas en condiciones modificadas	109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Suelo no-homogéneo. La resistividad aparente $\rho(a)$ es el promedio de ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 -Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea, 2013.....	35
Figura 2. Dirección recomendada para medir resistividad Motorola STD R56.....	39
Figura 3. Método de medición de tres puntos IEEE std 81 – 2012.....	40
Figura 4. Arreglo Wenner – IEEE 81 – 1993.....	41
Figura 5. Combinación de arreglos Wenner.....	42
Figura 6. Arreglo Schlumberger – IEEE 81 – 1993.....	43
Figura 7. Conexión de sistema simétrico.....	44
Figura 8. Curva característica de un suelo homogéneo.....	44
Figura 9. Curvas características de suelo de dos capas.....	46
Figura 10. Modelo de suelo de dos capas.....	46
Figura 11. Grafica de Sunde.....	47
Figura 12. Suelo multiplaca.....	48
Figura 13. Efectos de la corriente sobre el cuerpo humano.....	49
Figura 14. Bentonita sódica.....	63
Figura 15. Molde de soldadura exotérmica.....	64
Figura 16. Varilla Coperweld.....	65
Figura 17. Método de caída de potencial – Escuela técnica Schneider electric P-0009.....	66
Figura 18. Regla del 61.8 %.....	68
Figura 19. Procedimiento para obtener los valores EC.....	69
Figura 20. Valores obtenidos EC1, EC2 y EC3.....	69
Figura 21. Hallando λ	70
Figura 22. Punto de resistencia.....	71
Figura 23. Factor de corrección EC Medición de la tensión de paso y toque.....	71
Figura 24. Configuración de la malla de tierra profunda proyectada.....	86
Figura 25. Datos insertados al software CYMGrd para analizar el terreno actual.....	87
Figura 26. Resultados de la resistividad aparente de la estratificación del terreno actual en software CYMGrd.....	88
Figura 27. Reporte del análisis de suelo en software CYMGrd, indicando un error de 25.91%.....	89

Figura 28. Resultados de estratificación de suelo de dos capas en (terreno actual)	89
Figura 29. Tipo de diseño de la malla (rectangular).....	91
Figura 30. Valores asumidos de las distancias entre electrodos del eje 1 y eje 2 del terreno uniforme en el software CYMGrd	96
Figura 31. Reporte del terreno uniforme	96
Figura 32. Corte proyectado del terreno de dos capas.....	98
Figura 33. Terreno de dos capas modificado.....	98
Figura 34. Resultados de análisis en software CYMGrd del suelo estratificado de dos capas modificado.	99
Figura 35. Configuración de la malla (rectangular)	101
Figura 36. Tensión de paso y contacto admisible, en un terreno uniforme.....	101
Figura 38. Resistividad del terreno en condiciones naturales	105
Figura 39. Resistividad del terreno uniforme proyectado para la SE H1	107
Figura 40. Protección en condiciones naturales tensión de toque	108
Figura 41. Protección en condiciones naturales tensión de paso.....	108
Figura 42. Protección en condiciones modificadas tensión de toque	109
Figura 43. Protección en condiciones modificadas tensión de paso.....	110
Figura 44. Diferencia de resistencia de malla de ambos terrenos	111
Figura 45. Diferencia del GRP	111

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Localización del proyecto	119
Anexo 2. Coordenadas de localización.....	120
Anexo 3. Plano unifilar de la SE H1 del Proyecto Renovandes.....	121
Anexo 4. Malla de tierra profunda.....	122
Anexo 5. Ingeniería de detalle de la instalación, montaje y comisionado.....	123
Anexo 6. Certificado de calibración hoja 1	124
Anexo 7. Certificado de calibración hoja 2	125
Anexo 8. Calicata C_01 Proyecto CH H1	126
Anexo 9. Plan de mantenimiento de sistema de malla atierra	127
Anexo 10. Metrado y presupuesto malla a tierra profunda	128
Anexo 11. Estudio de calicata	129
Anexo 12. Corte de terreno para la futura SE H1	129
Anexo 13. Soldadura exotérmica de malla tierra	130
Anexo 14. Tratamiento de puesta a tierra.....	130
Anexo 15. Tapizado de pozo a tierra.....	131

RESUMEN

Título: Malla a tierra en un área arenosa y protección de la SE H1 del Proyecto Renovandes - Chanchamayo

Autor: Blademir Antonio Maita Cipriano

La investigación responde al problema:

¿Influye la malla a tierra en un área arenosa en la protección de la SE (subestación eléctrica) H1 del Proyecto Renovandes - Chanchamayo?

Como objetivo se pretende: determinar la influencia de la malla a tierra en un área arenosa en la protección de la SE H1 del Proyecto Renovandes - Chanchamayo y como hipótesis se asume que la malla a tierra en un área arenosa influye positivamente en la protección de la SE H1 del Proyecto Renovandes – Chanchamayo. El diseño fue el no experimental, en la muestra de la SE H1 del Proyecto Renovandes – Chanchamayo, a quien se aplicó la malla de puesta a tierra, basado en el Análisis de criticidad que permitió mejorar la confiabilidad operacional de la SE H1 del Proyecto Renovandes – Chanchamayo. Concluyendo que el procedimiento de la malla a tierra en un área arenosa que se describe y corresponde a la SE H1 del Proyecto Renovandes - Chanchamayo permite obtener niveles seguros de tensiones de paso y de toque dentro de la subestación (área cercada) y en sus proximidades. Puesto que la tensión de malla representa la peor tensión de toque posible dentro de la subestación (excluyendo los potenciales transferidos), esta clase de tensión se usará como base para el diseño.

Palabras clave: malla a tierra, área arenosa, protección, subestación eléctrica.

ABSTRACT

Title: Earth mesh in a sandy area and protection of the SE H1 of the Renovandes Project – Chanchamayo.

Author: Blademir Antonio Maita Cipriano

The investigation responds to the problem:

Does the mesh affect the ground in a sandy area in the protection of the S.E. (electrical substation) H1 of the Renovandes - Chanchamayo Project? The objective is to determine the influence of the mesh to the ground in a sandy area in the protection of the H1 SE of the Renovandes - Chanchamayo Project and as a hypothesis it is assumed that the mesh to the ground in a sandy area has a positive influence on the protection of the H1 of the Renovandes Project - Chanchamayo. The design was the non-experimental, in the sample of the H1 SE of the Renovandes - Chanchamayo Project, to whom the grounding mesh was applied, based on the criticality analysis that allowed to improve the operational reliability of the H1 SE of the Renovandes Project - Chanchamayo. Concluding that the procedure of the mesh to ground in a sandy area that is described and corresponds to the H1 SE of the Renovandes - Chanchamayo Project which allows to obtain safe levels of pass and touch voltages within the substation (fenced area) and in its vicinity. Since the mesh voltage represents the worst possible touch voltage within the substation (excluding the transferred potentials), this kind of voltage will be used as the basis for the design.

Keywords: earth mesh, sandy area, protection, electrical substation.

INTRODUCCIÓN

El diseño de mallas a tierra actualmente es muy controversial con respecto al terreno donde se planea diseñar la SE para disipar corrientes eléctricas bajo condiciones normales o de falla, en la presente tesis se justifica el diseño de una malla a tierra con mediciones, cálculos que se aproxima al modelado del terreno con un método óptimo y confiable, que en trabajos ya realizados se obtuvieron buenos resultados y una equipotencialidad casi perfecta de todo el sistema. Para así dimensionar de la manera más aceptable el conductor de la malla a tierra para obtener un ahorro en costos de suministros y montaje. Teniendo en consideración que a un mal dimensionamiento de la malla mayor será el costo de diseño y eso se reflejará en pérdidas económicas a la empresa concesionaria.

El presente trabajo se enfoca principalmente en razones académicas, una problemática que se presenta en distintos proyectos en la memoria de cálculo de sistemas de puesta a tierra, puesto que no hay un método estandarizado, solo se cuenta con recomendaciones de normas y estándares internacionales llegando a ser un indicador de la realidad local como internacional, se trata de justificar con métodos y procedimientos relacionados con los estándares actuales y puntualizar un criterio de diseño óptimo en el modelado del terreno, para evitar que surja diferencia de potenciales, inducidos por corrientes estáticas, atmosféricas y transitorias.

Contribuyendo con una mayor eficiencia ante protecciones por fallas a tierra, y garantizar la continuidad del servicio confiable dentro y fuera de la subestación.

Para realizar el presente trabajo se tomó como referencia estándares internacionales IEC/IEEE/NEC, normas peruanas, software CYMGrd, hojas de cálculo y para la recolección o procesamiento de datos se utilizó el paquete estadístico SPSS V.22, empleando algunas técnicas estadísticas como porcentajes, cruces de variable como r de Pearson, chi cuadrada, medias que nos han permitido realizar el análisis pertinente. En tal sentido, el trabajo que se presenta tiene como estructura lo siguiente:

Capítulo I, se presenta el planteamiento del problema, se determina la formulación del problema, la importancia y los alcances de la investigación y sus limitaciones.

Capítulo II, trata del marco teórico, donde abarca los antecedentes internacionales, nacionales y regionales, asimismo, las bases teóricas de la investigación que comprenden temas relacionados a las variables Malla a tierra en una área arenosa y protección SE H1. En las bases teóricas se desarrollaron temas relacionados a la Malla a tierra en un área arenosa como: teorías de puesta a tierra, concepto y principios de puesta a tierra, la malla a tierra en un área arenosa, su modelo, características, dimensiones y las definiciones de la malla a tierra en un área arenosa. Para la protección SE H1, se definió a través de los diversos conceptos de protección, y sus respectivas dimensiones, finalmente, se encuentra en este capítulo la definición de los términos básicos.

Capítulo III, se describe la metodología de la investigación, tipo y nivel de investigación, diseño de la investigación, población y muestra. Asimismo, la definición y operacionalización de las variables, los indicadores.

Capítulo IV, se describen los instrumentos de investigación y los resultados, donde se manifiesta la selección, validación y confiabilidad de los instrumentos. Asimismo, se encuentran los resultados estadísticos, la prueba de hipótesis y la discusión de resultados de los estudiantes de la especialidad de matemática y física de la Universidad Nacional del Centro de Perú. Finalmente, se presentan las conclusiones llegadas sobre nuestras hipótesis, en relación a nuestro problema y objetivos de investigación. También se presentan las recomendaciones, las referencias bibliográficas y los anexos respectivamente.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1. Planteamiento y formulación del problema

El desarrollo de la Memoria Descriptiva a nivel de Ingeniería de Detalle para la construcción de la nueva Subestación Eléctrica (SE) H1 60/22.9/13.8 kV que forma parte del proyecto de transmisión para conectar al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN) la Central Hidroeléctrica (CH) H1 de 20 MW donde se adjudicó a la Empresa de Generación Eléctrica (EGE) Santa Ana, quien contrata los servicios de GCZ para la construcción del proyecto de generación y transmisión de la CH H1 del proyecto Renovandes.

Para la evaluación de la potencia generada en la CH H1 hacia el SEIN, se tuvo previsto la construcción de la SE H1, para ello se realizó el estudio de una malla a tierra (MT) porque influye directamente en la protección de la SE; todo sistema de puesta a tierra (PT) debe diseñarse para respuesta dinámica con valores pequeños de impedancias transitorias, para obtener sobretensiones controlables al nivel del aislamiento y lograr un bajo número de salidas. En las últimas décadas han surgido inconvenientes con respecto a la protección adecuada de una SE que es de mucha importancia para los equipos eléctricos; como la gran pregunta que se hacen los proyectistas de una SE, ¿el terreno

influye o no? En el diseño de una malla a tierra, la causa se relaciona con los distintos tipos de procedimiento existentes para el diseño de la malla a tierra. (1)

Tras la revisión de trabajos de tesis de diferentes países, se obtiene la respuesta del ¿por qué no existe un procedimiento estándar para el modelamiento de terreno y el diseño de una malla a tierra?

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 de los sistemas de protección, estos no trabajan adecuadamente. (1)

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 nos darán falsas lecturas y un mal proceso de la planta industrial. Un buen sistema de puesta 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 de nuestro sistema de control. (2)

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 la presencia eléctrica estacionaria de los mismos 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 nos presente en nuestro sistema.

Con un diseño incorrecto la malla a tierra puede ocasionar daños irreparables en los equipos, o un mal funcionamiento entre ellos, pero lo más importante es que pueda ocasionar accidentes personales. De continuar la empresa concesionaria, tendrán pérdidas económicas por el deterioro de sus equipos y pérdidas económicas por afectar la producción con un personal expuesto al riesgo.

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 diseñadores.

Entonces podemos indicar que la malla a tierra en un área arenosa, es una función de la protección a través de procesos, la cual ha sido operacionalizada por sistemas al que proteger, con la finalidad de conocer el adecuado enmallado a tierra en un área arenosa de la SE H1 del proyecto Renovandes - Chanchamayo. Por estas consideraciones nuestra pregunta de investigación se ha formulada de la siguiente manera:

1.1.1. Formulación del problema

Problema general

¿Influye el diseño de una malla a tierra en un área arenosa en la protección de la SE H1 del Proyecto Renovandes - Chanchamayo?

Problemas específicos:

- a. ¿Cómo influye el diseño de una malla a tierra en un área arenosa en la SE H1 del Proyecto Renovandes – Chanchamayo?
- b. ¿Cuáles son los niveles de protección de la malla a tierra para la SE H1 del proyecto Renovandes - Chanchamayo?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Determinar la influencia del terreno en el diseño de la malla a tierra, para la protección de la SE H1 del Proyecto Renovandes - Chanchamayo.

1.2.2. Objetivos específicos

- a) Realizar el estudio de resistividad del terreno actual en condiciones naturales para la SE H1 del Proyecto Renovandes - Chanchamayo.
- b) Realizar el estudio de resistividad de un terreno uniforme para la SE H1 del Proyecto Renovandes - Chanchamayo.
- c) Justificar el nivel de protección en condiciones naturales del terreno actual para la SE H1 del Proyecto Renovandes - Chanchamayo.
- d) Justificar el nivel de protección en un terreno de dos capas modificado para la SE H1 del Proyecto Renovandes - Chanchamayo.

1.3. Justificación e importancia

1.3.1. Justificación social

La seguridad humana en una SE es un requisito primordial durante las condiciones normales o de falla, para asegurar que una persona transite o permanezca dentro o cerca de las instalaciones de una subestación con equipos energizados y no se vean expuestas a potenciales peligrosos o puedan sufrir descargas eléctricas. El sistema de malla a tierra debe proteger ante estos fenómenos electromagnéticos en la mayoría de los casos, pues estas son perturbaciones causadas por descargas electrostáticas y descargas atmosféricas.

1.3.2. Justificación técnica

Una malla a tierra en una SE es de vital importancia por la alta cantidad de componentes electrónicos como microprocesadores y transistores en los equipos eléctricos de protección, control y comunicación y estos han incrementado su susceptibilidad a disturbios eléctricos como lo son los transitorios. Cualquier tipo de daño puede ocasionar la continuidad, seguridad, flexibilidad y confiabilidad en el servicio y esto a su vez detener la operación de un proceso completo.

Es importante utilizar dispositivos de protección 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 electrónico deteriorado o defectuoso, ocasionado por descargas atmosféricas o diferencia de potencial, se tiene que detener parte del proceso o toda la planta industrial, generando pérdidas económicas; para evitar todo lo descrito anteriormente se tiene que realizar un buen sistema de puesta a tierra; estas son, entre otras, las razones de la necesidad de un buen sistema de puesta a tierra y una protección adicional para los equipos sensibles, así como para su mantenimiento.

1.3.3. Justificación económica

El estudio de malla a tierra en un área arenosa del proyecto Renovandes influye directamente en los costos a la empresa concesionaria EGE Santa Ana S.R.L. al plantear un estudio del terreno donde se planea ejecutar la SE H1, al proponer el corte del terreno y reemplazo del mismo para mejorar la resistividad del terreno, generando costos de movimiento de tierras y obras civiles no planificadas, que no se consideraban en el estudio de prefactibilidad. Para llevar a cabo este proyecto se requiere normas y estándares nacionales e internacionales y la bibliografía pertinente para el diseño de la malla. Además, se proyecta hacer recorridos e inspecciones al proyecto Renovandes que nos permita identificar el tipo de terreno, clima y análisis, solicitar la carga y de la potencia a ser instalada. Estos alcances se suman a los alcances ya mencionados.

El sustento y beneficio del presente estudio se da por los gastos innecesarios al momento de la ejecución de proyecto como retrasos no programados de obra, replanteos

de proyecto, repeticiones de la memoria de cálculo y los materiales consumibles que podría generar por un mal diseño de la malla a tierra. Se reafirma que todo costo en el estudio es sustentable para la concesionaria.

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: la instalación pueda acomodarse a las diferentes condiciones que se puede 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 general

La malla a tierra en un área arenosa influye positivamente en la protección de la SE H1.

1.5.2. Hipótesis específicas

- a) La resistividad del terreno actual en condiciones naturales para la SE H1 del Proyecto Renovandes - Chanchamayo es mayor a 100.
- b) La resistividad de un terreno uniforme para la SE H1 del Proyecto Renovandes – Chanchamayo es menor a 100.

- c) El nivel de protección en condiciones naturales del terreno actual para la SE H1 del Proyecto Renovandes – Chanchamayo es bajo.

- d) El nivel de protección en un terreno de dos capas modificado para la SE H1 del Proyecto Renovandes - Chanchamayo es alto.

1.5.3. Descripción de variables

Variable independiente (x):

- Malla a tierra en un área arenosa

Variable dependiente (y):

- Protección de la SE H1

1.5.4. Operacionalización de las variables

Tabla 1. Operación de variantes

VARIABLE INDEPENDIENTE	DEFINICIÓN	DIMENSIÓN	INDICADORES	INSTRUMENTO
Malla a tierra en un área arenosa.	Es un sistema de puesta a tierra que proporciona una resistencia baja a tierra remota, con el fin de minimizar la elevación del potencial de tierra.	Estudio del suelo	Calicata	Laboratorio
		Resistividad del terreno	Ohmios- metro	Telurómetro
		Resistencia de la malla a tierra	Ohmios	Telurómetro
		Tensión de toque y paso	Voltios	Voltímetro
VARIABLE DEPENDIENTE	DEFINICIÓN	DIMENSIÓN	INDICADORES	INSTRUMENTO
Protección de la SE H1	Son aquellas corrientes en condiciones normales y de falla que puede soportar una malla a tierra de una subestación eléctrica.	Protección contra sobretensiones eléctricas	Potencia	Voltímetro
		Protección contra sobrecorriente	Nivel de accionamiento	Amperímetro
		Protección contra descargas atmosféricas	Apantallamiento	Telurómetro
		Protección contra contacto o maniobra	Puestas a tierra	Telurómetro

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del problema

2.1.1. Nacional

Evaluación de la eficiencia energética y diseño óptimo de una línea de distribución en media tensión-10 kV. La tesis estudia los diferentes parámetros eléctricos que permiten cuantificar todos los fenómenos electromagnéticos, que influyen en el comportamiento de estos sistemas, y de los componentes a ellos conectados con la finalidad de cuantificar las pérdidas de energía y optimizar el diseño con la elección de la selección del conductor más conveniente. (2)

Diseño y ejecución de una puesta a tierra de baja resistencia. Este trabajo fue realizado con el objetivo de caracterizar los procesos físicos que intervienen en la fabricación de una puesta a tierra. La elaboración de este trabajo monográfico, es el producto de la experiencia laboral práctica del autor en el campo de la ingeniería eléctrica y la recopilación de material bibliográfico, revistas técnicas; para el diseño e instalación de una puesta a tierra que es de vital importancia porque contribuye en la solución de los problemas en el cumplimiento de las normas legales del mejoramiento de la calidad del servicio eléctrico. (3)

Modelado y análisis de la respuesta transitoria de puestas a tierra no extensas. Tesis de grado, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, 2012. En este trabajo se desarrolla una ruta de análisis para la definición del modelado de puesta a tierra y su respuesta frente a transitorios de corriente de impulso tipo rayo, aplicables al aterramiento de torres de líneas de transmisión; este modelo tiene como base de teoría de líneas de transmisión, y cuenta con la simplicidad y facilidad de su implementación al software, su aplicación plena al igual que las otras calidades. (4)

Optimización de la protección eléctrica de la subestación tierra colorada. Tesis de grado. Presenta una propuesta para la optimización de la protección del sistema eléctrico Tierra Colorada, considerado el sistema de subtransmisión en 60 kV y las redes de distribución en 10.5 kV, simula las fallas a lo largo de la red de estudio y el análisis de fallas reales, evalúa el desempeño de los ajustes de protección actuales y se propone alternativas de mejora. (5)

Metodología para la separación y cuantificación de las contribuciones armónicas en un punto de acoplamiento común (PAC). La presente investigación, se pretende la aplicación de la metodología propuesta, para dar un aporte a la solución de los problemas encontrados en la aplicación de la “Norma Técnica de los Servicios Eléctricos” (NTCSE), parte Calidad de Producto – Perturbaciones, restableciéndole de este modo, su aplicación plena al igual que las otras calidades. (6)

2.1.2. Internacional

Estudio de efectos y métodos de minimización de distorsiones armónicas en equipos de distribución eléctrica comercial e industrial. En este trabajo de investigación se llevó a cabo un estudio sobre las fuentes generadoras de armónicas y sus efectos en diferentes cargas eléctricas presentes comúnmente en instalaciones comerciales e industriales, Además se estudiaron los estándares que proporcionan las guías para limitar las distorsiones armónicas, en específico el estándar IEEE 519-1992, Así como también los equipos disponibles comercialmente para minimizarlas. (7)

Distorsión armónica producida por variadores de frecuencia para mejorar el desempeño de motores eléctricos trifásicos en el laboratorio de automatización de la

facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. Tesis de grado. En lo referente a la experimentación se efectuaron ensayos, en los cuales se varió las frecuencias del variador, en los rangos de 20, 40, 60 Hz de frecuencia de la red y 2.5, 7.5, 10, 15 kHz de frecuencia interna del variador, además se realizaron ensayos con el motor eléctrico trifásico trabajando al vacío y a plena carga. En estas circunstancias se hicieron mediciones de armónicos de tensión y de corriente y mediciones del factor de potencia. Dentro de las conclusiones obtenidas, se pudo determinar que la distorsión armónica es menor al tener la frecuencia fundamental, a esta frecuencia la presencia de armónicos disminuye, los motores son diseñados para un trabajo dado, que al alterar las condiciones lo sacará de su óptimo, al tener variaciones de frecuencias, para mejorar el desempeño de motores eléctricos trifásicos y reducir la distorsión armónica se requiere de la utilización de un filtro de armónicos (reactancia trifásica). Se realizaron mediciones después de haber sido instalado el filtro obteniendo resultados favorables. Se realizó una comparación del antes y después de ser instalado el filtro indicando la reducción de porcentajes de distorsión armónica total (THD), y el mejoramiento del factor de potencia (FP). (8)

Análisis de calidad de energía eléctrica en el nuevo campus de la Universidad Politécnica Salesiana. Tesis de grado. El objetivo del presente trabajo de Calidad de Energía Eléctrica es un medio para que, en la parte técnica, el abonado espere obtener del proveedor (empresa distribuidora) un suministro con tensiones equilibradas, sinusoidales y de amplitudes y frecuencias constantes. Entre los objetivos de la realización de esta tesis de Calidad de Energía Eléctrica es encontrar soluciones efectivas para corregir los disturbios y variaciones de voltaje y proponer conclusiones para corregir las fallas o problemas que se presenten en el sistema eléctrico. (9)

Evaluación de la calidad de energía en la Universidad Tecnológica de Pereira. Tesis de grado, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, 2008. El propósito de este trabajo fue plantear una metodología para evaluar la calidad de la energía en la Universidad Tecnológica de Pereira a través del analizador de redes eléctricas Topas 1000, y por medio de la información que este arroja, analizar y dar soluciones a las perturbaciones de las ondas de tensión y corriente (armónicos), desbalance de carga, factor de utilización de los transformadores, sobretensiones, análisis del factor de potencia, eventos de tensión y otros parámetros correspondientes a la calidad del

suministro eléctrico, además especificar el impacto económico de dichas deficiencias, teniendo en cuenta las normas y restricciones del sistema y de la legislación actual. (10)

Armónicas en sistemas de distribución eléctrica. Con este trabajo se pretende dar a conocer las fuentes y efectos principales de las armónicas en la red eléctrica y los equipos industriales utilizados en la transformación y aprovechamiento de la energía eléctrica, así como también exponer la metodología básica de análisis del problema armónico y los medios de supresión. Normalmente las armónicas no se eliminan completamente, sino que se reducen solo a niveles permisibles y seguros, normalizados por estándares, como los límites establecidos por el estándar 519 de IEEE. En los estudios armónicos se modelan equivalentes de la red eléctrica mediante paquetes computacionales con los que se obtiene valiosa información del comportamiento de la red ante fuentes armónicas. (1)

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Terminología utilizada

La terminología utilizada corresponde a la norma IEEE std. 80-2000 (11), que se presenta a continuación:

- ✓ **Malla de tierra:** un sistema de electrodos de tierra horizontales que consiste en un número de conductores desnudos interconectados y enterrados en la tierra, proporcionando una tierra común para dispositivos eléctricos o estructuras metálicas, usualmente en un lugar específico.
- ✓ **Elevación del potencial a tierra (GPR):** el máximo potencial eléctrico que un electrodo de tierra, malla o sistema puede alcanzar con respecto a un punto distante de tierra asumido a ser el potencial de tierra remota. Elevación de voltaje debido a fallas en el sistema y por la configuración de la conexión de los cables de neutro al sistema de tierra.
- ✓ **Falla a tierra:** es una conexión no intencional entre un conductor activo de un circuito y los conductores que normalmente no conducen corriente, las envolventes metálicas, canalizaciones metálicas, equipo metálico o tierra.

