



**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA  
ELÉCTRICA**

**Modelo Híbrido de una Malla de Puesta a Tierra con Geometría  
Helicoidal para Mejorar los Parámetros Eléctricos en una  
Subestación**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

Ingeniero Mecánico Electricista

**AUTORES:**

Gutierrez Acuña, Luis Fernando ([orcid.org/0000-0002-3330-1913](https://orcid.org/0000-0002-3330-1913))

Perez Lucho, Tomas Bruñer ([orcid.org/0000-0002-6270-6055](https://orcid.org/0000-0002-6270-6055))

**ASESORA:**

Mg. Serrepe Ranno, Miriam Marcela ([orcid.org/0000-0001-9342-1717](https://orcid.org/0000-0001-9342-1717))

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:**

Modelamiento y Simulación de Sistema Electromecánicos

**LÍNEA DE RESPONSABILIDAD SOCIAL UNIVERSITARIA:**

Desarrollo sostenible y adaptación al cambio climático

TRUJILLO – PERÚ

2023

## Dedicatoria

*El presente trabajo va dedicado a Dios, por brindarme sabiduría, salud y guiarme en cada paso que doy, a mis padres, esposa y familiares que siempre me apoyaron en todo momento y son un ejemplo en nuestras vidas.*

*Tomas*

*A mis padres, por su incondicional amor, apoyo y enseñanzas a lo largo de mi vida. Su ejemplo de perseverancia y sacrificio me ha inspirado a seguir adelante y a lograr mis metas.*

*Quiero dedicar este trabajo a mi esposa e hijos, quienes me han brindado su aliento y motivación en todo momento. Sin su ayuda, este logro no habría sido posible. Gracias a todos por ser parte de mi camino y por creer en mí.*

*Luis*

## **Agradecimiento**

*A los docentes de nuestra casa de estudios (Universidad César Vallejo), en especial a la Mg. Serrepe Ranno, Miriam Marcela, por compartir sus conocimientos, motivarnos y guiarnos en este largo camino de constante aprendizaje.*

*Los autores*

## Declaratoria de autenticidad de la asesora

Yo, SERREPE RANNO MIRIAM MARCELA, docente de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - TRUJILLO, asesor de Tesis titulada: "Modelo Híbrido de una Malla de Puesta a Tierra con Geometría Helicoidal para Mejorar los Parámetros Eléctricos en una Subestación", cuyos autores son GUTIERREZ ACUÑA LUIS FERNANDO, PEREZ LUCHO TOMAS BRUÑER, constato que la investigación tiene un índice de similitud de 19.00%, verificable en el reporte de originalidad del programa Turnitin, el cual ha sido realizado sin filtros, ni exclusiones.

He revisado dicho reporte y concluyo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio. A mi leal saber y entender la Tesis cumple con todas las normas para el uso de citas y referencias establecidas por la Universidad César Vallejo.

En tal sentido, asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada, por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

TRUJILLO, 12 de Diciembre del 2023

Apellidos y Nombres del Asesor:	Firma
SERREPE RANNO MIRIAM MARCELA DNI: 06437594 ORCID: 0000-0001-9342-1717	Firmado electrónicamente por: SRANNOMM el 14- 12-2023 09:43:55

Código documento Trilce: TRI - 0694089

## Declaratoria de originalidad de los autores

Nosotros, GUTIERREZ ACUÑA LUIS FERNANDO, PEREZ LUCHO TOMAS BRUÑER estudiantes de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - TRUJILLO, declaramos bajo juramento que todos los datos e información que acompañan la Tesis titulada: "Modelo Híbrido de una Malla de Puesta a Tierra con Geometría Helicoidal para Mejorar los Parámetros Eléctricos en una Subestación", es de nuestra autoría, por lo tanto, declaramos que la Tesis:

1. No ha sido plagiada ni total, ni parcialmente.
2. Hemos mencionado todas las fuentes empleadas, identificando correctamente toda cita textual o de paráfrasis proveniente de otras fuentes.
3. No ha sido publicada, ni presentada anteriormente para la obtención de otro grado académico o título profesional.
4. Los datos presentados en los resultados no han sido falseados, ni duplicados, ni copiados.

En tal sentido asumimos la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de la información aportada, por lo cual nos sometemos a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

Nombres y Apellidos	Firma
LUIS FERNANDO GUTIERREZ ACUÑA DNI: 46737368 ORCID: 0000-0002-3330-1913	Firmado electrónicamente por: LFGUTIERREZA el 12-12-2023 15:14:01
TOMAS BRUÑER PEREZ LUCHO DNI: 47027894 ORCID: 0000-0002-6270-6055	Firmado electrónicamente por: TPEREZLU3 el 12-12-2023 21:01:09

Código documento Trilce: TRI - 0694086

## Índice de contenidos

Carátula .....	i
Dedicatoria.....	ii
Agradecimiento.....	iii
Declaratoria de autenticidad de la asesora.....	iv
Declaratoria de originalidad de los autores.....	v
Índice de contenidos.....	vi
Índice de tablas.....	vii
Índice de figuras .....	viii
Resumen .....	x
Abstract.....	xi
I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. MARCO TEÓRICO .....	4
III. METODOLOGÍA.....	18
3.1. Tipo y diseño de investigación.....	18
3.2. Variables y operacionalización .....	19
3.3. Población, muestra, muestreo .....	19
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	20
3.5. Procedimientos.....	20
3.6. Método de análisis de datos .....	21
3.7. Aspectos éticos.....	22
IV. RESULTADOS .....	23
4.1. Parámetros físicos y eléctricos del terreno .....	23
4.2. Cálculo y dimensionamiento de los elementos del modelo híbrido de puesta a tierra .....	27
4.3. Simulación del modelo híbrido de puesta a tierra con geometría helicoidal .....	31
4.4. Análisis comparativo entre distintos modelos de puesta a tierra .....	38
V. DISCUSIÓN .....	44
VI. CONCLUSIONES .....	48
VII. RECOMENDACIONES.....	49
BIBLIOGRAFÍA .....	50
ANEXOS .....	55

## Índice de tablas

Tabla 1. Valores típicos de resistividad .....	11
Tabla 2. Valor de resistencia a tierra permitido .....	11
Tabla 3. Tipo de suelo de S.E. Otuzco.....	23
Tabla 4. Resistividad de terreno de acuerdo al tipo de suelo.....	24
Tabla 5. Resumen de cálculos obtenidos para análisis comparativo. ....	42

## Índice de figuras

Figura 1. Instrumentación empleada para medir sistemas de puesta a tierra. ....	13
Figura 2. Diagrama de flujo para desarrollo de la investigación. ....	21
Figura 3. Ubicación de la S.E. Otuzco desde Google Earth. ....	25
Figura 4. Temperatura máxima y mínima en Otuzco. ....	26
Figura 5. Disposición de la malla de puesta a tierra. ....	28
Figura 6. Resumen de resultados obtenidos de la malla de puesta a tierra con cálculo manual empleando ETAP 20. ....	32
Figura 7. Modelado del modelo híbrido de malla de puesta a tierra con geometría helicoidal. ....	33
Figura 8. Parámetros empleados para el conductor de cobre del modelo híbrido de malla de puesta a tierra con geometría helicoidal. ....	34
Figura 9. Parámetros empleados para el suelo multicapa del modelo híbrido de malla de puesta a tierra con geometría helicoidal. ....	34
Figura 10. Potencial absoluto del modelo híbrido de malla de puesta a tierra con geometría helicoidal (Vista en planta). ....	35
Figura 11. Potencial absoluto del modelo híbrido de malla de puesta a tierra con geometría helicoidal (Vista isométrica). ....	35
Figura 12. Potencial de paso del modelo híbrido de malla de puesta a tierra con geometría helicoidal (Vista en planta). ....	36
Figura 13. Potencial de paso del modelo híbrido de malla de puesta a tierra con geometría helicoidal (Vista isométrica). ....	36
Figura 14. Potencial de toque del modelo híbrido de malla de puesta a tierra con geometría helicoidal (Vista en planta). ....	37
Figura 15. Potencial de toque del modelo híbrido de malla de puesta a tierra con geometría helicoidal (Vista isométrica). ....	37
Figura 16. Resultados tensión de toque y paso. ....	38
Figura 17. Resumen de resultados obtenidos del modelo híbrido de malla de puesta	

a tierra con geometría helicoidal. ....	38
Figura 18. Modelo novedoso helicoidal empleado para análisis comparativo. ....	39
Figura 19. Modelo novedoso helicoidal dibujado en AutoCAD para luego pasarlo a ETAP20. ....	39
Figura 20. Modelado en el software ETAP20. ....	40
Figura 21. Perfil de potencial de toque. ....	40
Figura 22. Perfil de potencial absoluto. ....	41
Figura 23. Perfil de potencial de paso. ....	41
Figura 24. Resultados del modelo novedoso. ....	42

## Resumen

La actual investigación tuvo como objetivo diseñar un modelo híbrido de malla de puesta a tierra con geometría helicoidal para mejorar los parámetros eléctricos en una subestación. El tipo de investigación es aplicada, enfoque cuantitativo, tipo de diseño experimental. La muestra fue la subestación Otuzco, ubicada en la provincia de Otuzco, departamento de La Libertad. Los resultados determinaron que el terreno posee un suelo con una resistividad superficial de 200 ohmios.m, y a una profundidad de 70 cm es la mitad de la superficie, de 100 ohmios.m. La malla de puesta a tierra posee un área de 3000 m<sup>2</sup> (50mx60m), disposición cuadrada de 10mx10m, para obtener una resistencia de puesta a tierra de 0.919 ohmios, tensión de paso de 70.59 V y tensión de contacto de 200.81 V. Se utilizó una geometría helicoidal para el modelo de malla de puesta a tierra, permitiendo una mejora en los parámetros eléctricos de la subestación, ya que con el software ETAP20 se demostró que los cálculos no eran correctos, pero con la geometría helicoidal se mejoraban notablemente los valores. Ello demostró que el modelo híbrido de malla de puesta a tierra propuesto permite una mejora considerable de los parámetros eléctricos en la subestación.

**Palabras clave:** puesta a tierra, helicoidal, parámetros eléctricos, subestación.

## **Abstract**

The current research aimed to design a hybrid grounding mesh model with helical geometry to improve electrical parameters in a substation. The type of research is applied, quantitative approach, type of experimental design. The sample was the Otuzco substation, located in the province of Otuzco, department of La Libertad. The results determined that the terrain has a soil with a surface resistivity of 200 ohms.m, and in the soil it is half of the surface, 100 ohms.m. The grounding mesh has an area of 3000 m<sup>2</sup> (50mx60m), square arrangement of 10mx10m, to obtain a grounding resistance of 0.919 ohms, step voltage of 70.59 V and contact voltage of 200.81 V. A helical geometry for the grounding mesh model, allowing an improvement in the electrical parameters of the substation, since with the ETAP20 software it was shown that the calculations were not correct, but with the helical geometry the values were significantly improved. This demonstrated that the proposed hybrid grounding mesh model allows a considerable improvement of the electrical parameters in the substation.

**Keywords:** grounding, helical, electrical parameters, substation.

## I. INTRODUCCIÓN

Se conoce bien que gran parte de la población que consume energía eléctrica, viven y trabajan en zonas urbanas y ciudades que experimentan un aumento significativo en su población año tras año (Guizán *et al.*, 2022). Por ello, se han construido e instalado nuevas subestaciones eléctricas en zonas urbanas. Entonces, se desarrollaron las subestaciones eléctricas subterráneas, ya que son compactas y todo el equipamiento eléctrico se coloca bajo tierra en el interior de recintos prefabricados de hormigón. Su característica es que ocupa un mínimo espacio cumpliendo con los criterios medioambientales urbanísticos y son aptos para zonas con limitado espacio para su ubicación (Guizán *et al.*, 2022).

Los sistemas de puesta a tierra son las medidas de protección más importantes para proteger la vida de los seres vivos, las instalaciones, artefactos, dispositivos, etcétera (Faleiro *et al.*, 2022 ; Balci & Helvaci, 2019; Zhanlong *et al.*, 2019). Un sistema de puesta a tierra diseñado correctamente, permite la protección de los equipos y brinda seguridad al personal frente a los peligros de fallos eléctricos, adicionalmente proporciona la continuidad del suministro de energía (Permal *et al.*, 2021; Abdul *et al.*, 2019; Yihua *et al.*, 2019). La red de puesta a tierra es altamente importante para diseñar sistemas de protección contra rayos de la subestación, porque cuando sufre un accidente eléctrico o falla interna en el sistema eléctrico, dicha red proporciona un camino de baja impedancia hacia una alta corriente (Hu *et al.*, 2019).

En las últimas décadas, se ha realizado distintas investigaciones para mejorar los sistemas de puesta a tierra en subestaciones eléctricas convencionales. Una de las soluciones comúnmente consideradas en el caso de alta resistividad del terreno es emplear un material mejorador del terreno, como se presenta en una revisión detallada por Azmi *et al.* (2019), que se puede encontrar en forma natural o química. El material mejorador del terreno es eficaz para reducir la resistencia a tierra, una de las principales preocupaciones al utilizarlo, radica en la posibilidad de que sea lixiviado por agua de lluvia intensa o para algunos productos químicos, el riesgo de aumentar la corrosión de los electrodos de tierra, así como contaminación ambiental (Azmi *et al.*, 2019).

Un sistema de puesta a tierra conforma una parte fundamental en un circuito de potencia eléctrica, encontrándose en la literatura investigaciones y experimentos en los que se realiza un análisis comparativo de los voltajes de contacto, voltajes de paso, con los distintos tipos de mallas, vienen a ser escasos (Márquez *et al.*, 2023).

El sistema de puesta a tierra asegura de manera inmediata la línea cuando se produce una perturbación, como una sobrecorriente o sobretensión (Das & Baral, 2019). Por ejemplo, en la torre de la línea de transmisión de 150 kV ubicada en Koto Panjang Payakumbuh, se instaló un sistema de puesta a tierra de contrapeso, con electrodos instalados de forma horizontal para obtener un valor de resistencia a tierra relativamente bajo (Yusreni *et al.*, 2022). Esto quiere decir, mientras más bajo es el nivel de resistividad del suelo, más eficiente será el sistema de puesta a tierra. Ya que cada zona posee una estructura de suelo distinta en relación de sus propiedades geológicas y el suelo de roca es un tipo de suelo con propiedades sólidas y no contiene minerales del suelo (Yusreni *et al.*, 2023).

Por lo que se planteó como pregunta general ¿En qué medida se mejoró los parámetros eléctricos en una subestación eléctrica mediante el diseño de un modelo híbrido de malla puesta a tierra con geometría helicoidal?, asimismo de manera específica se planteó: ¿Qué parámetros físicos y eléctricos son necesarios para el diseño del modelo híbrido de puesta a tierra?, ¿Qué elementos forman parte del modelo híbrido de puesta a tierra?, ¿Cómo realizar la simulación del modelo híbrido de puesta a tierra?, y ¿Qué modelo híbrido de puesta a tierra mejora los parámetros eléctricos del terreno?

El presente trabajo se justifica, ya que, el modelo híbrido de malla de puesta a tierra con geometría helicoidal que se pretende desarrollar y simular empleando el software ETAP20 se realizó en una zona rural, en las cuales las tormentas eléctricas son de gran intensidad generando menoscabo y/o perjuicios. Por su relevancia social, evita o minimiza algunos daños o pérdidas ya sea humanas, materiales y económicas; contribuyendo en dar una mejor seguridad a las subestaciones. Además, por implicancias prácticas y de desarrollo, ya que da pie para que otros profesionales de la ingeniería eléctrica puedan seguir desarrollando modelos híbridos de puesta tierra en distintas zonas geográficas, teniendo en

cuenta las condiciones de protección y seguridad que mencionan las normas. finalmente, debido a su uso metodológico, se utiliza software ETAP20 para el diseño de un modelo híbrido de malla de puesta a tierra con geometría helicoidal para su simulación.

