



FACULTAD DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y ARQUITECTURA

CARRERA DE ELECTRICIDAD

TRABAJO DE TITULACIÓN

MODALIDAD PROYECTO TÉCNICO

TEMA:

**“DISEÑO DE UNA HERRAMIENTA INFORMÁTICA PARA EL
DIMENSIONAMIENTO DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA (SPT)
APLICADO A SISTEMAS DE TRANSFORMACIÓN.”**

AUTORES:

BAQUE DURÁN ALEX DARÍO

PINARGOTE ROSERO DARWIN ANDRÉS

ASESOR ACADÉMICO:

ING. MOREANO ALVARADO MILTON ENRIQUE, MSC.

MANTA – MANABÍ – ECUADOR

PERIODO – 2025 (1)

CERTIFICACIÓN DEL DOCENTE TUTOR

Manta, 08 de septiembre del 2025

Como docente tutor de la Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura de la Universidad Laica “Eloy Alfaro de Manabí”, hago constar que he acompañado y supervisado el proceso de elaboración del trabajo de titulación desarrollado bajo la modalidad de proyecto técnico, titulado: **“Diseño de una herramienta informática para el dimensionamiento de sistemas de puesta a tierra (SPT) aplicado a sistemas de transformación”**. Dicho proyecto ha sido elaborado conforme a las directrices institucionales vigentes para esta modalidad y en cumplimiento de lo estipulado en el Reglamento de Régimen Académico. Por lo tanto, **CERTIFICO** que el mencionado trabajo cumple con los requisitos académicos, científicos y formales que lo habilitan para ser presentado ante el tribunal de evaluación que designe la autoridad correspondiente.

El presente trabajo ha sido realizado por los estudiantes **Baque Durán Alex Darío** y **Pinargote Rosero Darwin Andrés**, pertenecientes a la carrera de Ingeniería en Electricidad, correspondiente al periodo académico **2025(1)**, quienes están habilitados para la defensa oral de su proyecto de titulación.

Extiendo la presente certificación para los fines pertinentes, en conformidad con la normativa institucional y salvo disposición legal en contrario.

Ing. Moreano Alvarado Milton Enrique, Msc.

Docente tutor

AUTORÍA DEL PROYECTO TÉCNICO

Quienes suscribimos, **Pinargote Rosero Darwin Andrés**, portador de la cédula de identidad N° **171982650-3** y **Baque Durán Alex Darío**, portador de la cédula de identidad N° **131524820-1**, egresados de la carrera de Ingeniería en Electricidad de la Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura de la Universidad Laica “Eloy Alfaro de Manabí”, declaramos que el presente proyecto de titulación es de autoría nuestra, el contenido, resultados y conclusiones obtenidos son de estricta responsabilidad de los autores, teniendo como respaldo citas bibliográficas necesarias para el desarrollo del proyecto, respetando el derecho intelectual de cada autor citado. El patrimonio de este proyecto de titulación corresponderá a la Universidad Laica “Eloy Alfaro de Manabí”.

Pinargote Rosero Darwin Andrés

Baque Durán Alex Darío

ASESOR ACADÉMICO

Ing. Moreano Alvarado Milton Enrique, MSc

DEDICATORIA

A mis padres, Andrea y Darwin, mi cimiento.

A mis hermanos, Maykel y Kerly, mi alegría.

A ti, Roxana, mi presente y futuro.

Y a mi amada abuelita, Mariana, hacia el cielo.

Esta meta alcanzada,

después de tanto esfuerzo,

es por y para ustedes.

Darwin Andrés Pinargote Rosero

DEDICATORIA

A mis padres, por su amor y guía que aún inspiran mi camino, y a mí mismo, por la constancia y esfuerzo que me llevaron a alcanzar este logro.

Alex Darío Baque Durán

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios por bendecirme y guiarme en cada paso de este camino, brindándome la fortaleza necesaria para culminar este proyecto académico.

A mis padres, Andrea y Darwin, cuyo sacrificio constante constituye un ejemplo de vida e inspiración. Su apoyo incondicional y enseñanzas han sido pilares fundamentales en mi formación personal y profesional.

Al amor de mi vida, Roxana, gracias por tu amor sincero, tu paciencia y tu entrega, que me han sostenido en los momentos más exigentes de este proceso.

A mi mejor amigo Andrés, por sus sabios consejos, su guía constante y el soporte brindado con generosidad y lealtad.

A mis amigos Joel, Pedro y Andy, quienes con su confianza, lealtad y apoyo inquebrantable han estado presentes en este trayecto, compartiendo desafíos y logros.

Por último, deseo reconocer a nuestro tutor, el ing. Milton Moreano MSc., y a todos los pocos y buenos docentes de la carrera, por su compromiso con la enseñanza, su pasión, resiliencia y motivación, cualidades que inspiran y fortalecen el espíritu académico.

Darwin Andrés Pinargote Rosero

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi familia: a mis padres, por enseñarme con su ejemplo la importancia del esfuerzo y la perseverancia; a mis hermanos, por los recuerdos compartidos y el apoyo constante; y a mis abuelos y a mi tía, quienes ya no están conmigo, pero cuya sabiduría, cariño y guía marcaron profundamente mi vida y siguen inspirándome cada día.

Agradezco también a los amigos que encontré a lo largo de la carrera, quienes, con su compañía, apoyo y ayuda en muchas ocasiones hicieron más llevadero este camino académico y contribuyeron a que cada desafío fuera más fácil de enfrentar.

Alex Darío Baque Durán

RESUMEN

Este proyecto presenta el desarrollo de una herramienta informática diseñada para automatizar el dimensionamiento de sistemas de puesta a tierra (SPT), orientada a sistemas de transformación. Surge como respuesta a los límites en los métodos tradicionales como cálculos manuales u hojas de Excel, los cuales suelen ser propensos a errores y carecen de estandarización.

La herramienta, desarrollada en Python, integra una interfaz visual en el que se permite ingresar datos reales obtenidos en campo mediante el método de Wenner, procesar automáticamente los cálculos normativos conforme a las normas IEEE Std 80 y 81 como: la resistividad promedio según los perfiles y las distancias de medida, conductor, resistencia total de la malla, corrientes de cortocircuito, el gradiente de potencial de tierra (GPR, por sus siglas en inglés), y tensiones de paso y toque; además se puede diseñar el SPT según la geometría del terreno disponible; y generar la documentación técnica, con gráficos y respaldos fotográficos, listo para la presentación ante empresas distribuidoras a nivel nacional.

Para la verificación del sistema se procedió con la implementación de una malla de puesta a tierra en un terreno seco, en el cual se incorporó cemento conductivo como parte del proceso constructivo, donde en primera instancia se obtuvo una resistencia medida de 0.12 ohmios. Después, con la herramienta desarrollada se obtuvo un resultado que difiere, con un valor de 1.1 ohm, el cual no toma en cuenta la mejora producida por el cemento conductivo. El valor calculado representa así una estimación conservadora, útil para asegurar un diseño funcional incluso en condiciones no tan favorables.