- ✓ **Corriente a tierra:** es una corriente fluyendo dentro o fuera del planeta Tierra o su equivalente trabajando como aterrizaje.
- ✓ **Corriente simétrica de falla a tierra:** es el valor rms máximo de la corriente simétrica de falla, después del inicio de una falla a tierra. Como tal, se representan los valores rms del componente simétrico en el primer medio ciclo de una onda de corriente que se desarrolla después del instante de una falla en un tiempo cero.
- ✓ **Factor de decremento:** es un factor de ajuste que se usa conjuntamente con los parámetros de la corriente simétrica de falla a tierra en los cálculos de aterrizaje orientados con seguridad. Se determina el equivalente rms de la onda de corriente asimétrica para una duración de falla dada, (t_f), tomado en cuenta para el efecto del “*dc offset*” inicial y su atenuación durante la falla.
- ✓ **Factor de división de la corriente de falla:** es un factor que representa al inverso de la relación de la corriente simétrica de falla a la parte de la corriente que fluye entre la rejilla de aterrizaje y en los alrededores del planeta Tierra.
- ✓ **Fibrilación ventricular:** restricción inmediata de la circulación sanguínea, es un efecto fisiológico producido por la corriente eléctrica.
- ✓ **Curva de gradiente de potencial:** es una gráfica del potencial de un sistema como función de la distancia a lo largo de una ruta especificada.
- ✓ **Potencial de toque o contacto:** la diferencia de potencial entre el aumento potencial de tierra (GPR) de una red o sistema de puesta a tierra y el potencial de superficie en la que una persona puede estar de pie, mientras que, al mismo tiempo tiene una mano en contacto con una estructura u objeto conectado a tierra. Las mediciones del voltaje de toque pueden ser en "circuito abierto" (sin la resistencia del cuerpo equivalente incluido en el circuito de medición) o en "circuito cerrado" (con la resistencia del cuerpo equivalente incluido en el circuito de medición).
- ✓ **Potencial de paso:** la diferencia de potencial de superficie que podría ser experimentado por una persona a una distancia de 1 metro con los pies sin hacer contacto con cualquier objeto conectado a tierra.

- ✓ **Resistividad del suelo:** representa la resistencia específica del suelo a cierta profundidad de un solo estrato, se obtiene indirectamente al procesar un grupo de medidas de campo, su magnitud se expresa en (Ω -m), es inversa a la conductividad. La resistividad eléctrica (ρ) es la relación entre la diferencia de potencial en un material y la densidad de corriente que resulta en el mismo. Es la resistencia específica de una sustancia. Numéricamente es la resistencia ofrecida por un cubo de 1m x 1m x 1m, medida entre dos caras opuestas.
- ✓ **Resistividad aparente del suelo:** la resistividad global de un volumen de suelo con diferentes propiedades. Es la que se obtiene en el trabajo de campo aplicando los diferentes métodos de medición.
- ✓ **Puesta a tierra o aterrizado:** sistemas, circuitos o equipos que están provistos con tierra con el propósito de establecer un circuito de retorno de tierra y mantener su potencial aproximadamente igual al potencial de la tierra.
- ✓ **Relé:** dispositivo conectado a un aparato mecánico de maniobra, que libera los órganos de retención permitiendo la apertura o el cierre del aparato.
- ✓ **Interruptor automático:** aparato mecánico de conexión capaz de establecer, soportar e interrumpir corrientes en las condiciones normales del circuito, así como de soportar durante un tiempo determinado e interrumpir corrientes en condiciones anormales especificadas del circuito tales como las de cortocircuito.
- ✓ **Seccionador:** aparato mecánico de maniobra que asegura, en posición de abierto, una distancia de seccionamiento que satisface condiciones especificadas.
- ✓ **Sobrecarga:** condición de funcionamiento en un circuito eléctricamente correcto que causa una sobreintensidad.
- ✓ **Cortocircuito:** conexión accidental o intencional, de dos o más puntos de un circuito que normalmente están a distinto potencial, mediante una resistencia o impedancia de valor relativamente bajo.

- ✓ **Intensidad diferencial (I_A):** valor eficaz de la suma vectorial de las intensidades que circulan por el circuito principal del interruptor diferencial.
- ✓ **Distancia de descarga (S_m):** longitud del último paso de la guía de un rayo, bajo la influencia de la tierra o un terminal que lo atrae.
- ✓ **Corriente de retorno (I_c):** corriente que circula entre la tierra y la nube, una vez que la guía de un rayo establece una ruta ionizada por la cual la tierra trata de neutralizar la carga de la nube.
- ✓ **Tensión crítica de flameo (CFO):** porcentaje de rayos que se espera, y no sea efectivamente apantallado.
- ✓ **Altura efectiva del apantallamiento (h_e):** pórtico que sostiene los conductores de fase más elevados de la subestación, a la cual se debe instalar el cable de guarda para un apantallamiento efectivo.

2.3. Normas y estándares aplicables

- CNE - Código Nacional de Electricidad Suministro y Utilización – 2001 / 2006 / 2011
- NPT – Norma Técnica peruana – 370.303: “Instalaciones eléctricas en edificios - Protección para garantizar la seguridad. Protección contra choques eléctricos”. Anexo (A-3). NTP 370.053.
- Ley de Concesiones Eléctricas y Reglamento
- Ley general de Residuos Sólidos N° 27314
- OSHA – *Occupational Safety and Health Administration*
- IEC – *The International Electrotechnical Commission*
- IEEE std 80-2000 "*Guide for Safety in AC Substation Grounding*".
- IEEE std 81-1983 y 2012 "*Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System*".
- IEEE std 142-2007 *Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems*.

- ASTM – *American Society for testing and materials* D3633-98: es un estándar que muestra cómo medir la resistividad del suelo cuando es imposible hacerlo directamente en este por la presencia de pavimentos de gran extensión y se quiere evitar romper el concreto para clavar los electrodos de prueba.
- MOTOROLA R56 “*Standards and Guidelines For Communication Sites*”. Norma aplicada para la puesta a tierra de sistemas de comunicación.

2.4. Resistividad del suelo o terreno

2.4.1. Resistividad del suelo (ρ)

Viene a ser la resistencia específica de un área de suelo o estrato lo cual variará horizontal y verticalmente, procesando diferentes mediadas en el patio donde será ubicado la subestación aplicando métodos de prospección de suelo basándose en mediciones directas, empleando un equipo de medición llamado telurómetro, su unidad de medida es el ohmio-metro. Se caracteriza por su resistividad (ρ) (naturaleza del terreno) en frecuencias operativas 50-60 Hz a baja frecuencia y a alta frecuencia llegando hasta los 25 kHz.

2.4.2. Resistividad aparente (ρ_a)

La resistividad aparente no aplica para suelos homogéneos, en campo se tiene suelos con concentraciones diferentes de elementos y cantidades variables, de ello se denomina resistividad aparente. El terreno se debe a sus propiedades heterogéneas que provoca líneas de campo eléctrico, producto de ello las corrientes no se distribuyen uniformemente. surge cuando se realizan mediciones sobre un subsuelo heterogéneo donde la resistividad medida llamada resistividad aparente es ficticia ya que es un “promedio” de las resistividades bajo cada uno de los electrodos. (3)

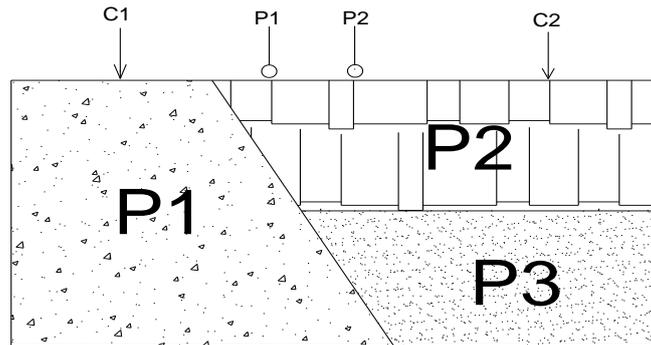


Figura 1. Suelo no-homogéneo. La resistividad aparente $\rho(a)$ es el promedio de ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 -Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea, 2013

Fuente: elaboración propia

2.4.3. Elementos que influyen en la resistividad del suelo

La naturaleza propia del terreno y los efectos climáticos al que están sometidos hacen que sea un terreno heterogéneo, estudios de diferentes científicos proponen tablas genéricas indicando rangos de valores de resistividad, a partir de información geológica; sin embargo, las condiciones varían de una localidad a otra, por lo tanto, son aproximaciones. (12)

- ✓ **Composición del suelo:** los suelos están compuestos principalmente, por óxido de silicio y óxido de aluminio que son altamente resistivos; sin embargo, la presencia de sales y agua en ellos mejora notablemente la conductividad por fenómenos electroquímicos y electrolíticos.
- ✓ **Concentración de sales:** las sales contienen electrolitos al ser disueltos en agua ocluida en el terreno a una temperatura determinada, la mayor o menor solubilidad, así como el grado de disociación del electrolito depende de los tipos de sales disueltas que afectan la resistividad del terreno.
- ✓ **Humedad:** la humedad es un factor que influye en la resistividad del terreno inversamente, a mayor humedad menor es la resistividad del suelo, vale decir que los terrenos secos presentan una alta resistividad, mientras que los suelos húmedos presentan una menor resistividad.
- ✓ **Temperatura:** la disminución de la temperatura igual o menor a cero incrementa considerablemente la resistividad del suelo debido a que el agua contenida en el suelo

se congela y el hielo es un mal conductor. Al aumentar la temperatura, disminuye la humedad del suelo aumentando la resistividad; sin embargo, hay que tener en cuenta este fenómeno, que afecta más a la superficie del suelo, en capas interiores la humedad es constante.

- ✓ **Granulometría:** el tipo y tamaño granular como también los espacios intergranulares tienen efecto en la manera como es retenida la humedad, con granos grandes la humedad puede ser retenida debido a la tensión superficial en los puntos de contacto.
- ✓ **Compactación:** la compactación solo tiene influencia cuando no se ha alcanzado la saturación del suelo, lo cual ocurre cuando el espacio intergranular es llenado lo más posible y a mayor compactación del suelo, mayor es el contenido de humedad y presenta una disminución de resistividad.
- ✓ **Estratigrama:** cada capa de terreno que conforma la resistividad varía significativamente; según el área geográfica y la ubicación, puede definirse que la resistividad del terreno es una magnitud variable y para poder conocer su valor es necesario medirla en condiciones climáticas favorables y no favorables y así permitirá establecer su magnitud existente.

2.5. Estructura del suelo

2.5.1. Resistividad por su composición

La resistividad del terreno de una subestación es esencial para determinar la composición general del suelo y el grado de homogeneidad, las pruebas de prospección geo-eléctrica proporcionan información útil sobre la presencia de varias capas y la naturaleza del suelo, y da una aproximación de resistividad del suelo donde se hizo el estudio.

Tabla 2. Resistividad de suelo promedio

Tipo de suelo	Rango de resistividad (Ω - m)
Terrenos pantanosos	< 30
Lama	5 – 100
Humus	10 – 150
Limo	20 – 100
Arcilla plástica	50
Arena arcillosa	50 – 500

Arcillas	80 – 300
Calizas blandas	100 - 300
Tierra de jardín	140 - 480
Suelo pedregoso cubierto de césped	300 - 500
Caliza fisurada	500 - 1000
Rocas de mica y cuarzo	800
Caliza compacta	1000 - 5000
Granito	1500 - 10000
Hormigón	2000 - 3000
Arena común	3000 - 9000
Basalto o grava	10000 - 20000

Fuente: IEE – 80 std - 2000

2.5.2. Tratamiento del terreno

Por sus propiedades altamente resistivas para un terreno de baja resistividad previamente, se considera:

Para terrenos de media resistividad donde se realice el cambio de terreno de los pozos o zanjas en forma parcial o total, el porcentaje de reducción puede estar de la siguiente manera:

- Cambio parcial de 20 % a 40 % de reducción de la resistencia eléctrica resultante.
- Cambio total de 40 % a 60 % de reducción de la resistencia eléctrica resultante.

El uso de bentonita, una arcilla natural que contiene el mineral montmorillinita, el cual se formó por la acción volcánica hace muchos años. No es corrosivo, es estable y tiene una resistividad de $2.5 \Omega \cdot m$ en una humedad del 300 %. La baja resistividad resulta principalmente de un proceso electrolítico entre el agua, Na_2O (soda), K_2O (potasio), CaO (lima), MgO (magnesia) y otras sales minerales que ionizan formando un electrolito fuerte con un rango de pH entre 8 a 10. Este electrolito se unirá gradualmente, como parte de la arcilla misma. Provista con una cantidad suficiente de agua, este incrementa hasta 13 veces su volumen seco y se adherirá a cualquier superficie que contacte. Debido a su naturaleza higroscópica, este actúa como un agente de secado que atrae cualquier humedad disponible del ambiente que lo rodea. La bentonita necesita agua para obtener

y mantener sus características favorables. Su contenido de humedad inicial se obtiene en una instalación cuando se prepara la mezcla. Una vez esté instalado, la bentonita cuenta con la presencia de una humedad para mantener sus características. La mayoría de los suelos tienen suficiente humedad, por lo tanto, la resequeidad no es un problema. La naturaleza higroscópica de la bentonita se aprovechará de la disponibilidad de agua para mantener su condición. Si se expone directamente a la luz solar, esta tiende a aislarse, previniendo que el proceso de resequeidad penetre mucho más. Esto no podría funcionar en un ambiente totalmente seco, debido a que la mezcla se puede contraer y agrietarse; de esta manera pierde contacto con el electrodo, incrementando la resistencia del mismo. (13)

Los electrodos de tipo químico consisten de un tubo de cobre lleno de sal. Los agujeros en el tubo permiten que, entre humedad, disuelva la sal y que permita que la solución de sal llegue hacia el interior de la tierra. Estos electrodos se instalan en agujeros y comúnmente se rellenan con un mejorador de suelo.

Los materiales mejoradores de suelos, algunos con una resistividad menor de $0.12 \Omega \cdot m$ (más o menos el 5 % de la resistividad de la bentonita), se colocan comúnmente alrededor de la varilla o alrededor de los conductores de puesta a tierra que se encuentran en una zanja, en una forma seca o en un compuesto premezclado. Algunos de estos materiales son permanentes y no derramarán ningún químico dentro del suelo. Otros materiales mejoradores de suelos disponibles se mezclan con la tierra del lugar en diferentes cantidades y lo derramará lentamente en el suelo, disminuyendo su resistividad.

2.6. Métodos para determinar la resistividad aparente

Se determina mediante fórmulas y va a depender de los métodos y arreglos utilizados por diversos análisis de estudios, estos deben ser realizados en varios lugares donde se proyecta la subestación. Existen varias capas y cada capa tiene una resistividad diferente, la resistividad varía apreciablemente con la profundidad, a menudo es deseable hacer pruebas a diferentes distancias, ya que cuando se incrementa la distancia de las pruebas, las corrientes de prueba penetran en las áreas más distantes en direcciones verticales horizontales y diagonales, sin importar cuánto se desvíe la trayectoria de corriente debido a variaciones del suelo. (14)

Es aconsejable incrementar la distancia entre los electrodos de prueba, con el fin de obtener valores precisos de las capas más profundas. Esto debido a que, a mayor separación, la corriente penetra más capas de suelo tanto de forma vertical como horizontal.

2.6.1. Dirección para mediciones de resistividad

Se recomienda realizar al menos tres mediciones en direcciones diferentes para obtener la muestra más óptima del modelado del terreno.

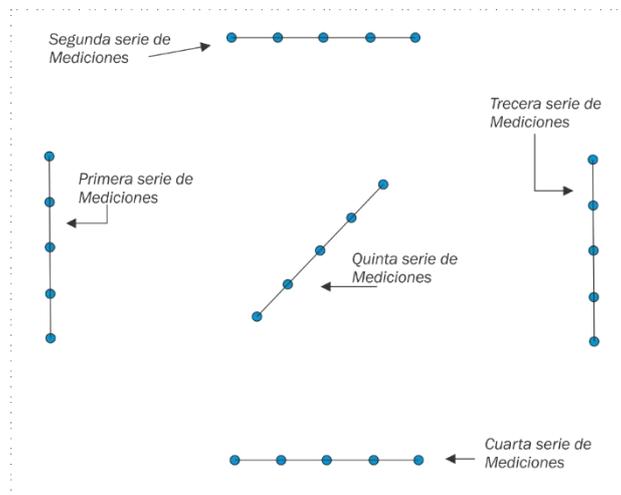


Figura 2. Dirección recomendada para medir resistividad Motorola STD R56
Fuente: elaboración propia

2.6.2. Método de tres puntos o método de variación de profundidad

Este método consiste en medir la resistencia de puesta a tierra de un electrodo tipo varilla y calcular la resistencia del suelo basado en la ecuación de resistencia a tierra de un electrodo vertical en un suelo homogéneo y datos geométricos de la varilla. Este método solo se debe aplicar cuando no se disponga del espacio suficiente para utilizar los métodos Wenner o Schlumberger, la prospección es mucho menor o solo se dispone de un telurómetro de tres electrodos. (11)

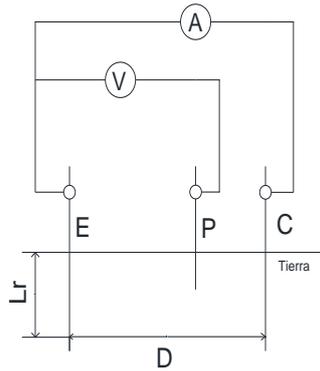


Figura 3. Método de medición de tres puntos IEEE std 81 – 2012
Fuente: elaboración propia

$$\rho = \frac{2\pi \cdot Lr \cdot R}{\ln \frac{4Lr}{r} - 1}$$

Ecuación 1. Resistividad con método de tres varillas
Fuente: elaboración propia

Donde:

ρ → Resistividad del terreno

R → Valor de la resistencia leído por el equipo

Lr → Longitud enterrada del electrodo

r → Radio del electrodo

E → Electrodo tipo varilla

P → Electrodo auxiliar

C → Electrodo de corriente

2.6.3. Método de cuatro puntos

Es la más utilizada para la resistividad aparente del suelo. Se instalan cuatro puntos de pruebas, llamados electrodos todos con la misma profundidad y con el espaciamiento al cual depende el arreglo que se utilice. El método consiste en inyectar una corriente controlada en los electrodos externos llamados *electrodos de corriente*, y a partir de esta y con la resistencia que presenta la tierra, se genera una diferencia de potencial entre los dos electrodos internos llamados *electrodos de potencial*, con estos dos parámetros

medidos se calcula la resistividad aparente mediante una fórmula que depende del factor geométrico del arreglo.

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

o también

$$\rho_a = \frac{4\pi a R}{n}$$

Donde:

$\rho_a \rightarrow$ Resistividad aparente del terreno ($\Omega - m$)

$R \rightarrow$ Resistividad medida (Ω)

$a \rightarrow$ Distancia entre electrodos (m)

$b \rightarrow$ Profundidad de penetración de los electrodos (m)

$n \rightarrow$ Factor aproximado que tiene un valor 1 y 2, (depende de la relación b/a)

De la ecuación se puede definir:

$$\rho = 4\pi a R \quad \text{Si } b > a$$

$$\rho = 2\pi a R \quad \text{Si } b < a$$

2.6.3.1. Arreglo Wenner

Este arreglo se da usando los cuatro electrodos alineados, igualmente separados a una distancia “a” y clavados a una misma profundidad “b”

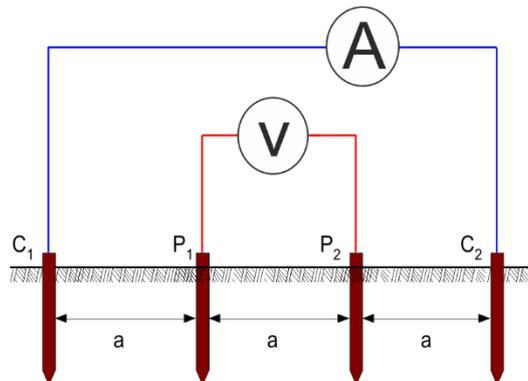


Figura 4. Arreglo Wenner – IEEE 81 – 1993
Fuente: elaboración propia

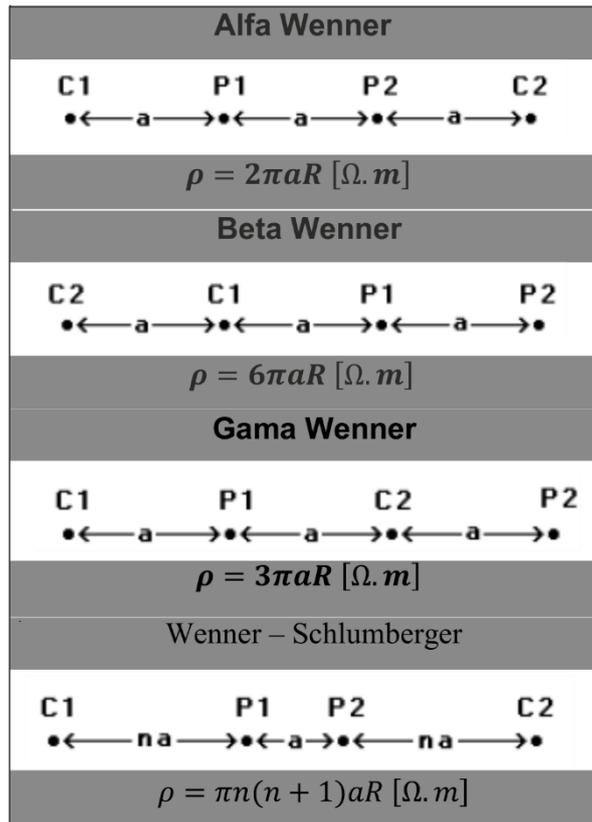
Donde:

C1 y C2: electrodos de corriente

P1 y P2: electrodos de potencia

si $b < a$, como es el caso más común:

$$\rho_a = 2\pi aR$$



*Figura 5. Combinación de arreglos Wenner
Fuente: elaboración propia*

2.6.3.2. Arreglo Shumberger

En este arreglo, al igual que en el de Wenner, los electrodos de emisión (corriente) y medición (tensión) están situados en línea recta, la variante de este arreglo radica en que la separación entre electrodos es simétrica, desigual para la correspondiente entre los electrodos de tensión y entre estos y los de corriente. (15)

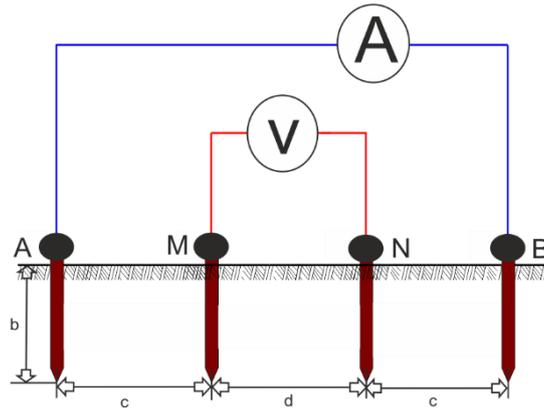


Figura 6. Arreglo Schlumberger – IEEE 81 – 1993
Fuente: elaboración propia

$$\rho_a = \frac{\pi c(c + d)R}{d}$$

Donde:

ρ_a → Resistencia aparente

C → Separación entre el electrodo de corriente y tensión

D → Separación entre los electrodos de tensión

R → Resistencia medida

2.6.4. Sistema simétrico

También es un arreglo de Wenner, del mismo modo se utiliza dos electrodos de intensidad y dos electrodos de tensión que se conectarán a los terminales del equipo de medición. Las cuatro picas se colocan simétricamente respecto a un punto central **0**, debajo del cual se va a medir la resistividad del terreno.

La relación entre la distancia de los electrodos de intensidad y la profundidad o estrato de terreno a la cual se está midiendo la resistividad aparente es:

$$h = \frac{1}{2}L$$

Con este método se puede obtener el valor de la resistividad promedio de todas las capas del terreno entre la superficie y una profundidad *h*.

La resistividad aparente se obtiene de:

$$\rho = \frac{\pi(L^2 - l^2)}{2l} \cdot R$$

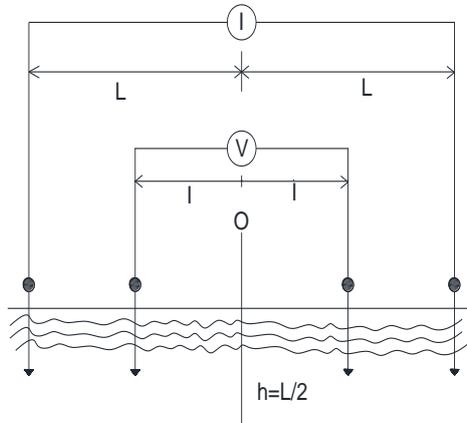


Figura 7. Conexión de sistema simétrico
Fuente: elaboración propia

2.7. Modelo de suelo

2.7.1. Modelo de suelo uniforme

Es usado cuando existe una variación moderada de la resistividad aparente. No más del 30 % del valor máximo, que raramente ocurre en la práctica en suelos homogéneos, el modelo de suelo uniforme puede ser razonablemente exacto.

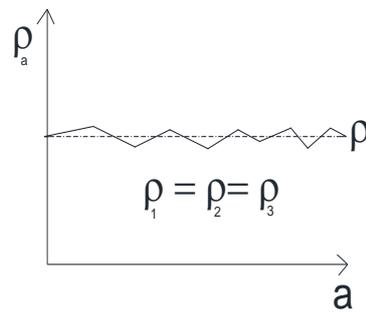


Figura 8. Curva característica de un suelo homogéneo
Fuente: elaboración propia

Para una aproximación de resistividad de suelo homogéneo se obtiene del promedio aritmético de la medición de la resistividad aparente donde:

$$\rho_a = \frac{\rho_{a1} + \rho_{a2} + \rho_{a3} + \rho_{an}}{n} \Omega m$$

$n = \text{número de medidas}$

O también

$$\rho_a = \frac{\rho_{amax} + \rho_{amin}}{2} \Omega$$

2.7.2. Modelo de suelo bicapa

La resistividad aparente varía en función a la distancia entre los electrodos de prueba, modelo de dos capas; es el más utilizado para casos en los cuales no es apropiado aplicar el modelo de suelo homogéneo, como por ejemplo cuando existe una gran variación en las mediciones de resistividad aparente, ya que este representa con más precisión al terreno en estudio.

Un modelo de suelo de dos capas se puede representar por una capa superior de profundidad infinita, el cambio brusco de la resistividad en los límites de cada capa del suelo se puede describir por medio de un factor de reflexión. El factor de reflexión, K, está dado:

$$k = \frac{p_2 - p_1}{p_1 + p_2}$$

$p_2 =$ Resistividad de la capa superior en $\Omega\text{-m}$

$p_1 =$ Resistividad de la capa inferior en $\Omega\text{-m}$

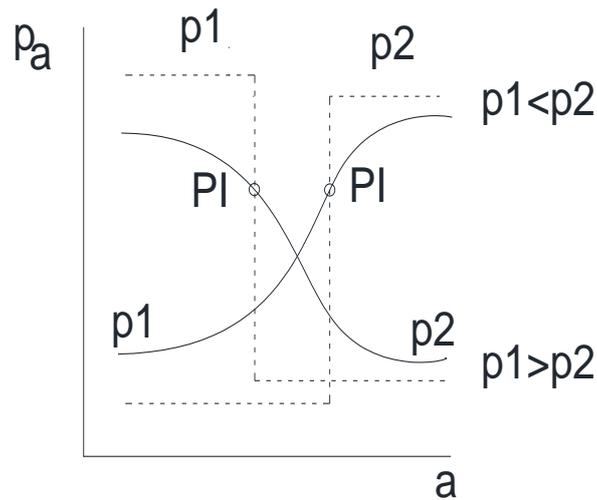


Figura 9. Curvas características de suelo de dos capas
Fuente: elaboración propia

2.7.2.1. Método de Sunde

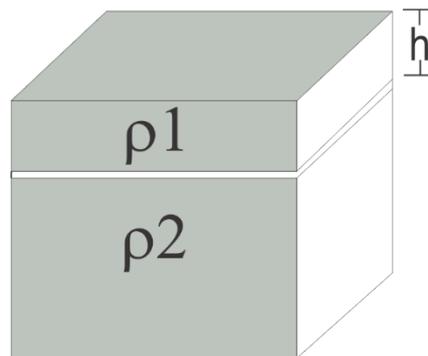


Figura 10. Modelo de suelo de dos capas
Fuente: elaboración propia

Este método toma valores de resistividad utilizando la configuración Wenner, los parámetros ρ_1 y ρ_2 que son obtenidos de la inspección de la curva de resistividad h de la capa superior es determinada por el método gráfico de Sunde, a continuación, su procedimiento.