Por lo tanto, se planteó como objetivo general: Diseñar un modelo híbrido de malla de puesta a tierra con geometría helicoidal para mejorar los parámetros eléctricos en una subestación eléctrica, y se plantea como objetivos específicos: determinar los parámetros físicos y eléctricos del terreno empleado para el modelo híbrido de puesta a tierra, calcular y dimensionar los elementos que forman parte del modelo híbrido de puesta a tierra, realizar la simulación del modelo híbrido de puesta a tierra empleando software ETAP20 y realizar un análisis comparativo entre distintos modelos de puesta a tierra.

La hipótesis planteada fue que el diseño de un modelo híbrido de malla de puesta a tierra con geometría helicoidal se mejoran los parámetros eléctricos en una subestación eléctrica.

## II. MARCO TEÓRICO

De acuerdo con la problemática descrita y de los objetivos planteados, se procedió a seleccionar los antecedentes para el desarrollo de la investigación.

En el contexto internacional, se encontró la investigación elaborada en Canadá por Daadaa *et al.* (2023) donde plantearon el objetivo de analizar el uso de electrodos revestidos de hormigón eléctricamente conductores como posible reemplazo de los sistemas de puesta a tierra de subestaciones. En primer lugar, realizaron la validación del software comercial FEM empleado para realizar análisis del sistema de puesta a tierra en términos de resistencia de la red, incremento del potencial de tierra y voltajes de contacto y paso, utilizando un área de 70mx70m con cobre convencional. Estudiaron varios parámetros del sistema de puesta a tierra con concreto eléctricamente conductor y electrodos revestidos de concreto, como la geometría, dimensiones, resistividad y el diámetro de la barra de refuerzo. Los resultados numéricos obtenidos demostraron que los sistemas de puesta a tierra con cemento conductor pueden funcionar mejor que los sistemas de puesta a tierra de subestaciones convencionales equipados con varillas verticales, particularmente en el caso de alta resistividad del terreno.

En Egipto, se encontró una investigación elaborada por Mosehly *et al.* (2023) donde plantearon el objetivo de estudiar el efecto de reducir la resistencia de puesta a tierra tanto en el supresor de sobretensiones además de la primera torre de la línea de transmisión contigua a una subestación de 66 kV en la sobretensión transitoria denominada. Se presentaron 3 casos de estudio empleando el software PSCAD/EMTDC para simular el diferencial de potencial en el equipamiento de la subestación con distintos valores de resistencia para la primera torre y para el supresor de sobretensiones. De los resultados, demostraron que el diseño adecuado del sistema de puesta a tierra de la primera torre mejoró la seguridad del sistema y redujó al mínimo el coste del sistema de puesta a tierra.

En el estudio realizado en Ecuador elaborado por Sinchi *et al.* (2022), donde plantearon como objetivo reducir la resistencia de puesta a tierra mediante aplicación de material de baja resistividad implementado en diferentes configuraciones de sistemas de puesta a tierra y en suelos con distintas resistividades. Para lo cual, realizaron pruebas de campo empleando material de

baja resistividad en distintas configuraciones del sistema de puesta a tierra para disminuir la resistencia de puesta a tierra. Evaluaron la reducción porcentual de la resistencia de puesta a tierra en relación al incremento de la complejidad del diseño del sistema de puesta a tierra y de la diferencia de la resistividad del terreno. Los resultados proporcionaron una guía útil para ingenieros e investigadores que diseñan, implementan y analizan sistema de puesta a tierra innovadores además de eficientes mediante la aplicación de compuestos mejorados para obtener instalaciones eléctricas más seguras.

En un estudio desarrollado en Arabia Saudita por Sabiha *et al.* (2021) donde plantearon el objetivo de mejorar la sostenibilidad del servicio de los parques eólicos conectados a la red para lograr servicios confiables y estables en momentos de incertidumbre de la velocidad del viento o durante la producción de energía intermitente. Encontraron que la elevada resistividad del terreno fue un desafío para el diseño. Emplearon el método de Wenner para realizar mediciones de resistividad aparente en campo. Utilizando el suelo estratificado óptimo, el sistema de puesta a tierra de la turbina eólica se evaluó considerando resistencias de puesta a tierra, potenciales eléctricos y voltajes de paso. El efecto del punto de ruptura se evaluó considerando el sistema de puesta a tierra diseñado. Se utilizaron COMSOL Multiphysics y ATP/EMTP para realizar simulaciones y modelados. Los resultados aseguraron la efectividad del diseño del sistema de puesta a tierra evaluado.

En Malasia, se tuvo la investigación realizada por Hizamul *et al.* (2021) quienes plantearon el objetivo de investigar sobre el rendimiento de múltiples electrodos de puesta a tierra horizontales. Se han realizado muchos estudios que apuntan al efecto de varios suelos y la disposición del electrodo de tierra en la reducción de la resistencia al impulso desde su estado estacionario y su disminución con el aumento de las corrientes. Aunque, se observó que muy pocos estudios sobre el efecto de las configuraciones de electrodos de tierra horizontales se habían realizado antes mediante mediciones de campo. Se demostró que con la adición de puntas en los electrodos se calculaba un campo eléctrico elevado. También se analizaron el tiempo hasta la corriente máxima, el tiempo de descarga y la impedancia de impulso para varios electrodos de tierra horizontales.

En la ciudad de Guayaquil en Ecuador, se encontró la investigación realizada por Echevarría y Guagua (2021) quienes plantearon el objetivo de analizar y rediseñar un sistema de puesta a tierra para la subestación Palestina. Para ello, emplearon la norma IEEE 81-2012 y diseñaron un mallado en consideración a la norma IEEE 80-2013. Realizaron un diagnóstico de la situación actual de la subestación mencionada, teniendo en cuenta el área, tipo, condición de la puesta a tierra y datos de resistencia permitidos por la norma. Luego, efectuaron mediciones mediante el método de Wenner, con el propósito de obtener valores de resistividad del suelo actuales. Concluyeron del diseño realizado, que al emplear un modelado de terreno uniforme, calcularon una resistividad de 55.77 ohmios por metro. Obtuvieron un mallado de 900 m<sup>2</sup> donde la distancia entre conductor y conductor fue de 5 metros. De los resultados, mencionaron que el diseño era correcto porque el valor de la resistencia obtenido fue menor a 1 ohmio y el potencial máximo del mallado es menor al voltaje de contacto permitido.

En un estudio efectuado en China elaborado por Abdaldaim *et al.* (2020) donde propusieron el objetivo de diseñar y analizar un sistema de protección contra rayos en una subestación urbana de 110 kV en consideración con las normas NFPA 780 e IEC 62305-3. El área total de la subestación fue descrita en base a los modernos diseños representados por la eficiencia operativa real de la instalación. El estudio tuvo a finalidad de dar una mejor comprensión del sistema de puesta a tierra bajo corrientes de rayo aclarando los conceptos básicos del nivel de protección contra rayos. El modo estuvo representado por el paquete de software CDEGS, que proporciona un modelado geométrico efectivo con visualización de objetos y resultados. Implementaron un módulo y una transformada rápida de Fourier automatizada para simular campos electromagnéticos en los dominios de tiempo y alta frecuencia. Los valores actuales se comparan con los niveles de protección deseados dentro de las normas. Los resultados del estudio mostraron que para mejorar la protección del sistema primario contra rayos, se debe considerar la red eléctrica total como una fuente de mejora para estudiar la influencia del blindaje y los niveles de protección proporcionados dentro de esta subestación.

Nuevamente, se encontró otro estudiado realizado en China, elaborado por Yang y Zou (2020) donde plantearon el objetivo de presentar un mejor enfoque alternativo y con solidez técnica para invertir los parámetros del terreno. De acuerdo con la información de la estructura del sueño se encontró que era útil para el diseño de puesta a tierra y poder evaluar los parámetros de la línea de transmisión. Propusieron un algoritmo eficiente para estimar los parámetros del suelo multicapa horizontal mediante la utilización de un método innovador de integración. En el algoritmo propuesto, un proceso de iteración adaptativa finaliza hasta que el error predefinido alcance el requisito, donde los parámetros de la tierra, como la profundidad de la capa, la resistividad de la capa y el número de capa, se ajustan en consecuencia con la ayuda del algoritmo de Levenberg-Marquardt. En cada iteración, la clave fue evaluar la resistividad aparente y sus derivadas parciales con respecto a los parámetros del suelo, los cuales se expresan en forma de integral general de Sommerfeld.

En una investigación desarrollada en China por Dan *et al.* (2019) donde plantearon el objetivo de proponer un modelo novedoso de conexión a tierra que emplea un electrodo de conexión a tierra helicoidal para mejorar el rendimiento de la conexión a tierra en el interior de un espacio de construcción axial limitado. En primera instancia, construyeron un modelo de cálculo por el método de elementos finitos basado en el concepto de incrementar el área de contacto entre los electrodos de puesta a tierra y suelo. Analizaron los parámetros de rendimiento de puesta a tierra de los electrodos helicoidales, la resistencia de puesta a tierra, la distribución del incremento de potencial eléctrico y el máximo voltaje de contacto. Del análisis de resultados, demostraron que el electrodo de puesta a tierra helicoidal generaba el mejor rendimiento.

El sistema de toma a tierra es considerado como un aspecto muy importante del sistema de energía eléctrica en términos de confiabilidad, dependencia y seguridad. Transportar la corriente de falla y garantizar la seguridad del operador y del equipo son los dos requisitos fundamentales de un sistema eléctrico de puesta a tierra (Jagannath *et al.*, 2023).

Según Morales (2021), el SPAT es una instalación de seguridad incluida en emplazamientos eléctricos, diseñado para transmitir descargas accidentales de

corriente hacia tierra, de esta forma evita el contacto eléctrico con las personas. La conducción de estas descargas es llevada a cabo por una varilla de cobre enterrada en el terreno denominada electrodo de puesta a tierra, la cual, de acuerdo a la normativa del CNE, sección 060-000. Debe tener baja resistencia eléctrica la cual es conectada a toda la instalación mediante un conductor.

León (2021) define a un sistema de toma a tierra, como aquella parte que permite a un circuito o equipo eléctrico conectarse a tierra, o a cualquier estructura conductora de gran dimensión la cual cumple la función de tierra. Así mismo, menciona que un conector a tierra une distintos puntos de instalación del sistema, así como el cable copperweld y alumoweld, respectivamente.

Para Anicama (2022), el SPAT es una instalación eléctrica que viene a ser necesaria para conectar un equipo eléctrico a un punto de tierra, para garantizar la protección de la misma, o algún usuario en contacto con la sobretensión. Así mismo, Almonacid (2023), indica que el SPAT es un componente básico en toda instalación eléctrica, porque desvía toda descarga eléctrica de cualquier equipo conectado a tierra, por tanto, evita que la corriente circule por partes metálicas para que no afecte a equipos ni personas.

Entre los materiales más empleados para diseñar sistemas de puesta a tierra es el cobre, siendo el principal material considerado para los electrodos (Durham *et al.*, 2020). Aunque, recientemente se está utilizando el acero galvanizado para elaborar las rejillas de puesta a tierra para subestaciones y líneas de transmisión, para aprovechar su costo (Lu *et al.*, 2022; Ye *et al.*, 2020).

Se sabe que la longitud de los electrodos que son efectivos para transportar corrientes de alta frecuencia se encuentra limitado por la inductancia del mismos, de manera que la impedancia de puesta a tierra tiene la posibilidad de volverse insensible a la longitud del electrodo. Cuando existen frecuencias elevadas, inclusive los efectos de propagación de los voltajes a lo largo del cableado de medición juegan un importante papel en la impedancia calculada por el instrumento empleado (Panicali y Fonseca, 2021).

El SPAT evita la filtración de frecuencias contaminantes a los equipos, usando blindajes conectados a frecuencia cero. De esta forma el conductor activo conectado a un punto de referencia logra reducir la posibilidad de daños a

elementos semiconductores por motivo de picos de tensión. Transmitiendo descargas atmosféricas y cargas electroestáticas al punto de tierra evitando daños a persona y equipos del sistema (Morales, 2021).

Para Balci y Helvaci (2019) en el sistema de toma a tierra, el valor de la resistencia de tierra cambia de manera impredecible según los tipos de toma a tierra. Sin embargo, la geometría del elemento de toma a tierra y el tipo de material también afectan el valor de la resistencia de propagación de tierra.

Cuando el suelo tiene una aproximación mediante un medio estratificado con dos capas, y la segunda capa tiene una resistividad eléctrica menor, una investigación reciente mostró que emplear electrodos verticales profundos vendría a ser una alternativa atractiva para lograr impedancias de puesta a tierra significativamente bajas (Batista *et al.*, 2020). Así lo afirman Louro *et al.* (2021), donde emplearon un procedimiento muy interesante para mejorar las propiedades de resistencia e impedancia de la puesta a tierra para transitorios rápidos.

La resistividad de un terreno es la relación entre el voltaje de la malla con respecto a la tierra de referencia y la corriente a través de la red a tierra (Arias & Mejía, 2019). Por otro lado, Usnayo y Mamani (2020) definen a la resistividad del suelo a determinada distancia de la superficie, siendo una capa interna del suelo; se determina con mediciones efectuadas en un cierto campo; se expresa en unidades como ( $\Omega.m$ ) u ( $\Omega.cm$ ), este parámetro es inverso a la conductividad. Por tanto, la resistencia específica ( $\rho$ ) se define como la relación dada entre la tensión eléctrica en determinado material y la densidad de corriente resultante del mismo.

Anicama (2022) determinó que la resistividad del suelo es indispensable para instalar el sistema de puesta a tierra, además es una buena guía para determinar el nivel donde la corrosión llegará a influir en tuberías metálicas enterradas en dicho estrato, debido a que los componentes causantes de la corrosión en el suelo están relacionados con el valor de resistividad.

De acuerdo con Shah y Bhasme (2014), para la resistencia de puesta a tierra se utiliza la fórmula (1):

$$R = \rho \left[ \frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left( 1 + \frac{1}{1 + h \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \dots (1)$$

Donde:

$\rho$  = resistividad del suelo en ohmios.

$L_t$  = longitud total del conductor de rejilla en metros.

$A$  = área total encerrada por la red de tierra en metros cuadrados

$h$  = profundidad del conductor de rejilla de tierra en metros.

Nassereddine *et al.* (2020), señalaron que la rejilla de conexión a tierra es capaz de proteger contra los efectos de un rayo directo del impacto a elementos de una instalación y del impacto de tensiones inducidas por un pulso electromagnético de rayo (LEMP) producido por la corriente del rayo. La resistencia de la rejilla de tierra de un solo electrodo  $R_g$ , se calcula mediante la fórmula (2):

$$R_g = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \left( \frac{8L}{d} \right) - 1 \right) \dots (2)$$

Donde:

$\rho$  es la resistividad del suelo.

$L$  es la longitud enterrada del electrodo en metros.

$d$ : diámetro del electrodo en metros.

Por otro lado, Ávila (2018), menciona que, la resistencia del terreno se mide para determinar la profundidad y grosor de los estratos de los suelos, así como determinar los valores adecuados para instalar una malla a tierra, así mismo, señala que para calcular la resistencia eléctrica de un SPAT se puede utilizar la técnica de Laurent y Niemann o por técnica de Dwinght, podemos visualizar en la Tabla 1, las clases y resistividad de suelos.

**Tabla 1.** Valores típicos de resistividad

Tipo	Resistividad (ohm-metro)	
Agua de mar	0.1 -	1
Tierra vegetal/arcilla húmeda	5 -	50
Arcilla, arena y grava	40 -	250
Creta (tiza) porosa	30 -	100
Piedra caliza cristalina	300 +	
Roca	1000 -	10000
Roca ígnea	2000 +	
Concreto seco	2000 -	10000
Concreto húmedo	30 -	100
Hielo	10000 -	100000

Fuente: (Electricistas, 2023).

Usnayo y Mamani (2020) señalan que todos los sistemas eléctricos de media, y alta tensión deben tener un SPAT como lo señala el código nacional de electricidad (CNE), por ello se recomienda y obliga a implementar en las líneas de transmisión, las técnicas e instrumentos, así como materiales implementarlo han sido desarrollados y mejorados de forma progresiva, por ello podemos afirmar que los SPAT se encuentran en todo el Sistema Interconectado Nacional.