Palabras clave: SPT – Sistemas de puesta a tierra – Dimensionamiento – Software – IEEE Std 80

ABSTRACT

This project presents the development of a software tool designed to automate the sizing of grounding systems, oriented toward power transformation systems. It arises as a response to the limitations of traditional methods, such as manual calculations or Excel spreadsheets, which are often prone to errors and lack standardization.

The tool, developed in Python, includes a graphical interface that allows users to enter real field data obtained with the Wenner method. It automatically processes the required calculations following IEEE Std 80 and IEEE Std 81, such as average soil resistivity based on profiles and measurement distances, conductor parameters, total mesh resistance, short-circuit currents, ground potential rise (GPR), and step and touch voltages. In addition, it can design the grounding system (SPT) according to the available site geometry and generate technical documentation, including graphs and photographic records, ready for submission to distribution companies at the national level.

To verify the system, a grounding grid was installed on dry soil, incorporating conductive cement during the construction process. The initial measurement yielded a resistance of 0.12 ohms. However, the developed tool produced a different result of 1.1 ohms, since it does not account for the improvement provided by the conductive cement. This calculated value can therefore be considered a conservative estimate, useful to ensure that the design remains functional even under less favorable conditions.

Keywords: SPT – Grounding systems – Sizing – Software – IEEE Std 80

TABLA DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN DEL DOCENTE TUTOR	ii
AUTORÍA DEL PROYECTO TÉCNICO	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	vi
RESUMEN	viii
TABLA DE CONTENIDO.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
ÍNDICE DE TABLAS	xv
INTRODUCCIÓN	16
CAPITULO I EL PROBLEMA.....	19
1.1. Título.....	19
1.2. Problemática	19
1.3. Justificación	20
1.4. Propuesta.....	21
1.5. Objetivos	21
1.5.1. Objetivo general	21
1.5.2. Objetivos específicos	21
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO	22
2.1. El sistema de puesta a tierra.....	22
2.2. Tipos de sistemas de puesta a tierra.....	22
2.2.1. Varilla de Puesta a Tierra.....	23
2.2.2. Malla de Conductores Horizontales	24
2.2.3. Electrodos Compuestos o Activos	25
2.2.4. Mallas Híbridas de Electrodo y Conductores	27
2.2.5. Configuración Cuadrada	28
2.2.6. Configuración en "L"	29
2.2.7. Configuración Lineal	30
2.3. Requisitos técnicos de los sistemas de puesta a tierra	32
2.4. Funciones principales del sistema de puesta a tierra	33

2.5.	Concepto de resistividad del terreno	34
2.6.	Factores que afectan la resistividad y su medición	34
2.7.	Medición de resistividad: método de Wenner	35
2.8.	Procedimiento operativo del método Wenner	36
2.9.	Análisis de perfiles de resistividad y dirección del terreno	38
2.10.	Cálculo de la Resistividad Promedio	40
2.11.	Normativa aplicada: IEEE estándar 80	41
2.12.	Ecuaciones utilizadas en el dimensionamiento de un sistema de puesta a tierra	
	44	
2.12.1.	Cálculo de la corriente máxima de falla	44
2.12.2.	Cálculo del calibre del conductor	47
2.12.3.	Cálculo de la resistencia total de la malla	50
2.12.4.	Cálculo de tensión de paso y de toque	51
2.12.5.	Cálculo del gradiente de potencial	52
CAPÍTULO III METODOLOGÍA		54
3.1.	Enfoque metodológico	54
3.2.	Fases del desarrollo de la herramienta	55
3.3.	Recursos Utilizados	58
3.3.1.	Software	58
3.3.2.	Equipo humano	58
3.3.3.	Materiales y herramientas	59
3.4.	Descripción de la herramienta desarrollada	60
3.4.1.	Limitaciones	65
3.4.2.	Alcance	65
CAPÍTULO IV DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS		67
4.1.	Medición de resistividad del suelo	67
4.1.1.	Características del terreno	67
4.1.2.	Condiciones climáticas	67
4.2.	Ingreso de datos en el aplicativo	73
4.2.1.	Ingreso de datos de mediciones del terreno	73
4.2.2.	Ingreso de datos de transformador ficticio	74

4.2.3. Ingreso de datos de conductor.....	77
4.2.4. Configuración de la malla	78
4.3. Resultados de la aplicación.....	79
4.4. Validación experimental del método de cálculo mediante la construcción de una malla de puesta a tierra	80
4.5. Contraste de resultados	83
CONCLUSIONES	85
RECOMENDACIONES.....	86
BIBLIOGRAFÍA	87
ANEXOS	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Esquema técnico de instalación de varilla de puesta a tierra vertical</i>	24
Figura 2 <i>Configuración general de una malla</i>	25
Figura 3 <i>Diseño esquemático de un electrodo compuesto activo acompañado de cámara de inspección</i>	26
Figura 4 <i>Malla híbrida de puesta a tierra con electrodos verticales</i>	27
Figura 5 <i>Representación de una malla de puesta a tierra de configuración cuadrada de 6 m × 6 m</i>	29
Figura 6 <i>Configuración en “L” para mallas de puesta a tierra</i>	30
Figura 7 <i>Configuración lineal de sistema de puesta a tierra</i>	31
Figura 8 <i>Disposición de electrodos en el método de Wenner</i>	38
Figura 9 <i>Perfil de resistividad del suelo respecto a la profundidad</i>	39
Figura 10 <i>Diagrama de bloques de las fases de la metodología</i>	54
Figura 11 <i>Diagrama de flujo utilizado en la programación de la herramienta</i>	57
Figura 12 <i>Página principal del programa DesignSPT con visualización 3D de la malla</i>	60
Figura 13 <i>Ingreso de datos generales del proyecto en la interfaz DesignSPT</i>	61
Figura 14 <i>Ingreso de datos técnicos del transformador en el aplicativo</i>	62
Figura 15 <i>Ingreso de datos de resistividad del terreno en DesignSPT</i>	63
Figura 16 <i>Ingreso de datos de resistividad del terreno en DesignSPT</i>	64
Figura 17 <i>Vista general del área de medición</i>	68
Figura 18 <i>Disposición de electrodos para medición de resistividad del terreno</i>	70
Figura 19 <i>Medición de resistividad del terreno con telurómetro</i>	70
Figura 20 <i>Medición de resistividad del terreno con telurómetro</i>	71
Figura 21 <i>Representación esquemática de los perfiles de medición en el terreno</i>	72
Figura 22 <i>Ingreso de datos de la resistencia en la herramienta informática</i>	74
Figura 23 <i>Placa de características de transformador de 50 kVA del fabricante INATRA</i>	75
Figura 24 <i>Ingreso de datos del transformador en la herramienta informática</i>	76
Figura 25 <i>Ingreso de datos del conductor y varilla de puesta a tierra en la herramienta informática</i>	77
Figura 26 <i>Diseño geométrico de la malla de puesta a tierra en el aplicativo</i>	78