- i. Trazar la gráfica ρ_a vs. a , con los datos obtenidos en la medición.
- ii. Estimar, por inspección de gráfica ρ_a vs. a , los valores de parámetros ρ_1 y ρ_2 .
- iii. Determinar la relación ρ_1/ρ_2 y seleccionar la correspondiente de la curva de la gráfica de Sunde (Figura 11) o interpolar y dibujar la curva en la gráfica.

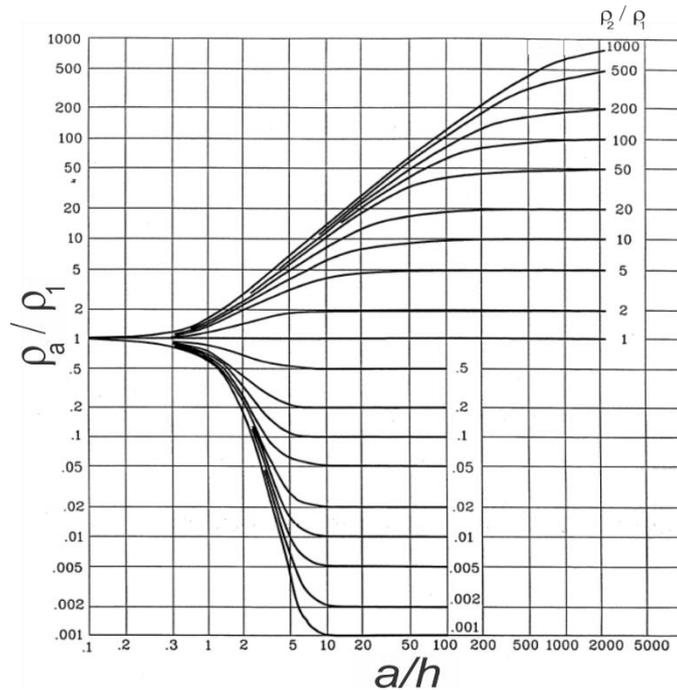


Figura 11. Grafica de Sunde
Fuente: elaboración propia

- iv. Seleccionar el valor de k en el eje ρ_a / ρ_1 , correspondiente al cambio de concavidad de la curva seleccionada en C.
- v. Obtener el valor correspondiente de a/h .
- vi. Obtener ρ_a del valor k seleccionada en D ($\rho_a = k \cdot \rho_1$) y determinar el valor de a de la curva ρ_a vs. a .
- vii. Determinar el valor de h de la relación a/h .

2.7.3. Modelo de suelo multiplaca

2.7.3.1. Método de Pirsón

El método de Pirsón puede ser considerado como una extensión del método de dos capas (método de Sunde), al dividirse la curva ρ_a x a en tramos ascendentes y descendentes queda evidenciado que el suelo de varias capas se puede analizar como una secuencia de curvas de suelos equivalentes a dos capas.

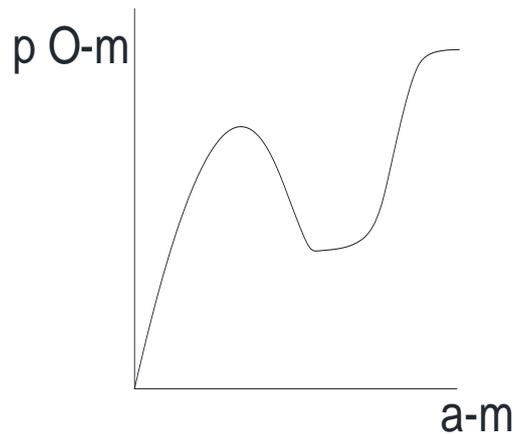


Figura 12. Suelo multiplaca
Fuente: elaboración propia

Considerado el primer trecho como un suelo de dos capas, se obtiene ρ_1 , ρ_2 y h_1 , al analizar el segundo trecho primero se debe determinar una resistividad equivalente, vista por la tercera capa. De esta forma se obtiene la resistividad ρ_3 y la profundidad de la capa equivalente.

2.8. Efecto de la corriente en el cuerpo humano

La magnitud de la corriente es conocida como el umbral de percepción en las personas, se puede sentir una sensación suave de hormigueo en sus manos o dedos causado por la corriente eléctrica que puede circular en el cuerpo ese momento (16).

Las corrientes de 1 a 6 mA, no daña la habilidad de una persona en controlar sus músculos para liberar un objeto con energía.

Tetanización: Consiste en la anulación de la capacidad de reacción muscular que impide la separación voluntaria del punto de contacto (los músculos de las manos y los brazos se contraen sin poder relajarse). Normalmente este efecto se produce cuando se superan los 10 mA.

Las corrientes entre 9 a 25 mA, son dolorosas y puede dificultar el movimiento a las personas, es imposible liberar objetos energizados sujetado con la mano. Este efecto no es permanente y puede desaparecer al interrumpir el flujo de la corriente.

Asfixia: Produce cuando la corriente eléctrica atraviesa el tórax. el choque eléctrico tetaniza el diafragma torácico y como consecuencia de ello los pulmones no tienen capacidad para aceptar aire ni para expulsarlo. Este efecto se produce a partir de 25-30 mA.

Las corrientes en el rango 60 a 100 mA producen fibrilación ventricular, paro cardíaco, abstinencia respiratoria, podría causar daño o muerte severa, se representa la figura con curvas según la Comisión Internacional Electrotécnica (IEC).

Fibrilación ventricular: Produce cuando la corriente pasa por el corazón y su efecto en el organismo se traduce en un paro circulatorio por rotura del ritmo cardíaco. El corazón, no puede bombear sangre a los diferentes tejidos del cuerpo humano. Ello es particularmente grave en los tejidos del cerebro donde es imprescindible una oxigenación continua de los mismos por la sangre. Se presenta con intensidades del orden de 100 mA y es reversible si el tiempo de contacto es inferior a 0.1 segundo. La fibrilación se produce cuando el choque eléctrico tiene una duración superior a 0.15 segundos.

Quemaduras: Internas o externas por el paso de la intensidad de corriente a través del cuerpo por Efecto Joule o por la proximidad al arco eléctrico. Se producen zonas de necrosis (tejidos muertos), y las quemaduras pueden llegar a alcanzar órganos vecinos profundos, músculos, nervios e incluso a los huesos. La considerable energía disipada por efecto Joule, puede provocar la coagulación irreversible de las células de los músculos estriados e incluso la carbonización de las mismas.

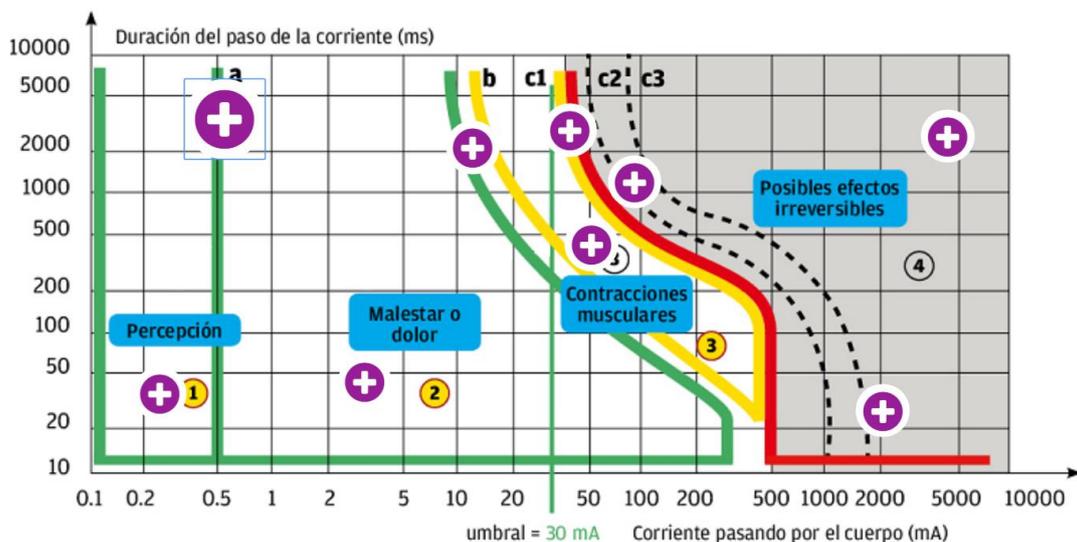


Figura 13. Efectos de la corriente sobre el cuerpo humano
Fuente: IEC 60479-1

Tabla 3. Efectos de la corriente a frecuencia industrial sobre el cuerpo humano ($1.0\text{ s} < t < 3.0\text{ s}$)

Corriente	Efectos experimentados
1 mA	Límite de la percepción
6 – 8 mA	Intervalo admisible, fastidio
9 – 25 mA	Malestar, dolor de músculo estriado
25 – 60 mA	Respiración difícil, contracción de músculos lisos
60 – 100 mA	Abandono, fibrilación ventricular ($t > 3\text{ seg.}$)
>100 mA	Paro cardiaco, quemadura, muerte

Fuente: elaboración propia

2.9. Cálculos de diseño de malla de puesta a tierra

2.9.1. Calculo de la corriente máxima a disipar por la malla (I_G)

Es un valor de diseño de la corriente de falla máxima:

$$I_G = I_F \cdot D_f \cdot S_f \cdot C_p$$

Donde:

$I_F = 3I_0 \rightarrow$ Corriente simétrica de falla a tierra en A

$D_f \rightarrow$ Factor de decremento para tener en cuenta la componente DC

$S_f \rightarrow$ Factor de división de corriente

$C_p \rightarrow$ Factor de crecimiento futuro de la subestación, considera el incremento futuro de falla

2.9.2. Corriente de falla de secuencia cero (I_0)

$$I_0 = \frac{E}{3 \cdot Z_f + (Z_1 + Z_2 + Z_3) + j(X_1 + X_2 + X_3)}$$

Donde:

$I_0 \rightarrow$ Corriente de falla de secuencia cero, valores RMS en kA

$E \rightarrow$ Tensión de fase – neutro RMS en V

$Z_f \rightarrow$ Impedancia de falla

Z_1, Z_2 y $Z_0 \rightarrow$ Son impedancias equivalentes de secuencia positiva, negativa y cero del sistema en el punto de falla.

X_1, X_2 y $X_0 \rightarrow$ Son reactancias equivalentes de secuencia positiva, negativa y cero del sistema en el punto de falla.

2.9.3. Corriente simétrica de falla a tierra (I_F)

Falla línea – línea – tierra, ignorando la resistencia de la falla y la resistencia de puesta a tierra.

$$(I_F)_{L-L-T} = 3 \cdot I_0 = \frac{3 \cdot E \cdot Z_2}{Z_1 \cdot (Z_0 + Z_2) + Z_2 \cdot Z_0}$$

Falla línea – tierra, ignorando la resistencia de la falla y la resistencia de puesta a tierra.

$$(I_F)_{L-T} = 3 \cdot I_0 = \frac{3 \cdot E}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

$I_0 \rightarrow$ Valor RMS de secuencia cero de la corriente simétrica de falla en A

$E \rightarrow$ Tensión fase – neutro RMS en V

$Z_1 \rightarrow$ Impedancia equivalente de secuencia (+) del sistema en el punto de falla

$Z_2 \rightarrow$ Impedancia equivalente de secuencia (-) del sistema en el punto de falla

$Z_3 \rightarrow$ Impedancia equivalente de secuencia (0) del sistema en el punto de falla

Una falla línea – tierra será peor si $Z_1 \cdot Z_0 > (Z_2)^2$ en el punto de la falla y una falla línea – línea -tierra será la peor si $Z_1 \cdot Z_0 < (Z_2)^2$, es común que un sistema dado $Z_1 = Z_2$.

2.9.4. Tiempo de falla (t_f) y tiempo de choque (t_s)

La duración de la falla y la duración del choque normalmente se asumen iguales, a menos que la duración de la malla sea de choques sucesivos, como los producidos por los recierres automáticos de los reclosers. La selección de t_f puede reflejar tiempos de despeje rápidos de la subestación de transmisión y tiempos de despeje lentos para

subestaciones de distribución. La selección t_F y t_s puede resultar en la combinación más baja de factores de decremento de corrientes de falla y corrientes permitidas por el cuerpo humano que están en un rango, t_F y t_s de 0.25 a 1s.

2.9.5. Factor de decremento (D_f)

Este factor se produce por el desplazamiento de la componente de corriente directa y por la atenuación de las componentes transitorias de corriente alterna y directa de la corriente de falla.

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

Donde:

$t_f \rightarrow$ Duración de la falla en segundos

$T_a \rightarrow$ Constante de tiempo de la componente DC (T_a)

$$T_a = \frac{X}{\omega R} = \frac{X}{R} \cdot \frac{1}{2\pi f}$$

$X, R \rightarrow$ Componentes de la impedancia subtransitoria de falla que se usa para determinar la relación $= \frac{X}{R}$

Tabla 4. Factores de decremento

Duración de la falla		Factor de decremento			
t_f		D_f			
Segundos	Hz	X/R=10	X/R=20	X/R=30	X/R=40
0.00833	0.5	1.576	1.648	1.675	1.688
0.05	3	1.232	1.378	1.462	1.515
0.10	6	1.125	1.232	1.316	1.378
0.20	12	1.064	1.125	1.181	1.232
0.30	18	1.043	1.085	1.125	1.163
0.40	24	1.033	1.064	1.095	1.125
0.50	30	1.026	1.052	1.077	1.101
0.75	45	1.018	1.035	1.052	1.068
1.00	60	1.013	1.026	1.039	1.052

Fuente: IEEE 80-std 2000

2.9.6. Factor de crecimiento (C_p)

Es determinado en función a la capacidad total de la subestación, cuando no se considera aumentos futuros de carga ni alimentadores, $C_p = 1$.

2.9.7. Factor de división de corriente (S_f)

Es una representación equivalente de los cables de guarda, neutros. Es conectarlos a la malla en la subestación y luego resolver el equivalente para determinar qué fracción de la corriente total de falla fluye entre la malla y la tierra circundante, y qué fracción fluye a través de los cables de guarda o neutros, hacia las tierras de los pies de torres que entran y sacan líneas de la subestación. S_f depende de:

$$(S_f)_{X/Y} = \left| \frac{(Z_{eq})_{X/Z}}{R_g + (Z_{eq})_{X/Z}} \right|$$

Donde:

$(Z_{eq})_{X/Z} \rightarrow$ Impedancia equivalente de X cables de guarda de líneas de transmisión y neutros de alimentadores de distribución

$R_g \rightarrow$ Resistencia del sistema de puesta a tierra

También es igual:

$$S_f = \frac{I_g}{3 \cdot I_0}$$

2.10. Selección del Área del conductor (A_{MCM})

$$A_{MCM} = I_f \cdot \frac{197.4}{\sqrt{\left(\frac{TCAP}{t_c \cdot \alpha_r \cdot \rho_r}\right) \cdot \ln\left(\frac{K_0 + Tr}{K_0 + T_a}\right)}}$$

Donde:

$A_{MCM} \rightarrow$ Área del conductor *en MCM*

$I_f \rightarrow$ Corriente de falla RMS en kA

TCAP → Factor de capacidad térmica de volumen J/cm³/°C

T_c → Tiempo que circula la corriente en segundos

T_r → Temperatura de referencia de los materiales en °C

T_a → Temperatura ambiente en °C

α_r → Coeficiente térmico de la resistividad a una temperatura T_r 1/°C

ρ_r → Resistividad del conductor a una temperatura T_r μΩ-cm

α₀ → Coeficiente térmico de la resistividad a 0°C en 1/°C

T₀ y K₀ Es igual a → $a \frac{1}{\alpha_0}$ o $\left[\left(\frac{1}{\alpha_0}\right) - T_r\right]$ en °C

Fórmula simplificada de una aproximación:

$$A_{MCM} = I_f \cdot K_f \cdot \sqrt{t_c}$$

Donde:

K_f → Constante para el material de tabla 00, usando T_a = 40 °C

Cada uno de los factores mencionados se encuentran en la siguiente tabla de conductores, donde se determinará el calibre más próximo y el diámetro.

Tabla 5. Constante de material de conductores

Material	Conductividad (%)	T _m ^a (°C)	K _f
Copper, annealed soft-drawn	100.0	1083	7.00
Copper, commercial hard-drawn	97.0	1084	7.06
Copper, commercial hard-drawn	97.0	250	11.78
Copper-clad seel wire	40.0	1084	10.45
Copper-clad seel wire	30.0	1084	12.06
Copper-clad seel rod	20.0	1084	14.64
Aluminum EC Grade	61.0	657	12.12
Aluminum 5005 Alloy	53.5	652	12.41
Aluminum 6205 Alloy	52.5	654	12.47
Aluminum-clad steel wire	20.3	657	17.2
Steel 1020	10.8	1510	15.95
Stainless clad steel rod	9.8	1400	14.72
Zinc-coated steel rod	8.6	419	28.96
Stainless steel 304	2.4	1400	30.05

Fuente: elaboración propia

Tabla 6. Dimensiones de conductores

Calibre de conductor		Área nominal mm ²	Diámetro m
MCM	AWG		
350		177.35	0.015
300		152.01	0.0139
250		126.68	0.0127
211.6	4/0	107.22	0.0117
167.8	3/0	85.03	0.0104
133.1	2/0	67.44	0.0093

Fuente: elaboración propia

2.11. Tensión de paso y de toque

2.11.1. Tensión de paso (E_p)

Tensión de paso límite tolerable por el cuerpo humano de 50 kg de peso corporal:

$$E_{p_{50}} = \left(\frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \right) \cdot (1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s)$$

2.11.2. Tensión de toque (E_c)

Tensión de toque o contacto límite tolerable por un cuerpo humano de 50 kg de peso corporal:

$$E_{t_{50}} = \left(\frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \right) \cdot (1000 + 1.5 \cdot C_s \cdot \rho_s)$$

Donde:

t_s → Tiempo de duración de la falla o Duración de choque (s)

C_s → Factor de disminución o aislamiento asociado de la capa superficial

ρ_s → Resistividad del material de la capa superficial Ω -m

$R_s = 1000 \Omega$ → Resistencia promedio del cuerpo humano

$I_B = \left(\frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \right)$ → Corriente tolerable en función de tiempo por un cuerpo humano de 50

kg

$I_B = \left(\frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \right)$ → Corriente tolerable en función del tiempo por un cuerpo humano de 70

kg

$6C_s\rho_s = 2R_f$ → Resistencia a tierra de los dos pies separados 1 m en serie sobre la capa superficial

$1.5C_s\rho_s = R_f/2$ → Resistencia a tierra de los dos pies juntos en serie sobre la capa superficial

Se recomienda que las tensiones de paso y de toque reales deben ser menores que los respectivos límites máximos permisibles para obtener seguridad.

2.11.3. Resistividad de la capa superficial (ρ_s)

En general, en subestaciones es una capa de grava, roca volcánica triturada colocada sobre la superficie, incrementa la resistencia de contacto entre el suelo y los pies de las personas en la subestación, ya que esta resistencia se agrega a la resistencia promedio del cuerpo humano y la corriente por el cuerpo baja considerablemente.

Generalmente se considera la h_s de la capa superficial:

$$0.15\text{m} \geq h_s \geq 0.1\text{m}$$

h_s → Espesor de la capa superficial (ρ_s)

Promedio de resistividad de la capa superficial ρ_s

$$500 \Omega \cdot \text{m} > \rho_s > 2000 \Omega \cdot \text{m}$$

2.11.4. Factor de disminución o aislamiento de la capa superficial (C_s)

$$C_s = 1 - \frac{0.09(1 - \frac{\rho}{\rho_s})}{2 \cdot h_s + 0.09}$$

Donde:

C_s → Factor de disminución de la capa superficial

ρ → Resistividad del terreno ($\Omega \cdot \text{m}$)

$\rho_s \rightarrow$ Resistividad de la capa superficial ($\Omega\text{-m}$)

$h_s \rightarrow$ Espesor de la capa superficial cm

La norma define la reflexión entre las resistividades de materiales diferentes como:

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s}$$

2.12. Cálculo de la resistencia de la malla

2.12.1. Cuadrícula de la malla

✓ Los espaciamentos más usuales entre conductores (D)

$$15\text{m} > D > 3\text{m}$$

✓ Profundidad más usual del conductor (h)

$$1.5\text{m} > h > 0.5\text{m}$$

✓ Calibres más usados de conductor (ACM)

$$\text{MCM} > A_{CM} \geq 2/0 \text{ AWG}$$

2.12.2. Resistencia de la malla (R_g)

Esta fórmula es empleada para mallas sin varillas de tierra, su efectividad ha sido probada con resultados casi idénticos a los obtenidos en la formula.

$$R_g = \rho \cdot \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20} \cdot A} \cdot \left(1 + \frac{1}{1 + h \cdot \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right]$$

Donde:

$L_T \rightarrow$ Longitud total de conductores enterrados en m

$\rho \rightarrow$ Resistividad del terreno $\Omega\text{-m}$

$A \rightarrow$ Área de ubicación de la malla a tierra m^2

$h \rightarrow$ Profundidad de la malla en m

2.12.3. Resistencia de malla para suelo uniforme y bicapa

Esta ecuación determina la resistencia de un sistema de puesta a tierra en un suelo homogéneo y no-homogéneo que consta de una malla horizontal con electrodos verticales.

$$R_g = \frac{R_1 \cdot R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2 \cdot R_m}$$

Donde:

$R_1 \rightarrow$ Resistencia de tierra de los conductores de la malla Ω

$R_2 \rightarrow$ Resistencia de tierra de todas las varillas de tierra en Ω

$R_m \rightarrow$ Resistencia mutua entre el grupo de conductores de la malla R_1 , y el grupo de varillas de tierra R_2 , en Ω

Calculo de R_1 , R_2 y R_m para suelo homogéneo

Resistencia de tierra de los conductores de malla (R_1) está dada por:

$$R_1 = \rho \frac{\rho}{\pi \cdot L_c} \left[\ln \left(\frac{2 \cdot L_c}{\sqrt{d_c \cdot h}} \right) - \frac{K_1 \cdot L_c}{\sqrt{A}} - K_2 \right]$$

$$K_1 = -0.05 \frac{L_x}{L_y} + 1.2$$

$$K_2 = 0.1 \frac{L_x}{L_y} + 4.68$$

$\rho \rightarrow$ Resistividad del terreno $\Omega\text{-m}$

$L_c \rightarrow$ Longitud total de los conductores de la malla en m

$h \rightarrow$ Profundidad de los conductores de la malla en m

$d_c \rightarrow$ Diámetro del conductor de la malla en m

$A \rightarrow$ Área cubierta de los conductores de la malla de tierra m^2

$L_x \rightarrow$ Largo de la malla en m

$L_y \rightarrow$ Ancho de la malla en m

Resistencia de varillas (R_1) está dada por:

$$R_1 = \frac{\rho}{2\pi \cdot n_r \cdot L_r} \left[\ln \left(\frac{8L_r}{d_r} \right) - 1 + \frac{2K_1 \cdot L_r}{\sqrt{A}} - (\sqrt{n_r} - 1)^2 \right]$$

Donde:

$n_r \rightarrow$ Numero de varillas de tierra

$L_r \rightarrow$ Longitud de cada varilla en m

$d_r \rightarrow$ Diámetro de varilla en m

Resistencia mutua entre la malla y las varillas (R_m)

$$R_m = \frac{\rho}{\pi \cdot L_c} \left[\ln \left(\frac{2L_r}{L_r} \right) + \frac{K_1 \cdot L_c}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right]$$

$$(R_m < R_1, R_m < R_2, R_g > R_m)$$

Cálculo de R_1 , R_2 y R_m para suelo no-homogéneo

$$R_1 = \frac{\rho_1}{\pi \cdot L_c} \left[\ln \left(\frac{2L_r}{\sqrt{d_c \cdot h}} \right) + \frac{K_1 \cdot L_c}{\sqrt{A}} - K_2 \right]$$

$$R_2 = \frac{\rho_a}{2\pi \cdot n_r \cdot L_r} \left[\ln \left(\frac{8L_r}{d_2} \right) - 1 + \frac{2K_2 \cdot L_r}{\sqrt{A}} - (\sqrt{n_r} - 1)^2 \right]$$

$$R_m = \frac{\rho_a}{\pi \cdot L_c} \left[\ln \left(\frac{2L_c}{L_r} \right) + \frac{K_1 \cdot L_c}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right]$$

$$\rho_a = \frac{L_r \cdot \rho_1 \cdot \rho_2}{\rho_2(H - h) + \rho_1(L_r + h - H)}$$

Donde:

$\rho_1 \rightarrow$ Resistividad de la capa superior en Ω -m

$\rho_2 \rightarrow$ Resistividad de la capa profunda en Ω -m

$H \rightarrow$ Espesor de la capa superior (valor encontrado de método de Sunde)

$h \rightarrow$ Profundidad de la malla en m

$L_r \rightarrow$ Longitud de las varillas (c/u)

$\rho_a \rightarrow$ Resistividad aparente en $\Omega\text{-m}$

Las mediciones realizadas corresponden al Sistema de Puesta a Tierra perteneciente al circuito eléctrico del sistema general por un pozo de puesta a tierra del tipo vertical.