**Tabla 2.** Valor de resistencia a tierra permitido

Particularidades	Resistencia permitida
Subestaciones grandes	0.5 $\Omega$
subestaciones principales	1.0 $\Omega$
subestaciones pequeñas	2.0 $\Omega$
Base de torre	8.0 $\Omega$

Fuente: (Patel & Kumar Kori, 2016).

Según Chandra *et al.* (2019) es el voltaje de paso está presente con en el pie de una persona de pie sobre la puesta a tierra red. Esta diferencia de potencial se debe al potencial de elevación de tierra causado por la falla corriente que se conduce a la rejilla de tierra. Este aumento en el potencial provoca una descarga eléctrica que fluye a través de las piernas y podría causar la muerte.

Según Rahi (2012), el criterio de tensión de paso tolerable se calcula mediante la fórmula (3):

$$E_{step} = \frac{(1000 + 6C_s\rho_s).116}{\sqrt{t_s}} \dots (3)$$

También menciona Chandra (2019), el voltaje de contacto se define como el potencial que es presente cuando la persona toca el equipo en la subestación. Es el voltaje presente entre la mano y pie. La corriente de falla fluye a través de 3 caminos si la persona está en contacto con el equipo de la subestación, es decir:

- a. De la mano al pie.
- b. De pie a pie.
- c. Cuando dos manos tocan el equipo.

Según Chandra (2019), la tensión de contacto se calcula con la fórmula (4) y (5):

$$E_{touch} = \frac{0.116}{\sqrt{t}} \left( Rb + \frac{Rf}{2} \right) \dots (4)$$

$$E_{touch} = \frac{0.116}{\sqrt{t}} (Rb + 1.5psCs) \dots (5)$$

$Rb$  = resistencia del cuerpo = 1000  $\Omega$ .

$Rf/2$  = resistencia del pie para voltaje de contacto =  $3\rho_s cs$ .

$\rho_s$  = resistividad del suelo/superficie (2000  $\Omega$ ).

$Cs$  = factor de reducción de la capa superficial (0.72), IEE STD 80.

$t$  = Tiempo de corriente de falla en seg. (100 mseg a 1seg).

Según Rahi (2012), el criterio de tensión de contacto tolerable se calcula con la fórmula (6):

$$E_{touch} = \frac{0.116}{\sqrt{t}} (Rb + 1.5psCs) \dots (6)$$

Donde:

$Cs$  = 1 para ninguna capa superficial protectora

$\rho_s$  = la resistividad del material de la superficie en  $\Omega$ -m.

$t_s$  = duración del circuito de choque en segundos.



Figura 1. Instrumentación empleada para medir sistemas de puesta a tierra.

Fuente: (Mazur, 2014).

### Diseño de la malla de puesta a tierra

De acuerdo con el Reglamento Técnico para Instalaciones Eléctricas “RETIE”, Norma ANSI/IEEE Std 80 y Norma ANSI/IEEE Std 2000, se procede de la siguiente manera para poder calcular la malla de puesta a tierra.

Para determinar la tensión de paso se emplea la fórmula (7):

$$E_p = \frac{165 + \rho_s}{\sqrt{t}} \dots (7)$$

Donde:

$E_p$ : Voltaje de paso tolerable (V).

$\rho_s$ : Resistividad superficial del terreno (ohm.m).

$t$ : Tiempo de duración máxima de la falla (s).

Para determinar la tensión de contacto se emplea la fórmula (8):

$$E_t = \frac{165 + 0.25\rho_s}{\sqrt{t}} \dots (8)$$

Donde:

$E_t$ : Voltaje de contacto tolerable (V).

Para seleccionar el calibre del conductor de cobre de la malla, se utiliza la fórmula (9):

$$Ac = I_f \left( \frac{33t}{\log \left( \frac{T_m - T_a}{234 + T_a} + 1 \right)} \right)^{0.5} \dots (9)$$

Donde:

$T_a$ : temperatura ambiente.

$T_m = 450 \text{ }^\circ\text{C}$  (temperatura máxima en los nodos de la malla,  $450 \text{ }^\circ\text{C}$  para soldadura exotérmica y  $250 \text{ }^\circ\text{C}$  con amarre pernado).

$Ac$ : Sección del conductor (CM).

$t$ : Tiempo máximo para despejar el fallo (s).

$I_f$ : Corriente máxima de falla (A).

Seguidamente se calcula las tensiones reales de paso y de contacto, empleándose las fórmulas (10) y (11):

Voltaje de paso real:

$$E_p = k_s \times k_i \times \frac{\rho \times I_f}{L_c} \dots (10)$$

Donde:

$E_p$ : Voltaje de paso real (V).

$k_s$ : Coeficiente que toma en consideración la profundidad y espaciado de la malla.

$k_i$ : Coeficiente que toma en consideración la irregularidad que posee el terreno.

$\rho$ : Resistividad que posee el suelo (omh.m).

$I_f$ : Corriente máxima de falla (A).

$L_c$ : Longitud total que tiene el cable conductor.

Voltaje de contacto real:

$$E_t = k_m \times k_i \times \frac{\rho \times I_f}{L_c} \dots (11)$$

Donde:

$E_t$ : Voltaje de contacto real (V).

$k_m$ : Coeficiente que considera las características geométricas de la malla.

La longitud total que tiene el cable conductor se calcula con la fórmula (12):

$$L_c = n \times A + m \times B \dots (12)$$

Donde:

A: Longitud de la malla (m).

B: Ancho de la malla (m).

n: Cantidad de conductores en paralelo respecto al parámetro "A" (m).

m: Cantidad de conductores en paralelo respecto parámetro "B" (m).

Entonces, el coeficiente  $k_m$  se calcula con la fórmula (13):

$$k_m = \frac{1}{2\pi} \ln \left( \frac{D^2}{16hd_c} \right) + \frac{1}{\pi} \ln \left( \frac{3}{4} \times \frac{5}{6} \times \frac{7}{8} \times \dots \right)_{(n-2) \text{ términos}} \dots (13)$$

Donde:

D: Espaciado entre los conductores (m).

h: Profundidad de enterramiento de la malla (m).

d: Calibre del conductor de cobre (m).

El factor  $k_i$  se calcula empleando la fórmula (14) y (15):

$$k_i = 0.65 + 0.172n \quad \text{si } n \leq 7 \dots (14)$$

$$k_i = 2.0 \quad \text{si } n > 7 \dots (15)$$

Luego, el factor  $k_s$  se determina con la fórmula (16):

$$k_s = \frac{1}{\pi} \left( \frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{2D} + \frac{1}{3D} + \dots \right)_{"n" \text{ términos}} \dots (16)$$

Si se cumple con los criterios establecidos, se continua con el cálculo de la resistencia de puesta a tierra, empleando la fórmula (17) desarrollada por Laurent y Niemann:

$$R = 0.443 \rho \left( \frac{1}{\sqrt{A_y}} + \frac{1}{L_c} \right) \dots (17)$$

Donde:

R: Resistencia de puesta a tierra (ohm).

$A_y = A \times B$ : Área de la malla de puesta a tierra (m<sup>2</sup>).

También se considera el método de Dwight, quien desarrollo la fórmula (18):

$$R_s = \frac{\rho}{2\pi L'} \left( \ln \left( \frac{2L'}{r} \right) + \ln \left( \frac{L'}{h} \right) + \frac{2h}{L'} + \frac{h^2}{(L')^2} - 2 \right) \dots (18)$$

$R_s$ : Resistencia de puesta a tierra para un solo conductor (ohm).

$\rho$ : Resistividad del terreno (ohm.m).

$L'$ : Longitud del conductor (m).

h: Profundidad de enterramiento del conductor (m).

r: radio del conductor de cobre (m).

Se continúa calculando la resistencia debido a interferencias mutuas entre los conductores de cobre, con la fórmula (19):

$$R_a = \frac{\rho}{2\pi L'} \left( \ln \left( \frac{4L'}{E} \right) + \ln \left( \frac{E}{2L} \right) + \frac{E^2}{2L'} + \frac{E^2}{16(L')^2} - 1 \right) \dots (19)$$

Donde:

$R_a$ : Resistencia mutua entre conductores (ohm).

$E = 2.191 D$ : Espaciado equivalente entre un conductor y los demás (m).

Para calcular la resistencia total de un solo conductor se emplea la fórmula (20):

$$R_c = R_s + (n - 1) R_a \dots (20)$$

Donde:

$R_c$ : Resistencia de un solo conductor (ohm).

Y la resistencia de "n" conductores se calcula con la fórmula (21):

$$R_{cn} = \frac{R_c}{n} \dots (21)$$

Donde:

$R_{cn}$ : Resistencia de n conductores (ohm).

Análogamente, se calcula la resistencia de los conductores de cobre transversales de unión, con la fórmula (22):

La resistencia mutua de los elementos de unión donde se incluye la interferencia originada por los conductores transversales a los cuales se encuentran unidos es:

$$R_{am} = (m - 1)R_{ak} + (n - 1)R_a \dots (22)$$

Donde:

$R_{am}$ : Resistencia mutua de los elementos con interferencia (ohm).

$R_{ak}$ : Resistencia mutua de los elementos de unión (ohm).

$$R_{cu} = R_{su} + R_{am} \dots (23)$$

Donde:

$R_{cu}$ : Resistencia de un solo conductor de unión (ohm).

$$R_{cm} = \frac{R_{cu}}{m} \dots (24)$$

Finalmente, la resistencia equivalente de la malla de puesta a tierra se calcula con la fórmula (25):

$$R = \frac{R_{cn} \times R_{cm}}{R_{cn} + R_{cm}} \dots (25)$$

### III. METODOLOGÍA

#### 3.1. Tipo y diseño de investigación

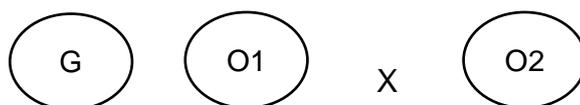
##### Tipo de investigación

El actual estudio es cuantitativo porque se cuantificaron las variables, dimensiones e indicadores con el fin de dar respuesta a los objetivos planteados y mejorar los parámetros eléctricos en una subestación por medio de un modelo híbrido de malla de puesta a tierra con geometría helicoidal (Sánchez, 2019).

Es aplicada porque se emplearon los conocimientos, teorías y fórmulas respecto al diseño de sistemas de puesta a tierra, para obtener un modelo híbrido de malla de puesta a tierra con geometría helicoidal que mejore los parámetros eléctricos en una subestación (Sánchez *et al.*, 2018).

##### Diseño de investigación

Un diseño es no experimental, cuando hay manipulación de una o más variables independientes; para luego analizar los resultados o consecuencias de la o las variables dependientes, así mismo es de tipo preexperimental porque el grado de control es mínimo (Hernández y Mendoza, 2018). En este estudio es de diseño no experimental, dado que se buscó determinar el impacto del modelo híbrido de malla de puesta a tierra con geometría helicoidal para mejorar los parámetros eléctricos en una subestación. Para lo cual se empleó el software ETAP20 para modelar el sistema de puesta a tierra propuesto y determinar sus parámetros.



Donde:

G: Grupo

X: mejorar el modelo híbrido de malla de puesta a tierra.

O1: Observación de la mejora de los parámetros eléctricos en una subestación eléctrica pre estímulo.

O2: Observación de la mejora de los parámetros eléctricos en una subestación eléctrica post estímulo.

### **3.2. Variables y operacionalización**

#### **Variable independiente: Modelo híbrido de malla de puesta a tierra con geometría helicoidal**

Para Anicama (2022), el SPAT es una instalación eléctrica que viene a ser necesaria para conectar un equipo eléctrico a un punto de tierra, para garantizar la protección de la misma, o algún usuario en contacto con la sobretensión. Así mismo, Almonacid (2023) indica que el SPAT es un componente básico en toda instalación eléctrica, porque desvía toda descarga eléctrica de cualquier equipo conectado a tierra, por tanto, evita que la corriente circule por partes metálicas para que no afecte a equipos ni personas. Se indica modelo híbrido, formado por 2 tipos de puesta a tierra utilizados actualmente, es decir, una malla de puesta a tierra además de una geometría helicoidal.

#### **Variable dependiente: Parámetros eléctricos**

Son aquellas características o propiedades propias del sistema de puesta a tierra, que permiten mejorarlos, como, por ejemplo, la resistencia, la impedancia, el voltaje de toque y de paso, entre otros (Daadaa et al., 2023).

En el Anexo 1 se detalla la tabla de operacionalización de variables.

### **3.3. Población, muestra, muestreo**

#### **Población:**

La población estuvo conformada por todas las subestaciones disponibles en Otuzco para poder realizar el diseño de un modelo híbrido de puesta a tierra.

- **Criterios de inclusión:**

Subestaciones con suelo multicapa.

- **Criterios de exclusión:**

Subestaciones con suelo de una sola capa.

#### **Muestra:**

La muestra se conformó por la subestación Otuzco con un terreno multicapa.

## **Muestreo**

El tipo de muestreo que se utilizó fue no probabilístico, ya que de acuerdo con Hernández y Mendoza (2018), señalan que este tipo de muestreo es un subgrupo en el cual los elementos a elegir no dependen de la probabilidad sino de las características de la investigación.

### **Unidad de análisis:**

La unidad de análisis es el terreno de una subestación con multicapa.

## **3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

### **Técnicas de recolección de datos**

La técnica a utilizar fue la observación, la cual permitió recoger los datos del terreno de la subestación eléctrica.

### **Instrumentos de recolección de datos**

Así mismo la guía de observación permitió recolectar información para conocer la situación del terreno de la subestación utilizada para poder modelar el sistema híbrido de puesta a tierra y también la ficha de registro porque se recolectó datos de otras investigaciones. Dicho instrumento se puede apreciar en el Anexo 2.

## **3.5. Procedimientos**

Los procedimientos empleados para la siguiente investigación fueron:

- En primer lugar, se analizó la situación actual del terreno multicapa de la subestación elegida, conociendo su resistividad para poder determinar las demás características para el diseño del sistema de puesta a tierra, es decir, sus parámetros físicos y eléctricos.
- Luego, se calculó y dimensionó los elementos que conforman al modelo híbrido de puesta a tierra, los cuales fueron empleados para el modelado. Siendo el diámetro del conductor de cobre a utilizar, más las medidas de la malla de puesta a tierra.
- Seguidamente, se procedió a desarrollar el modelo híbrido de malla de puesta a tierra con geometría helicoidal empleando el software ETAP20 para realizar una simulación en tiempo real y determinar los parámetros eléctricos

correspondientes. Para ello, se empleó el algoritmo y diagrama de flujo descrito en la investigación.

- Posteriormente, se realizó un análisis comparativo entre la metodología propuesta y el modelo desarrollado por Dan *et al.* (2019), para que así se pueda determinar cuál de los 2 modelos o metodologías son mejores o brindan mejores resultados.

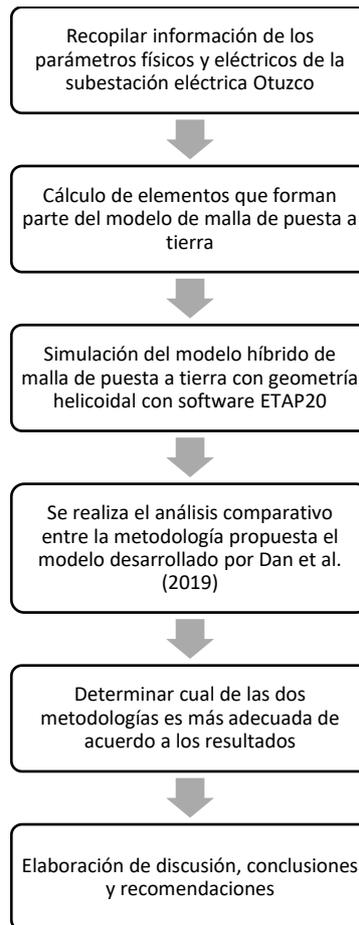


Figura 2. Diagrama de flujo para desarrollo de la investigación.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.6. Método de análisis de datos

Toda la información obtenida del presente proyecto fue procesada de forma manual y empleando software ETAP20, todo ello, que permitan responder a los objetivos planteados. Para ello, se emplearon tablas, figuras y gráficos necesarios que permitan explicar e interpretar los resultados, colocando al final una explicación de la metodología empleada y de los resultados obtenidos.