Figura 27	<i>Diseño geométrico de la malla de puesta a tierra en el aplicativo.....</i>	79
Figura 28	<i>Unión mediante soldadura exotérmica en conductor de cobre desnudo</i>	81
Figura 29	<i>Vista general del terreno destinado para la construcción del sistema de puesta a tierra (después)</i>	82
Figura 30	<i>Medición de resistencia del sistema de puesta a tierra con pinza telurimétrica</i>	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Valores típicos del factor de asimetría.</i>	46
Tabla 2	<i>Constantes para determinar el área del conductor.</i>	48
Tabla 3	<i>Lista de materiales y costos estimados para la implementación del sistema de puesta a tierra.</i>	59
Tabla 4	<i>Mediciones de resistencia del terreno por perfil y profundidad mediante método de Wenner.</i>	72
Tabla 5	<i>Tabla comparativo de resultados de resistencia teórica y real.....</i>	84

INTRODUCCIÓN

La correcta implementación de sistemas de puesta a tierra (SPT) es un pilar esencial en el diseño de instalaciones eléctricas, tanto para garantizar la seguridad de las personas como para proteger los equipos y asegurar la continuidad operativa de los sistemas. Las normas IEEE Std 80 e IEEE Std 81 sirven como guías para el diseño y la revisión de sistemas de puesta a tierra en subestaciones. Allí se incluyen fórmulas y requisitos que buscan proteger tanto a las personas como a los equipos, al mismo tiempo que se garantiza que las instalaciones funcionen de manera segura y confiable. Además, estos documentos también consideran aspectos como la resistencia de los materiales, el comportamiento térmico y mecánico del sistema y la forma en que se distribuyen los voltajes en el terreno. No obstante, cuando se llevan a la práctica, muchos proyectos muestran que no siempre se siguen estas recomendaciones al pie de la letra. Esto pasa por factores como la presión de terminar rápido, la falta de espacio físico en las instalaciones o el interés de reducir costos en la construcción inicial.

En muchos casos se observa que el cálculo y dimensionamiento de estas instalaciones todavía se realiza de manera manual o, en el mejor de los casos, con hojas de cálculo bastante básicas. Este tipo de métodos trae consigo varias limitaciones. Por un lado, incrementan la posibilidad de cometer errores humanos, sobre todo en operaciones repetitivas o cuando intervienen redondeos. Además, son poco flexibles frente a modificaciones que se presenten en el diseño. Finalmente, no generan reportes completos que respalden de manera clara el cumplimiento de lo que exige la normativa. En auditorías o revisiones técnicas, esta carencia puede convertirse en un problema serio, pues no se cuenta con documentación estructurada que evidencie la conformidad del sistema con los estándares internacionales.

El proyecto aquí presentado pretende solventar las limitaciones identificadas previamente, enfocándose en la creación de una herramienta computacional destinada a la automatización del diseño y dimensionamiento de sistemas de puesta a tierra (SPT). Su meta primordial consiste en simplificar el procedimiento, al tiempo que estandariza los resultados y asegura el cumplimiento de las normas internacionales referidas. Para ello, la herramienta incorpora los cálculos técnicos requeridos tensiones de paso y de toque, gradiente de potencial y resistencia total de la malla todos ellos remitidos a algoritmos que siguen las directrices establecidas por la IEEE. Simultáneamente, ofrece al usuario la posibilidad de personalizar variables críticas, entre las que se incluyen la geometría y configuración de la malla, el número de varillas, el calibre del conductor y los perfiles de resistividad del terreno, que se determinan utilizando el procedimiento de Wenner.

La validación de la herramienta desarrollada fue un paso decisivo dentro del proyecto. Para ello se realizaron mediciones de campo con un telurómetro, a partir de las cuales se obtuvieron los valores reales de resistencia y resistividad del suelo en un sistema de puesta a tierra (SPT). Estos datos fueron comparados con los resultados arrojados por el software, lo que permitió verificar su funcionamiento y asegurar la estabilidad del algoritmo programado. Además, se realizaron pruebas en diferentes configuraciones de red y sobre distintos perfiles del terreno, confirmando que la herramienta podía adaptarse a escenarios variados.

Entre las principales funciones que ofrece la herramienta es su capacidad para generar informes técnicos de forma automática. Cada documento que se produce incluye tablas con las mediciones pertinentes, gráficos para una mejor comprensión, evaluaciones de las tensiones de paso y de contacto, y además un anexo fotográfico que reporta cada una de las etapas del trabajo de campo. Gracias a este algoritmo acortamos de forma notable el tiempo destinado a la elaboración de reportes, si no que, al mismo tiempo aseguran un grado elevado de precisión en los

datos presentados. Una de las funciones más destacables del software es su capacidad de elaborar de manera automática informes técnicos completos. Estos incluyen tablas con los resultados de las mediciones, gráficos de apoyo, evaluaciones de tensiones de paso y de contacto, e incluso un anexo fotográfico que documenta cada fase del trabajo de campo; y se logra reducir considerablemente el tiempo invertido en la preparación de reportes, manteniendo al mismo tiempo un alto nivel de exactitud.

Como resultado, la presentación de los diseños ante entidades reguladoras, como la CNEL Manabí, se vuelvan un proceso mucho más ágil y confiable. Al mismo tiempo, este proceso sistemático ayuda a disminuir errores humanos y garantiza que los sistemas de puesta a tierra diseñados sean seguros, funcionales y rentables.

CAPITULO I

EL PROBLEMA

1.1. Título

Diseño de una herramienta informática para el dimensionamiento de sistemas de puesta a tierra (SPT) aplicado a sistemas de transformación.

1.2. Problemática

En el contexto ecuatoriano, específicamente en los proyectos eléctricos que requieran la conexión de transformadores a la red de distribución del Sistema Nacional Interconectado (SNI) que se presentan ante las empresas distribuidoras del país, se exige la incorporación de un apartado técnico dedicado al sistema de puesta a tierra (SPT), el cual debe cumplir con requisitos específicos de formato y contenido. (Resolución No ARCONEL-006/2020 "Distribución y comercialización de energía eléctrica", 2020)

Dichos proyectos incluyen no solo el dimensionamiento de la malla, sino también información complementaria como localización del sitio, datos personales de los involucrados en el proyecto, características de la red a la que se conectará el transformador y las especificaciones de los materiales empleados, la formulación matemática, el análisis normativo aplicado y evidencia fotográfica del sitio donde se instalará la malla.

Este proceso de realización del capítulo se vuelve tedioso y complejo para los profesionales técnicos del área que aún usan cálculos manuales u hojas de Excel, para los que buscan automatizar un poco el proceso, que son confusas y con poca capacidad de versatilidad en el dimensionamiento de los SPT.