2.12.4. Cálculo de elevación de potencial de tierra (GPR)

$$GPR = I_g \cdot R_g$$

2.13. Cálculo real de la tensión de paso y tensión de malla

2.13.1. Tensión máxima de malla (E_m)

$$E_m = \frac{\rho \cdot I_g \cdot K_M \cdot K_i}{L_M}$$

Donde:

$K_m \rightarrow$ Valor geométrico de espaciamiento de la malla

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16hd_c} \frac{(D+2h)^2}{8Dd_c} - \frac{h}{4d_c} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left(\frac{8}{\pi(2n-1)} \right) \right]$$

Para mallas con varillas a lo largo del perímetro o mallas con varias varillas de tierra en las esquinas se toma el valor de $K_{ii}=1$

Se aplica este valor de corrección para mallas sin varillas de tierra, o solo una pocas:

$$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{2/n}}$$

Para la profundidad de malla se usa el factor de corrección (K_h)

$$K_h = \sqrt{1 + h/h_0} \rightarrow H_0 = 1m$$

El número de conductores paralelos de una malla rectangular se representa con “n” y se haya de la siguiente manera:

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d$$

$$n_a = \frac{2L_c}{L_p}; n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{A}}}; n_c = \left[\frac{L_x \cdot L_y}{A} \right]^{0.7A}; n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}}$$

En mallas cuadradas $\rightarrow n = n_a$ dado que $n_b = n_c = n_d = 1$

En mallas rectangulares $\rightarrow n = n_a \cdot n_b$ dado que $n_c = n_d = 1$

En mallas tipo “L” $\rightarrow n = n_a \cdot n_b \cdot n_c$ dado que $n_d = 1$

Donde:

L_c \rightarrow Longitud total de los conductores de la malla horizontal en m

L_p \rightarrow Longitud del perímetro de la malla en m

L_x \rightarrow Longitud máxima de la malla en dirección X, en m

L_y \rightarrow Longitud máxima de la malla en dirección Y, en m

D_m \rightarrow Distancia máxima entre dos puntos diferentes de la malla en m

El factor de irregularidad es (K_i) se define:

$$K_i = 0.644 + 0.148n$$

Para mallas sin varillas o para mallas con pocas varillas esparcidas a través de la malla, pero ninguna en las esquinas o a lo largo del perímetro, la longitud efectiva es (L_M):

$$L_M = L_C + L_R$$

$L_R = n_r L_r$ \rightarrow Longitud total de todas las varillas

n_r \rightarrow Número de varillas

$L_r \rightarrow$ Longitud de cada varilla

Para mallas con varias varillas de tierra en las esquinas, así como a lo largo del perímetro la longitud efectiva (L_M) es:

$$L_M = L_C + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_X^2 + L_Y^2}} \right) \right] L_R$$

2.13.2. Tensión de paso (E_P)

$$E_P = \frac{\rho \cdot I_g \cdot K_s \cdot K_i}{L_s}$$

La longitud efectiva del conductor enterrado (L_s) para mallas con o sin varillas de tierra es:

$$L_s = 0.75L_C + 0.85L_R$$

Valor de K_s , esta ecuación es válida para profundidades de enterramiento de 0.25 m < h < 2.5 m

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right]$$

2.14. Insumos y materiales para construcción de la malla

Bentonita: el empleo de esta sustancia mejora el contacto entre los electrodos y el terreno y las propiedades eléctricas del terreno en las cercanías de los electrodos. La bentonita es un mineral arcilloso, su estructura se basa en el apilamiento de planos de iones de oxígeno e hidroxilos. La presencia de la superficie interlamilar, así como de una débil carga en la misma, son características esenciales de este grupo de minerales. Como consecuencia de ello son capaces de incluir en ella, no sólo cationes hidratados, sino también agua u otros líquidos polares, dando lugar a una mayor separación de las capas (aumento de su espaciado reticular) a esto se denomina hinchamiento. Esta es una de las propiedades más importantes para los distintos usos industriales de la bentonita. Aunque hidratación y deshidratación ocurren con independencia del tipo de catión, el grado de hidratación si está ligado a la naturaleza del catión interlamilar y a las cargas de las láminas. La

absorción de agua en el espacio interlaminar tiene como consecuencia la separación de las láminas dando lugar al hinchamiento. Este proceso depende del balance entre la atracción electrostática catión-lámina y la energía de hidratación del catión. A medida que se intercalan capas de agua y la separación entre las láminas aumenta, las fuerzas que predominan son de repulsión electrostática entre láminas, lo que contribuye a que el proceso de hinchamiento pueda llegar a disociar completamente unas láminas de otras. Cuando el catión interlaminar es el Na, las bentonitas tienen una gran capacidad de hinchamiento, pudiendo llegar a producirse la completa disociación de cristales individuales de esmectita, teniendo como resultado un alto grado de dispersión y un máximo desarrollo de propiedades coloidales que son la que le dan el aspecto de gel. Si, por el contrario, tienen Ca o Mg como cationes de cambio, su capacidad de hinchamiento será mucho más reducida. (3)



Figura 14. Bentonita sódica
Fuente: elaboración propia

Soldadura exotérmica: se prefieren las conexiones exotérmicas [de marcas: Cadweld, Thermoweld, Ultraweld o Mexweld] para redes de tierras de subestaciones de alta potencia. Para fabricar una conexión exotérmica no es necesaria una fuente de energía externa. Al encender una chispa sobre el polvo ignitor, se inicia una reacción química, donde el óxido de cobre es reducido por el metal aluminio, produciendo cobre fundido a unos 1400 C y escoria de aluminio. Este cobre fluye sobre los conductores soldándolos en la forma del molde de grafito, obteniendo una unión metálica sólida en unos 20 segundos. La mezcla adecuada de metal y polvo ignitor (llamada "carga") depende del tamaño de la cavidad del molde, la que los fabricantes han codificado por números que

representan el peso de la mezcla: 32, 45, 65, 90, 115, 150, 200, 250 y 500. Es importante notar que una buena unión depende del ajuste del molde a los conductores, ya que hay que tomar en cuenta que los moldes de grafito en uso normal se van desgastando y solamente sirven para máximo unas 50 soldaduras. (17)



*Figura 15. Molde de soldadura exotérmica
Fuente: elaboración propia*

Electrodos: para construir una malla a tierra va a requerir de uno o varios electrodos, aquí disponemos de 2 tipos de electrodos:

- a) Cobre electrolítico puro
- b) Acero bañado en cobre más conocido como varillas Coperweld

Por su forma en la fabricación tenemos que existen varillas, platinas, etc. Siendo las más comunes las varillas de 1.80, 2.00 y 2.40 metros de longitud existiendo en calibres de diámetro desde $\frac{1}{2}$, $\frac{5}{8}$, $\frac{3}{4}$ de pulgada. (18)



*Figura 16. Varilla Coperweld
Fuente: elaboración propia*

2.15. Medición de la resistencia de malla a tierra

2.15.1. Método de la caída de potencial

Este método será utilizado para la mayoría de los electrodos de tierra, y no se utilizará cuando los electrodos de prueba cubran una gran área.

- a) Conectar el electrodo bajo prueba a los terminales C1 y P1.
- b) Llevar la pica de corriente (C) tan lejos como sea posible del electrodo bajo prueba (E).
- c) Conectar esta pica al terminal C2 del medidor de tierras.
- d) Llevar la pica de potencial (P) a mitad de camino entre E y C, sobre la recta que les une. Conectar el cable de esta pica al terminal P2 del medidor de tierras.
- e) Realizar la medida, siendo esta la resistencia R1.
- f) Poner la pica (P) a una distancia igual al 40 % de EC desde E y tomar una segunda lectura, (R2).
- g) Poner la pica P a una distancia igual al 60 % de EC desde E, y tomar una tercera lectura (R3).
- h) Calcular el valor medio de R1, R2 y R3 (R media).
- i) Restar a R3 el valor medio y expresarlo como un porcentaje de la R media.
- j) Si el porcentaje es 1,2 veces más pequeño que la precisión requerida del resultado, entonces la R media puede ser tomada como la resistencia de tierra, con esta precisión.

- k) Si esto no es así, entonces poner C más lejos de E, o usar el método «de la pendiente».

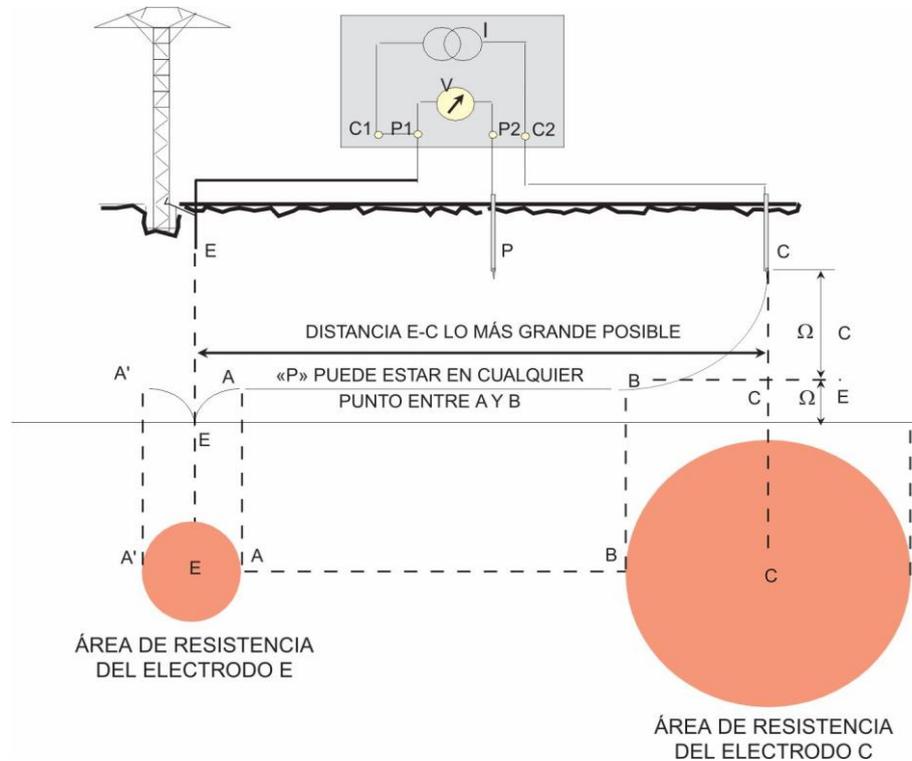


Figura 17. Método de caída de potencial – Escuela técnica Schneider electric P-0009
Fuente: elaboración propia

Para conseguir el mayor nivel de exactitud al realizar la comprobación de resistencia con el método de caída de potencial de 3 hilos, es fundamental que la sonda se coloque fuera del área de influencia del electrodo de conexión a tierra que se está comprobando y la toma de tierra auxiliar. (19)

Si no se coloca fuera del área de influencia, las zonas eficaces de resistencia se superponen e invalidan cualquier medición que esté realizando. La tabla es un guía para conocer la configuración apropiada de la sonda (pica interna) y la toma de tierra auxiliar (pica exterior).

Tabla 7. Configuración de picas según la profundidad del electrodo Fuente manual fluke 1625

Profundidad del electrodo de tierra	A la pica interior	A la pica exterior
2 m	15 m	25 m
3 m	20 m	30 m
6 m	25 m	40 m
10 m	30 m	50 m

Fuente: elaboración propia

Para comprobar la exactitud de los resultados y garantizar que las picas están situadas fuera del área de influencia, vuelva a colocar la pica interna (sonda) moviéndola 1 metro en cada dirección y vuelva a realizar la medición. Si se produce un cambio importante en la lectura (30 %), debe aumentar la distancia entre la varilla de toma de tierra que se está midiendo, la pica interior (sonda) y la pica exterior (toma de tierra auxiliar) hasta que los valores medidos sean lo suficientemente constantes al volver a colocar la pica interior (sonda). (20)

2.15.2. Método de la pendiente

Si el método de la caída de potencial falla por no dar suficiente precisión, el método de la pendiente, designado en su mayor parte para sistemas de electrodos que cubren una gran área, podrá ser utilizado.

- a) Conectar C1 y P1 al electrodo bajo prueba, como en el método anterior.
- b) Tomar lecturas situando la pica P a las distancias: 20 %, 40 % y 60 % desde el electrodo E. Estas lecturas son: R1, R2 y R3 respectivamente.
- c) Para mayor exactitud se pueden hacer medidas al 90 %, 80 %, 70 % de EC, obteniendo también los valores R1, R2 y R3. Los valores R2 y R3 son similares a los hallados en el primer método («caída de potencial»); sin embargo, ahora los valores en lugar de promediarlos, hallaremos el valor μ .
- d) Calculo de $\mu = \frac{R_3 - R_2}{R_2 - R_1}$
- e) Multiplicar PT/C por EC y obtener la distancia EP. (Para el valor de μ aparece un valor de PT/C en las tablas del Dr. Tagg, en anexos).

- f) Poner la pica de potencial a la distancia EP hallada, y tomar la lectura. Esta lectura es la resistencia de tierras del electrodo bajo prueba, y este será el resultado.
- g) Repetir el procedimiento variando EC. Comparar los resultados de las dos pruebas.

2.15.3. Método de la intersección de curvas

Según el Dr. Tagg, en su libro PROC. IEE, vol. II nº 12 diciembre de 1964, dice que la verdadera resistencia de malla a tierra de un sistema de electrodos se obtiene cuando la pica de potencial P está situada a una distancia del centro eléctrico del sistema, igual al 61.8 % de la distancia desde el centro eléctrico hasta la pica de corriente C.

Regla del 61,8 % si conocemos el centro eléctrico del electrodo, entonces podemos realizar la medida situando el electrodo P al 61,8 % de EC desde E, valiéndonos la medida obtenida como resultado aproximado. En la realidad, como desconocemos el centro eléctrico, no podremos aplicar este método.

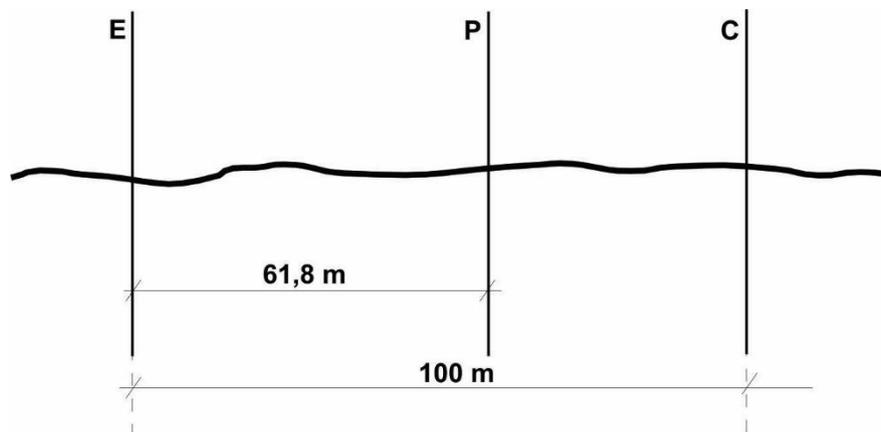


Figura 18. Regla del 61.8 %
Fuente: elaboración propia

Procedimiento de medida:

- a) Elegimos E de forma arbitraria dentro del sistema de electrodos.
- b) Llevamos C lo más lejos posible que se pueda.
- c) Hacer todas las medidas, situando P al 10 %, 20 %, 30 %, ..., hasta el 90 % de EC.

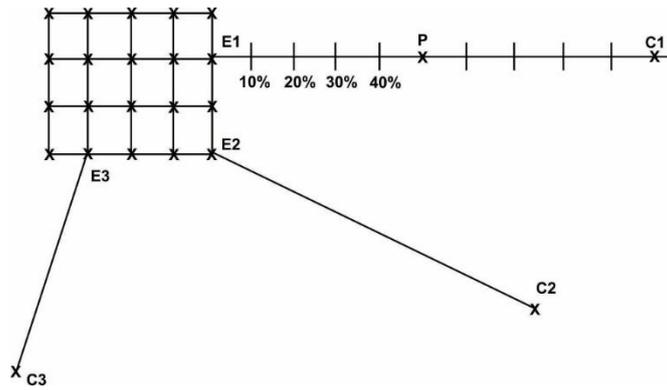


Figura 19. Procedimiento para obtener los valores EC
Fuente: elaboración propia

- d) Dibujar los valores de R obtenidos a las diferentes distancias, de ellos deduciremos la curva EC1.
- e) Repetiremos el proceso con la misma E (o punto de contacto de la malla de electrodos) y otra distancia C, obtendremos la curva EC2, de otra forma similar a la anterior.
- f) Repetiremos con nuevos valores de EC obtenidos EC3.

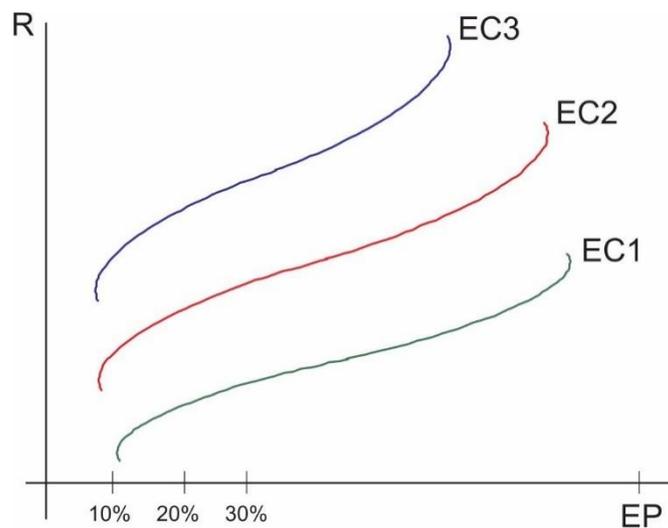


Figura 20. Valores obtenidos EC1, EC2 y EC3
Fuente: elaboración propia

- g) Puede ocurrir que estas tres curvas se corten en un punto, el cual será el valor de resistencia requerida como resultado. Sin embargo, esto no es normal. La teoría del Dr. Tagg introduce un nuevo concepto que es el valor λ que es la distancia entre nuestro punto E y el punto de electrodo equivalente del sistema. Haremos la transformación con nuestras tres curvas. (19)

Realizaremos la transformación siguiente, utilizando la regla del 61.8 %:

$$\lambda + EP = 61.8\% (\lambda + ECN)$$

$$\lambda = \frac{0,618ECN - EP}{1 - 0,618} \rightarrow \frac{0,618ECN - EP}{0,382}$$

$$\lambda = 1.617 ECN - 2.6.17 EP$$

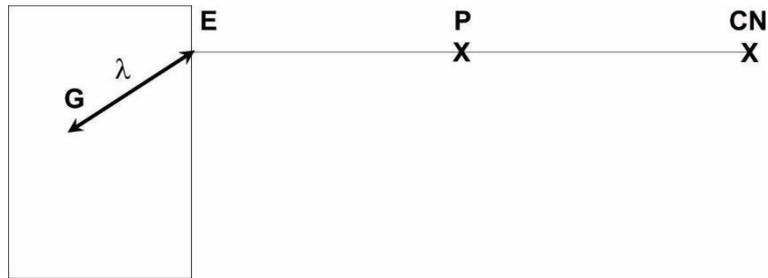


Figura 21. Hallando λ
Fuente: elaboración propia

- h) Los valores de λ pueden darnos resultados negativos, pero el valor de resistencia será igualmente válido.
- i) Para saber la distancia exacta de EP, sustituiremos en la fórmula el valor de λ hallado.

$$EP = 0.618 ECN - 0.382 \lambda$$

- j) A todas las medidas anteriormente realizadas, habrá que introducir el factor de corrección anteriormente descrito.

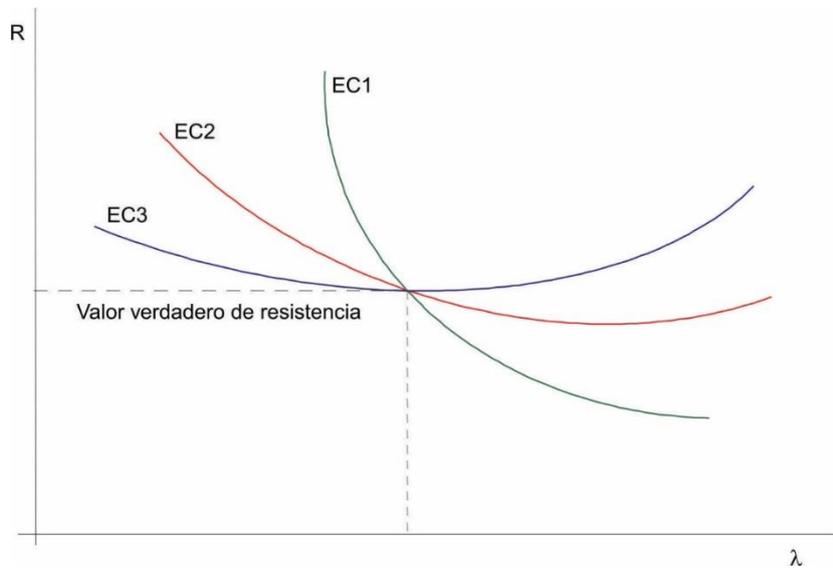


Figura 22. Punto de resistencia
Fuente: elaboración propia

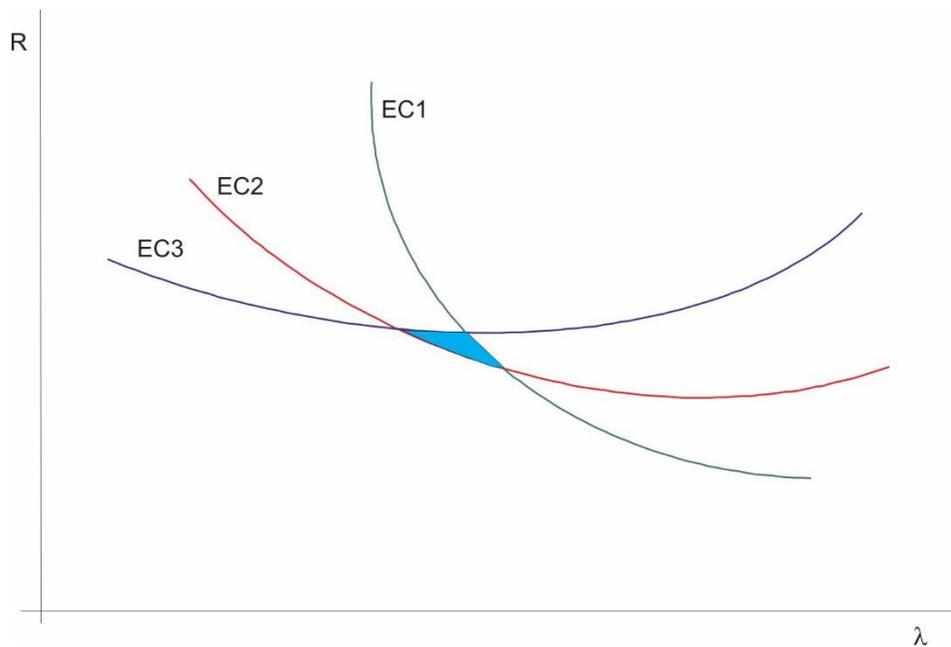


Figura 23. Factor de corrección EC Medición de la tensión de paso y toque
Fuente: elaboración propia

2.16. Subestación eléctrica

Es un conjunto de equipos utilizados para dirigir o para redistribuir el flujo de energía a través de rutas alternas, en un sistema de potencia, y garantizar la seguridad de este por medio de dispositivos automáticos de control y protección.

- Subestación de generación, asociadas a centrales generadoras
- Subestación de transformación, con transformadores elevadores y/o reductores
- Subestación de maniobra, conectado a varios circuitos (o líneas) para orientar o distribuir el flujo de potencia a diferentes áreas del sistema
- Equipos de patio
- Interruptores
- Seccionadores
- Transformadores de corriente y tensión
- Transformadores y reactores de potencia
- Descargadores de tensión
- Bobinas de bloqueo

2.17. Sistemas de protección en una subestación eléctrica

Una subestación forma parte importante de los sistemas eléctricos de potencia SEP, es un centro de transformación de energía eléctrica que enlaza líneas de media tensión con líneas de alta tensión o viceversa dependiendo de la configuración de la subestación, una subestación es un conjunto de equipos de maniobra, protección, cables y estructuras, su función es el cambio de nivel de tensión y corriente.

Es muy importante la protección de la subestación ya que cada elemento está sujeto a una falla, corto circuito, eventos atmosféricos y/o transitorios.

2.17.1. Apantallamiento

Se conoce como apantallamiento de una subestación al conjunto de elementos instalados con el objetivo principal de proteger los equipos y elementos de la subestación contra descargas atmosféricas directas (rayos) se presenta tres metodologías para el diseño del apantallamiento IEEE Std. 998-1996.

Una sobretensión transitoria importante es la producida por las descargas atmosféricas que inciden en la subestación, ya sea a través de la línea de transmisión o por una descarga directa sobre los equipos de la subestación, producidas por falla del

apantallamiento. Cuando una descarga atmosférica alcanza un sistema de potencia, una sobretensión elevada aparece a través de los equipos de la subestación. (21)

Si la sobretensión excede la soportabilidad del aislamiento, este se rompe y aparece un arco de potencia que será mantenido por la tensión a frecuencia industrial del sistema. Se hace la operación de interruptores para eliminar el cortocircuito. Si la descarga se produce a través del aire de una cadena de aisladores o de equipos con aislamiento auto regenerativo, generalmente no se producen daños.

En la práctica, la función de apantallamiento consiste en proteger a los equipos de la subestación contra esas descargas directas.

2.17.2. Relés de protección

✓ Sensibilidad

El relé debe ser lo suficientemente sensible para operar en las condiciones mínimas que se puedan dar en la instalación que comprometa al sistema. En cualquier SEP, en varias ocasiones en el día y durante las distintas estaciones del año, la carga puede variar entre límites muy amplios. Para cubrir estas exigencias cambiantes de la carga solicitada, es preciso poner diferentes combinaciones en la generación con el fin de atender la demanda de la forma más adecuada. La condición de mínima exigencia de generación, es generalmente la que nos va a definir la sensibilidad del relé. En estas condiciones, circulará por la protección la mínima corriente de falla al producirse un cortocircuito y el relé, deberá ser lo suficientemente sensible para despejar esa falla.

✓ Selectividad

Una característica también es la selectividad de un relé de protección, es la facultad para reconocer inequívocamente una falla, para posteriormente disparar los interruptores que tiene encomendados y despejar la falla. Los relés deben de seleccionar entre las fallas por las que deben de operar, por ser producidas en los propios equipos que protegen, de las fallas en otros equipos por las que no deben de operar. Algunos esquemas de protecciones son inherentemente selectivos, esto implica, el que no se vean afectados por las fallas que se produzcan fuera de los equipos o zonas que tienen bajo su

responsabilidad. Un ejemplo de este tipo de esquemas inherentemente selectivos son las protecciones diferenciales.

✓ **Rapidez**

Tiene que contar con la rapidez adecuada. Por supuesto, la rapidez es esencial en la separación del elemento dañado de la red, para evitar que se produzcan mayores desperfectos debido a los efectos del cortocircuito, y de esta manera, reducir los costos de reparación y el de su permanencia fuera de servicio. La rapidez de operación tiene además repercusión directa en la estabilidad general del Sistema Eléctrico de Potencia. Durante una falla por cortocircuito, el resto de la red transmite menor energía y algunos generadores tienden a perder el sincronismo, produciéndose en ellos la salida de paralelo. Cuanto menor es el tiempo de mantenimiento de la falla es menos probable que los generadores pierdan el sincronismo y, por consecuencia, afecte a la estabilidad del sistema.