### **3.7. Aspectos éticos**

El presente trabajo fue realizado teniendo en cuenta los principios y conductas que debería tener toda investigación, se utilizó las normas ISO 690 y 690-2 para poder citar y referenciar dicho estudio. Así mismo cabe recalcar que se respetó la resolución de consejo universitario N°0126-2017/UCV en el capítulo III, normas éticas para el desarrollo de la investigación. Los datos e información empleada de artículos, tesis, libros y revistas han sido citados y referenciados conforme a lo estipulado y solicitado por la universidad y la norma ISO 690, esto quiere decir que, han sido utilizados, pero empleando el parafraseo para evitar el plagio o copia y posteriormente se ha citado a los autores originales para que no pierdan la autoría y originalidad del texto, brindando el crédito correspondiente al autor. Adicionalmente, se tuvo la asesoría y guía de un asesor particular para el desarrollo del presente estudio, con la finalidad de hacerlo de la mejor manera y que se asemeje a la realidad posible.

## IV. RESULTADOS

Para poder empezar con el análisis, se detalla el procedimiento paso a paso para llevarlo a cabo, comenzando con la obtención de los parámetros físicos y eléctricos del terreno donde se ubica la subestación Otuzco, ubicada en Otuzco, departamento de La Libertad. Seguidamente, con dichos parámetros se procedió a realizar los cálculos respectivos considerando la normativa vigente, nacionales como internacionales, como el Código Nacional de Electricidad (CNE), Normas Técnica Peruanas (NTP), IEEE, IEC, entre otras.

Luego, con los resultados obtenidos de los cálculos, se procedió a simular la malla de puesta a tierra obtenida en el software ETAP20, tanto el convencional como el helicoidal, y los resultados obtenidos poder emplearse para compararlos posteriormente con el modelo híbrido de malla de puesta a tierra con geometría helicoidal, para determinar si es técnicamente factible y si se logran mejorar los parámetros eléctricos en la subestación Otuzco.

### 4.1. Parámetros físicos y eléctricos del terreno

La subestación seleccionada es la S.E. Otuzco, ubicada en la provincia de Otuzco, departamento de La Libertad. Posee una altitud de 2659 m.s.n.m., dicha información se puede verificar en la Figura 3.

De acuerdo con el estudio de suelos elaborado por Hygeomin Diseño e Ingeniería (2021), solicitado por Hidrandina, obtuvieron un tipo de suelo Regosol éutrico – Cambisol éutrico (RGe-CMe) en toda el área donde se encuentra ubicada la subestación mencionada.

**Tabla 3.** Tipo de suelo de S.E. Otuzco.

Código	Descripción	Proporción	Paisaje	Pendiente (%)
RGe-CMe		60 – 40	Lomadas, colinas y montañas	8-25, 25 4 +75

Fuente: (Hygeomin Diseño e Ingeniería, 2021)

De acuerdo con la **¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida.**, el tipo de suelo mencionado se asemeja a un tipo de tierra arcillo-arenosa húmeda, y es de esperarse, ya que la subestación se encuentra ubicada sobre terrenos de cultivo, por lo tanto, se tuvo que:

$$\rho_{\text{terreno}} = 200 \Omega.m$$

**Tabla 4.** Resistividad de terreno de acuerdo al tipo de suelo.

<b>Clase de terreno</b>	<b>Resistividad (ohmios.m)</b>
Tierra pantanosa	50
Tierra arcillosa	100
Tierra arcillo-arenosa húmeda	200
Tierra arenosa seca	1 000
Tierra de arenisca dura	2 000
Suelo con estrato de roca	10 000
Petróleo	10 <sup>16</sup>

*Fuente: (Casas, 2006).*

De acuerdo con ello, la resistividad del terreno se ha considerado como 200  $\Omega \cdot m$ , la cual sirvió para elaborar los cálculos respectivos del modelo híbrido de puesta a tierra. De la Figura 4 se obtuvo la temperatura para el cálculo de la malla de puesta a tierra, empleando la temperatura máxima de 13 °C, ya que es donde suceden los casos críticos, la misma que se obtuvo de Weather Spark (2023).



Figura 3. Ubicación de la S.E. Otuzco desde Google Earth.

Fuente: Google Earth.

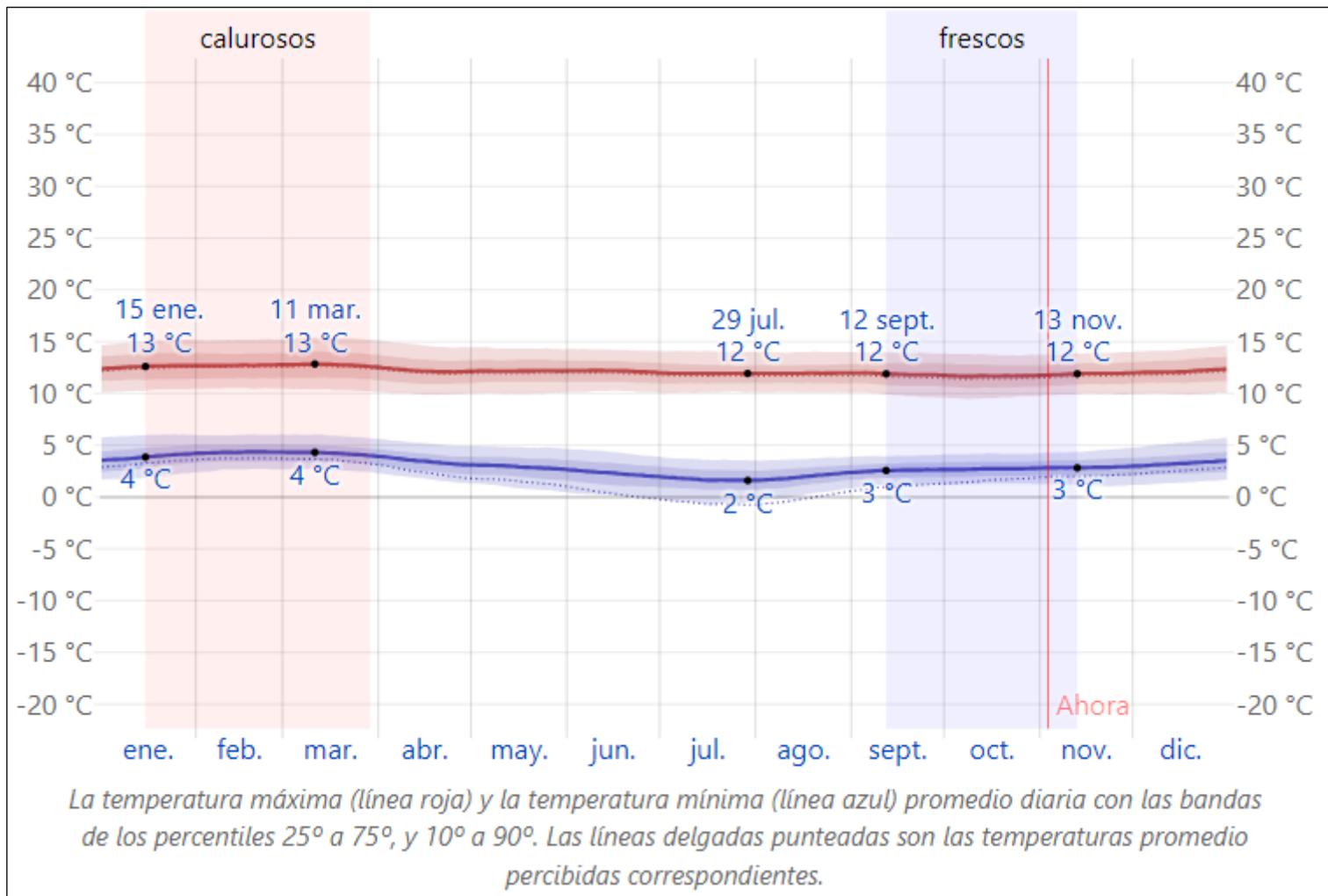


Figura 4. Temperatura máxima y mínima en Otuzco.

Fuente: (Weather Spark, 2023).

## 4.2. Cálculo y dimensionamiento de los elementos del modelo híbrido de puesta a tierra

Para el cálculo de la malla, se ha considerado los siguientes parámetros:

$I_f$ : Corriente máxima de falla: 1 000 A

Nivel de tensión en el lado primario: 33 kV

$\rho$ : Resistividad del suelo: 100 ohm.m

$\rho_s$ : Resistividad de la superficie: 200 ohm.m

Tiempo máximo de falla: 1 seg.

Con dichos datos, se procedió a realizar los cálculos para el sistema de puesta a tierra de la siguiente manera:

### Seleccionando el conductor

Con respecto a la temperatura ambiente  $T_a$ , se emplea la temperatura máxima obtenida en el intervalo de un año, ya que con esa temperatura se tienen los efectos más críticos, la cual se obtiene de la Figura 4 .

$T_a = 13 \text{ }^\circ\text{C}$  (temperatura ambiente).

$T_m = 450 \text{ }^\circ\text{C}$  (temperatura máxima en los nodos de la malla, 450 °C para soldadura exotérmica y 250 °C con amarre pernado).

$A_c$ : Sección del conductor (CM).

$t$ : Tiempo máximo para despejar el fallo (s).

Empleando la fórmula (9):

$$A_c = 1\,000 \left( \frac{33 \times 1}{\log \left( \frac{450 - 13}{234 + 13} + 1 \right)} \right)^{0.5} = 8\,637.13 \text{ CM}$$

Donde:

$$1 \text{ CM} = 5 \times 10^{-4} \text{ mm}^2$$

Reemplazando:

$$A_c = 8\,637.13 (5 \times 10^{-4} \text{ mm}^2) = 4.32 \text{ mm}^2$$

Entonces, el diámetro del conductor es:

$$d_c = \sqrt{\frac{4 A_c}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 4.32 \text{ mm}^2}{\pi}} = 2.35 \text{ mm}$$

Ahora, se selecciona el conductor de acuerdo a los diámetros estandarizados en el mercado, por lo que es necesario un diámetro mayor al calculado y que se encuentre de acuerdo con la normativa vigente, por lo tanto, el calibre es el AWG 2/0 con un diámetro de 10.52 mm.

### Cálculo de malla

Ahora, como primera aproximación se tuvo un cuadrado de 60 m x 50 m, con cuadrados de 10 m x 10 m. Entonces se obtuvo la siguiente distribución de la malla de puesta a tierra:

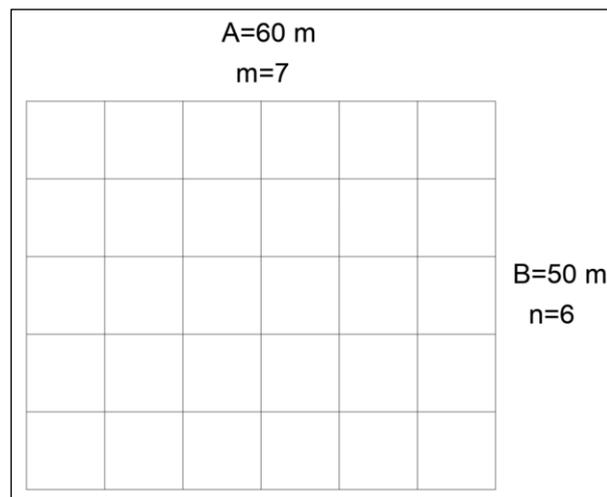


Figura 5. Disposición de la malla de puesta a tierra.

Fuente: Google Earth.

$$A = 60 \text{ m}$$

$$B = 50 \text{ m}$$

$$m = 7$$

$$n = 6$$

$$D = 10 \text{ m}$$

La longitud del conductor o perímetro de la malla que va enterrado considerando una profundidad de enterramiento de 0.70 m es de acuerdo a la fórmula (12):

$$h = 0.70 \text{ m}$$

$$d_c = 0.01052 \text{ m}$$

$$L_c = 6 \times 60 \text{ m} + 7 \times 50 \text{ m} = 710 \text{ m}$$

### Calculando las tensiones reales de paso y de contacto

El factor  $k_m$  se calcula con la fórmula (13), que al reemplazar los datos se obtiene lo siguiente:

$$k_m = \frac{1}{2\pi} \ln \left( \frac{(10 \text{ m})^2}{16 \times 0.7 \text{ m} \times 0.01052 \text{ m}} \right) + \frac{1}{\pi} \ln \left( \frac{3}{4} \times \frac{5}{6} \times \frac{7}{8} \times \frac{9}{10} \right) \text{ (n-2) términos}$$

$$k_m = 0.84765$$

El factor  $k_i$  se calcula con la fórmula (14) y (15):

Como  $n$  es menor de 7, se tiene lo siguiente:

$$k_i = 0.65 + 0.172 \times 6 = 1.682$$

Luego, el factor  $k_s$  se calcula con la fórmula (16), que al reemplazar los datos se obtuvo lo siguiente:

$$k_s = \frac{1}{\pi} \left( \frac{1}{2 \times 0.70 \text{ m}} + \frac{1}{10 \text{ m} + 0.70 \text{ m}} + \frac{1}{2 \times 10 \text{ m}} + \frac{1}{3 \times 10 \text{ m}} + \frac{1}{4 \times 10 \text{ m}} + \frac{1}{5 \times 10 \text{ m}} \right)$$

$$k_s = 0.29796$$

Calculando el voltaje de paso con la fórmula (7):

$$E_p = \frac{165 + 200}{\sqrt{1}} = 365 \text{ V}$$

Calculando el voltaje de contacto con la fórmula (8):

$$E_t = \frac{165 + 0.25 \times 200}{\sqrt{1}} = 215 \text{ V}$$

Luego, calculando los valores reales que son permisibles para paso y contacto con las fórmulas (10) y (11):

$$E_p = 0.29796 \times 1.682 \times \frac{100 \times 1\,000}{710} = 70.59 \text{ V} < 365 \text{ V}$$

$$E_t = 0.84765 \times 1.682 \times \frac{100 \times 1\,000}{710} = 200.81 \text{ V} < 215 \text{ V}$$

Ahora, como se ha cumplido con los criterios, se sigue con la continuidad del cálculo.

### **Cálculo de la resistencia de puesta a tierra**

Para calcular la resistencia de puesta a tierra, se empleó el método de Laurent y Niemann, también por el método de Dwight, los cuales vienen a ser bastante aproximados.