Por otro lado, las herramientas disponibles para el diseño de SPT presentan limitaciones que también dificultan su aplicación en este contexto. Programas comerciales especializados como CDEGS, ETAP, CYMGRD, SKM, XGSLab o SafeGrid poseen funcionalidades avanzadas, pero presentan altos costos de licencia que restringen su acceso a consultores independientes, pequeñas empresas o instituciones académicas. Además, ninguno posee la capacidad de generar reportes adaptados a los requerimientos de las empresas distribuidoras del país.

1.3. Justificación

Frente a esta problemática, surge la necesidad de una herramienta informática accesible, precisa y adaptada a la normativa vigente, que permita automatizar el dimensionamiento de los SPT. La propuesta del proyecto responde a dicha necesidad mediante el desarrollo de un software que integra algoritmos de cálculo basados en las normas IEEE Std 80 y 81, incorpora mediciones de resistividad obtenidas con el método de Wenner y facilita la personalización de variables como geometría de la malla, número de electrodos y calibre de los conductores. De esta forma, se garantiza la estandarización de resultados, la reducción de errores humanos y la generación automática de informes técnicos completos.

Los resultados finales se traducirán en cálculos coherentes y fiables que minimizan el margen de error y promueven la protección integral de los activos gracias a la facilidad de simulación de sistemas de transformación en las redes de distribución. La relevancia de este proyecto radica en que no solo cumple con los lineamientos normativos y de seguridad exigidos, sino que también aporta al fortalecimiento de la práctica profesional en la ingeniería eléctrica.

La herramienta desarrollada optimiza tiempos, facilita la verificación de diseños y brinda soporte confiable para la presentación de proyectos ante empresas reguladoras. Además, se

convierte en un recurso didáctico y de investigación para instituciones académicas, al ofrecer un entorno de simulación y análisis que promueve la formación de futuros profesionales en el área.

1.4. Propuesta

Crear una herramienta informática a través del lenguaje de programación Python con interfaz gráfica para el dimensionamiento de sistemas de puesta a tierra (SPT) que permita a los profesionales realizar cálculos precisos y estandarizados en sistemas de transformación, así como la generación de reportes según los criterios de las empresas distribuidoras del país.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Desarrollar una herramienta informática que facilite el dimensionamiento preciso y estandarizado de sistemas de puesta a tierra (SPT) en instalaciones eléctricas.

1.5.2. Objetivos específicos

- Recopilar datos necesarios para definir las variables y la metodología para el cálculo del sistema de puesta a tierra.
- Desarrollar algoritmos específicos para programar la herramienta de dimensionamiento de sistemas de puesta a tierra.
- Generar reportes automáticos que presenten los resultados del dimensionamiento de sistemas de puesta a tierra.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. El sistema de puesta a tierra

Según ESSA (2020), la puesta a tierra en los sistemas eléctricos consiste en una conexión intencional y directa con la tierra, empleando componentes de baja resistencia, sin incluir fusibles ni protecciones. Esto asegura que todos los elementos metálicos, como canalizaciones, cajas, accesorios, estructuras y carcasas de equipos, se mantengan al mismo nivel de potencial eléctrico, evitando así que puedan cargarse bajo condiciones normales. La tierra, al tener un potencial de cero voltios y por su capacidad para eliminar corrientes no deseadas gracias a las concentraciones de agua y sales cercanas a la superficie, es ideal para prevenir posibles problemas eléctricos.

Según Retie Eléctrica (2024), los sistemas de puesta a tierra son fundamentales en las redes eléctricas, en alta como en baja tensión. Sus principales objetivos incluyen:

- Proteger las instalaciones y edificios frente los rayos.
- Garantizar la seguridad de las personas y los animales, disminuyendo los riesgos por tensiones peligrosas.
- Mantener la compatibilidad electromagnética (EMC).
- Asegurar el correcto funcionamiento de la red eléctrica y la calidad de la energía

2.2. Tipos de sistemas de puesta a tierra

Los sistemas de puesta a tierra son esenciales para garantizar la seguridad y el correcto funcionamiento de las instalaciones eléctricas. Según las características del terreno y los requerimientos específicos de cada proyecto, se seleccionan diferentes configuraciones que

aseguran una óptima disipación de corrientes de falla y protección del sistema eléctrico (Rendueles, 2022).

2.2.1. Varilla de Puesta a Tierra

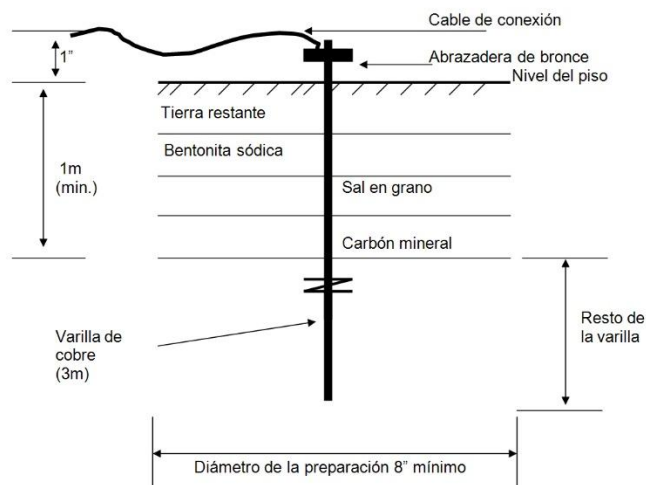
La varilla de puesta a tierra es uno de los sistemas más simples y económicos utilizados para garantizar la correcta disipación de la corriente de falla. Consiste en una barra metálica cilíndrica, generalmente de acero revestido de cobre, que se entierra verticalmente a una profundidad determinada por la longitud misma de la varilla y la excavación realizada y la profundidad a la que descansaría el conductor horizontal, es decir, según las condiciones del sistema.

En la figura 1 en su parte superior se observa la unión entre la varilla y el conductor de tierra, la cual se realiza con una abrazadera o conector mecánico que garantiza la continuidad eléctrica hacia el sistema de puesta a tierra. Alrededor de la conexión se pone una capa de grava o piedra triturada, que ayuda a que el agua se drene y a que la unión se mantenga seca, así la unión dura más tiempo. Si se quieren hacer inspecciones, la parte de arriba de la varilla se puede dejar accesible a través de una tapa de revisión que queda a nivel del suelo, así se puede mirar su estado sin tener que hacer excavaciones.

Este sistema se emplea comúnmente en instalaciones residenciales o comerciales de baja demanda eléctrica, donde la resistividad del terreno es favorable y no se requiere una alta capacidad de disipación, debido a su facilidad de instalación, bajo costo y aceptable desempeño técnico en condiciones normales (J&D Eléctricos, 2020).

Figura 1

Esquema técnico de instalación de varilla de puesta a tierra vertical

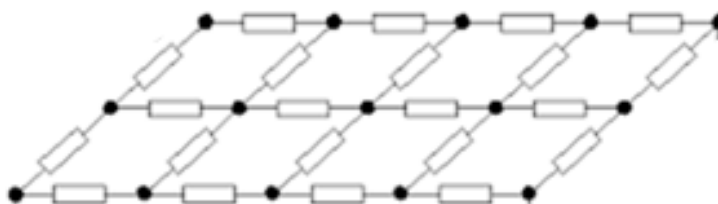


Nota. Tomado de "Vertical Ground Rod Installation", por Paktechpoint (2022).