✓ **Fiabilidad**

Para que el performance del sistema de protecciones funcione eficazmente, debe de ser fiable. La fiabilidad es la medida del grado de confianza de que un sistema de protección va a actuar correctamente.

La fiabilidad engloba dentro de sí dos conceptos. Por un lado, el concepto de obediencia, que es la cualidad de que una protección opere correctamente cuando es requerida para operar y por otro, el concepto de seguridad, que es la cualidad de no operar ante unas causas extrañas, evitando actuaciones incorrectas. La fiabilidad de un sistema de protecciones depende en primer lugar, de la fiabilidad de los propios relés y, en segundo lugar, de su aplicación, de su correcta instalación y de su mantenimiento preventivo.

2.18. Seguridad y procedimiento

2.18.1. Listado de equipos de protección personal

Símbolo del EPP	Descripción	Función
	Guantes de cuero reforzado, badana y/o dieléctrico Norma EN 60903	Protección contra el riesgo de sufrir quemaduras
	Zapatos de seguridad dieléctrica con punta reforzada Norma EN 12568-S	Protección contra el riesgo de sufrir lesión por golpes provocados por cargas suspendidas u objetos sueltos en el desarrollo de los trabajos
	Uniforme de algodón (camisa, pantalón) Norma OSHA-ANSI Z359.1	Protección contra el riesgo de sufrir lesión por contacto con sustancias peligrosas o material abrasivo directamente sobre la piel.
	Casco de seguridad con barbiquejo de acuerdo a la norma ANSI Z89.1	Protección contra el riesgo de sufrir lesión por golpes provocados por cargas suspendidas u objetos sueltos en el desarrollo de trabajos en altura
	Lentes de seguridad Norma ANSI Z3591	Protección contra el riesgo de lesionar los ojos por contacto directo con polvos, fragmentos proyectados por el desarrollo de alguna tarea
	Tapones de oídos Tipo 2 EN352-3.	Protección auditiva contra el riesgo de sufrir lesión por causa del ruido excesivo

2.18.2. Secuencia de ejecución de malla a tierra

N°	Actividad	Descripción	Seguridad
1	Verificación de documentos	<ul style="list-style-type: none"> Revisión y aprobación de procedimientos Revisión y aprobación de documentos relacionados al suministro (planos, tabla de datos técnicos, protocolos de pruebas) Revisión de certificaciones y competencia de operadores y equipos Elaboración y revisión de ATS y PT 	 <p>No inicie ninguna tarea si no cuenta con la autorización respectiva</p>
2	Preparación y despliegue de recursos	<ul style="list-style-type: none"> Selección e inspección de equipos, herramientas, materiales y equipos de protección personal Evaluación del área y llenado de ATS y PT 	 <p>No inicie ninguna tarea si no cuenta con</p>

N°	Actividad	Descripción	Seguridad
		<ul style="list-style-type: none"> • Traslado de personal, equipos, herramientas y materiales al lugar de trabajo • Capacitación del personal involucrado en los procedimientos explicitados 	la autorización respectiva
3	Ejecución del montaje del sistema de puesta a tierra profunda	<p>Consideraciones generales</p> <p>El sistema de puesta a tierra profunda está compuesto por el conductor de cobre que deriva de la malla de tierra profunda (Empalme tipo cruz o empalme tipo T), conectores de sujeción, el trayecto y puntos de interconexión con terminales de puesta a tierra ubicados en los equipos de casa de máquinas, estructuras metálicas de soporte, pórticos, perchas en las canaletas, tableros de control, cajas de mando y/o cualquier estructura metálica que podría eventualmente conducir una carga eléctrica por la ocurrencia de cualquier falla en el sistema eléctrico de la subestación (circuitos en baja, media o alta tensión)</p> <p>Actividades a realizar</p> <ul style="list-style-type: none"> - Reunión de inicio de trabajos - Difusión del procedimiento de trabajo - Identificación de estructuras y equipos según planos - Identificación de puntos de puesta a tierra en estructuras y equipos según planos electromecánicos - Inspección del área de trabajo - Traslado de materiales para aterramiento - Señalización y delimitación de zona de trabajo - Puesta a tierra de la malla profunda - Limpieza de la zona de trabajo <p>Actividades preliminares</p> <ul style="list-style-type: none"> - Se señalizará y delimitará el área de trabajo a fin de conseguir que ningún personal ajeno a la actividad transite por la zona restringida - Se tomará la medida desde la malla de tierra profunda, hasta la estructura de equipos y se obtendrá la distancia que existe desde los puntos de puesta a tierra de cada equipo hacia la malla de puesta a tierra profunda. 	 <p>Precaución trabajo con carga suspendida</p>

N°	Actividad	Descripción	Seguridad
		<ul style="list-style-type: none"> - Se verificará el calibre del cable de la malla de tierra profunda y el calibre del cable del sistema de puesta a tierra superficial con la finalidad de elegir el molde de grafito adecuado según las medidas que se tiene en campo. - Se cortará cable de cobre desnudo según la distancia necesaria. <p>Descripción de actividades</p> <ul style="list-style-type: none"> - Para el sistema de puesta se deberá verificar según planos el calibre del cable de cobre desnudo. - Se tiene en consideración para la excavación definir según plano la cuadrícula de la malla de tierra profunda, por tanto, para la instalación de las mechas se debe realizar excavaciones según el plano de malla de tierra profunda. - Realizada la excavación para iniciar con la malla de tierra profunda, se realizará la limpieza del conductor donde se realizará la soldadura. Para esto se podrá emplear alcohol y trapo industrial. Calentar el cable de ser necesario si existe humedad en la zona de excavación. - El exceso de humedad o elementos extraños (grasa, aceite, etc.) podrán resultar en una soldadura inadecuada y podrán ocurrir salpicaduras excesivas de metal fundente para fuera del molde. - Observe con atención si el molde que está siendo utilizado es el adecuado, si está bien cerrado para evitar posible vaciamiento de metal fundente. - Se añadirá 90/120/150 gr de soldadura exotérmica (de acuerdo a lo especificado) y el molde deberá ser fijado mediante una tenaza metálica. - La soldadura exotérmica consta de un polvo de ignición, el mismo que debe ser colocado cuidadosamente sobre la mezcla exotérmica de modo que solo una pequeña mecha de polvo este expuesto hacia la boca del molde por donde será encendido mediante un chispero (no se deberá emplear fosforo). 	

N°	Actividad	Descripción	Seguridad
		<ul style="list-style-type: none"> - La posición de la ignición es siempre lateral a la apertura del molde. - Colóquese a un lado o detrás del molde para evitar ser alcanzado por una esporádica proyección de material fundido. - La soldadura exotérmica en reacción libera un poco de humo, de baja toxicidad, que se dispersa rápidamente en la atmósfera. En lugares cerrados, donde puede haber gran concentración de humo, se debe providenciar ventilación y utilizar máscara respiratoria. - Se deberá intercalar los moldes para evitar un sobrecalentamiento del grafito y una posible reacción anticipada del polvo de ignición. - Realizada la reacción exotérmica de la soldadura se libera gran cantidad de calor (aproximadamente 1500 °C) que funde al cobre, al mismo tiempo que se solidifica rápidamente. El molde de grafito al mismo tiempo que protege al operador, también moldea por termo fusión a la unión o derivación de cable de cobre, por tanto, a los segundos de haber realizado el encendido se debe retirar el molde antes que cualquier excedente de material fundido solidificado deje atrapado al molde, en tal caso el molde no podrá ser retirado sin dañarse. - Una vez realizada la soldadura exotérmica, se procederá a limpiar las rebabas formadas en el empalme con un cepillo metálico, luego se procederá a rellenar y compactar el terreno. - Una soldadura válida viene determinada por las condiciones siguientes, a verificar: <ul style="list-style-type: none"> • El fundido debe cubrir completamente la cámara de soldadura, cubriendo la sección de los conductores. • El resultado no presente porosidad superficial de profundidad mayor a 1 mm. 	

N°	Actividad	Descripción	Seguridad
		<ul style="list-style-type: none"> • La soldadura debe quedar libre de escoria sobre los conductores. <p>El color de la soldadura debe variar de dorado a cobre una vez se ha limpiado convenientemente el empalme.</p> <p>Para el aterramiento de estructuras metálicas se contará con elementos de fijación tales como conectores de una vía, dos vías y/o terminales a compresión.</p> <p>Para el aterramiento de equipos, el conductor de cobre realizará su pase por las estructuras fijándose con conectores de una vía y al llegar al equipo tendrá instalado conectores a compresión.</p> <p>Para el caso de aterramiento de cajas de paso, cajas de mando y/o cualquier otra derivación se realizará la instalación de conectores de doble vía (en una vía se instala el conductor que va al punto de puesta a tierra del equipo y en otra vía se instalará la derivación hacia la caja de mando, caja de pase u otra derivación. (22)</p>	
4	Desmovilización de recursos	<ul style="list-style-type: none"> • Retiro de todos los materiales, equipos y herramientas a excepción de la señalización. • Los materiales de embalaje serán dispuestos según el reglamento de desechos sólidos del Contratista. • Limpieza del área de trabajo al final de la jornada. • Retiro del personal de la zona de trabajo en la unidad móvil. 	 <p>No retire la señalización</p>
5	Conformidad y cierre del proceso	<ul style="list-style-type: none"> • Efectuar la verificación visual del montaje del sistema de puesta a tierra superficial. • Informar al Supervisor de Pruebas y Supervisor. 	 <p>No retire la señalización</p>

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo y nivel

Tipo

El tipo de investigación es de carácter aplicado, porque responde a un problema teórico o sustantivo y se orienta a describir, explicar, predecir y recopilar información de la realidad (23).

Nivel

El nivel de investigación es descriptivo, tiene como finalidad describir, analizar e interpretar sistemáticamente un conjunto de hechos, relacionados con nuestra variable de estudio. (24) y (25).

(26), tomando las ideas de (27), explica que los estudios descriptivos buscan especificar las propiedades, características y los perfiles importantes de personas, grupos, comunidades o cualquier otro fenómeno que se sometan a un análisis. Así mismo afirman que para los investigadores cuantitativos describir es medir, mientras para lo cualitativos, es recolectar información.

Es decir, en un estudio descriptivo donde se selecciona una serie de cuestionarios y se mide o recolectan informaciones sobre cada una de ellas, para así describir lo que se ha investigado. Este tipo de investigación permite conocer las características que relacionan en una determinada circunstancia espacio - temporal dada. (27)

3.2. Método

a) Método general

Según, (28), el método es un proceso sistemático que orienta y ordena el razonamiento en base a esquemas lógicos para descubrir la verdad de un conocimiento o cumplir con un objetivo. En consecuencia, podemos señalar que el método es el camino a seguir mediante una serie de operaciones, reglas y procedimientos fijados de antemano de manera voluntaria y reflexiva para alcanzar un determinado fin y que permitirán obtener un conocimiento objetivo de la realidad. Es por ello, que la presente investigación se sustenta en el método científico.

b) Método específico

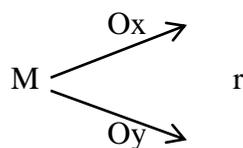
Como método específico se eligió el método descriptivo, hipotético y estadístico porque consiste en analizar e interpretar sistemáticamente un conjunto de hechos o fenómenos y sus variables que les caracterizan en su estado actual.

El método descriptivo intenta una observación sistemática, focaliza una realidad, identifica las dimensiones y sus factores internos. Así mismo, se sustenta en el cuidado y empleo de instrumentos y técnicas de gran fiabilidad y validez. (29)

3.3. 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 relación que existe entre las variables estudiadas. (23), y (24). Es decir, se cuantifica cada

variable probablemente relacionada y después se analiza la correlación que existe entre ambas variables de una misma muestra de estudio. Su representación gráfica es:



M = muestra

O = representa a las observaciones y/o mediciones realizadas

X = representa la variable

Y = representa a la variable

R = representa la relación hipotética de las variables

3.4. Población, muestra y técnica de muestreo

3.4.1. Población

La población estuvo conformada por la SE H1 del proyecto Renovandes - Chanchamayo.

Para la realización de la investigación se consideró como población de estudios a la SE H1 del proyecto Renovandes - Chanchamayo, para lo cual se coordinó con la EGE Santa Ana S.R.L. con sus representantes. En el año académico 2016-II.

3.4.2. Muestra

Para la determinación del tamaño de la muestra se utilizó como fuente la base de datos obtenidos de las mediciones de la puesta a tierra en el periodo 2016-II, que se encuentran registrados en la SE H1 del proyecto Renovandes – Chanchamayo.

3.4.3. Técnica de muestreo

- Se realizó muestreo probabilístico estratificado.

3.5. 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 proyecto como el informe final y dentro de ella tenemos:

- ✓ **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 las mediciones de puesta a tierra 2016-II.

b. Técnica de cuestionario encuesta

Esta técnica se utilizó al momento de buscar información de nuestras variables en estudio como son:

Malla a tierra en un área arenosa

Protección SE H1 del proyecto Renovandes – Chanchamayo

3.6. 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 (29) para probar independencia de variables.

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

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Procedimiento de análisis de malla a tierra

- 1) Describir la estructura del suelo y selección del modelo de suelo, determinando el perfil de la resistividad y el modelo de suelo que se necesite (modelo uniforme, modelo de dos capas).
- 2) Determinar el calibre del conductor según la corriente de falla $3I_0$, la cual debe ser la corriente máxima de falla proyectada en un futuro.
- 3) Cálculo de valores admisibles de tensión de toque y tensión.
- 4) Cálculo de longitud de conductor que rodee toda el área de la malla a tierra.
- 5) Resistencia de la malla a tierra en suelo uniforme, determinada por las ecuaciones que se proporcionaron en los cálculos simplificados y las ecuaciones de Schwarz de ser necesario.
- 6) Esta resistencia de malla deberá ser menor que la resistencia objetivo proyectada según sea el caso, caso contrario deberá evaluarse nuevamente modificando el diseño preliminar.
- 7) La corriente I_G se determina por las ecuaciones que se proporcionan en la determinación de la corriente máxima de malla. Para prevenir un sobre diseño del sistema de aterrizaje se tomará en cuenta, solamente la porción de la corriente de falla, $3I_0$, que fluye desde la malla a tierra. La corriente I_G debe, de cualquier manera, reflejar el peor tipo de falla y su localización, el factor de decremento, factor de división de corriente y cualquier expansión futura del mismo.

- 8) El GPR del diseño preliminar está por debajo del voltaje de paso y tolerable, no se necesitará un análisis adicional. Solamente será necesario dejar conductores adicionales para dar acceso a las terminales de aterrizaje de los equipos.
- 9) Los cálculos de la malla y voltaje de paso para las mallas, tal como se han diseñado, podrán estar terminados siguiendo las técnicas y el análisis para suelos uniformes.
- 10) Si el voltaje de malla calculado está por debajo del voltaje de paso admisible, el diseño es aceptable. Si el voltaje de malla calculado es mayor que el voltaje de toque tolerable, el diseño preliminar deberá ser revisado.
- 11) Si el voltaje de paso y el voltaje de toque calculados están por debajo de los voltajes admisibles, el diseño requerirá solamente de ciertos refinamientos. Si no, el diseño preliminar se debe revisar.
- 12) Si exceden los límites del voltaje de toque o del voltaje de paso admisibles, se requerirá de una revisión del diseño de la malla.
- 13) Antes de satisfacer los requerimientos del voltaje de toque y de paso, probablemente se requieran varillas de tierra y mallas adicionales. Los conductores de malla adicionales probablemente se requieran si el diseño de malla no incluye conductores cerca del equipo a ser aterrizado.

4.2. Datos de entrada para el cálculo de la malla a tierra en condiciones de suelo actual y modificado para hoja de cálculo o software CYMGrd

Los datos de entrada son datos definidos de acuerdo al estudio de prefactibilidad del proyecto como son los de coordinación de protecciones, coordinación de asilamiento, configuración de la subestación, apantallamiento, sistema de malla a tierra profunda.

- Tensión de red: 60kV
- Frecuencia nominal: 60 Hz
- Corriente de falla: 10 000 A
- Tiempo de duración de la falla: 0,25 s
- Espesor del estrato superior: 1,0 metros
- Resistividad del estrato superior: ohm-m
- Resistividad del estrato inferior: ohm-m
- Resistividad de la grava: 3 000 ohm-m
- Espesor de la grava: 0,10 m

- Peso de la persona: 50 kg
- Diámetro y longitud de la varilla: 5/8" y 2400 mm
- Calibre del conductor principal: 2/0 AWG
- Profundidad de enterramiento: 0,8 m respecto del nivel del terreno
- Máxima longitud de la malla en la dirección x Lx: 56.5 m
- Máxima longitud de la malla en la dirección y Ly: 40 m
- Numero de picas (electrodos verticales) nR: 17
- Temperatura ambiente: 40 c

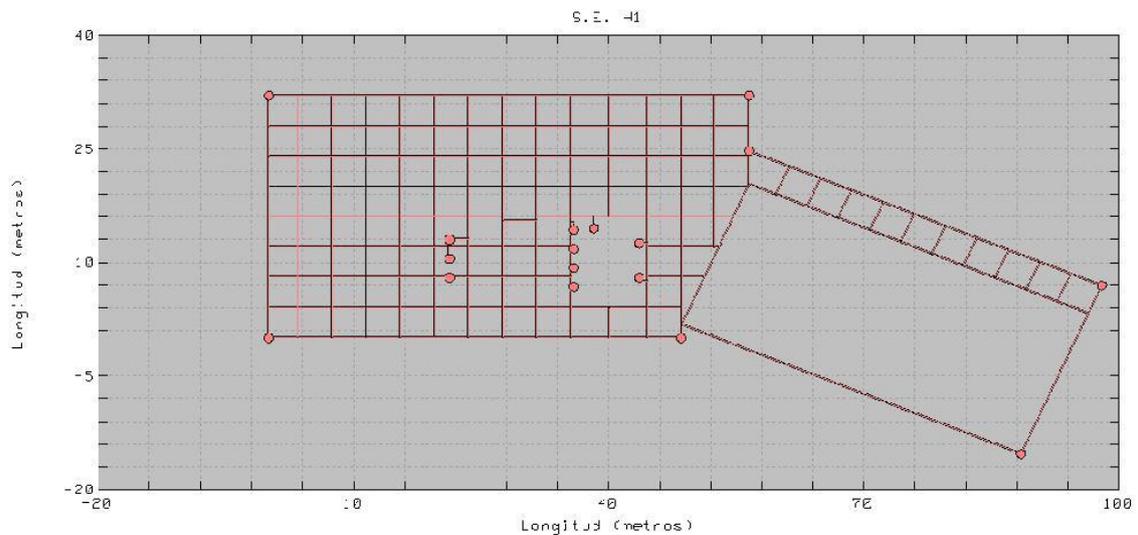


Figura 24. Configuración de la malla de tierra profunda proyectada
Fuente: Estudio de prefactibilidad del proyecto CH H1 Renovandes

4.3. Análisis de resistividad y tensiones tolerables del terreno actual

4.3.1. Medición de la resistividad del terreno actual en condiciones naturales

Tabla 8. Medición de la resistividad del terreno actual eje 1 y eje 2

Eje	Distancia entre electrodos (m)						Promedio
	1	2	4	8	16	32	
1	1420	854	630	200	309	785	742.25
2	1667	866	622.5	319	300	290	866
Valores asumidos	1667	866	630	319	309	785	

Fuente: elaboración propia

En la Tabla 8, se observa que, las medidas obtenidas en condiciones naturales del terreno actual, utilizando el método de cuatro electrodos (Wenner) obteniendo como resultando en el eje 1 y eje 2; asumiendo las medidas más altas de ambos ejes que es (1667 Ω -m), a 2 metros (866 Ω -m), a 4 metros (630 Ω -m), a 8 metros (319 Ω -m), a 16 metros (309 Ω -m) y a 32 metros (785 Ω -m), con el propósito de utilizar las medidas en el software CYMGrd para el análisis de respuesta a las tensiones de toque y paso.

4.3.2. Modelamiento del terreno actual

Usando los datos de los valores asumidos se procedió a modelar el terreno y definir si es un suelo uniforme o suelo de dos capas, para obtener la resistencia aparente y analizar la profundidad del primer estrato con respecto al segundo estrato, para ello se utilizará el software CYMGrd.

	Activado	Distancia entre las sondas (m)	Resistividad (ohm-m)
1	<input checked="" type="checkbox"/>	1	1420
2	<input checked="" type="checkbox"/>	2	854
3	<input checked="" type="checkbox"/>	4	622.5
4	<input checked="" type="checkbox"/>	8	319
5	<input checked="" type="checkbox"/>	16	309
6	<input checked="" type="checkbox"/>	32	785
7	<input checked="" type="checkbox"/>		

Figura 25. Datos insertados al software CYMGrd para analizar el terreno actual

Fuente: elaboración propia

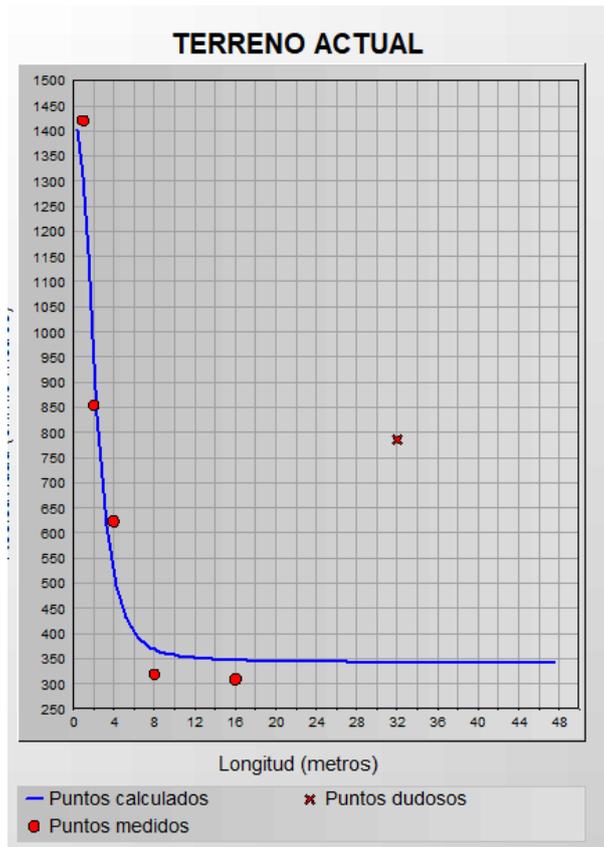


Figura 26. Resultados de la resistividad aparente de la estratificación del terreno actual en software CYMGrd
Fuente: elaboración propia

En la figura 26, se observa la alta resistividad del terreno con respecto a sus mediciones tomadas.

4.3.3. Resultados de la estatificación del terreno actual

Tabla 9. Resultado de resistividad aparente del terreno actual

Resistividad Ω-m		Profundidad capa superior h-m	Coeficiente de reflexión K
Capa superior ρ_1	Capa inferior ρ_2		
1420	341.4	1.5	0.836552

Fuente: elaboración propia

En la Tabla 9, se muestra el resultado del suelo donde se pretende construir la malla a tierra, donde se obtiene un suelo de dos capas con una resistividad aparente de 1420 ohm - m en el primer estrato a una profundidad de 1.5 m y la capa inferior con 341.4 ohm-

m siendo un resultado no tan favorable para la resistencia de la malla a tierra, para los cálculos posteriores del GPR, tensiones de paso y contacto.