#### **Método de Laurent y Niemann**

Empleando fórmula (17), calculando el área de la malla:

$$A_y = A \times B = 60 \text{ m} \times 50 \text{ m} = 3\,000 \text{ m}^2$$

Reemplazando los datos:

$$R = 0.443 \times 100 \left( \frac{1}{\sqrt{3\,000}} + \frac{1}{710} \right) = 0.87 \, \Omega$$

#### **Método de Dwight**

Para este método, se empleó la fórmula (18), que al reemplazar los datos se obtuvo lo siguiente:

$$L' = A = 60 \text{ m}$$

$$R_s = \frac{100}{2\pi \times 60} \left( \ln \left( \frac{2 \times 60}{0.00526} \right) + \ln \left( \frac{60}{0.7} \right) + \frac{2 \times 0.7}{60} + \frac{0.7^2}{(60)^2} - 2 \right) = 3.318 \, \Omega$$

Luego:

$$E = 2.191 \text{ D} = 2.191 \times 10 \text{ m} = 21.91 \text{ m}$$

Siguiendo con el cálculo, empleando la fórmula (19) y reemplazando los datos necesarios antes calculados, se obtuvo lo siguiente:

$$R_a = \frac{100}{2\pi \times 60} \left( \ln \left( \frac{4 \times 60}{21.91} \right) + \ln \left( \frac{21.91}{2 \times 60} \right) + \frac{21.91^2}{2 \times 60} + \frac{21.91^2}{16(60)^2} - 1 \right) = 0.982 \, \Omega$$

Luego, empleando la fórmula (20) y sustituyendo los datos correspondientes, se obtuvo lo siguiente:

$$R_c = 3.318 \, \Omega + (6 - 1) \times 0.982 \, \Omega = 8.228 \, \Omega$$

Entonces, la resistencia de “n” conductores empleando la fórmula (21) y

sustituyendo los datos necesarios se obtuvo lo siguiente:

$$R_{cn} = \frac{8.228 \Omega}{6} = 1.371 \Omega$$

Seguidamente, empleando la fórmula (18) para el ancho de la malla:

$$R_{su} = \frac{100}{2\pi \times 50} \left( \ln \left( \frac{2 \times 50}{0.00526} \right) + \ln \left( \frac{50}{0.7} \right) + \frac{2 \times 0.7}{50} + \frac{0.7^2}{(50)^2} - 2 \right) = 3.867 \Omega$$

$$E = 2.430 D$$

$$E = 2.430 \times 10 m = 24.30 m$$

Luego, utilizando la fórmula (19) para el ancho de la malla, se obtuvo:

$$R_{ak} = \frac{100}{2\pi \times 50} \left( \ln \left( \frac{4 \times 50}{24.30} \right) + \ln \left( \frac{24.30}{2 \times 50} \right) + \frac{24.30^2}{2 \times 50} + \frac{24.30^2}{16(50)^2} - 1 \right) = 1.787 \Omega$$

Calculando la resistencia mutua con la fórmula (22):

Reemplazando datos:

$$R_{am} = (7 - 1) \times 1.787 \Omega + (6 - 1) \times 0.982 \Omega = 15.632 \Omega$$

Luego, la resistencia de un solo conductor empleando la fórmula (23):

$$R_{cu} = 3.867 \Omega + 15.632 \Omega = 19.499 \Omega$$

Luego, la resistencia de los “m” conductores con la fórmula (24):

$$R_{cm} = \frac{19.499 \Omega}{7} = 2.786 \Omega$$

Finalmente, la resistencia total de la malla se calcula con la fórmula (25):

$$R = \frac{1.371 \Omega \times 2.786 \Omega}{1.371 \Omega + 2.786 \Omega} = 0.919 \Omega < 3 \Omega$$

Se concluye que la disposición escogida es la adecuada, brindando tensiones de paso y contacto en el rango permisible y una resistencia menor a 3 ohmios.

### **4.3. Simulación del modelo híbrido de puesta a tierra con geometría helicoidal**

Para realizar la simulación, se empleó el software ETAP20, donde en primer lugar se simuló la malla de puesta a tierra calculada en el ítem anterior, para luego agregar la geometría helicoidal y así poder realizar un análisis comparativo determinando si emplear dicha geometría permite mejorar los parámetros eléctricos

de la subestación en estudio, que es la subestación Otuzco.

<u>Ground Grid Summary Report</u>											
Rg Ground Resistance ohm	GPR Ground Potential Rise Volts	Maximum Touch Potential					Maximum Step Potential				
		Tolerable Volts	Calculated		Coordinates (m)		Tolerable Volts	Calculated		Coordinates (m)	
			Volts	%	X	Y		Volts	%	X	Y
0.877	890.4	145.4	218.4	150.2	20.7	53.6	233.6	83.5	35.8	20.80	53.50
Total Fault Current		1.000 kA		Reflection Factor (K):		-0.333					
Maximum Grid Current:		1.016 kA		Surface Layer Derating Factor (Cs):		0.845					
				Decrement Factor (Df):		1.016					
<b>Warnings:</b>											
The maximum Touch Voltage exceeds the tolerable limits.											

Figura 6. Resumen de resultados obtenidos de la malla de puesta a tierra con cálculo manual empleando ETAP 20.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 6 muestra que se cumple con la tensión máxima de toque con 83.5 V menor a los 233.6 V tolerables, con una resistencia de malla de puesta a tierra de 0.877 ohmios, pero respecto al máximo potencial de toque obtenido de 218.4 V, es superior a los 145.4 V tolerables, representando un incremento de 150.2%.

Seguidamente, se modelo el modelo híbrido de malla de puesta a tierra con geometría helicoidal considerando los siguientes parámetros:

Resistividad de suelo uniforme: 100 ohm.m.

Resistividad de capa superficial (típico): 3000 ohm-m (CNE y IEEE-80) - 15 cm de la capa (0.5 pie).

Corriente de Falla: 1 kA.

Tiempo de Falla: 1 s.

Conductor: Cobre recocido temple suave 2/0 AWG (70 mm<sup>2</sup>) (calculado).

Profundidad de enterramiento del Cu: 2.29 pies (0.7 m).

Frecuencia simulada: 60 Hz.

Medidas exteriores: 60 m x 50 m.

Peso de la Persona para tensiones de Toque y Paso: 70 kg

Temperatura ambiente: 13°C.

No se ha considerado varillas de Cu.

Simulación realizada por el Método de Elementos Finitos (FEM).

El primer paso, fue dibujar el modelo híbrido de malla de puesta con geometría helicoidal en el software AutoCAD 2023, dándole las medidas antes calculadas respecto al terreno empleado, calibre de conductores de cobre para el mallado, lo cual se puede apreciar en la Figura 7.

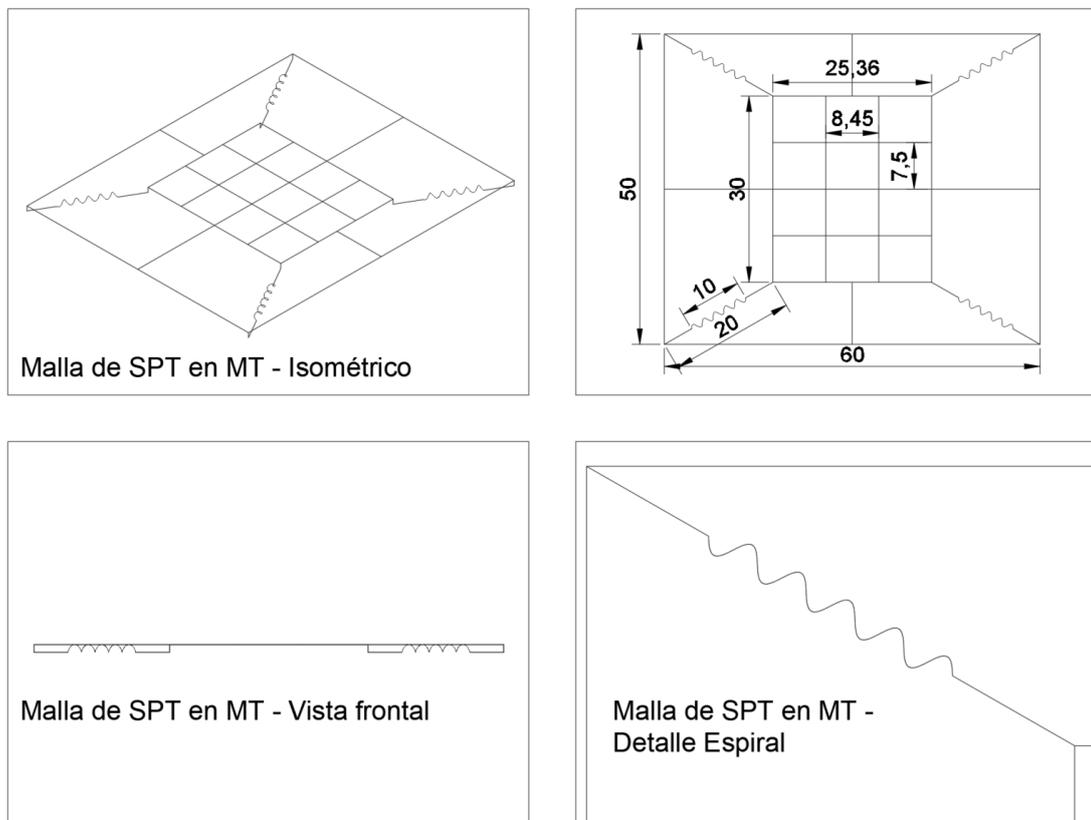


Figura 7. Modelado del modelo híbrido de malla de puesta a tierra con geometría helicoidal.

Fuente: Elaboración propia.

Se ingresaron los datos del terreno, como su resistividad de la capa superior, capa inferior, conductor de cobre desnudo para el mallado de puesta a tierra, parámetros de la helicoidal, entre otros. Lo cual se observa en la Figura 8 y Figura 9.

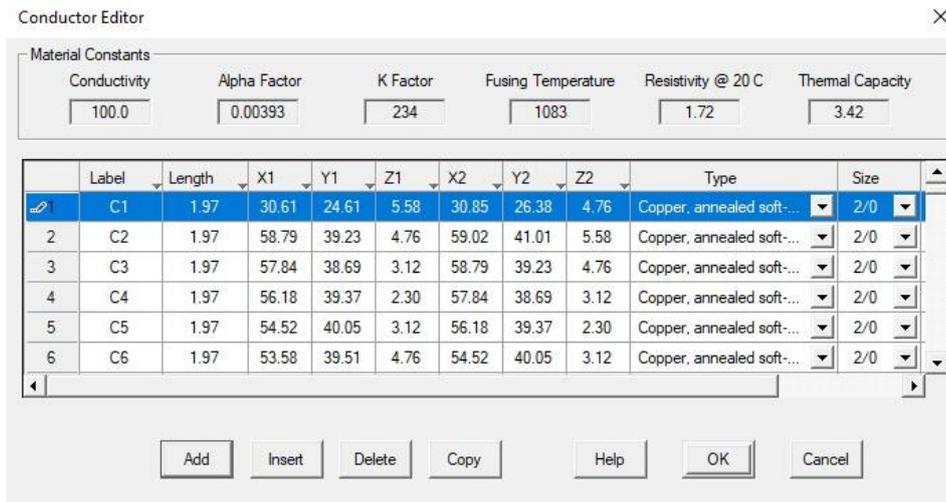


Figura 8. Parámetros empleados para el conductor de cobre del modelo híbrido de malla de puesta a tierra con geometría helicoidal.

Fuente: Obtenido de ETAP20.

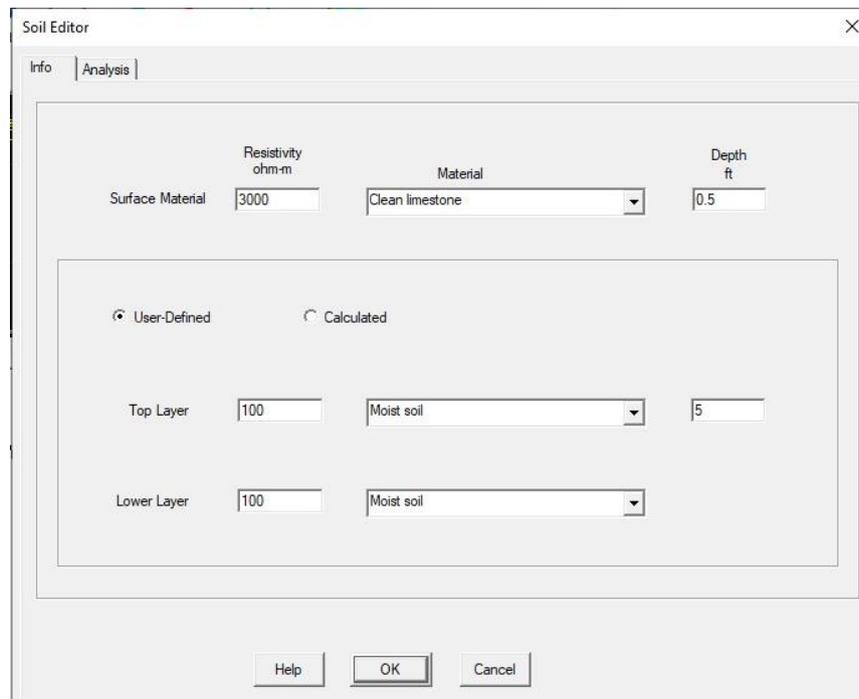


Figura 9. Parámetros empleados para el suelo multicapa del modelo híbrido de malla de puesta a tierra con geometría helicoidal.

Fuente: Obtenido de ETAP20.

Seguidamente, se empleó el software ETAP20 para ingresar los datos del modelo híbrido de malla de puesta a tierra con geometría helicoidal, donde se obtuvieron los siguientes resultados:

La Figura 10 muestra el potencial absoluto vista en planta obtenido en el modelo híbrido de malla de puesta a tierra con geometría helicoidal, donde dicho potencial

absoluto máximo fue de 270 V.

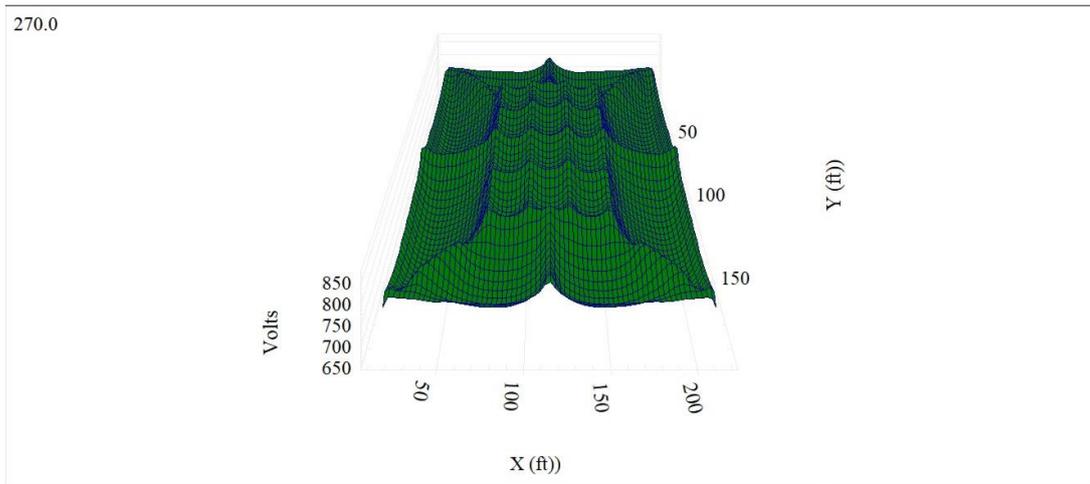


Figura 10. Potencial absoluto del modelo híbrido de malla de puesta a tierra con geometría helicoidal (Vista en planta).

Fuente: Obtenido de ETAP20.

La Figura 11 muestra el potencial absoluto vista isométrica obtenido en el modelo híbrido de malla de puesta a tierra con geometría helicoidal, obteniéndose un valor de potencial absoluto máximo de 223 V.

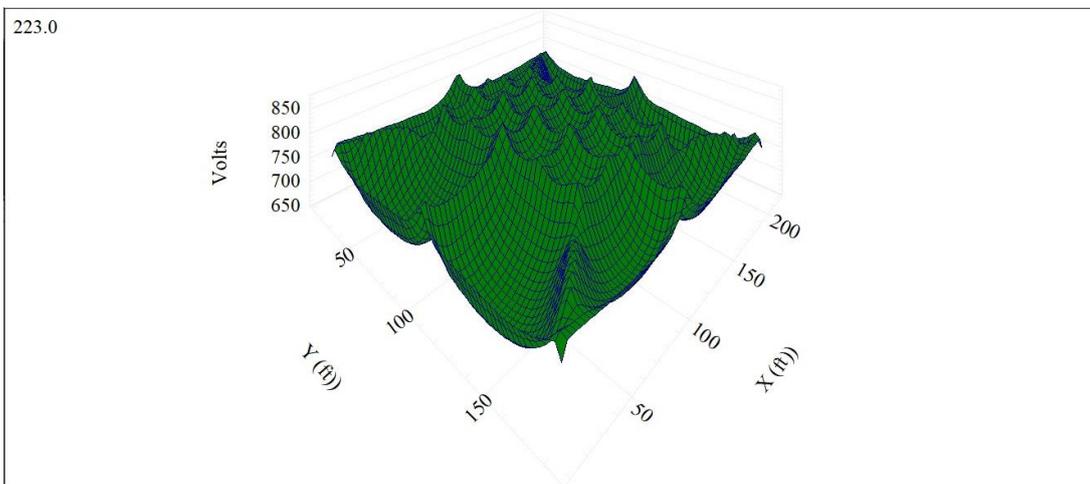


Figura 11. Potencial absoluto del modelo híbrido de malla de puesta a tierra con geometría helicoidal (Vista isométrica).