2.2.2. Malla de Conductores Horizontales

El sistema en cuestión se configura mediante conductores de cobre desnudo dispuestos horizontalmente sobre el terreno en patrones geométricos regulares, como cuadrículas o alineaciones paralelas como se puede observar en la figura 2. Tal disposición favorece una difusión homogeneizada de las corrientes de falta, ocasionando una notable disminución en los gradientes de potencial que se manifiestan en la superficie del suelo.

Este tipo de mallas encuentra aplicación prevalente en infraestructuras de alta complejidad técnica, como subestaciones eléctricas, plantas de procesamiento industrial y centros de transformación, donde se exige una resistencia de puesta a tierra que permanezca a niveles mínimos y donde la disipación eficiente de corrientes elevadas se torna imprescindible.

Figura 2*Configuración general de una malla*

Nota. La imagen representa una red de conductores interconectados donde se simulan las resistencias del reticulado y de las conexiones a tierra, facilitando el análisis del comportamiento eléctrico del sistema. Tomado de Concha (2020).

Este tipo de sistema puede complementarse con varillas verticales interconectadas en los nodos de la malla, y con diagonales de refuerzo, lo cual mejora la eficiencia en la conducción y la seguridad del sistema. Electricity Magnetism (2021) explica que esta configuración resulta especialmente efectiva en terrenos amplios o de resistividad variable, garantizando el cumplimiento de los límites de tensión de paso y de toque establecidos por las normativas técnicas.

2.2.3. Electrodo Compuestos o Activos

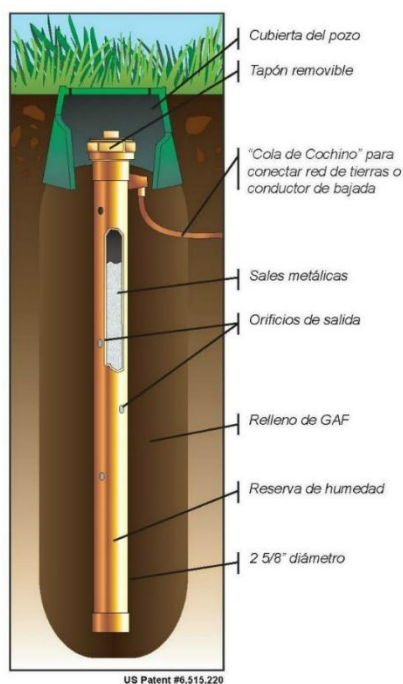
Los electrodos compuestos o activos son soluciones avanzadas para mejorar la conductividad en terrenos adversos, como suelos rocosos o de alta resistividad.

Según Schneider Electric (2018), “los electrodos activos están diseñados para liberar continuamente materiales conductores hacia el terreno, lo que garantiza una baja resistencia de puesta a tierra durante toda la vida útil del sistema”. Esta característica los convierte en una alternativa eficiente cuando los métodos convencionales, como las varillas simples, no logran alcanzar los niveles de resistividad requeridos.

Tal como se observa en la figura 3, este tipo de electrodo está constituido por una varilla metálica, generalmente de cobre, encapsulada en un tubo con orificios a lo largo de su cuerpo. En su interior se encuentra un compuesto químico conductor como bentonita o sales metálica que se libera gradualmente hacia el terreno, formando una zona de contacto eléctricamente activa que mantiene la humedad y mejora la conductividad. Esta configuración también incluye una cámara superior de inspección y mantenimiento, lo que facilita su supervisión en campo

Figura 3

Diseño esquemático de un electrodo compuesto activo acompañado de cámara de inspección



Nota. La varilla metálica se encuentra encapsulada y presenta orificios que permiten la liberación del material conductor. Se instala de manera vertical en un pozo provisto de una cámara de inspección, constituyendo un diseño característico de electrodo compuesto o activo, especialmente utilizado en terrenos con alta resistividad. Tomado de Intelec (2024).

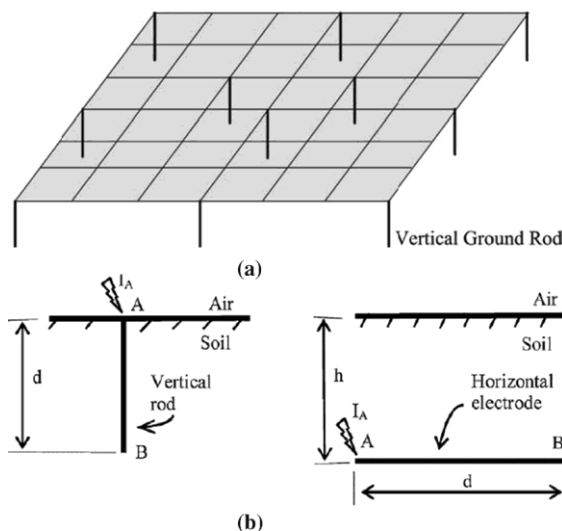
Este tipo de sistema se emplea frecuentemente en instalaciones eléctricas de alta importancia, tales como subestaciones, centros de datos y torres de telecomunicaciones, donde la continuidad del servicio y la protección contra descargas eléctricas son fundamentales.

2.2.4. *Mallas Híbridas de Electrodo y Conductores*

Las mallas híbridas son sistemas de puesta a tierra donde se combinan varillas verticales (electrodos) y conductores horizontales de cobre, creando una estructura interconectada y eficiente para la disipación de corrientes de falla. Este tipo de configuración, como se muestra en la figura 4, la usamos cuando necesitamos llevar corriente al terreno de forma segura, especialmente cuando las redes eléctricas no pueden fallar de ninguna forma. Así nos aseguramos de que toda la energía que circula se proteja.

Figura 4

Malla híbrida de puesta a tierra con electrodos verticales



Nota. Red de conductores enterrados interconectados con varillas de puesta a tierra, distribuidas de manera regular, conformando un sistema robusto de disipación de corrientes de falla. Tomado de Martins (2020).

Según Grupo Perteo (2023), “las mallas híbridas están formadas por una combinación de electrodos de varilla y conductores horizontales enterrados, que se unen mediante soldaduras o conexiones especiales para formar una red continua”. Esto hace que la corriente de falla fluya en paralelo y que la diferencia de voltaje baje, así se asegura que el sistema de protección se mantenga seguro y siga funcionando sin que haya problemas de operación.