Reporte del análisis de suelo		Wednesday, July 04, 2016, 19:01:18
Nombre de la subestación	S.E. H1	
Proyecto	RENOVANDES C.H. H1	
Estudio	MALLA A TIERRA	
Parámetros		
Título	TERRENO ACTUAL	
Modelo de suelo	Estratificado en 2 capas	
Modelo securitario	IEEE Std. 80-2000	
Peso corporal	50 kg	
Espesor de la capa superficial	0.1 metros	
Resistividad de la capa superficial	3000 ohm-m	
Duración del choque eléctrico	0.25 secs	
Resultados de salida		
Espesor de la capa superior	1.5 metros	
Resistividad de la capa superior	1420 ohm-m	
Resistividad de la capa inferior	341.4 ohm-m	
Factor Cs de reducción	0.836552	
Tensión máxima de contacto	1105.36 voltios	
Tensión máxima de paso	3725.44 voltios	
Error RMS	25.91 %	

Figura 27. Reporte del análisis de suelo en software CYMGrd, indicando un error de 25.91%

Fuente: elaboración propia

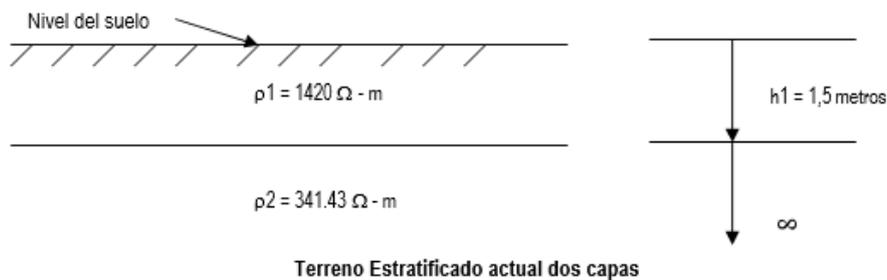


Figura 28. Resultados de estratificación de suelo de dos capas en (terreno actual)

Fuente: elaboración propia

4.3.4. Cálculo de la sección del conductor

Tabla 10. Cálculo de la sección del conductor

Descripción cable:	100 Copper, annealed soft-drawn
Temperatura ambiente:	40 °C
Intensidad de falta (valor eficaz):	10 KA
Tiempo de la falta:	0.25 s
Conductividad del material:	100 %

Coefficiente de resistividad térmico a 20°C:	0.00393 °C ⁻¹
K ₀ :	234 °C
Temperatura de fusión:	1083 °C
Resistividad ρ_r a 20°C	1.72 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$
Capacidad térmica TCAP:	3.42 J/(cm ³ ·°C)
Sección mínima:	17.7406649 mm ²
Sección mínima normalizada:	25 mm²

4.3.5. Reticulado de la malla

Tabla 11. Longitud del conductor de la malla a ser enterrado

Longitud del lado de la malla L _x :	56.5 m
Longitud del lado de la malla L _y :	40 m
Área total A:	2260 m ²
Número de conductores en x:	15
Espacio entre conductores D _y :	2.8571429 m
Número de conductores en y:	9
Espacio entre conductores D _x :	7.0625 m
Espacio medio entre conductores D:	4.9598214 m
Perímetro L _p :	193 m
Longitud total conductores L _c :	1207.5 m
Distancia máxima entre dos puntos D _m :	69.226079 m
Factor geométrico n _a :	12.512953
Factor geométrico n _b :	1.0074455
Factor geométrico n _c :	1
Factor geométrico n _d :	1
Factor geométrico n:	12.606118
Factor corrección geométrico K _i :	2.5097055
Número de picas n _R :	17
Longitud pica L _r :	2.5 m
Longitud picas total L _R :	42.5 m
Longitud total efectiva L _M :	1275.2475 m
Diámetro pica 2b:	0.0173 m

Fuente: elaboración propia

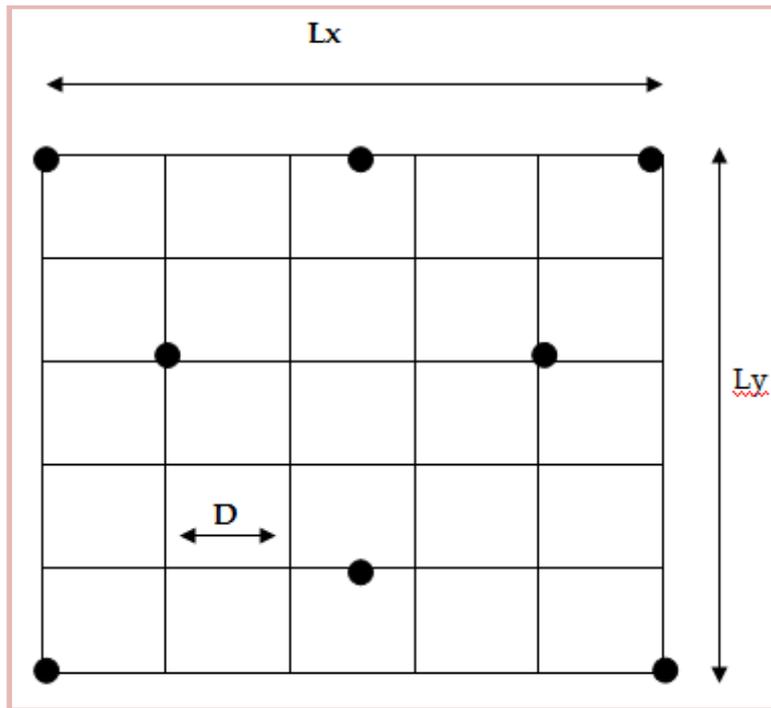


Figura 29. Tipo de diseño de la malla (rectangular)

4.3.6. Cálculo de la tensión de paso y contacto admisible

Tabla 12. Tensiones de paso y contacto admisible

Peso de la persona:	50	kg
Resistividad capa superficial ρ_s :	3000	$\Omega \cdot m$
Resistividad del terreno ρ :	1420	$\Omega \cdot m$
Profundidad de la capa superficial h_s :	1.5	m
Factor reductor de la capacidad normal C_s :	0.984660194	
Tiempo de descarga t_s :	0.25	s
Corriente de descarga máxima admisible (Dalziel's):	232.00000	mA
Corriente de descarga máxima admisible (Curva Z):	493.75	mA
Corriente de descarga máxima admisible:	232.00000	mA
Tensión metal-metal E_{mm} :	232.00000	V
Tensión de contacto admisible:	1259.98524	V
Tensión de paso admisible:	4343.94097	V

Norma a aplicar:	IEEE 80-2000
Tensión de contacto admisible E_{touch} :	1259.98524 V
Tensión de paso admisible E_{step} :	4343.94097 V

Fuente: elaboración propia

4.3.7. Cálculo de la resistencia de puesta a tierra de conductores enterrados en combinación de mallas y picas (varillas verticales)

Tabla 13. Cálculo de resistencia de puesta a tierra

Resistividad del terreno:	1420	$\Omega \cdot m$
Diseño inicial Puesta a Tierra:	2	rectangular
Longitud total de los conductores L_c :	1207.5	m
Profundidad de enterrado conductor h :	0.8	m
Diámetro del conductor d :	0.010998	m
Radio efectivo conductor a' :	0.094	m
Área total del mallado A :	2260	m^2
1) Curvas de Schwarz		
Tipo de Curva:	1	CURVA A
Coefficiente k_1 :	1.3535	
Coefficiente k_2 :	5.711875	
2) Kerzel		
Coefficiente Kerzel k_1 :	1.357834058	
Coefficiente Kerzel k_2 :	7.194628187	
Método de cálculo:	Kerzel	
k_1 :	1.357834058	
k_2 :	7.194628187	
Resistencia PAT conductor R_1 :	14.01867952	Ω

Fuente: elaboración propia

4.3.8. Cálculo de IG y GPR

Tabla 14. Cálculo del IG y GRP

Corriente falta I_F :	10.000 KA
Split factor Sf:	0.80516
Tipo de Resistencia de PAT	1 combinación de mallas y picas
Resistencia puesta a tierra	
Rpat:	14.018158331 Ω
Cálculo de Df	
Factor de reducción Df:	1.051714
Cálculo Corriente I_G	
Considerar factor Df:	1 Si
Considerar factor Sf:	1 Si
Corriente I_G:	8.4680 KA
-	
GPR:	118705.5419 V

Fuente: elaboración propia

4.3.9. Cálculo de la tensión de malla y de paso tolerables

Tabla 15. Tensión de malla y paso tolerable

Resistividad del terreno ρ :	1420	$\Omega \cdot m$
Diseño inicial puesta a tierra:	2	rectangular
Distancia entre conductores D:	4.00	m
Diámetro del conductor d:	0.010998	m
Profundidad cable enterrado h:	0.800	m
Factor geométrico n:	12.60611821	
Tipo de mallado:	4	picas en el perímetro
Factor Kii:	1.000	
Factor Kh:	1.342	
Factor Km:	0.563	
Factor geométrico Ki:	2.509705494	
Factor geométrico Ks:	0.345	
Corriente de falta I_G :	8467.984105	A
Longitud total efectiva L_M :	1275.25	m
Longitud total conductores L_c :	1207.50	m
Longitud picas total L_R :	42.50	m
Longitud efectiva L_S :	941.75	m
Tensión de malla E_m:	13330.60	V
Tensión de paso E_S:	11048.50	V

Fuente: elaboración propia

4.3.10. Tensión de malla y de paso tolerable

Tabla 16. *Análisis final de tensión de malla y paso tolerable en suelo actual*

$$¿Em = 13330.60 < E_{touch} = 1259.99 ?$$

2 NO

MODIFICAR DISEÑO INICIAL

$$¿Es = 11048.50 < E_{step} = 4343.94 ?$$

2 NO

MODIFICAR DISEÑO INICIAL

Fuente: elaboración propia

El resultado final cumpliendo los procedimientos para el modelado del terreno actual tomando las medidas de resistividad del terreno, no son favorables para las condiciones requeridas en el diseño de una malla a tierra por el tipo de terreno, lo cual la hoja de cálculo sugiere una modificación del diseño. (15)

4.4. Análisis resistividad de suelo uniforme y suelo de dos capas modificado

4.4.1. Medición de la resistividad del suelo uniforme

Tabla 17. *Mediciones de la resistividad en dos direcciones utilizando el método de Wenner*

Eje	Distancia entre electrodos (m)						Promedio
	1	2	4	8	16	32	
1	49	44.1	39	29.1	54.68	68	43.005
2	48	35.1	37	46	18.23	43.2	40.605
Valores asumidos	49	44.1	39	46	54.68	68	

Fuente: elaboración propia

En la tabla 17, se representa las mediciones tomadas en un terreno homogéneo (tierra vegetal) nos da una resistividad promedio aproximado de del terreno lo cual no son los valores a utilizas en el software. Para analizar el terreno uniforme proyectado se tomará los valores asumidos 49 ohm – m, 35.1 ohm – m, 39 ohm – m, 46 ohm – m, 54.68 ohm – m, y 68 ohm – m, lo cual nos servirá para analizar su resistencia del terreno a analizar.

4.4.2. Modelamiento del terreno uniforme

	Activado	Distancia entre las sondas (m)	Resistividad (ohm-m)
1	<input checked="" type="checkbox"/>	1	49
2	<input checked="" type="checkbox"/>	2	44.1
3	<input checked="" type="checkbox"/>	4	39
4	<input checked="" type="checkbox"/>	8	46
5	<input checked="" type="checkbox"/>	16	54.68
6	<input checked="" type="checkbox"/>	32	68
7	<input type="checkbox"/>		

Figura 30. Valores asumidos de las distancias entre electrodos del eje 1 y eje 2 del terreno uniforme en el software CYMGrd

Fuente: elaboración propia

Reporte del análisis de suelo		Wednesday, July 04, 2016, 21:10:24
Nombre de la subestación	S.E. H1	
Proyecto	RENOVANDES CH H1.	
Estudio	S.E. H1	
Parámetros		
Título	TERRENO UNIFORME	
Modelo de suelo	Definido por el usuario	
Espesor de la capa superior	12 metros	
Resistividad de la capa superior	43.25 ohm-m	
Resistividad de la capa inferior	92.3 ohm-m	
Modelo securitario	IEEE Std. 80-2000	
Peso corporal	50 kg	
Espesor de la capa superficial	0.1 metros	
Resistividad de la capa superficial	3000 ohm-m	
Duración del choque eléctrico	0.25 secs	
Resultados de salida		
Factor Cs de reducción	0.694129	
Tensión máxima de contacto	956.67 voltios	
Tensión máxima de paso	3130.68 voltios	

Figura 31. Reporte del terreno uniforme

Fuente: elaboración propia

En la figura 31 se elabora un análisis del terreno uniforme en su zona propia para recopilar la información pertinente sobre su resistividad y su posible uso en el proyecto donde se pretende realizar el corte del terreno y reemplazar por un terreno de uniforme que reúna las condiciones para el uso del diseño de malla a tierra.

Tabla 18. Resultado de resistividad de suelo uniforme

Resistividad Ω -m		Profundidad capa superior h-m	Coeficiente de reflexión K
Capa superior ρ_1	Capa inferior ρ_2		
43.25	92.3	12	0.694129

Fuente: elaboración propia

La Tabla 18 muestra la resistividad obtenida 43.25 Ω -m de un suelo homogéneo (uniforme), que corresponde a un nivel de resistividad bajo, los 12 m que indica tener la capa superior demuestra su alta uniformidad del suelo en el yacimiento propio de la zona que dará lugar a una resistencia de puesta a tierra de la SE no muy alta, favorable para el cálculo GPR y las tensiones de paso y contacto. Debido a la alta resistividad del primer estrato que se presentan en el área de la SE H1 y con el fin de que las tensiones de choque sean menores a los máximos permitidos, se plantea hacer un corte del terreno, en el área de la subestación, hasta 1,0 m de profundidad, y reemplazar el terreno por tierra vegetal (43.25 ohm-m). ya corroborado que es adaptable para dichos propósitos de la SE H1.

La profundidad seleccionada del corte de terreno se debe a lo observado en el Perfil Estratigráfico de la calicata C- 01 donde hasta la profundidad de 1,0 m se presentan estratos de alta resistividad. Por lo tanto, se modelará el terreno en el CYMGrd, considerando el reemplazo del terreno propio por tierra vegetal.

4.4.3. Modelamiento del terreno de dos capas modificado (suelo actual y suelo uniforme)

Para el presente modelado se va a realizar un modelado de suelo estratificado de dos capas considerando los valores ya obtenidos en el modelamiento de suelo actual que usaremos como dato de resistividad inferior 341.4 ohm – m a una profundidad de 1 m, y la resistividad del segundo análisis de estrato del terreno uniforme que es de 43.25 ohm – m que se pretende reemplazar al estrato inferior del terreno actual por tener una alta resistividad que es de 1420 ohm – m.

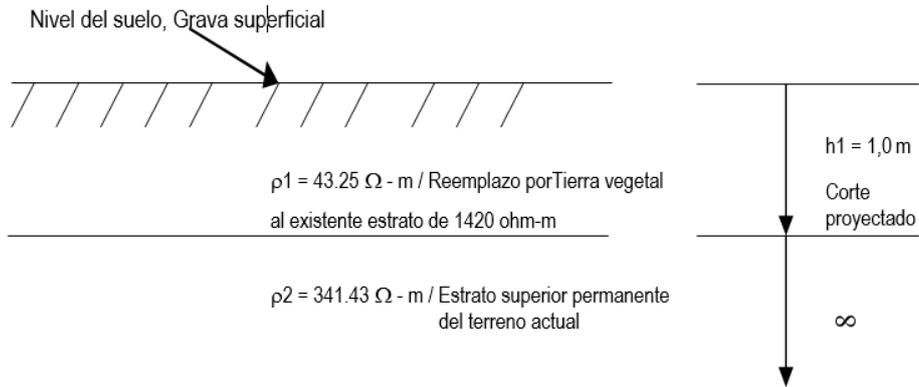


Figura 32. Corte proyectado del terreno de dos capas

Fuente: elaboración propia

Tabla 19. Datos para insertar al software CYMGrd

Resistividad $\Omega \cdot m$		Profundidad capa superior h-m
Capa superior ρ_1	Capa inferior ρ_2	
42.25	341.4	1

Fuente: elaboración propia

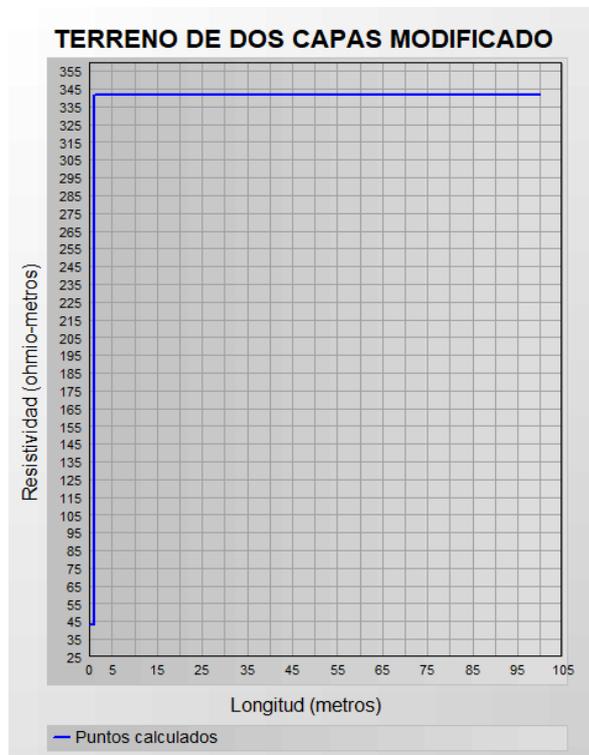


Figura 33. Terreno de dos capas modificado

Fuente: elaboración propia

4.4.4. Resultados de la estratificación del terreno de dos capas modificado

Tabla 20. Resultados de suelo estratificado de dos capas

Resistividad Ω -m		Profundidad capa superior h-m	Coeficiente de reflexión K
Capa superior ρ_1	Capa inferior ρ_2		
43.25	341.4	1.5	0.694129

Fuente: elaboración propia

4.4.5. Resultados de la estratificación del terreno de dos capas modificado

Reporte del análisis de suelo		Wednesday, July 04, 2016, 23:13:28
Nombre de la subestación	S.E. H1	
Proyecto	RENOVANDES CH H1.	
Estudio	S.E. H1	
Parámetros		
Título	TERRENO DE DOS CAPAS MODIFICADO	
Modelo de suelo	Definido por el usuario	
Espesor de la capa superior	1 metros	
Resistividad de la capa superior	43.25 ohm-m	
Resistividad de la capa inferior	341.4 ohm-m	
Modelo securitario	IEEE Std. 80-2000	
Peso corporal	50 kg	
Espesor de la capa superficial	0.1 metros	
Resistividad de la capa superficial	3000 ohm-m	
Duración del choque eléctrico	0.25 secs	
Resultados de salida		
Factor Cs de reducción	0.694129	
Tensión máxima de contacto	956.67 voltios	
Tensión máxima de paso	3130.68 voltios	

Figura 34. Resultados de análisis en software CYMGrd del suelo estratificado de dos capas modificado.

Fuente: elaboración propia

4.4.6. Cálculo de la sección del conductor

Tabla 21. Cálculo de la sección del conductor

Descripción cable:	100 Copper, annealed soft-drawn
Temperatura ambiente:	40 °C
Intensidad de falta (valor eficaz):	10 KA
Tiempo de la falta:	0.25 s

Conductividad del material:	100 %
Coefficiente de resistividad térmico a 20°C:	0.00393 °C ⁻¹
K ₀ :	234 °C
Temperatura de fusión:	1083 °C
Resistividad pr a 20°C	1.72 μΩ·cm
Capacidad térmica TCAP:	3.42 J/(cm ³ ·°C)
Sección mínima:	17.7406649 mm ²
Sección mínima normalizada:	25 mm²

Fuente: elaboración propia

4.4.7. Reticulado de la malla

Tabla 22. Análisis de la geometría de la malla

Longitud del lado de la malla L _x :	56.5	m
Longitud del lado de la malla L _y :	40	m
Área total A:	2260	m ²
Número de conductores en x:	15	
Espacio entre conductores D _y :	2.8571429	m
Número de conductores en y:	9	
Espacio entre conductores D _x :	7.0625	m
Espacio medio entre conductores D:	4.9598214	m
Perímetro L _p :	193	m
Longitud total conductores L _c :	1207.5	m
Distancia máxima entre dos puntos D _m :	69.226079	m
Factor geométrico n _a :	12.512953	
Factor geométrico n _b :	1.0074455	
Factor geométrico n _c :	1	
Factor geométrico n _d :	1	
Factor geométrico n:	12.606118	
Factor corrección geométrico K _i :	2.5097055	
Número de picas n _R :	17	
Longitud pica L _r :	2.5	m
Longitud picas total L _R :	42.5	m
Longitud total efectiva L _M :	1275.2475	m
Diámetro pica 2b:	0.0173	m

Fuente: elaboración propia

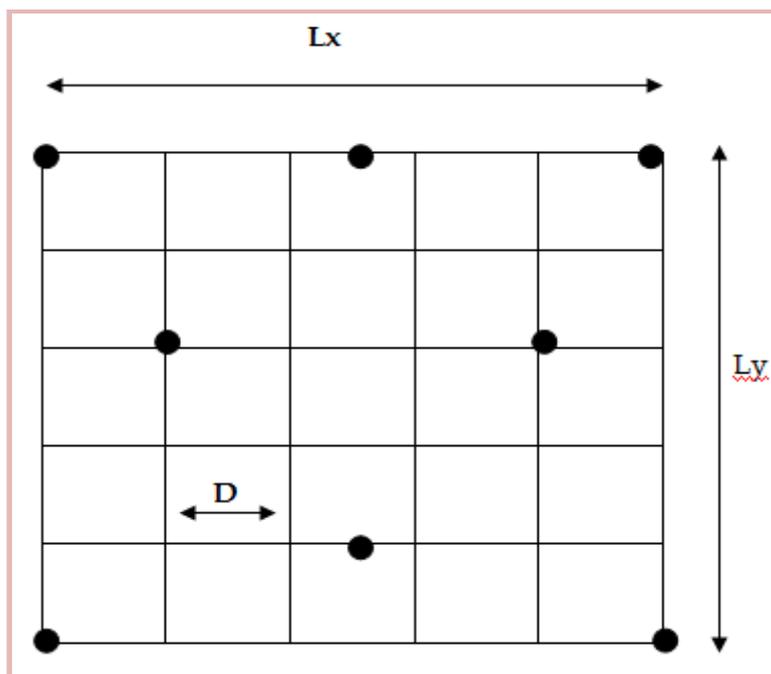


Figura 35. Configuración de la malla (rectangular)

Fuente: elaboración propia

4.4.8. Cálculo de la tensión de paso y contacto admisible

Tabla 23. Tensiones de paso y contacto admisible

Peso de la persona:	50	kg
Resistividad capa superficial ρ_s :	3000	$\Omega \cdot m$
Resistividad del terreno ρ :	43.25	$\Omega \cdot m$
Profundidad de la capa superficial h_s :	1	m
Factor reductor de la capacidad normal C_s :	0.957558612	
Tiempo de descarga t_s :	0.25	s
Corriente de descarga máxima admisible (Dalziel's):	232.00000	mA
Corriente de descarga máxima admisible (Curva Z):	493.75	mA
Corriente de descarga máxima admisible:	232.00000	mA
Tensión metal-metal E_{mm} :	232.00000	V
Tensión de contacto admisible:	1231.69119	V
Tensión de paso admisible:	4230.76477	V
Norma a aplicar:	IEEE 80-2000	
Tensión de contacto admisible E_{touch}:	1231.69119	V
Tensión de paso admisible E_{step}:	4230.76477	V

Figura 36. Tensión de paso y contacto admisible, en un terreno uniforme

Fuente: elaboración propia

4.4.9. Cálculo de resistencia de puesta a tierra con conductores enterrados mallas y picas (varillas verticales)

Tabla 24. Resistividad de la malla a tierra en terreno de dos capas

Resistividad del terreno:	43.25	$\Omega \cdot m$
Diseño inicial Puesta a Tierra:	2	rectangular
Longitud total de los conductores Lc:	1207.5	m
Profundidad de enterrado conductor h:	0.8	m
Diámetro del conductor d:	0.010998	m
Radio efectivo conductor a':	0.094	m
Área total del mallado A:	2260	m ²
1) Curvas de Schwarz		
Tipo de Curva:	1	CURVA A
Coeficiente k ₁ :	1.3535	
Coeficiente k ₂ :	5.711875	
2) Kerckel		
Coeficiente Kerckel k ₁ :	1.357834058	
Coeficiente Kerckel k ₂ :	7.194628187	
Método de cálculo:	Kerckel	
k ₁ :	1.357834058	
k ₂ :	7.194628187	
Resistencia PAT conductor R ₁ :	0.426977387	Ω

Fuente: elaboración propia

4.4.10. Cálculo de IG y GRP

Tabla 25. Calculo del IG y GPR

Cálculo Corriente I _G	
Considerar factor Df:	1 Si
Considerar factor Sf:	1 Si
Corriente I_G:	8.4680 kA
-	
GPR:	3615.503302 V

4.4.11. Cálculo de la tensión de malla y de paso tolerables

Tabla 26. Tensiones de malla y paso tolerables

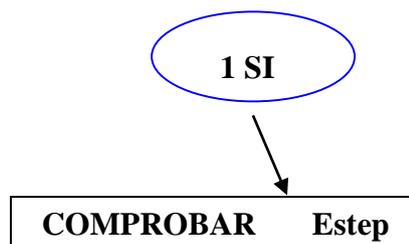
Resistividad del terreno ρ :	43.25	$\Omega \cdot m$
Diseño inicial puesta a tierra:	2	rectangular
Distancia entre conductores D:	4.00	m
Diámetro del conductor d:	0.010998	m
Profundidad cable enterrado h:	0.800	m
Factor geométrico n:	12.60611821	
Tipo de mallado:	4	picas en el perímetro
Factor Kii:	1.000	
Factor Kh:	1.342	
Factor Km:	0.563	
Factor geométrico Ki:	2.509705494	
Factor geométrico Ks:	0.345	
Corriente de falta I_G :	8467.984105	A
Longitud total efectiva L_M :	1275.25	m
Longitud total conductores L_c :	1207.50	m
Longitud picas total L_R :	42.50	m
Longitud efectiva L_S :	941.75	m
Tensión de malla E_m:	406.02	V
Tensión de paso E_s:	336.51	V

Fuente: elaboración propia

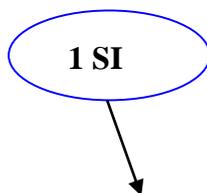
4.4.12. Tensión de malla y de paso tolerables

Tabla 27. Análisis de la tensión de malla y paso tolerable en suelo de dos capas modificado

$$\text{¿}E_m = 406.02 < E_{\text{touch}} = 1231.69 \text{ ?}$$



$$\chi^2_{Es} = 336.51 < \chi^2_{Estep} = 4230.76 ?$$



DISEÑO PAT CORRECTO

DISEÑO CORRECTO

4.5. Prueba de hipótesis

4.5.1. Hipótesis general

Ho: No influye positivamente la malla a tierra en la protección de la SE H1 del Proyecto Renovandes – Chanchamayo.

Hi: Influye positivamente la malla a tierra en la protección de la SE H1 del Proyecto Renovandes - Chanchamayo.

Tabla 28. Pruebas de chi-cuadrado de Pearson

Pruebas de chi-cuadrado de Pearson		Protección de la S.E. H1
Malla a tierra en un área arenosa	Chi cuadrado	73.403
	gl	2
	Sig.	0.05

Fuente: elaboración propia

$$X^2_{\text{calculado}} = 73.403$$

$$X^2_{\text{tabulado}} = 5.99$$



$$X^2_{\text{calculado}} > X^2_{\text{tabulado}}$$

Por lo tanto, a un nivel de significancia de 0.05 y con 2 grados de libertad, se acepta la hipótesis alterna, con lo que se puede afirmar que influye positivamente la malla a tierra

en la protección de la SE H1 del Proyecto Renovandes - Chanchamayo, en sentido de que en una malla a tierra en un área arenosa regular o deficiente, en una SE H1 presentan mayor dificultad en su protección.

4.5.2. Hipótesis específicas

a) Hipótesis específica 1:

H₀: La resistividad del terreno actual en condiciones naturales para la SE H1 del Proyecto Renovandes - Chanchamayo. No es mayor a 100 Ω-m.

H_i: La resistividad del terreno actual en condiciones naturales para la SE H1 del Proyecto Renovandes - Chanchamayo. Es mayor a 100 Ω-m.

Tabla 29. Resistividad del terreno en condiciones naturales

Eje	Distancia entre electrodos (m)						Promedio
	1	2	4	8	16	32	
1	1420	854	630	200	309	319	742.25
2	1667	866	622.5	319	300	290	866
Valores asumidos	1667	866	630	319	309	785	

Fuente: elaboración propia



Figura 37. Resistividad del terreno en condiciones naturales
Fuente: elaboración propia

En la Figura 38, se observa que, las mediciones de resistividad del terreno en condiciones normales, respecto a longitudes trazadas, las medidas asumidas son de 1 m (16670 Ω -m), a 2 m (866 Ω -m), a 4 m (630 Ω -m), a 8 m (319 Ω -m), 16 m (309 Ω -m), a 32 m (785 Ω -m), estos datos son los valores asumidos de ambas mediciones en el eje 01 y eje 02 del terreno actual donde se pretende construir la malla a tierra de la SE H1, tomando como dato final la resistividad aparente obtenida de (1420 Ω -m), a una profundidad de 1.5 metros, calculado con el software CYMGrd, que se usó para los determinados procedimientos ya descritos.