Fuente: Obtenido de ETAP20.

La Figura 12 muestra el potencial de paso vista en planta obtenido en el modelo híbrido de malla de puesta a tierra con geometría helicoidal, donde el potencial máximo de paso obtenido fue de 270 V.

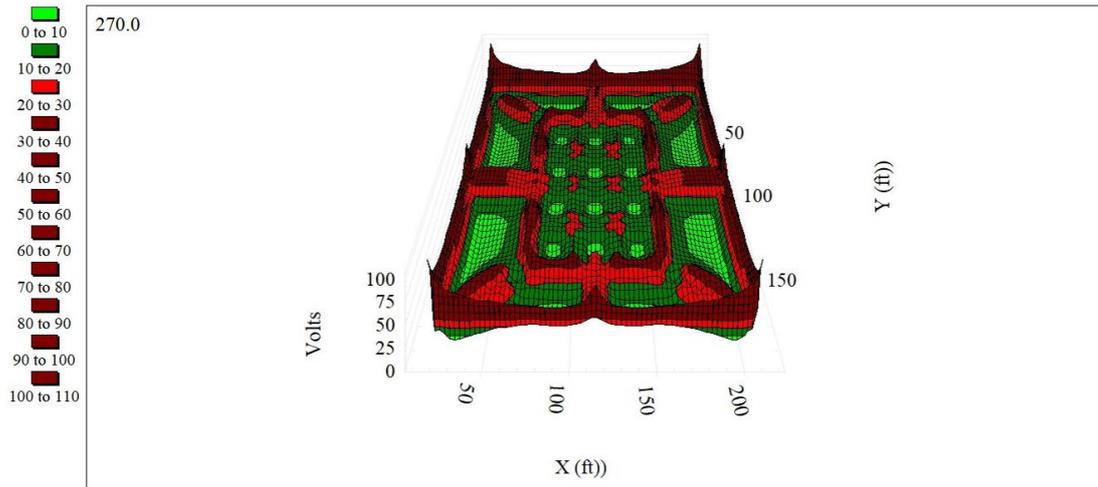


Figura 12. Potencial de paso del modelo híbrido de malla de puesta a tierra con geometría helicoidal (Vista en planta).

Fuente: Obtenido de ETAP20.

La Figura 13 muestra el potencial de paso vista isométrica obtenido en el modelo híbrido de malla de puesta a tierra con geometría helicoidal, en esta figura indica que el valor máximo obtenido fue de 47 V.

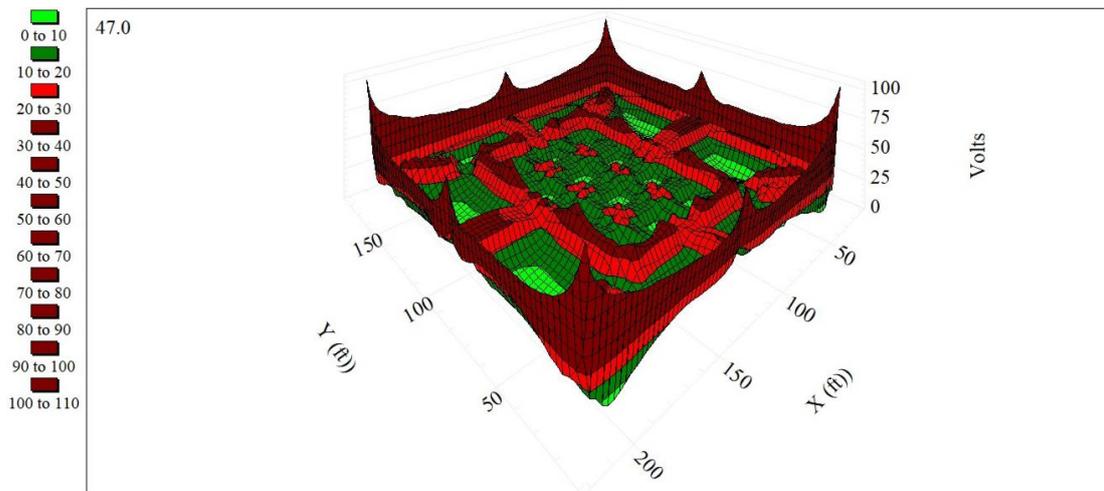


Figura 13. Potencial de paso del modelo híbrido de malla de puesta a tierra con geometría helicoidal (Vista isométrica).

Fuente: Obtenido de ETAP20.

En la Figura 14 se aprecia el potencial de toque vista en planta obtenido en el modelo híbrido de malla de puesta a tierra con geometría helicoidal, indicando un valor máximo del potencial de toque de 270 V.

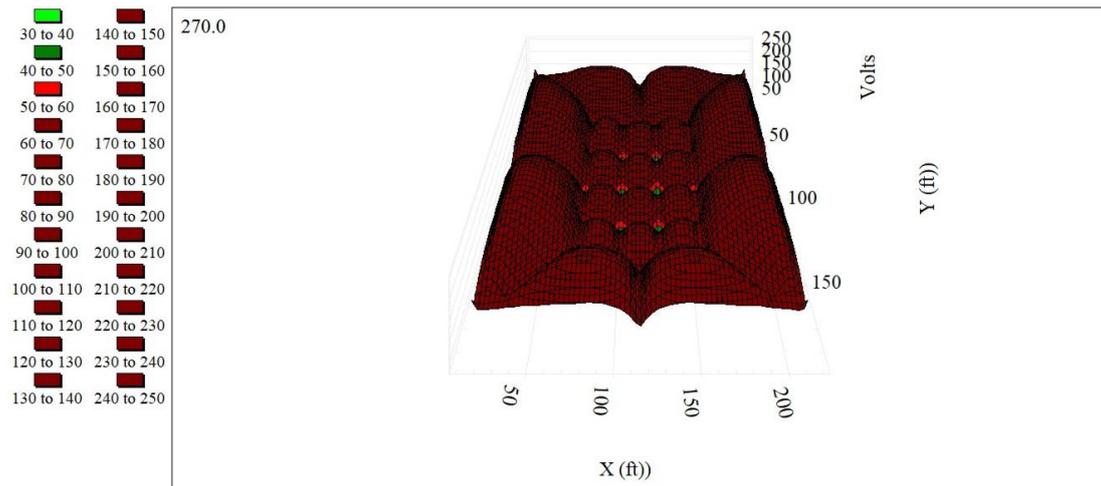


Figura 14. Potencial de toque del modelo híbrido de malla de puesta a tierra con geometría helicoidal (Vista en planta).

Fuente: Obtenido de ETAP20.

En la Figura 15 se aprecia el potencial de toque vista isométrica obtenido en el modelo híbrido de malla de puesta a tierra con geometría helicoidal, indicando un valor máximo del potencial de toque de 270 V.

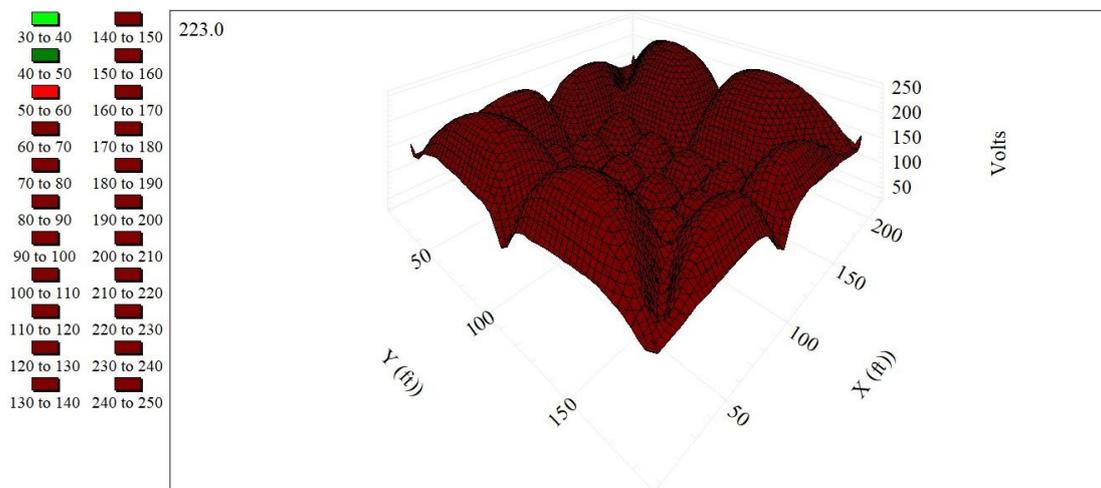


Figura 15. Potencial de toque del modelo híbrido de malla de puesta a tierra con geometría helicoidal (Vista isométrica).

Fuente: Obtenido de ETAP20.

En la Figura 16 se observan los resultados obtenidos de la simulación del modelo híbrido de malla de puesta a tierra con geometría helicoidal, obteniendo un voltaje de toque de 248.8 V, un voltaje de toque de 102.2 V, un GPR de 906.7 V y una resistencia de la malla de 0.895 ohmios. Dichos valores se encuentran por debajo de los límites tolerables de acuerdo a cálculo, y la resistencia es similar, con una variación de apenas 2.61%.

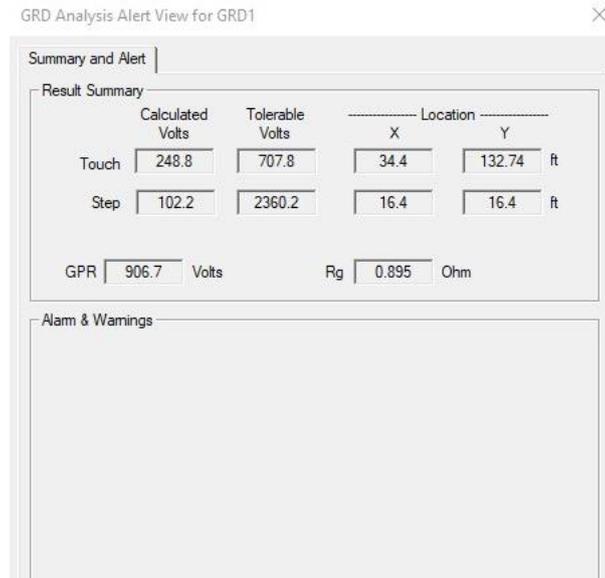


Figura 16. Resultados tensión de toque y paso.

Fuente: Obtenido de ETAP20.

La Figura 17 detalla el resumen de todos los valores obtenidos de la simulación donde el máximo potencial de toque se dio en las coordenadas X igual a 34.4 pies, Y en 132.7 pies, el máximo potencial de paso se dio en las coordenadas X igual a 16.40 pies con Y igual a 16.40 pies.

Ground Grid Summary Report											
Rg Ground Resistance ohm	GPR Ground Potential Rise Volts	Maximum Touch Potential					Maximum Step Potential				
		Tolerable Volts	Calculated Volts	%	Coordinates (ft) X Y		Tolerable Volts	Calculated Volts	%	Coordinates (ft) X Y	
0.895	906.7	707.8	248.8	35.2	34.4	132.7	2360.2	102.2	4.3	16.40	16.40

Figura 17. Resumen de resultados obtenidos del modelo híbrido de malla de puesta a tierra con geometría helicoidal.

Fuente: Obtenido de ETAP20.

#### 4.4. Análisis comparativo entre distintos modelos de puesta a tierra

Para poder realizar el análisis comparativo, se modelo el novedoso sistema de puesta a tierra propuesto por Dan *et al.* (2019), pero con las condiciones del terreno de la subestación Otuzco, donde se simuló el modelo híbrido de malla de puesta a tierra con geometría helicoidal. Para ello, se dibujó el sistema de puesta a tierra en el software ETAP20 tal cual se muestra en la Figura 18 desarrollado por Dan *et al.* (2019).

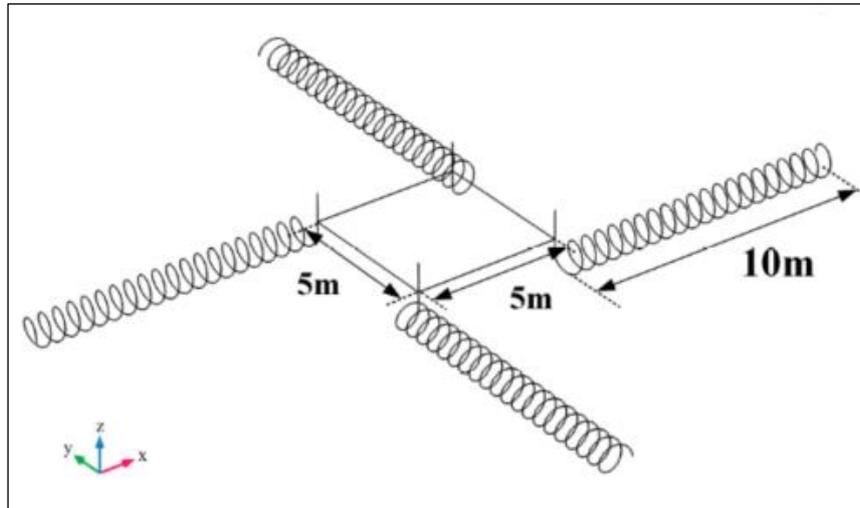


Figura 18. Modelo novedoso helicoidal empleado para análisis comparativo.

Fuente: Dan et al. (2019).

La Figura 19 muestra el modelo dibujado en AutoCAD 2022 para posteriormente ser exportado al software ETAP20 y poder realizar el análisis respectivo.

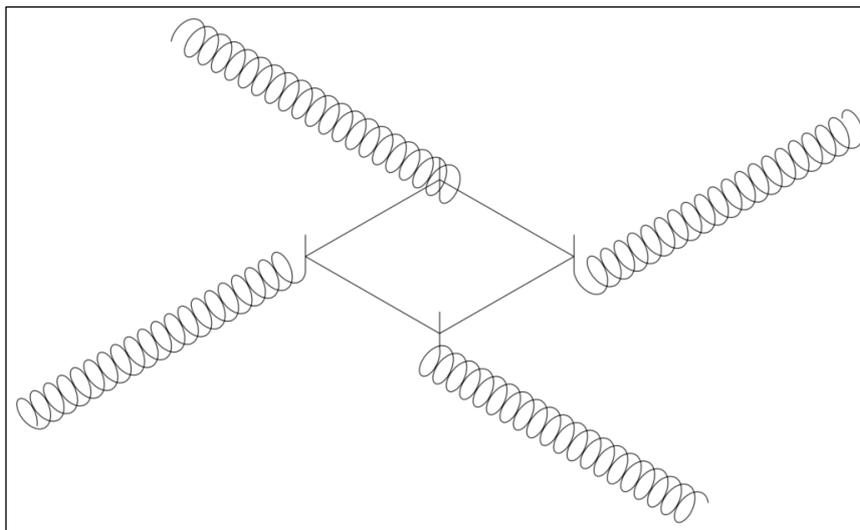


Figura 19. Modelo novedoso helicoidal dibujado en AutoCAD para luego pasarlo a ETAP20.

Fuente: Elaborado con AutoCAD 2022.

En la Figura 20 se muestra el modelado del sistema de puesta a tierra novedoso propuesto por Dan et al. (2019) empleando el software ETAP20, siendo dibujado tal cual se aprecia en la Figura 18 y Figura 19.