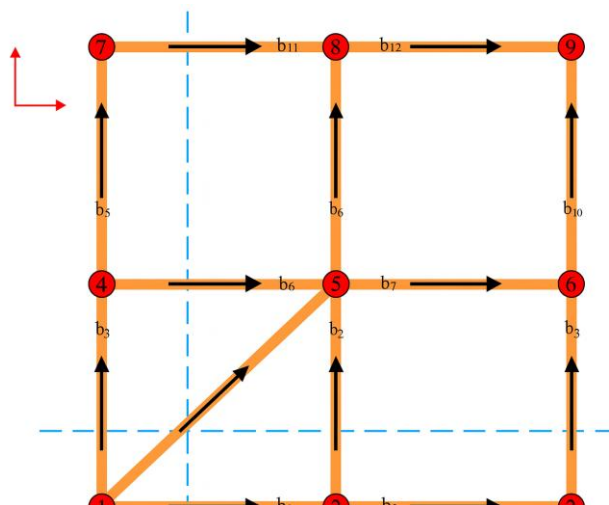
Son ampliamente utilizadas en subestaciones eléctricas, centros de transformación, plantas de generación y otras instalaciones industriales críticas donde se requiere una respuesta sólida frente a descargas atmosféricas o fallas internas del sistema.

2.2.5. Configuración Cuadrada

La malla de configuración cuadrada es una de las disposiciones más comunes en los sistemas de puesta a tierra debido a su facilidad de implementación, eficiencia en la disipación de corriente de falla y buen comportamiento ante descargas eléctricas. Esta distribución permite una propagación homogénea del potencial eléctrico en la superficie del terreno, lo cual disminuye significativamente las tensiones de paso y de contacto. Gracias a su simetría geométrica, es ampliamente utilizada en estudios de simulación mediante métodos de elementos finitos, facilitando el análisis eléctrico y estructural del sistema de puesta a tierra en subestaciones de media y alta tensión (Saravanan, 2021).

Figura 5

Representación de una malla de puesta a tierra de configuración cuadrada de $6\text{ m} \times 6\text{ m}$.



Nota. La figura muestra un modelo numérico en el que se representa una cuadrícula de conductores enterrados, dispuestos en intervalos regulares. Esta configuración tiene como propósito aproximar una distribución de potencial simétrica dentro del dominio analizado. Tomado de Saravanan (2021).

2.2.6. Configuración en "L"

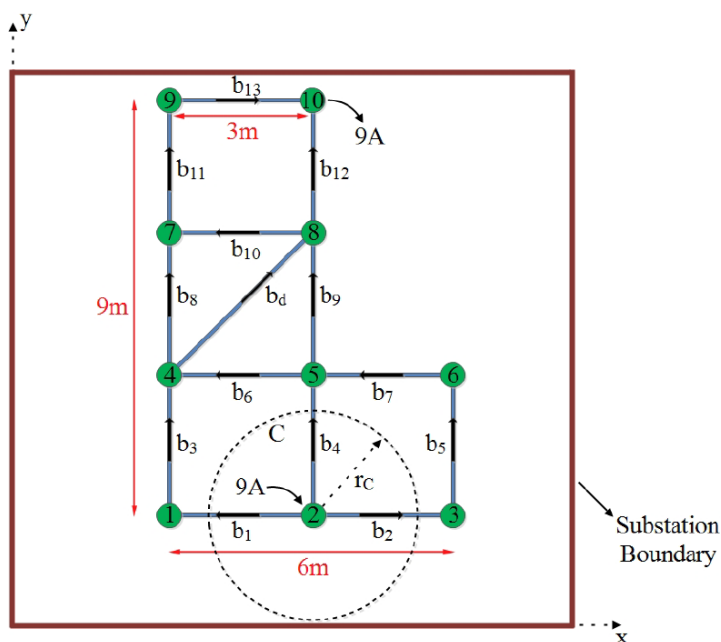
Las limitaciones de espacio obligan en algunos casos a utilizar una configuración en forma de 'L', como se muestra en la figura 6, especialmente en terrenos donde la malla completa no puede instalarse por la presencia de obstrucciones o condiciones topográficas. Aun con esta disposición, la barra de tierra conserva la capacidad de absorber y distribuir las corrientes de falla sin comprometer la seguridad.

No obstante, cada curva o remate del diseño se convierte en un punto crítico, por lo que el ingeniero debe garantizar que el trayecto de retorno mantenga la homogeneidad del potencial y evitar que en los extremos se formen zonas aisladas que concentren voltajes indeseados.

Según la Escuela Politécnica Nacional (2009) esta configuración “se utiliza cuando el terreno disponible no permite formar una malla completa, siendo común en esquinas o bordes de instalaciones eléctricas” (p. 12).

Figura 6

Configuración en “L” para mallas de puesta a tierra



Nota. Diagrama de una malla en ‘L’ de 6 m × 9 m, con conductores y electrodos enterrados a 0,3 metros de profundidad. Se instala a lo largo del borde de una subestación y genera un patrón asimétrico adecuado para condiciones de terreno irregular. Tomado de Ibrahim (2019).

2.2.7. Configuración Lineal

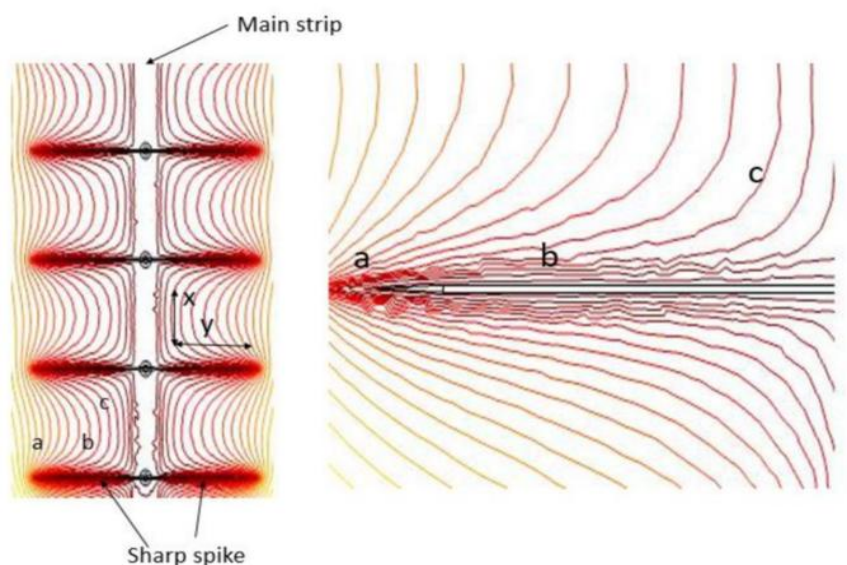
La puesta a tierra de tipo lineal consiste en enterrar conductores rectos o en tramos continuos, lo que la hace adecuada en espacios angostos donde no es posible instalar mallas convencionales. Este esquema resulta especialmente útil en líneas de transmisión, corredores de

cables o edificaciones con geometrías irregulares, donde las dimensiones del terreno limitan la aplicación de los diseños tradicionales de conexión a tierra.