Respecto a la hipótesis, se rechaza la hipótesis nula y aceptamos la hipótesis de estudio; la cual menciona que la resistividad del terreno actual en condiciones naturales para la SE H1 del Proyecto Renovandes - Chanchamayo. Es mayor a 100 Ω -m. debido al análisis en el software que dio resultado m (1420 Ω -m).

b) Hipótesis específica 2:

H₀: La resistividad de un terreno uniforme para la SE H1 del Proyecto Renovandes – Chanchamayo, no es menor a 100. Ω -m.

H₁: La resistividad de un terreno uniforme para la SE H1 del Proyecto Renovandes – Chanchamayo, es menor a 100. Ω -m.

Tabla 30. Medidas tomadas en eje 1 y eje 2 en terreno uniforme

Eje	Distancia entre electrodos (m)						Promedio
	1	2	4	8	16	32	
1	49	44.1	39	29.1	54.68	68	43.005
2	48	35.1	37	46	18.23	43.2	40.605
Valores asumidos	49	35.1	39	46	54.68	68	

Fuente: elaboración propia



*Figura 38. Resistividad del terreno uniforme proyectado para la SE H1
Fuente: elaboración propia*

La Figura 39. se observa que, las mediciones de resistividad del terreno uniforme, respecto a longitudes trazadas en ambos ejes 01 y 02, se asumió los valores de resistividad más altos para calcular en el software las medidas del terreno uniforme que son los siguientes a 1 m (49 Ω -m), a 2 m (35.1 Ω -m), a 4 m (39 Ω -m), a 8 m (46 Ω -m), a 16 m (54.68 Ω -m), y a 32 m (68 Ω -m) dando como resultado la respuesta de análisis con una resistividad del terreno de su primera capa a 12 m de profundidad una resistencia de m (43.25 Ω -m), esta resistencia, reuniendo las condiciones de cálculos y análisis nos sirvió para poder calcular el diseño de la malla a tierra proyectado.

Respecto a la hipótesis, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna (H_i); la cual nos dice que la resistividad de un terreno uniforme para la SE H1 del Proyecto Renovandes – Chanchamayo, es menor a 100. Ω -m; debido al análisis en el software que dio resultado m (43.25 Ω -m).

c) Hipótesis específica 3:

H_o : El nivel de protección en condiciones naturales del terreno actual para la SE H1 del Proyecto Renovandes – Chanchamayo, no es bajo.

H_i : El nivel de protección en condiciones naturales del terreno actual para la SE H1 del Proyecto Renovandes – Chanchamayo, si es bajo.

Tabla 31. Protección en condiciones naturales

Tensión	Terreno natural			Resultado
	Admisible	Calculado	Condición	
Contacto	1259.98524 V		$E_m=13330.60 < E_{touch}=1259.98524$ Modificar diseño inicial	Diseño no válido
Malla		13330.60 V		
Paso	4343.94097 V	11048.50 V	$E_s=11048.50 < E_{step}=4343.94097$ Modificar diseño inicial	Diseño no válido

Fuente: Elaboración propia



Figura 39. Protección en condiciones naturales tensión de toque
Fuente: elaboración propia



Figura 40. Protección en condiciones naturales tensión de paso
Fuente: elaboración propia

En la Tabla 31, respecto a la hipótesis planteada, se rechaza la hipótesis nula H_0 , y se acepta la hipótesis alterna H_i es decir; que el nivel de protección en condiciones naturales del terreno actual para la SE H1 del Proyecto Renovandes – Chanchamayo, es bajo; debido a la condición según IEEE std.80 para la tensión de toque donde la $E_m=13330.60 \text{ V} < E_{touch}=1259.99$, la cual una respuesta no válida, del mismo modo para la tensión de paso se tiene la siguiente condición $E_s=11048.50 < E_{step}=4343.94$, generando del mismo modo una respuesta negativa para un diseño no válido.

d) Hipótesis específica 4:

H₀: el nivel de protección en un terreno de dos capas modificado para la SE H1 del Proyecto Renovandes - Chanchamayo. No es alto.

H_i: el nivel de protección en un terreno de dos capas modificado para la SE H1 del Proyecto Renovandes - Chanchamayo. Es alto.

Tabla 32. Protección en un terreno de dos capas en condiciones modificadas

Tensión	Condiciones modificadas			Resultado
	Admisible	Calculado	Condición	
Contacto	1231.69119 V		$E_m=406.02 < E_{touch}=1231.69119 \text{ V}$ Diseño correcto	Diseño válido
Malla		406.02 V		
Paso	4230.76477 V	306.51 V	$E_s=306.51 < E_{step}=4230.76477 \text{ V}$ Diseño correcto	Diseño válido

Fuente: elaboración propia



Figura 41. Protección en condiciones modificadas tensión de toque
Fuente: elaboración propia

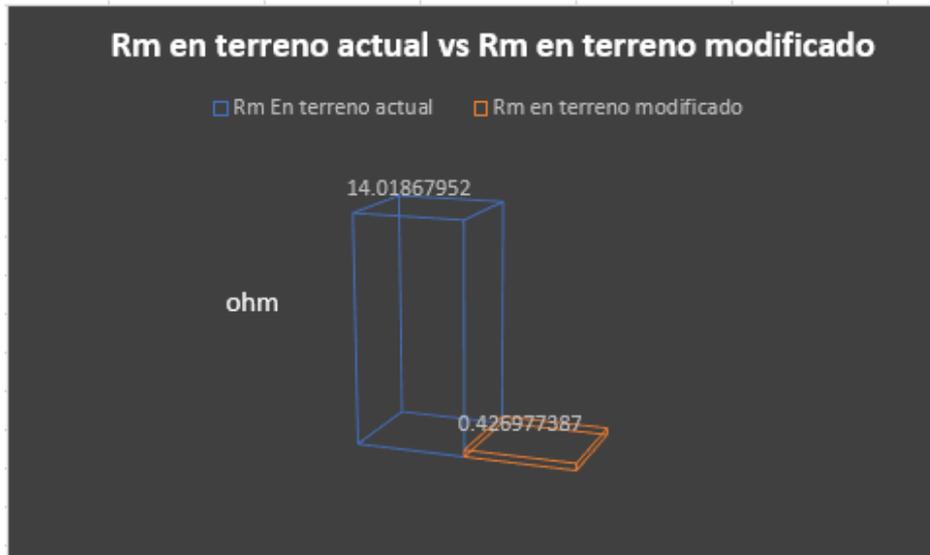


*Figura 42. Protección en condiciones modificadas tensión de paso
Fuente: elaboración propia*

En la Tabla 32, respecto a la hipótesis planteada, se rechaza la hipótesis nula H_0 , y se acepta la hipótesis alterna H_1 ; es decir que: el nivel de protección en un terreno de dos capas modificado para la SE H1 del Proyecto Renovandes – Chanchamayo, es alto; debido a la condición dada según IEEE std.80, para la tensión de toque la $E_m=406.02 < E_{touch}=1231.69119$ la cual genera una afirmación válida, del mismo modo para la tensión de paso se tiene la siguiente condición $E_s=306.51 < E_{step}=4230.76477$, generando una afirmación para un diseño válido.

4.5.3. Diferencia entre la resistencia de malla en condiciones naturales y modificada

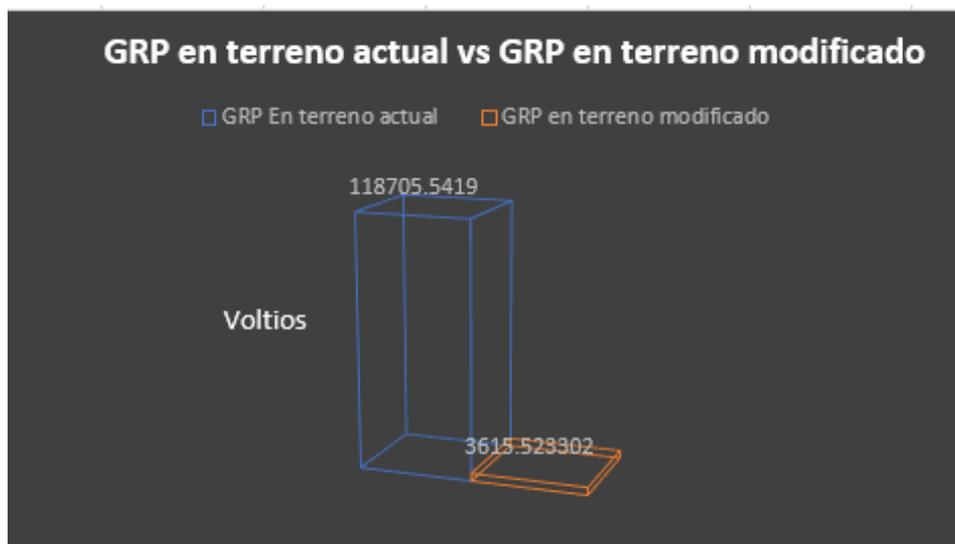
En la figura 44, se compara la diferencia de la resistencia de malla calculada para un terreno en condiciones naturales y un terreno de dos capas modificado siendo óptima la Resistencia de un terreno de dos capas con 0.426 ohm, que resulta favorable y está dentro de los estudios de prefactibilidad del proyecto < 3 ohm la resistividad de la malla a tierra proyectado.



*Figura 43. Diferencia de resistencia de malla de ambos terrenos
Fuente: elaboración propia*

4.5.4. Diferencia entre el GRP en terreno natural y terreno modificado

En la Figura 45, se comparan los cálculos realizados de la tensión máxima a recorrer por la malla siendo no tan favorable el terreno natural por su alta tensión que genera.



*Figura 44. Diferencia del GRP
Fuente: elaboración propia*

4.5.5. Discusión de los resultados

Para el diseño propuesto de comparación del sistema de malla a tierra, con el nombre **terreno modificado** se tomaron las siguientes consideraciones:

- Se ha considerado un terreno con 2 estratos, usando los valores mostrados de un terreno uniforme para el primer estrato (capa inferior), que fue analizado en un terreno a 120 km del lugar del proyecto y fue corroborado como un suelo vegetal.
- En el Estudio de pre operatividad para la Interconexión de la C.H. La Virgen y Renovandes H1; en el año 2024, se puede apreciar una corriente de corto máxima de 1.993 KA. Para el diseño se ha considerado que la corriente de corto es 10 KA.
- Se ha considerado la contribución de la línea de transmisión hacia S.E. Chanchamayo, en la corriente de corte.
- Se buscará que la resistencia de la malla de tierra (subestación y casa de máquinas), sea $\leq 3 \Omega$.
- Las tensiones de choque, para el ancho de la cuadrícula seleccionada, deberán ser menores que las máximas permisibles.
- Para el diseño de la malla profunda y la red superficial se usará conductor de Cu de 2/0 AWG; y las varillas de puesta a tierra serán de Copperweld de 5/8". Esto será validado en el proceso de cálculo.
- Se ha utilizado un tiempo de actuación de las protecciones de 250 m en el proceso de cálculo.

Los resultados estadísticos obtenidos permiten contrastar y validar la hipótesis de investigación planteada para el presente estudio. Que estos constituyan a una base tangible para afirmar, de modo categórico, que la malla a tierra en un área arenosa influye positivamente en la protección de la SE H1 del Proyecto Renovandes en Chanchamayo. De acuerdo al diseño metodológico tomado en cuenta se brinda también resultados en el plano descriptivo que es considerado como un estudio preliminar; así como en el análisis correlacional que constituyó, finalmente, el centro de interés para el abordaje y tomado como el estudio propiamente dicho.

A partir de un análisis descriptivo, el presente estudio reporta algunas características resaltantes tanto en la variable ***malla a tierra*** en general con sus respectivas dimensiones; así también respecto a la variable ***Protección*** de la SE H1.

El estudio de la malla a tierra en un área arenosa y sus factores en el proyecto Renovandes es trascendental pues conlleva a conocer su influencia en la mejora o continuidad respecto a la calidad del servicio brindado, así como la relación con las variables eléctricas. Esto es muy importante porque como remarca (17), las relaciones de

protección y los procesos de comunicación establecidas dentro de una subestación tienen una incidencia directa en la protección de esta, y esto a su vez en el Proyecto Renovandes.

De ello se desprende que una buena malla a tierra en un área arenosa ayuda a desarrollar mejores sistemas de protección, también mayor cuidado frente a la tensión de toque y la tensión de paso; en comparación con una malla a tierra deficiente, donde se produce un conflicto frente a la seguridad del operario, trayendo así: muertes, perjuicios, comunicación deficiente, baja confiabilidad e interferencia y, por tanto, baja productividad. (17)

En el presente estudio se obtuvo que el 65.1 % del terreno en condiciones naturales no es óptimo para un sistema a tierra en la protección del proyecto Renovandes en Chanchamayo, mientras que 32.3 % lo considera regular y un 2.6 % refiere que es bueno. Respecto a la dimensión *estudio de suelo*; un 62.6 % opina que el terreno no es adecuado, mientras que 31.3 % lo considera regular y un 6.2 % refiere que es bueno. Respecto a la dimensión *criterio de diseño*, un 74.9 %, opina que el ambiente brinda malas condiciones para un sistema de protección, mientras que 23.6 % refiere que ofrece regulares oportunidades de protección, un 1.5 % refiere que las oportunidades de protección son deficientes. Respecto a la dimensión mecánica del continuo; un 70.3 %, opina que es malo, mientras que el 27.2 % lo considera regular y un 2.6 % refiere que es deficiente.

El presente estudio también consideró como objetivo de estudio el de realizar el estudio de resistividad de un terreno uniforme para la SE H1 del Proyecto Renovandes - Chanchamayo. Así, para el caso de la resistividad del terreno uniforme se logró determinar, en el análisis global, que tanto la resistividad en términos de protección en condiciones naturales y modificado de la muestra total de estudio, presentan dificultades siendo de mayor relevancia la resistividad en condiciones naturales.

En el estudio de (30) en protección de sistemas de potencia en Venezuela, concluye que el 82 % manifiesta que los terrenos rocosos presentan mayor dificultad para un sistema a tierra: el 79 % son los terrenos pantanosos. El 82 % indica que son los terrenos fangosos y el 67 % manifestó que son los terrenos arenosos. Las zonas selváticas manifestaron en mayor grado la presencia de resistividad del terreno en comparación con los otros tipos de terreno.

Así mismo, en el estudio de (14), realizado en Lima, evidencia los procesos físicos que intervienen en la fabricación de una puesta a tierra que es de vital importancia en la solución de los problemas en el cumplimiento de las normas legales del mejoramiento de la calidad del servicio eléctrico. Por otro lado, (12), desarrolla una ruta de análisis para la definición del modelado de puesta a tierra y su respuesta frente a transitorios de corriente de impulso tipo rayo, aplicables al aterramiento de torres de líneas de transmisión; este modelo tiene como base de teoría de líneas de transmisión, y cuenta con la simplicidad y facilidad de su implementación frente a los terrenos arenosos.

Así mismo, la investigación realizada establece que la resistividad del terreno en condiciones naturales sigue una función inversa; es decir, a los primeros metros de ubicación de los electrodos se tiene una alta resistividad, esta irá disminuyendo según se aumente la longitud, si se saca un promedio aritmético esta supera los 100 Ω -m considerados. Por otro lado, el estudio nos permite analizar desde la perspectiva del terreno tratado que, en estas condiciones se observa un comportamiento inverso. Con respecto al primer caso las medidas realizadas por el telurómetro a las longitudes de 1, 2.4, 8, 16, 32 en todos los casos no superan los 100 Ω -m, siendo el promedio el esperado para las condiciones de puesta a tierra en el tipo de terreno arenoso. En oposición a lo que menciona (2), que destaca de su investigación que los terrenos arenosos generan dificultades y son menos eficaces para sistemas de puesta a tierra.

El resultado del estudio permitió esclarecer la resistividad del terreno en condiciones naturales y modificadas, encontrando en ambas situaciones diferencias en la tensión de toque y paso, de acuerdo a las tablas estos parámetros son desfavorables si se emplean en la condición natural, debido a que los valores son muy altos; tal como menciona (12), que refiere que la tensión de toque y paso son parámetros de control en subestaciones de elevación, reducción y/ distribución y deben de ser de valores mínimos.

CONCLUSIONES

- El diseño del sistema de puesta a tierra proyectada de la subestación, considera que las corrientes de falla a tierra serán disipadas por la malla de tierra profunda.
- Debido a la alta resistividad del primer estrato que se presenta en el área de la subestación, y con el fin de que las tensiones de choque, sean menores a los máximos permitidos, se plantea hacer un corte del terreno en el área de la subestación hasta 1,0 m de profundidad, y reemplazar el terreno propio por un terreno uniforme.
- Para el primer estrato se considera una resistividad de 43.4 Ω -m (tierra vegetal – terreno uniforme), y para el segundo estrato se considera una resistividad de 341,43 Ω -m. (utilizar el estrato superior propio del lugar)
- El sistema de puesta a tierra de la S.E. H1, estará conformado por una malla de red profunda de Cu desnudo de 2/0 AWG ubicada a 0,8 m de profundidad, respecto al nivel del terreno.
- La red de tierra superficial será con conductor de Cu desnudo de 2/0 AWG.
- Se utilizará una capa de grava de 10 cm en el patio de llaves de la subestación.
- La resistencia de la malla de puesta a tierra calculado es de 0.46 Ω .
- Las tensiones de toque y paso dentro de la subestación se encuentran por debajo de los valores máximos permitidos. Por lo tanto, ante una falla en la subestación las personas estarán protegidas contra sus efectos. El diseño del sistema de puesta a tierra proyectada de la subestación considera que las corrientes de falla a tierra serán disipadas por la malla de tierra profunda.
- El estudio permitió confirmar una influencia positiva entre la malla a tierra y la protección de la SE H1 del proyecto Renovandes-Chanchamayo, lo que nos indica que,

a menor resistividad de la malla a tierra, mejor será la protección de la SE H1 del proyecto Renovandes.

- Respecto a la resistividad del terreno se concluye que la SE H1 del proyecto Renovandes en condiciones naturales ofrece una resistividad muy alta, medidas tomadas por el telurómetro según, lo que nos indica que el diagnóstico de resistividad por dimensiones posibilitó reflejar resultados similares al encontrar el análisis global; pues los resultados estadísticos permiten aseverar que la resistividad es mayor a los $100 \Omega\text{-m}$ la cual es condición suficiente de terreno no apto. De ello se desprende que un terreno arenoso no ayuda a generar una resistividad adecuada para una malla a tierra.
- Por otro lado respecto a la protección eléctrica de la SE H1 se concluye que, un porcentaje significativo presenta dificultades en la protección contra la tensión de toque y paso, lo que nos indica que el análisis por dimensiones del nivel de protección estudiado permitió establecer que el terreno en condiciones naturales no reúne las condiciones de protección por lo que hace falta un proceso adecuado al cual se denominó condiciones modificadas, pues este permite niveles de protección óptima para la tensión de toque y paso en la SE H1 del proyecto Renovandes de Chanchamayo.
- Se concluye que la resistividad en condiciones naturales presenta alta resistividad por metro respecto a la resistividad de un terreno uniforme en la muestra de donde se realizó la investigación del proyecto Renovandes de Chanchamayo; así mismo, en los 4 niveles de longitud las resistividades tuvieron la categoría (baja, media y alta) los terrenos arenosos en condiciones naturales superan los 100 ohm por metro mientras que un terreno uniforme está por debajo de los 100 ohm por metro.
- Se concluye que la resistividad del terreno actual en condiciones naturales para la SE H1 del Proyecto Renovandes - Chanchamayo. Es mayor a $100 \Omega\text{-m}$.
- Se concluye que la resistividad de un terreno uniforme, modificando el terreno actual a dos capas para la SE H1 del Proyecto Renovandes – Chanchamayo, es menor a $100 \Omega\text{-m}$; debido al estudio realizado obteniendo $43.4 \Omega\text{-m}$.

- Se concluye que el nivel de protección en condiciones naturales del terreno actual para la SE H1 del Proyecto Renovandes – Chanchamayo, es bajo; debido a la condición tomada de la norma IEEE std. 80 2000, y analizada con los datos obtenidos donde la tensión de malla $E_m=13330.60 < E_{touch}=1259.99$ admisible, la cual genera una relación no válida, del mismo modo para la tensión de paso se tiene la siguiente condición $E_s=11048.50 < E_{step}=4343.94$, generando del mismo modo un diseño no válido.
- Se concluye que el nivel de protección de un terreno de dos capas modificado con una capa uniforme para la SE H1 del Proyecto Renovandes – Chanchamayo, es alto; debido a la condición según la norma IEEE std. 80 2000 donde la tensión de malla $E_m=406.03 < E_{touch}=1231.69119$ admisible, la cual genera una condición válida, del mismo modo para la tensión de paso se tiene la siguiente condición $E_s=306.51 < E_{step}=4230.46477$, generando del mismo modo una condición para un diseño válido.

RECOMENDACIONES

- A la empresa de Generación Eléctrica Santa Ana S.R.L. del Proyecto Renovandes de Chanchamayo, se les recomienda desarrollar planes y programas a fin de seguir mejorando sustancialmente la protección de la SE H1.
- Elaborar y aplicar programas de prevención e intervención ante casos de fallas con respecto a la tensión de toque y de paso en la SE H1 del proyecto Renovandes de Chanchamayo.
- Realizar propuestas frente a los factores causantes de la alta resistividad del terreno arenoso, seguidamente hacer un tratamiento y plantear estrategias adecuadas para su manejo.
- Se recomienda la realización de otros estudios considerando muestras de resistividad de terrenos en sus diferentes categorías del país, así como la inclusión de variables intervinientes que enriquezcan el marco teórico sobre la protección de subestaciones.
- Dentro del plan de mantenimiento de la SE H1 deberá incluirse la medición de la resistencia de tierra, así como de los valores de tensión de toque y paso, por lo menos una vez al año, para así comprobar que sigue dentro de los valores óptimos de operación.
- Para realizar un eficiente diseño del sistema de puesta a tierra, se deberá calcular la corriente de falla que circulará hacia tierra, esto para no sobredimensionar dicho sistema; en el caso del presente informe fue por requerimiento del cliente quien fijó el valor.

Cuadro de coordenadas		
Vertices	UTM WG84 ZONA 18	
	Este (m)	Norte (m)
V1	474081.05	8788101.33
V2	474077.32	8788067.93
V3	474126.00	8788062.50
V4	474163.89	8788044.14
V5	474173.38	8788060.83

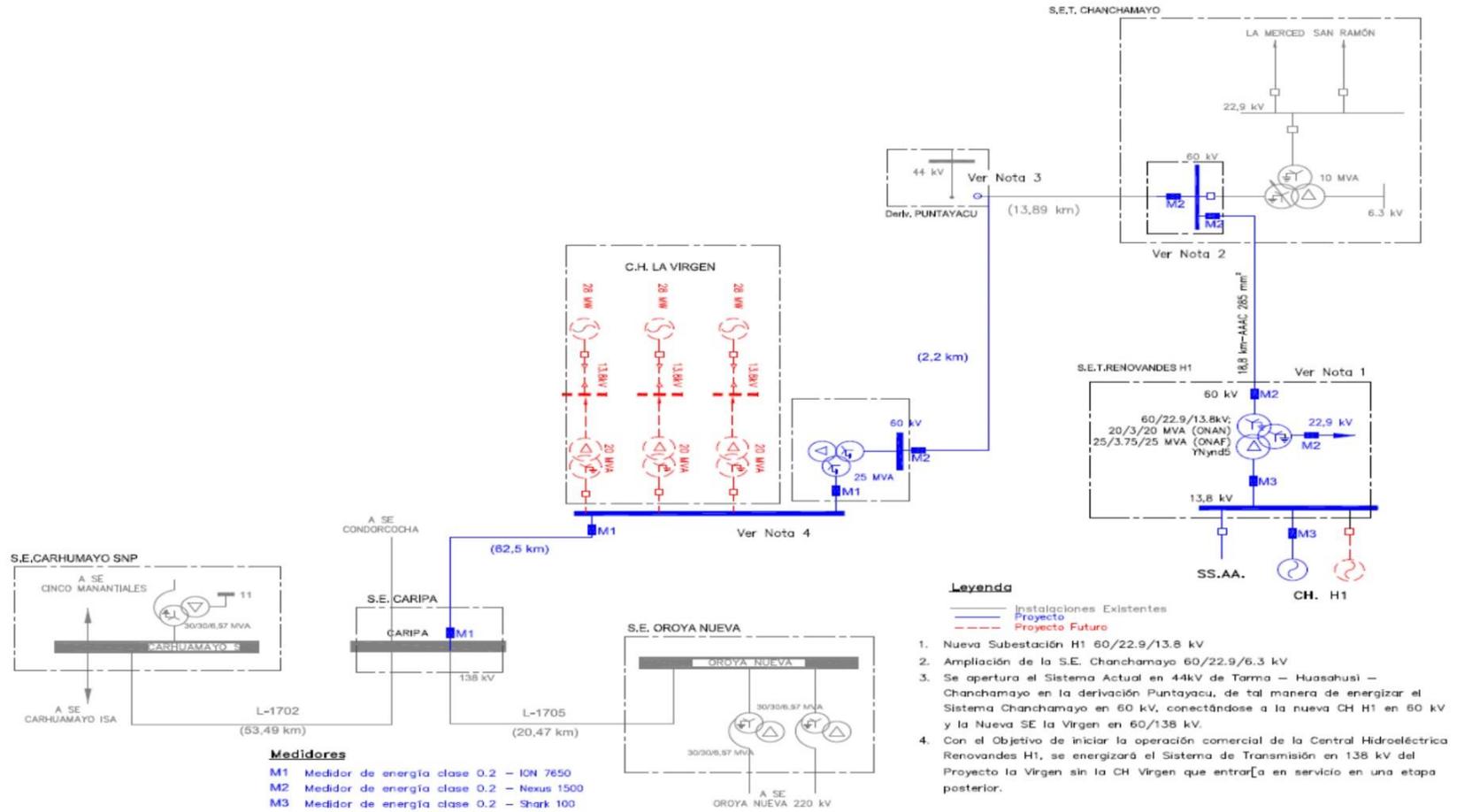
Anexo 2. Coordenadas de localización

Fuente: elaboración propia

Las características climatológicas y geográficas en el área del proyecto, son las siguientes:

- Altura : 660 m.s.n.m.
- Temperatura Mínima : 15 °C
- Temperatura Media : 27,3 °C
- Temperatura Máxima : 38,6 °C
- Contaminación Ambiental : Pesada

✓ **A.2 Plano unifilar del proyecto**



Anexo 3. Plano unifilar de la SE H1 del Proyecto Renovandes

Fuente: Proyecto Renovandes EGE Santa Ana SRL

✓ A.3 Malla de tierra profunda



Metrado de Materiales			
Item	Símbolo	Descripción	Cant.
1	➔	Soldadura horizontal de cable sobrepuesto en cruz, Pasante de Cu 70mm ² , y derivación de Soldadura horizontal de un cable de zona y un cable de derivación en L, Pasante Cu 70mm ² , y derivación Cu 70mm ² Red profunda.	85u
2	➔	Soldadura horizontal de un cable de zona y un cable de derivación en L, Pasante Cu 70mm ² , y derivación Cu 70mm ² Red profunda.	71u
3	➔	Soldadura horizontal de un cable de zona y un cable de derivación en T, Pasante Cu 70mm ² , y derivación Cu 70mm ² Red superficial.	78u
4	⊕	Soldadura cable pasante a varilla pasante, Conductor de Cu 70mm ² y varilla Coperweld 5/8"	17u
5	⊕	Soldadura cable terminal a extremo de varilla, Conductor de Cu 70mm ² y varilla Coperweld 5/8"	1u
6	—	Varilla Coperweld de 5/8" x 2,40 m. long.	16u
7	⚡	Terminal de compresión para cable de Cu de 70 mm ²	10u
8	⊕	Pozo de tierra con caja de Registro (PT1).	10u
9	⊕	Pozo de tierra sin caja de Registro (PT2).	6u
10	⊕	Rejilla Metálica.	3u
11	⊕	Conector a tierra para 2 conductores de Cu de 70 mm ² .	20u
12	⊕	Conector a tierra para conductor de Cu de 70 mm ² .	142u
13	⊕	Conector a tierra cable de Cu de 70 mm ² a Tierra del Catavento #1/2	40u
14	—	Conductor de Cu desnudo de 70 mm ² para red de tierra profunda.	1330m
15	—	Conductor de Cu desnudo de 70 mm ² para red de tierra superficial.	500m
16	—	Malla para soldadura horizontal de cable sobrepuesto en cruz, Pasante de Cu 70mm ² , y derivación de Cu 70mm ² .	3u
17	—	Malla para soldadura horizontal de cable de zona y un cable de derivación en L, Pasante de Cu 70mm ² , y derivación de Cu 70mm ² .	5u
18	—	Malla para soldadura cable pasante a varilla pasante, Conductor de Cu 70mm ² , y varilla Coperweld 5/8"	1u
19	—	Malla para soldadura cable terminal a extremo de varilla, Conductor de Cu 70mm ² , y varilla Coperweld 5/8"	1u
20	—	Vol Tierra propio cerrada (m3).	7
21	—	Vol Tierra vegetal (m3). Ver nota 4.	1190

(*) El metrado corresponde a la red de tierra profunda de la Casa de Máquinas.
 (**) El soporte del pararraye PR-1, se colocará en la base del accionador BSB-1.