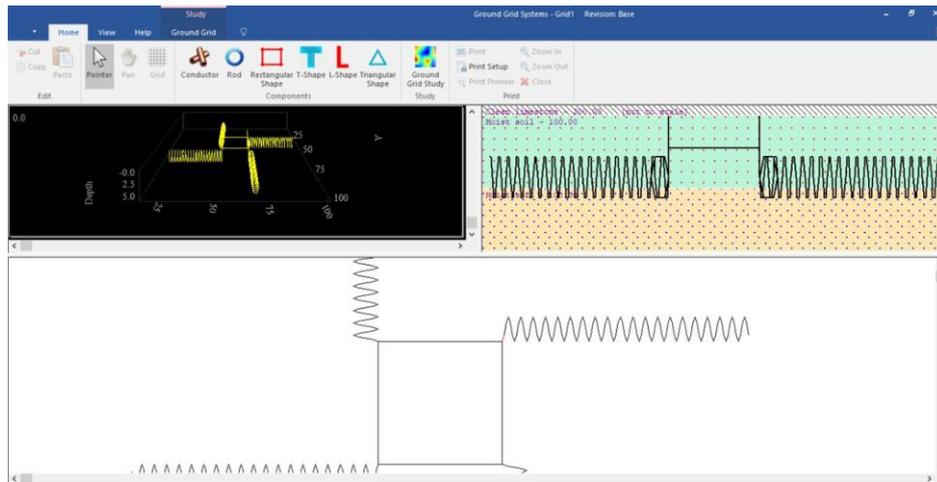


Figura 20. Modelado en el software ETAP20.

Fuente: Elaborado con ETAP20.

La Figura 21 muestra el perfil de potencial de toque máximo obtenido del modelo novedoso de puesta a tierra con los parámetros de la subestación eléctrica Otuzco, obteniéndose un valor máximo de 235 V.

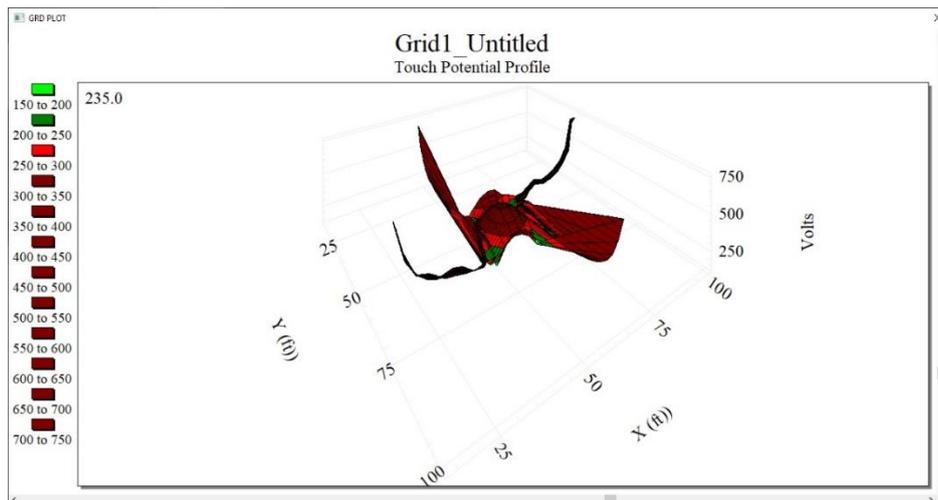


Figura 21. Perfil de potencial de toque.

Fuente: Elaborado con ETAP20.

La Figura 22 muestra el perfil de potencial absoluto máximo obtenido del modelo novedoso de puesta a tierra con los parámetros de la subestación eléctrica Otuzco, donde se obtuvo un valor máximo de 224 V.

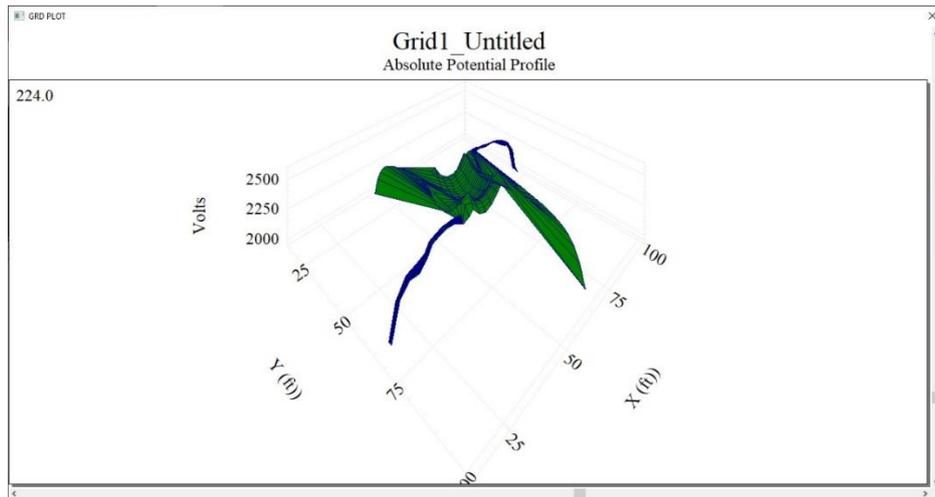


Figura 22. Perfil de potencial absoluto.

Fuente: Elaborado con ETAP20.

La Figura 23 muestra el perfil de potencial de paso máximo obtenido que fue de 230 V.

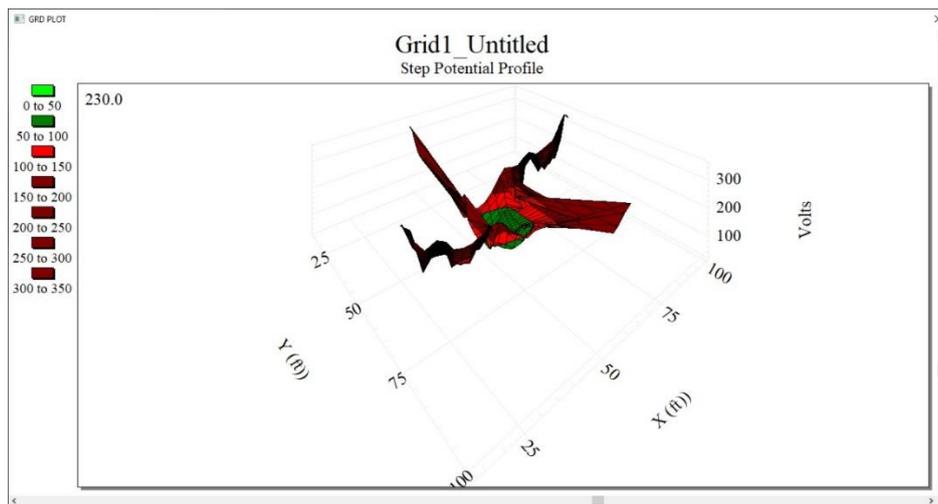


Figura 23. Perfil de potencial de paso.

Fuente: Elaborado con ETAP20.

La Figura 24 muestra los resultados obtenidos, con un voltaje de toque de 745.1 V, muy superior frente a los 198.7 V tolerables, y un voltaje de paso de 350.8 V, por encima de los 323.9 V tolerables, con un GPR de 2729.0 V y una resistencia de la malla de 2.693 ohmios. Dichos valores se encuentran por encima de los límites tolerables de acuerdo a cálculo, y la resistencia es mucho más grande que la del modelo híbrido de malla de puesta con geometría helicoidal, con una variación de 200.89%, siendo bastante considerable y significativa.

<b>Ground Grid Summary Report</b>											
<b>Rg</b> Ground Resistance ohm	<b>GPR</b> Ground Potential Rise Volts	<b>Maximum Touch Potential</b>					<b>Maximum Step Potential</b>				
		<b>Tolerable</b> Volts	<b>Calculated</b>		<b>Coordinates (ft)</b>		<b>Tolerable</b> Volts	<b>Calculated</b>		<b>Coordinates (ft)</b>	
			Volts	%	X	Y		Volts	%	X	Y
2.693	2729.0	198.7	745.1	374.9	97.7	48.3	323.9	350.8	108.3	97.10	47.40
Total Fault Current		1.000 kA		Reflection Factor (K):			-0.333				
Maximum Grid Current:		1.013 kA		Surface Layer Derating Factor (Cs):			0.886				
					Decrement Factor (DF):			1.013			
<b>Warnings:</b>											
The maximum Touch Voltage exceeds the tolerable limits.											
The maximum Step Voltage exceeds the tolerable limits.											

Figura 24. Resultados del modelo novedoso.

Fuente: Elaborado con ETAP20.

Luego de realizar los cálculos tanto manuales como con uso del software ETAP20, se compararon los resultados para determinar si son correctos y la variación obtenida respecto uno de otro, además de comparar los resultados obtenidos con los de Dan *et al.* (2019), con el propósito de poder realizar posteriormente la discusión de resultados.

Tabla 5. Resumen de cálculos obtenidos para análisis comparativo.

Descripción	Cálculo manual de acuerdo con normativa	ETAP 20 (Modelado cálculo manual)	ETAP20 (modelado con helicoidal)	Puesta a tierra helicoidal (Dan et al., 2019) con parámetros de subestación Otuzco
Voltaje máximo de toque	200.81 V < 215 V	218.4 V > 145.4 V	248.8 V < 707.8 V	745.1 V > 198.7V
Voltaje máximo de paso	70.59 V < 365 V	83.5 V < 233.6	102.2 V < 2 360.2 V	350.8 V > 323.9 V
Resistencia de la malla	0.919 ohmios	0.877 ohmios	0.895 ohmios	2.693 ohmios
GPR o EPR	-	890.4 V	906.7 V	2729.0 V

Fuente: Elaboración propia.

De la Tabla 5 se puede decir lo siguiente:

El voltaje máximo de toque con cálculo manual indicó que se encontraba dentro de los límites tolerables, pero de la simulación realizada a dicha malla de puesta a tierra, se obtuvo un valor de 218.4 V, superior al límite tolerable, por lo que no cumplía dicha configuración, con respecto al voltaje máximo de paso, del cálculo

manual por normativa arrojó un valor de 70.59 V menor a los 365 V tolerables, cumpliendo con la norma, y la resistencia de la malla de puesta a tierra fue de 0.919 ohmios, menor a 1 ohmio. De ello, se concluye que la configuración no era la adecuada.

Ahora con respecto al modelo híbrido de malla de puesta a tierra con geometría helicoidal, considerando la malla de 50 m x 60 m de los cálculos, pero agregando la geometría descrita y realizando distintos modelos, donde la que se presenta en la investigación fue la que arrojó resultados favorables, siendo la configuración seleccionada para su posterior análisis. Los resultados obtenidos mostraron que empleando dicha configuración (ver Figura 7), el voltaje máximo de toque obtenido es de 248.8 V inferior a los 707.8 V tolerables, con un voltaje máximo de paso de 102.2 V, inferior a los 2 360.2 V tolerables, con una resistencia de malla de puesta a tierra de 0.895 ohmios, y un GPR de 906.7 V. Con ello, se demuestra la viabilidad técnica de emplear un novedoso modelo híbrido de malla de puesta a tierra con geometría helicoidal, mejorando los parámetros eléctricos en la subestación Otuzco. Ahora, con relación a los cálculos obtenidos por Dan *et al.* (2019), difieren en gran manera, y ello puede deberse a que la malla empleada es mucho más pequeña, abarcando menos área.

## V. DISCUSIÓN

De los resultados del terreno de la subestación seleccionada, se obtuvo un tipo de suelo arcillo-arenosa húmeda, esto significa que el terreno posee la facultad de poder absorber humedad, lo que es beneficioso para un sistema de puesta a tierra o malla de puesta a tierra, obteniéndose un valor de resistividad del suelo de 200 ohmios por metro en la superficie y en la capa inferior o segunda capa de 100 ohmios por metro, ello demuestra su facilidad de mantener la humedad, es decir, absorber agua, y es de esperarse, porque la subestación se ubica entre terrenos de cultivos. En relación con Daadaa *et al.* (2023), quienes emplearon un terreno o tipo de suelo con una resistividad de 140 ohmios por metro para ambas capas y para un mallado de puesta a tierra sin varillas, además de un terreno de 300 ohmios por metro en la superficie y de 100 ohmios por metro en la segunda capa, para un mallado de puesta a tierra con varillas verticales, dichos valores son similares a los empleados en la presente investigación, por lo tanto, se consideran válidos, aunque la resistividad del suelo y la superficie puede variar de un terreno a otro, dependiendo del estudio de suelos, y dependiendo de la aplicación de la malla de puesta a tierra a utilizar. De igual manera, Dan *et al.* (2019) emplearon un valor de 200 ohmios por metro para el terreno donde se implementará el sistema de puesta a tierra, un sistema novedoso helicoidal. De igual modo, en la investigación de Echevarría y Guagua (2021), quienes emplearon el método de Wenner para obtener la resistividad del terreno que emplearon, obteniendo un valor de 55.77 ohmios por metro, un valor más bajo del empleado en la actual investigación y que se verá reflejado en la resistencia de puesta a tierra obtenida. Todos los valores sirvieron para poder hacer un análisis comparativo de todos los sistemas de puesta a tierra y poder verificar cual posee las mejores características. Además, Hizamul

*et al.* (2021) mencionaron que los resultados de los sistemas de puesta a tierra dependen en gran manera del tipo de suelo donde se utiliza, ya que si la resistividad es baja, la resistencia equivalente obtenida será baja, ayudando considerablemente a obtener los resultados esperados, sin mucho esfuerzo y con costos más bajos, pero si el terreno posee una resistividad elevada, se deben emplear mallas de puesta a tierra, siendo costoso su implementación pero su efectividad les da la importancia adecuada para ser utilizadas, ya que mejoran en gran manera los parámetros eléctricos de la subestación o industria donde se desea emplear. También Sinchi *et al.* (2022) realizaron distintas configuraciones de sistemas de puesta a tierra en suelos de distintas características y resistividades, donde lograron elaborar una guía útil para ingenieros e investigadores que se dedican a diseñar, implementar y analizar sistemas de puesta a tierra innovadores, donde emplean distintos compuestos mejorados para la obtención de instalación eléctricas más asequibles y brindando una seguridad adecuada.

Con respecto a los cálculos del sistema de puesta a tierra, se obtuvo un área de mallado de 3 000 m<sup>2</sup>, un rectángulo de 60 m x 50 m, con un valor de la resistencia equivalente de 0.919 ohmios, con una tensión de paso calculada de 70.59 V y una tensión de contacto calculada de 200.81 V. En relación con Daadaa *et al.* (2023), tienen similitud con sus resultados, ya que el mallado tuvo un área de 70 m x 70 m, con cobre convencional, empleando cuadrados de separación de 14 m x 14 m, enterrados a 0.50 m de profundidad, con un diámetro de cobre de 9.27 mm y emplearon varillas verticales de 7.5 m de largo y 15.9 mm de diámetro, ubicadas en las intersecciones de los conductores. Donde los valores de tensión de contacto fueron de 271.09 V y una tensión de paso de 100.52 m, similares a los calculados pero que difieren un poco debido a la configuración del mallado que fue mayor y de

la resistividad del terreno, siendo menor, esto es, emplearon un terreno de 140 ohmios por metro contra los 200 ohmios por metro empleados en la presente investigación, dichos valores difieren, pero poco debido a dichas diferencias en las configuraciones empleadas. Con respecto a Echevarría y Guagua (2021), quienes emplearon un área de mallado de puesta a tierra de 900 m<sup>2</sup>, con una separación de cuadrados de 5 m x 5 m, con un valor de resistencia equivalente menor a 1 ohmio y el voltaje de contacto permitido es adecuado, significando que los cálculos que realizaron fueron correctos, de igual modo que en la presente investigación, ya que se tuvo en consideración siempre la normativa vigente, tanto nacional como internacional. Cabe resaltar que los cálculos manuales fueron elaborados conforme a la normativa vigente del Reglamento Técnico para Instalaciones Eléctricas “RETIE”, Norma ANSI/IEEE Std 80 y Norma ANSI/IEEE Std 2000, para que se fundamente el uso de las distintas fórmulas, que brindaron un mejor panorama para poder realizar el modelado del sistema de puesta a tierra con geometría helicoidal.