Según FSingeniería (2025), esta clase de diseño se usa en sistemas de transmisión porque el área que se tiene por lo general es larga y en forma lineal, como se puede observar en la figura 7. Por eso, es necesario encontrar una opción que se amplíe más y que se coloque en disposición direccional.

Figura 7

Configuración lineal de sistema de puesta a tierra



Nota. Figura de una disposición lineal de electrodos enterrados, comúnmente utilizada en instalaciones con geometría alargada como líneas de transmisión. Tomado de Ostadrahimi (2021).

Además, como lo explica la Escuela Politécnica Nacional (2009), “esta estructura es empleada cuando no se dispone de espacio suficiente para realizar una malla completa y se requiere una conexión a tierra confiable en una sola dirección” (p. 8). Aunque su capacidad de disipación

puede ser menor frente a otras configuraciones, si se diseña correctamente, puede cumplir con los requisitos de seguridad y continuidad operativa en entornos críticos.

2.3. Requisitos técnicos de los sistemas de puesta a tierra

Las reglas que estamos revisando tienen dos metas principales que cualquier falla eléctrica se disipe de la forma correcta y que al mismo tiempo todos los componentes del sistema incluyendo la gente, los equipos y la infraestructura queden protegidos ante cualquier descarga o cambio inesperado de energía. Eso significa que la seguridad y la salud de todos los que la rodean, de forma directa o indirecta, están como prioridad.

Según la IEEE (2013), un sistema de puesta a tierra es considerado seguro y eficiente cuando cumple una serie de criterios fundamentales que garantizan su correcto funcionamiento bajo condiciones normales y de falla. Estos criterios no solo buscan asegurar una correcta disipación de las corrientes de falla, sino también proteger a las personas, los equipos y la infraestructura ante posibles descargas eléctricas o eventos transitorios. Entre los principales aspectos que deben evaluarse se encuentran la resistencia eléctrica del sistema, su comportamiento frente a condiciones climáticas variables, la capacidad de disipar descargas atmosféricas, el control de tensiones peligrosas, su resistencia térmica y la durabilidad ante agentes corrosivos.

Uno de los primeros aspectos a tener en cuenta es que la resistencia debe ser lo suficientemente baja como minimizar la posibilidad de descargas eléctricas al personal y a las máquinas involucradas por eventos como fenómenos naturales o fallas de aislamiento en los equipos eléctricos.

La Empresa Eléctrica Quito (2024) en su guía para el diseño de redes de distribución determina un valor límite para la resistencia eléctrica en un sistema de puesta a tierra para sistemas

de distribución aérea de 25 ohmios, mientras que se considera un valor de 5 ohmios para instalaciones soterradas.

Sin embargo, la IEEE (2007) detalla que, si bien el NEC u otras normativas indican la necesidad de un límite de resistencia para un sistema de puesta a tierra, este valor no debe interpretarse en el sentido de que el valor, por ejemplo, de 25 ohmios es un valor de resistencia satisfactorio para un sistema de puesta a tierra.

Por el contrario, un criterio mejor utilizado es el de aumento de voltaje de tierra de la estación en condiciones máximas de falla a tierra y la valoración de los voltajes de paso y de toque para mostrar los valores estipulados la normativa IEEE Std 80. Este método que también es usado en el Código Eléctrico Canadiense (CEC) CSA C22.1 gracias a que se sustenta en que el criterio se basa en la seguridad.

2.4. Funciones principales del sistema de puesta a tierra

El sistema de puesta a tierra cumple funciones fundamentales para garantizar la seguridad de las personas y la protección de las instalaciones eléctricas. Entre sus principales propósitos se encuentra la disipación adecuada de corrientes eléctricas no deseadas hacia el suelo, evitando así que estas circulen por estructuras metálicas, equipos sensibles o cuerpos humanos.

Conforme los lineamientos de la EEQ (2024), un principio clave en cualquier sistema de conexión a tierra es crear un recorrido de muy baja resistencia así, si hay una falla y entra una corriente sale rapidísimo y sin dañar nada. El fin aquí es que las descargas eléctricas no se le peguen a las personas ni a las máquinas.

Adicionalmente, el sistema de puesta a tierra contribuye a estabilizar el potencial eléctrico de las instalaciones frente a fenómenos transitorios o descargas atmosféricas, reduciendo la

probabilidad de daños por sobretensiones y mejorando la confiabilidad del sistema eléctrico en su conjunto. (Elektro-Korrosion, 2014)

2.5. Concepto de resistividad del terreno

La resistividad del suelo es una propiedad eléctrica que cuantifica la oposición que presenta un determinado tipo de terreno al paso de la corriente eléctrica. Se expresa en ohm-metro ($\Omega \cdot m$) y constituye un parámetro clave en el diseño de sistemas de puesta a tierra, ya que condiciona la capacidad del sistema para disipar corrientes de falla de forma segura y eficiente (Chauvin Arnoux Group, 2024).

Un suelo con baja resistividad como los suelos húmedos o arcillosos permite una mejor conducción de corriente, facilitando la dispersión de las descargas eléctricas. En cambio, terrenos con alta resistividad, como los rocosos o secos, dificultan la disipación, por lo que requieren sistemas de puesta a tierra más complejos o de mayor superficie. (Goelectric Earthing Meter, 2024)

De acuerdo con el Electric Power Research Institute (2021), “la resistividad del suelo no solo varía según el tipo de material, sino también con la profundidad, la humedad, la temperatura y la presencia de sales disueltas”, lo que obliga a realizar estudios específicos del terreno para garantizar una instalación segura y eficiente.

2.6. Factores que afectan la resistividad y su medición

La resistividad del suelo es una propiedad eléctrica fundamental que define la capacidad del terreno para conducir corriente eléctrica. Como lo señala Briceño (2015), “la resistividad del suelo depende de: tipo de suelo, porcentaje de humedad, composición química, compactación del

material, temperatura, estratificación del suelo, mezcla de diferentes tipos de materiales y concentración de sales disueltas en la humedad del suelo” (p. 27).

Además, la resistividad varía notablemente con la verticalidad del perfil del subsuelo, debido a cambios en el nivel freático, tipo de partículas y densidad, incluso en capas que parecían homogéneas. De acuerdo con Llorente (2009), el diseño de un sistema de puesta a tierra debe considerar la resistencia al paso de la corriente entre los electrodos y el terreno sea lo más baja posible, ya que de eso depende la seguridad del sistema. Hay que tener en cuenta también que el suelo está formado por diferentes capas, y cuando se mide la resistividad en campo el valor que se obtiene corresponde a un promedio de todas ellas. Por esa razón, al momento de modelar el sistema es necesario interpretar bien esos resultados para que el diseño sea confiable

Además, la resistividad varía notablemente con la verticalidad del perfil del subsuelo, debido a cambios en el nivel freático, tipo de partículas y densidad, incluso en capas que parecían homogéneas. De acuerdo con Llorente (2009), el diseño de un sistema de puesta a tierra debe considerar la resistencia al paso de la corriente entre los electrodos y el terreno sea lo más baja posible, ya que de eso depende la seguridad del sistema. Hay que tener en cuenta también que el suelo está formado por diferentes capas, y cuando se mide la resistividad en campo el valor que se obtiene corresponde a un promedio de todas ellas. Por esa razón, al momento de modelar el sistema es necesario interpretar bien esos resultados para que el diseño sea confiable