- Notas:**
- Todos las medidas están expresadas en milímetros.
 - Las cotas de medida están de acuerdo al sistema internacional (S.I.).
 - Se deberá realizar un corte de terreno, al área representada donde se ubicará la subestación, y ocupar como material de relleno tierra vegetal bien compactada. El corte de terreno será de 1,00m de profundidad. En el metrado se ha considerado el volumen de tierra vegetal necesaria para el corte de terreno y las cajas de tierra.
 - El metrado de la red de tierra profunda para la subestación, se encuentra a una profundidad de 0,5m respecto al nivel de superficie real.
 - Se utilizará para la malla, varilla y superficie conductor de Cu de 270 AWG o de 70mm², y una caja de zona de 0,1m de espesor.
 - El Contratista debe verificar, para las etapas, lo siguiente:
 - Para el caso de la medida corta, esta deberá tener 0,5m como mínimo sobrepuesto de pedestal del equipo proyectado.
 - Para el caso de Transformador de potencia, las medidas deberán tener 2m como mínimo sobrepuesto del pedestal.

Plano de Referencia:

- 107.EL.7.40.1 Red de Tierra Profunda - Vista en Planta General
- 107.EL.7.40.2 Red de Tierra Profunda - Detalles 1
- 107.EL.7.40.3 Red de Tierra Profunda - Detalles 2
- 107.EL.7.40.3 Lista de Conectores de Red de Tierra Superficial
- 107.EL.7.40.6 Detalles de Conectores de Red de Tierra Superficial

Legenda:

- Malla Red Profunda - Proyecto
- Malla Red Profunda - Casa de Máquinas
- Malla larga (Aterramiento de Escudo)
- Malla corta (Aterramiento Estructura Soporte)

Plano de Referencia:

1. La zona está compuesta por tierra vegetal compactada.
 2. Para los Pozos de Fuente Tierra se realizará una mezcla uniforme con los siguientes materiales:
 - 30% Terreno Propio Cerrado
 - 70% Tierra Vegetal

RENOWNDES
CENTRAL HIDROELECTRICA RENOWNDES HI

RED DE TIERRA PROFUNDA
VISTA EN PLANTA

APROBADO: ADG
 DISEÑADO: ADG
 REVISADO: ADG
 APROBADO: ADG
 DISEÑADO: ADG
 REVISADO: ADG
 ESCALA: 1:100
 FECHA: 17/09/2010
 CANTIDAD: 1
 PLAN: A

Bases (**)	Ubicación	Machas (mm)								
		Fases		Fases		Rejillas Mando-Control	Rejillas Cuchilla-Tierra	Rejillas Mando-Control	Rejillas Cuchilla-Tierra	Caja Centralización
		R	S	R	T					
BTP-1	Batida de Barra	5000	—	6000	4000	—	6000	—	—	—
BTA-1	Batida de Barra	5000	—	6000	4000	—	6000	—	—	—
BSB-1	Batida de Barra	5000	5000	6000	6500	4000	3000	5000/3000	—	4500
BSL-1	Batida de Barra	9000	7000	6500	3000	4000	3000	5000/3000	2000/2500	4000
BTT-1	Batida de Barra	8000	7500	6000	2500	2500	2500	—	—	5500
PR-1	Batida de Barra	9000	7500	6500	2500	3500	2500	—	—	—

Bases de Equipos Patio 60 kV		
Código	Descripción	Cant.
BTP-1	Base de Pórtico de Barra	2u
BTA-1	Base de Torreta de Apantallamiento	1u
BIP-1	Base de Interruptor de Potencia	1u
BSB-1	Base de Seccionador de Barra	2u
BSL-1	Base de Seccionador de Línea	1u
BTT-1	Base de Transformador de Tensión	3u
BTF-1	Base del Transformador de Potencia	1u

Anexo 4. Malla de tierra profunda
Fuente: Proyecto Renovandes GCZ

✓ **A.4 Planos de detalle de uniones con soldadura exotérmica**

Conductor de Cu 70 mm²

Varilla Copperweld # 5/8"

Terminal de compresión, con el largo, para conductor de Cu 70mm²

1	
Denominación	Soldadura horizontal de cable subterráneo en cruz. Pasante de Cu 70mm ² , y derivación de Cu 70mm ² .
Marca Referencia	Codeweld o similar
Cantidad	85u

2	3
Denominación	Soldadura horizontal de un cable de pozo y un cable de derivación en T. Pasante de Cu 70mm ² , y derivación de Cu 70mm ² .
Marca Referencia	Codeweld o similar
Cantidad	149u

4	
Denominación	Soldadura cable pasante a varilla pasante. Conductor de Cu 70mm ² , y varilla Copperweld 5/8".
Marca Referencia	Codeweld o similar
Cantidad	17u

5	
Denominación	Soldadura cable terminal a extremo de varilla. Conductor de Cu 70mm ² , y varilla Copperweld 5/8".
Marca Referencia	Codeweld o similar
Cantidad	1u

6	
Denominación	Varilla de Copperweld de 5/8" x 240 cm. largo.
Marca Referencia	-
Cantidad	16u

7	
Denominación	Terminal de compresión, con el largo, para conductor de Cu 70mm ²
Marca Referencia	-
Cantidad	16u

Detalle de Conexiones
Escala: 1:2

Pozo de puesta a tierra Tipo PT1 (10u) (con tapa de concreto)
Escala: 1:20

Pozo de puesta a tierra Tipo PT2 (6u) (sin tapa de concreto)
Escala: 1:20

Caja de Registro Pozo PT1
Escala: 1:10

Detalle "A"
Caja de Registro Prefabricada
Escala: 1:10

Detalle "B"
Escala: 1:5

Detalle "X"
Escala: 1:2,5

Detalle "Y"
Escala: 1:2,5

11
Rejilla Metálica (3u)

Notas:

- Todos los medidas están expresadas en milímetros.
- Los unidades de medidas están de acuerdo al Sistema Internacional (S.I).
- Para los Pozos de Puesta Tierra se realizará una mezcla uniforme con los siguientes materiales:
 - 30% Tierra Fina/Gravada
 - 70% Tierra Vegetal

Planos de Referencia:

- 107.EL.7.40.1 Red de Tierra Profunda - Vista en Planta General
- 107.EL.7.40.2 Red de Tierra Profunda - Vista en Planta
- 107.EL.7.40.4 Red de Tierra Profunda - Detalle 2
- 107.EL.7.40.5 Lista de Conectores de Red de Tierra Superficial
- 107.EL.7.40.6 Detalles de Conectores de Red de Tierra Superficial

Escala Gráfica	
0	0.2
0	0.4
0	0.6
0	0.8
0	1.0
0	1.2
0	1.4
0	1.6
0	1.8
0	2.0
0	2.2
0	2.4
0	2.6
0	2.8
0	3.0
0	3.2
0	3.4
0	3.6
0	3.8
0	4.0
0	4.2
0	4.4
0	4.6
0	4.8
0	5.0
0	5.2
0	5.4
0	5.6
0	5.8
0	6.0
0	6.2
0	6.4
0	6.6
0	6.8
0	7.0
0	7.2
0	7.4
0	7.6
0	7.8
0	8.0
0	8.2
0	8.4
0	8.6
0	8.8
0	9.0
0	9.2
0	9.4
0	9.6
0	9.8
0	10.0

#	ADG	ADG	ADG	ADG	ADG	ADG
CLIENTE:	RENOVANDES					
PROYECTO:	CENTRAL HIDROELECTRICA RENOVANDES H1					
TITULO:	RED DE TIERRA PROFUNDA DETALLES 1					
DESIGNO:	ADG	ADG	ADG	ADG	ADG	ADG
FORMATO:	A-1	LABORAL N°	107.EL.7.40.3	FECHA:	30.10.15	INDICADA
				APROBADO:		APROBADO:

Anexo 5. Ingeniería de detalle de la instalación, montaje y comisionado
Fuente: Proyecto Renovandes GCZ

✓ **A.5 Certificado de calibración de equipo telurómetro**

	7330 NW 66 th STREET, MIAMI, FLORIDA 33166, USA PHONE: +1 (305) 938-0389 FAX: +1 (305) 513-4493 www.tentech.us	TM-25R Earth Tester
Certificate No.	53 6 1 8 0	Page: 1 / 2

Calibration Certificate

Equipment: **Megabras TM-25R Earth Tester**

Serial No.: **15K1201**

Property No.

Date of calibration : **11/12/2016**

NOTES:

1 Calibration procedure

The calibration procedure used was based on the recommendations of the IEC 17025:2005 Standard, in the technical instruction PQ GQ 01 and in the manuals of operation of the involved instruments.

2. Used standards

Decade resistance box, Yokogawa, model No.: 2786-20. Serial number 01017, with calibration certificate No. 146293_101 issued by IPT on 07/30/2015, validity for 2 year.

Fluke 8845A, 6 ½ digits, digital multimeter, serie N° 1869003 with calibration certificate N° 1D11607, issued on December 19, 2014 by NVLAP in accordance with the Fluke Calibration Quality System document QSD 111 0.

(1) IPT – Instituto de Pesquisa Tecnológica.

3. Uncertainties

The conventional true values are affected with the following uncertainties: ±0,5%

The uncertainty expanded told, it is based on a standardized uncertainty combined multiplied by an inclusion factor K=2, for a level of trust of approximately 95%

4. Enviromental conditions

Room temperature:

23 ± 2 °C

Relative humidity:

56 ± 5%

The reproduction of this document will only be able to be integral

Anexo 6. Certificado de calibración hoja 1
Fuente: Proyecto Renovandes AUDIGESAC



7330 NW 86TH STREET,
MIAMI, FLORIDA 33166, USA
PHONE: +1 (305) 938-0389
FAX: +1 (305) 513-4493
www.tentech.us

TM-25R Earth Tester

Certificate No. 53 6 1 8 0 11/12/2015 Page: 2 / 2

5. Calibration Values:

Maximum admissible error : $\pm (2.5 \% \text{ Read value} + 1 \text{ digit})$.

Standard Value (Ω)	Read Value (Ω)	Error
1.000	0.98	-2.00%
4.000	4.03	0.75%
5.000	5.02	0.40%
10.000	10.00	
20.000	20.0	-0.25%
30.000	29.9	-0.33%
40.000	39.9	-0.25%
50.000	50.2	0.40%
100.000	100.0	
200.00	200	
300.00	303	1.00%

Results: All test were satisfactory in this equipment.

6. Observations

- This Certified of Calibration it is valid only for the tested unit, not being extensive to any lots, even if it is similar
- The reproduction of this document will only be able to be integral.
- All these certificates are traceable to National and International standards and are in compliance with ISO/IEC 17025:2005.

Calibrated by:

Alfredo Arevalo

Supervisor:

Eng° Clays Milan

The reproduction of this document will only be able to be integral

Anexo 7. Certificado de calibración hoja 2
Fuente: Proyecto Renovandes AUDIGESAC

✓ **A.6 Prueba de calicata**

		Ubicación : CH H1 RENOVANDES		CALICATA C_01 Coordenadas Norte 8 788 055,420 Este 474 156,90 Elevación 661,53 Nivel Freático(m) 5.10 m Prof. Calicata(m) 6.20 m		
		Fecha de excavación : 08/04/2016 Fecha de registro : 08/04/2017 Método : Mecánico Equipo : JCB 220 Dimensiones calicata : 2.60 m x 6.20 m Registrado por : R.M.E				
CENTRAL HIDROELECTRICA RENOVANDES H1						
Profundidad(m)	SUCS	Grafico	Condición de muestra:  Disturbada  En bloque Descripción	Muestra	Código muestra	Comentarios
0.5 0.6	SM		Arena limosa, no plástica, en estado suelto, húmeda, marrón claro, estructura homogénea.			
1.0	Pt		Turba, blanda, muy húmeda, negro, olor característico.			
1.4 1.5 2.0 2.5 3.0 3.5 4.0 4.5 5.0 5.1	GP-GM		Grava mal graduada con limo y arena, plasticidad baja a nula, suelta, húmeda, hay presencia de lentes de turba, estructura homogénea, grava redondeada de tamaño variado, bolonería en 40,0% y bloques aislados de tamaño máximo = 42", marrón claro, presencia de nivel freático a 5.10 m Grava: 50,0% Arena: 30,0% Finos: 20,0% 			Presencia de lentes de turba Potencia 6.20 m No se hizo la densidad natural ya que las partículas supera las 2" y es un material suelto. Presencia de bloques y bolones en un 50 % aproximadamente Nivel Freático a 5.10 m
5.5	N.F.		Nivel de Napa Freático			
6.0 6.2						No se pudo bajar más ya que este fue el límite de excavación del equipo Límite de excavación

Anexo 8. Calicata C_01 Proyecto CH H1

Fuente Liec elaboración de calicata

✓ **A.7 Plan de mantenimiento**

ITEM	REALIZAR A	ACCION PREVENTIVA
1	Un año	Medición de resistencia de puesta a tierra Medición de equipotencialidad Revisión de ajustes necesarios del sistema Revisión de estructuras de anclaje: aisladores y tensores Pruebas de imágenes térmicas
2	Cinco años	Evaluación de resistencia de puesta a tierra de cada subsistema de puesta a tierra Medición de equipotencialidad de cada subsistema Medición de resistencia de puesta a tierra de todo el SPT interconectado
3	Diez años	Revisión de conexiones al electrodo (una muestra) Las actividades propias de cada año
4	Veinte años	Diagnosticar Evaluar Rediseñar Proyectar acciones correctivas

Anexo 9. Plan de mantenimiento de sistema de malla atierra

Fuente: elaboración propia

✓ **A.8 Analisis de costos unitarios sistema de puesta a tierra**

EGE SANTA ANA SRL				CGZ		
ANÁLISIS DE COSTOS UNITARIOS DE LAS OBRAS ELECTROMECÁNICAS DE LA S.E. H1 13.8/22.9/60 KV						
PROYECTO:	RENOVANDES					
PARTIDA:	6.00 SISTEMA DE PUESTA A TIERRA					
DESCRIPCIÓN:	6.01 SISTEMA DE PUESTA A TIERRA PROFUNDA					
RENDIMIENTO:	0.120	global/día			UNIDAD:	glb.
DESIGNACIÓN	CUAD.	UNID.	APORTE	COSTO U.	C. PARCIAL	SUB TOTAL
MATERIALES						120,113.45
Material consumible		EST	0.10	192.50	19.25	
Pinza multimétrica		Un.	0.25	1.93	0.48	
Conectores, uniones y varillas		Pza.	0.10	2.20	0.22	
Soldadura moldes		gln	10.00	9.35	93.50	
Conductor de cobre blando / soldadura exotérmica. y accesorios		Glb	100.00	1,200.00	120,000.00	
MANO DE OBRA						10,552.40
Ingeniero de seguridad	0.10	h-h	6.67	52.50	350.00	
Capataz en trab. eléct.	1.00	h-h	66.67	20.45	1,363.20	
Operario en trab. eléct.	2.00	h-h	133.33	17.24	2,299.20	
Peón	4.00	h-h	266.67	11.40	3,040.00	
Ingeniero electricista	1.00	h-h	66.67	52.50	3,500.00	
MAQUINARIAS Y EQUIPOS						165,142.47
Camión FM	0.50	h-m	80.00	800.00	64,000.00	
Camión oruga	0.10	h-m	80.00	1,250.00	100,000.00	
Camioneta pick up 4 x 2	0.10	h-m	6.67	45.42	302.80	
Caballote alza bobina	0.10	h-m	6.67	62.20	414.67	
Telurómetro de alta frecuencia Megger	0.25	h-m	16.67	5.50	91.67	
Higrómetro, cámara termográfica	0.25	h-m	16.67	20.00	333.33	
HERRAMIENTAS						527.62
Herramientas manuales y equipos de protección		% m-o	5.00	10,552.40	527.62	
COSTO DIRECTO TOTAL					USS/.	296,335.94

Anexo 10. Metrado y presupuesto malla a tierra profunda

Fuente: EGE Santa Ana S.R.L.

B. Reporte fotográfico del proyecto



Anexo 11. Estudio de calicata



Anexo 12. Corte de terreno para la futura SE H1



Anexo 13. Soldadura exotérmica de malla tierra



Anexo 14. Tratamiento de puesta a tierra



Anexo 15. Tapizado de pozo a tierra

BIBLIOGRAFÍA

1. **Reyes Calderon, G.** *Armonicas en sistemas de distribución eléctrica*. Mexico : Univercidad Autónoma de Nuevo León, 1996.
2. **Seminario, Kerry Zerpa.** *Evaluación de la eficiencia energética y diseño óptimo de una línea de distribución en media tensión-10KV*. Piura : Universidad de Piura, 2013.
3. **Qqueshuayllo Cancha, Wilbert René.** *Diseño y Ejecución de una puesta a tierra de baja resistencia*. Lima – Perú : s.n., 2005.
4. **Echevarria Peche, Erasmo Amador.** *Modelado y análisis de la respuesta Transitoria de puestas a tierra no extensas*. Lima-Peru : UNI, 2012.
5. **Jara Noriega, Jhon.** *Optimización de la protección electrica de la subestacion tierra colorada*. Piura : Univercidad de Píura, 2015.
6. **Ponce De León Córdova, Jean Paúl.** *Metodología para la separación y cuantificación de las contribuciones armónicas en un punto de acoplamiento común (PAC)*. Lima : Universidad Nacional de Ingeniería. Programa Cybertesis PERÚ, 2007.
7. **Proaño Pérez, Noé Fernando y Velasquez Zharate, Victor Adolfo.** *Estudio de efectos y métodos de minimización de distorsiones armónicas en equipos de distribución eléctrica comercial e industrial*. Guayaquil : Facultad de Ingenierías - Universidad Politécnica Salesiana, 2010.
8. **López Ati, Darwin Abraham.** *Distorsión armónica producida por variadores de frecuencia para mejorar el desempeño de motores eléctricos trifásicos en el laboratorio de automatización de la facultad de ingeniería civil y mecánica*. Ecuador : Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica - Universidad Técnica de Ambato, 2013.
9. **Holguin, Marcos y Gomes Coello, David.** *Análisis de calidad de energía eléctrica en el nuevo campus de la Universidad Politécnica Salesiana*. Ecuador : Facultad de ingeniería eléctrica - Universidad Politécnica Salesiana, 2010.
10. **Vélez Osorio, Oscar Javier y Peláez Delgado, Dayana.** *Evaluación de la calidad de energía en la Universidad Tecnológica de Pereira*. Pereira : Facultad de Ingenierías Programa de Ingeniería Eléctrica - Universidad Tecnológica de Pereira, 2008.
11. **IEEE/ANSI.** *Guide for Safety in AC Substations Grounding. (revisión de 1986)*. USA : persons, 80-2000. 0-7381-5639-6 SH95700.
12. **Peche Erasmo, Amador Echeverria.** *Modelado y análisis de la respuesta Transitoria de puestas a tierra no extensas*. Lima : s.n., 2012.
13. **ABC.** *ABC de los sistemas de puesta a tierra y pararrayos*. s.l. : MASS@TIERRA. www.tierrafisica.com.
14. **Wilber Rene, Q. C.** *Diseño y ejecución de una puesta a tierra de baja resistencia*. Lima : San Marcos, 2005.
15. **Astudillo ochoa, Cristian Rodrigo y Cajamarca Currillo, Marco Vinicio.** *Calculo de sistemas de puesta a tierra aplicación de la norma IEEE 80-2000*. Cuenca, Ecuador : s.n., 2012.
16. *Efectos de la corriente en los seres humanos y el ganado - Parte 1: Aspectos generales*. **IEC60479-1**. 2005, Siemens Brasil 2005, pág. 4.
17. **Martín, José Raul.** *Diseño de subestaciones eléctricas*. Maxico : Mc Graw Hill, 1986.
18. **Chiriboga Guaras, Raúl Alejandro.** *Proyecto de un sistema de puesta a tierra normalizada para centros de transformación en el sector del nuevo aeropuerto de Quito parroquia de Tababela*. Quito : Escuela politécnica Nacional, 2008.
19. **Electric, Schneider.** www.schneiderelectric.com. [En línea] CT-PT-009-Z002, 14 de 04 de 2014.

20. **GEO, Fluke 1625-2.** <https://pt.rs-online.com/web/b/fluke/>. [En línea] Medidor de Resistencia a Tierra Fluke, FLUKE-1625-2, CAT II 300 V.
21. **IEEE Guide for Direct Lightning Stroke. IEEEStd.998-1996.** EEUU : The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 1996.
22. **Navarro Palacios, Claudia Beatriz.** *Análisis de la seguridad eléctrica en áreas críticas del hospital nacional zacamil dr. Juan José Fernández y Hospital General del Instituto Salvadoreño del Seguro Social.* San Salvador : s.n., 2006.
23. **Sanchez, H Y C y Reyes.** *Planificación de la investigación.* Lima Peru : Ed Ciencia. 205p, 2000.
24. **Alvitres, V.** *Metodo científico, Planificación de la investigación.* Lima Peru : Ed. Ciencia 205p., 2000.
25. **Corbetta.** *Metodología y técnicas de investigación.* s.l. : Mac Draw Hill. 1a Edición, 2006.
26. **Hernández, Roberto, Fernández, Carlos y Baptista, Maria del Pilar.** *Metodología de la investigación.* Colombia : Mc. Graw Hill, 2010. 978-1-4562-2396-0.
27. **Danhke, G. L.** *Investigación y comunicación.* Mexico : MacGraw-Hill Bachelona, 1989.
28. **Espinoza, Ciro.** *Metodología de investigación tecnológica.* Huancayo : Ciro Espinoza Montes, 2014. 978-612-00-0222-3.
29. **Ñaupas, Humberto.** *Metodología de la investigación.* Colombia : Ediciones de la U, 2014. 978-958-762-188-4.
30. **Yanque Tomasevich, Mirko Mashenko.** *Diseño de redes de puesta a tierra en subestaciones de corriente alterna.* Lima-Perú : Tesis de Grado, 2006.
31. **Calipsa, Juan Carlos y Iza, Elva Elizabeth.** *Estudio del cambio de Voltaje en la subestacion 17 de 6.3 kV a 23 kV para mejorar el servicio en el area noroccidental de Quito.* Quito : s.n., 2002.
32. **García Trasancos, Jose.** *Instalaciones electricas en baja y media tension.* Madrid : Mc. Graw Hill, 2008. 978-1-4562-2396-0.
33. **Medina, Darwin y Ttito, Angel.** *Planteamiento de metodologia e integracion de soluciones para mejora de la calidad de tension en los sistemas electricos de distribucion.* Lima : s.n., 2012.
34. **Neri, Maribel Carolina.** *Estudio de la planificacion a corto y mediano plazo de las subestaciones Guaira y Casino.* Venezuela : Universidad Simon Bolivar, 2006.
35. **Yebra Morón, Juan Antonio.** *Sistemas electricos de distribucion.* Barcelona : Reverté, 2009. 978-84-291-3029-4.
36. **Hileman, Andrew R.** *Insulation Coordination for Power Systems.* USA : Persons, 1999.
37. **Alvarez Antonio, Humberto Alberto.** *Estudio de armónicos en rectificadores estáticos de potencia con el método modificado de los coeficientes de Fourier.* Lima : Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica - Universidad Nacional de Ingeniería, 2000.
38. **Guarras, Chiriboga.** *Proyecto de un sistema de puesta a tierra normalizada para centros de transformación en el sector del nuevo aeropuerto de Quito parroquia de Tababela.* Quito : Quito, 2008.
39. **K, Zerpa.** *Evaluación de la eficiencia y diseño optimo de una linea de distribución.* Piura : Univercidad de Piura, 2013.
40. **Noriega, Jhon Jara.** *Optimización de la protección eléctrica de la subestación tierra colorada.* Piura : Universidad de Piura, 2015.
41. **Vilca Choque, Miguel Angel y Quisiyupanqui Cusiquispe, Jhon Edgar.** *Estudio de coordinación de protecciones en la subestacion de dolorespata acorde a lanueva*

topologia en alta y media tension para el año 2018. Cusco : Consejo de investigacion de la UNSAAC, 2015.

42. **Gomez Expocito, Antonio, y otros.** *Sistemas eléctricos de potencia.* Lima-Perú : Pearsón Educacción-Madrid España, 2003.

43. **Felipe Ramirez, Carlos.** *Subestaciones de Alta Y Extra Alta Tensión.* Colombia : Ingeniería Mejía Villegas S.A., 1991.

44. **Elecin.** *Subestaciones electricas de transformacion de media tension para usuarios finales.* Madrid : Persons, 2015.