En relación a la simulación del modelo híbrido de malla de puesta a tierra con geometría helicoidal empleando el software ETAP20 mediante el método de elementos finitos, arrojó valores de voltaje máximo de toque de 248.8 V, por debajo de los 707.8 V permisibles, con un máximo voltaje de paso de 102.2 V, inferior a 2360.2 V permisibles, con un valor de resistencia equivalente de malla de puesta a tierra de 0.895 ohmios y un GPR de 906.7 V. Donde dichos resultados difieren con respecto a los obtenidos por Dan *et al.* (2019), donde hizo uso del software COMSOL Multiphysics pero para un sistema de puesta a tierra simple, considerando parámetros distintos a los empleados en la presente investigación, pero que al variar dichos parámetros con los de la subestación Otuzco y realizar la simulación, el software arrojó valores por encima de los tolerables, demostrando

que dicho modelo no es adecuado para emplearse en subestaciones eléctricas de potencia, ya que no funcionaría adecuadamente.

## VI. CONCLUSIONES

1. El terreno de la subestación seleccionada posee un tipo de suelo llamado Regosol éutrico – Cambisol éutrico (RGe-CMe), que se ha considerado como una tierra arcillo-arenosa húmeda, con una resistividad promedio de 200 ohmios por metro, pero en la superficie, y en el suelo es por lo general, la mitad de la superficie, es decir, de 100 ohmios por metro y la temperatura empleada fue de 13 °C, máxima obtenida en Otuzco, la cual es para el caso más crítico.
2. El sistema de puesta a tierra debe tener un área de 3 000 m<sup>2</sup>, esto es, de 60 m x 50 m, con una disposición de cuadrados de 10 m x 10 m, para poder obtener una resistencia equivalente del sistema de puesta a tierra de 0.919 ohmios, con una tensión de paso de 70.59 V y una tensión de contacto de 200.81 V.
3. De la simulación del modelo híbrido de malla de puesta a tierra con geometría helicoidal con el software ETAP20 empleando el Método de Elementos Finitos (FEM) se obtuvo un voltaje máximo de toque obtenido de 248.8 V inferior a los 707.8 V tolerables, con un voltaje máximo de paso de 102.2 V, inferior a los 2 360.2 V tolerables, con una resistencia de malla de puesta a tierra de 0.895 ohmios y un GPR de 906.7 V.
4. Del análisis comparativo se concluye que emplear un modelo híbrido de malla de puesta a tierra con geometría helicoidal logra mejorar los parámetros eléctricos en la subestación Otuzco, arrojando valores muy por debajo de los tolerables por normativa, ello demuestra que es factible emplear dicho modelo híbrido de malla de puesta a tierra.

## **VII. RECOMENDACIONES**

1. Se recomienda realizar cada cierto tiempo un estudio de suelos además de utilizar el método de Wenner para poder determinar la resistividad del terreno tanto en la superficie como a la profundidad donde se colocará la malla de puesta a tierra en las diferentes subestaciones a nivel nacional.
2. Los cálculos dependerán de los parámetros físicos y eléctricos del terreno, por lo que se recomienda tener dichos parámetros actualizados para que el cálculo sea correcto y el sistema de puesta a tierra diseñado logre brindar las mejores prestaciones al sistema eléctrico.
3. Se recomienda realizar el modelado en software diferente al empleado en la presente investigación, para determinar si existe variación significativa entre uno y otro, y determinar cuál sería el más adecuado para ser utilizado.
4. Se recomienda emplear distintas configuraciones que permitan mejorar los parámetros eléctricos, empleando software para corroborar que se cumple con los requisitos establecidos por la normativa nacional e internacional.

## BIBLIOGRAFÍA

ABDALDAIM, M., LI, L., & WANG, P. (2020). Estimation performance of the lightning protection system in an urban 110 kV grounding grid substation. *Results in Engineering*, 6(100140), 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2020.100140>

ABDUL, A., et al. (2019). Investigations on the Performance of a New Grounding Device with Spike Rods under High Magnitude Current Conditions. *Energies*, 12(6), 1-18. <https://doi.org/10.3390/en12061138>

ALMONCID, J. (2023). Diseño de instalaciones eléctricas en baja tensión para certificación EDGE del edificio multifamiliar Unión. Repositorio de la Universidad Mayor de San Marcos.

ANICAMA, E. (2022). Implementación de sistema puesta a tierra usando cemento conductor para protección de balanza Thermo Ramsey para faja transportadora en empresa Clariant – Callao. Repositorio de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

ARIAS, R., & MEJÍA, J. V. (2019). Failures in overhead lines grounding system and a new improve in the IEEE and national standards. *Engineering Failure Analysis*, 100, 103-118. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.02.033>

ÁVILA, L. (2018). Mejoramiento de Puesta a Tierra en la Subestación de Transformación de la Compañía Minera Quiruvilva S.A., Santiago de Chuco, La Libertad. Repositorio de la Universidad César Vallejo.

AZMI, A., et al. (2019). The use of enhancement material in grounding system: a review. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 13(2), 453-460. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v13.i2.pp453-460>

BALCI, S., & HELVACI, O. (2019). A Comparative simulation on the grounding grid system of a wind turbine with FEA software. *Journal of Energy Systems*, 3(4), 148-157. <https://doi.org/10.30521/jes.613724>

BATISTA, R., et al. (2020). A study of grounding arrangements composed by vertical electrodes for two-layered stratified soil models. *Electric Power Systems Research*, 180(106129), 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.106129>

- CASAS, F. (2006). Tierras Soporte de la Seguridad Eléctrica. ICONTEC.
- CHANDRA, G., SARMA, P., & SEKHARA, K. (2019). Designing earthing grid/mat for 33/11 kV substation using GI earth flats and pipes maintaining tolerable step and touch potential. *International Journal of Industrial Electronics and Electrical Engineering*, 7(2), 1-6.
- DAADAA, M., et al. (2023). Numerical Investigation of the Use of Electrically Conductive Concrete-Encased Electrodes as Potential Replacement for Substation Grounding Systems. *Energies*, 16(4410), 1-21. <https://doi.org/10.3390/en16114410>
- DAN, Y., et al. (2019). Novel Grounding Electrode Model with Axial Construction Space Consideration. *Energies*, 12(4765), 1-17. <https://doi.org/10.3390/en12244765>
- DAS, P., & BARAL, A. (2019). Effect of Tower Footing Resistance on Back Flashover for A Double Circuit Line. 2019 8th International Conference on Power Systems (ICPS), 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICPS48983.2019.9067355>
- DURHAM, R., SZCZECINSKI, S., & DURHAM, M. (2020). Factors Impacting Selection of Grounding and Bonding Conductors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56(5), 4652-4661. <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.3005637>
- ECHEVARRÍA, L., & GUAGUA, L. (2021). Análisis y rediseño del sistema de puesta a tierra para la subestación Palestina mediante MATLAB. Repositorio de la Universidad Politécnica Salesiana.
- Electricistas. (2023). <https://electricistas.cl/conductores-a-tierra/>. <https://electricistas.cl/conductores-a-tierra/>
- FALEIRO, E., et al. (2022). A fast method to compute the grounding resistance of a coated electrode using the coated electrode equivalent radius. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 137(107879), 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107879>
- GUIZÁN, R., et al. (2022). Numerical analysis and safety design of grounding systems in underground compact substations. *Electric Power Systems Research*, 203(107627), 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107627>
- HERNÁNDEZ, R., & MENDOZA, C. (2018). Metodología de la Investigación: Las

rutas cuantitativamente, cualitativa y mixta. Mc Graw Hill Education.

HIZAMUL, H., et al. (2021). Investigations on the performance of various horizontal ground electrodes. *Energies*, 14(1036), 1-12. <https://doi.org/10.3390/en14041036>

HU, H., et al. (2019). A new optimization design for grounding grid. *Electrical Power and Energy Systems*, 108, 61-71. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.12.041>

Hygeomin Diseño e Ingeniería. (2021). Plan ambiental detallado de la SET Otuzco, 3 MVA 33/22.9/13.8 kV, de la provincia de Otuzco, región La Libertad. Hidrandina.

JAGANNATH, M., KARANDIKAR, P., & KULKARNI, N. (2023). An optimal design for grounding grid configuration with unequal conductor spacing. *Advances in Engineering Software*, 176, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2022.103367>

LEÓN, R. (2021). Mejoramiento de la puesta a tierra en estructuras arriostradas tipo VSL de la Línea de transmisión 500 kV L-5032 Chilca - Poroma. Repositorio de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

LOURO, P., BATISTA, R., & PAULINO, J. (2021). Lightning performance of a critical path from a 230-kV transmission line with grounding composed by deep vertical electrodes. *Electric Power Systems Research*, 195(107165), 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107165>

LU, Z., et al. (2022). State Estimation for Medium- and Low-Voltage Distribution Systems Considering Measurement Characteristics and Grounded Slack Bus. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 71(1008112), 1-12. <https://doi.org/10.1109/TIM.2022.3214285>.

MÁRQUEZ, É., et al. (2023). Experimentation with grounding systems using different types of mesh in a bath with electrolyte. *Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology*.

MAZUR, G. (2014). *Principios de puesta a tierra*. American Technical Publishers - Fluke Corporation.

MORALES, J. (2021). Influencia del sistema puesta a tierra tipo varilla para la protección de la subestación de 30 kVA en la Minera Zanja - Cajamarca 2021. Repositorio de la Universidad Continental.

MOSEHLY, A., et al. (2023). Impact of First Tower Earthing Resistance on Fast

Front Back-Flashover in a 66 kV Transmission System. *Energies*, 13(4663), 1-20.  
<https://doi.org/10.3390/en13184663>

NASSEREDDINE, M., ALI, K., & NOHRA, C. (2020). Photovoltaic solar farm: earthing system design for cost reduction and system compliance. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 10(3), 2884-2893.  
<https://doi.org/10.11591/ijece.v10i3>

PANICALI, A., & FONSECA, C. (2021). Effect of the integration path on grounding measurements. *Electric Power Systems Research*, 194(107062), 1-7.  
<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107062>

PATEL, S., & KUMAR, A. (2016). Comparison between Earthing System Designing Parameters for Different Types of Soil Resistivity Area and Minimization of Limitation. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 5(10), 1756-1763.  
<https://doi.org/10.21275/ART20162596>

PERMAL, N., et al. (2021). The Impact of Substation Grounding Grid Design Parameters in Non-Homogenous Soil to the Grid Safety Threshold Parameters. *IEEE Access*, 9, 37497-37509. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3063018>

RAHMAN, M., et al. (2022). A review of electrically conductive concrete heated pavement system technology: From the laboratory to the full-scale implementation. *Construction and Building Materials*, 329(127139), 1-19.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127139>

SABIHA, N., et al. (2021). Assessment of grounding grid for enhancing wind turbine service sustainability. *Ain Shams Engineering Journal*, 12, 577-589.  
<https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.08.005>

SÁNCHEZ, H., REYES, C., & MEJÍA, K. (2018). Manual de términos en investigación científica, tecnológica y humanística. Repositorio de la Universidad Ricardo Palma.

SÁNCHEZ, F. (2019). Fundamentos Epistémicos de la Investigación Cualitativa y Cuantitativa: Consensos y Disensos. *Revista Digital de investigación en Docencia Universitaria*, 13(1), 102-122. <https://doi.org/10.19083/ridu.2019.644>

SHAH, S., & BHASME, N. (2014). Design of earthing system for HV/EHV AC

substation (A case study of 400 kV substation at Aurangabad, India). *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, 6(6), 2597-2605.

SINCHI, F., et al. (2022). Soil Treatment to Reduce Grounding Resistance by Applying Low-Resistivity Material (LRM) Implemented in Different Grounding Systems Configurations and in Soils with Different Resistivities. *Applied Sciences*, 12(4788), 1-23. <https://doi.org/10.3390/app12094788>

USNAYO, E., & MAMANI, E. (2020). Diseño de un sistema de puesta a tierra para la línea de transmisión de 60 kV desde la SE María Jiray hasta la Unidad Minera Contonga. *Repositorio de la Universidad Continental*.

YANG, J., & ZOU, J. (2020). Parameter Estimation of a Horizontally Multilayered Soil With a Fast Evaluation of the Apparent Resistivity and Its Derivatives. *IEEE Access*, 8, 52652-52662. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2980875>

YE, H., et al. (2020). Study on corrosion fracture diagnosis method of grounding wire of tower grounding device. *Measurement*, 166(108213), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108213>

YIHUA, D., et al. (2019). Research on Discharging Current Distribution of Grounding Electrodes. *IEEE Access*, 7, 59287-59298. <https://doi.org/Research on Discharging Current Distribution of Grounding Electrodes>

YUSRENI, W., et al. (2022). Experimental Investigation of Insulator Dielectric Strength of Transmission Tower in Rocky Areas. *Social Science Journal - Res Militaris*, 12(6), 185-191.

YUSRENI, W., et al. (2023). An Optimal Design of Grounding System for Tower Footings in Payakumbuh 150 kV Transmission Line of Koto Panjang. *International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology*, 13(3), 844-850.

ZHANLONG, Z., et al. (2019). Helix grounding electrode with good grounding performance. *MATEC Web of Conferences*, 277, 1-9. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201927703007>

## ANEXOS

### Anexo 1. Tabla de operacionalización de variables

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala
Independiente Modelo híbrido de puesta a tierra	Son configuraciones distintas al sistema de puesta a tierra convencional, pudiendo adoptarse múltiples tipos para un mismo mallado de puesta con el objetivo de obtener mejores resultados en la resistencia, voltaje de paso, voltaje de contacto, impedancias, entre otros parámetros (Dan et al., 2019).	Se mide considerando el software descrito en la investigación, permitiendo verificar los parámetros eléctricos del mismo.	Parámetros de funcionamiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Resistencia eléctrica del conductor</li> <li>- Resistividad de superficie del terreno.</li> <li>- Resistividad del terreno.</li> <li>- Área del terreno.</li> </ul>	De razón
Dependiente Parámetros eléctricos	Son las características que pueden ser medibles en un sistema de puesta a tierra como la resistencia, voltaje de paso, voltaje de contacto, entre otros (Batista et al., 2020).	Se miden en consideración con el modelado del sistema híbrido de puesta a tierra, para ello se utiliza el software respectivo.	Parámetros operativos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Resistencia del modelo híbrido de puesta a tierra.</li> <li>- Tensión de paso.</li> <li>- Tensión de contacto.</li> <li>- GPR (Ground Potencial Rise)</li> </ul>	De razón

## Anexo 2. Instrumento de recolección de datos

<b>GUÍA DE OBSERVACIÓN</b>	
<b>Datos generales</b>	
Nombre de la empresa	Hidrandina
Nombre del observador	Tomás Pérez L – Luis Gutiérrez A
Nombre de la subestación eléctrica	Subestación de Otuzco
fecha y hora de inicio	15/09/2023
<b>Variables a observar</b>	
<b>Indicadores</b>	<b>Observaciones</b>
1. Dimensiones del mallado de puesta a tierra	50mx60m = 3000m <sup>2</sup>
2. Materiales utilizados en el mallado	
3. Corriente de falla en la subestacion	1000A
4. Tiempo de duración de la falla	1s
5. Tipo de suelo de la subestación	Regosol éutrico – Cambisol éutrico
6. Resistencia de puesta a tierra obtenida en la simulación	
7. Resistividad superficial	200ohmios.m
8. Resistividad inferior del suelo	100ohmios.m
9. Eficiencia de la dispersión de corrientes de falla en el mallado	
<b>Análisis de datos</b>	
<b>Indicadores</b>	<b>Observaciones</b>
1. Analizar los resultados de la simulación del mallado de puesta a tierra	
2. Comparar los resultados obtenidos con los criterios de diseño y las normativas aplicables	
3. Evaluar la eficiencia y efectividad del mallado en la dispersión de corrientes de falla	