2.7. Medición de resistividad: método de Wenner

El procedimiento conocido como método de Wenner ha alcanzado amplia aceptación en el ámbito de la caracterización de la resistividad del terreno, particularmente en la planeación de redes de puesta a tierra. Según el análisis de Villa-Acevedo, Rodríguez-Serna y Saldarriaga Loaiza (2013), la técnica se basa en la disposición de cuatro electrodos alineados y separados por la misma

distancia; los electrodos extremos suministran corriente a la tierra, mientras que los electrodos intermedios registran la diferencia de potencial inducida. Al realizar un estudio de la caída de tensión de la corriente introducida logramos conocer la resistividad del suelo, es así como es información es interpretada y nos da datos importantes sobre la conductividad del terreno, Además, podemos relacionarla con la distancia que hay entre los (a) hasta la profundidad que alcanza la corriente.

Según el NETAWorld Journal (2021), para hacer esta medición se usa un telurómetro, es un aparato diseñado para inyectar corriente a través de electrodos que están en el exterior y, al mismo tiempo, mide la diferencia de potencial entre los electrodos que están en el interior. Aplicando la Ley de Ohm junto con los parámetros geométricos del arreglo, este dispositivo calcula automáticamente la resistividad, lo que asegura un diseño eficaz y seguro del sistema de puesta a tierra. la resistencia al paso de la corriente entre los electrodos y el terreno, y garantizar que el valor de la resistencia de paso sea lo más bajo posible. Asimismo, la estratificación natural del terreno implica que la resistividad medida in situ corresponde a un valor promedio ponderado del comportamiento eléctrico de cada capa, por lo que debe interpretarse correctamente al momento de modelar el sistema.

2.8. Procedimiento operativo del método Wenner

La guía técnica de Fluke Corporation (2017) indica que un correcto uso del método de Wenner garantiza la obtención de datos confiables. La guía proporcionada, la cual está enfocada a la industria e ingeniería, describen los siguientes pasos clave:

1. **Preparación del equipo.** Es importante verificar que el telurómetro se encuentre calibrado y en correcto funcionamiento. También se debe disponer con anticipación de todos los

accesorios necesarios. Los electrodos metálicos deben estar limpios y los cables de conexión en buen estado, garantizando así la fiabilidad de las mediciones.

2. **Disposición de electrodos.** Se deben colocar cuatro electrodos metálicos en línea recta sobre el terreno, cuidando que la separación entre ellos sea uniforme (a), como se puede ver en la figura 8. Esta distancia, como regla, debe ser al menos tres veces mayor que la profundidad a la que están enterrados los electrodos.
3. **Conexión del sistema.** Conectar los dos electrodos externos (C1 y C2) al circuito de corriente del telurómetro, y los dos electrodos internos (P1 y P2) al circuito de medición de potencial.
4. **Inyección de corriente.** Activar el telurómetro para que inyecte una corriente eléctrica de valor conocido a través de los electrodos externos.
5. **Medición de potencial.** El telurómetro mide la diferencia de potencial entre los electrodos internos, permitiendo calcular la resistividad aparente del suelo mediante la fórmula correspondiente al método de Wenner:

$$\rho = 2\pi \cdot a \cdot \frac{V}{I} \quad (1)$$

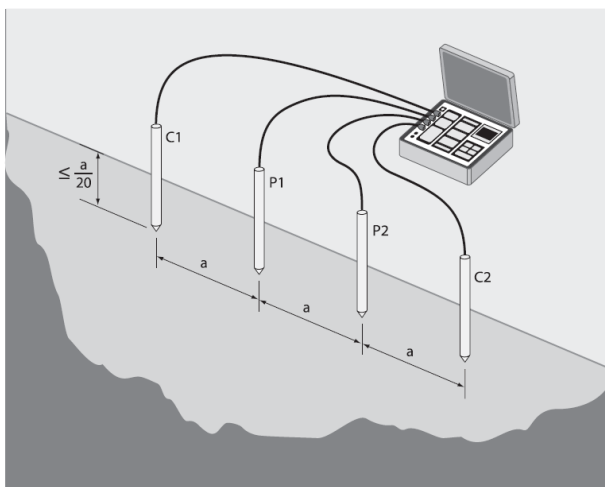
Donde:

- ρ : resistividad en ohm por metro.
- a: espacio entre los electrodos en metros.
- V: voltaje medido.
- I: corriente inyectada.

Este cálculo considera la geometría del arreglo y la resistencia medida, evaluando la capacidad del terreno para disipar la corriente de falla, por lo que este valor es fundamental para validar la seguridad eléctrica del sistema.

Figura 8

Disposición de electrodos en el método de Wenner.



Nota. La figura muestra el arreglo lineal de cuatro electrodos utilizados en el método de Wenner: C1 y C2 (corriente), P1 y P2 (potencial), equidistantes entre sí a una distancia “a”. Este método se emplea junto a un telurómetro para medir la resistividad aparente del terreno. Tomado de Telurómetro (2022).

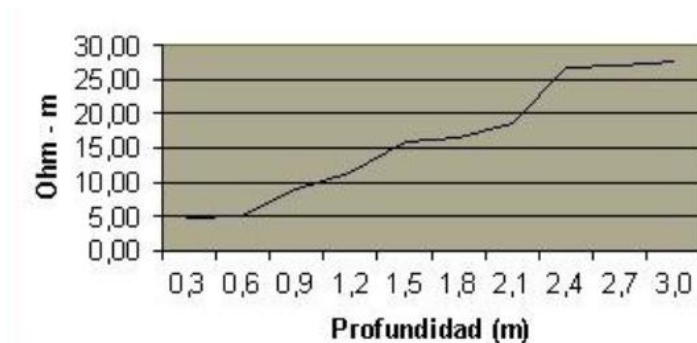
2.9. Análisis de perfiles de resistividad y dirección del terreno

Los perfiles de resistividad son representaciones gráficas que muestran cómo varía la resistividad eléctrica del suelo en función de la profundidad o de una dirección específica. Pyramid Geophysical Services (2020) señala que estos perfiles permiten identificar la distribución de materiales y su capacidad de conducción, siendo cruciales en estudios de puesta a tierra.

Para obtenerlos mediante el método de Wenner, se debe repetir el procedimiento con incrementos progresivos en la distancia entre electrodos (por ejemplo: 1 metro, 2 metros, 3 metros, etc.), evaluando la resistividad a diferentes profundidades (Pérez, 2023).

Figura 9

Perfil de resistividad del suelo respecto a la profundidad



Nota. Esta figura representa la resistividad del suelo que varía a diferentes profundidades. De este modo, podemos identificar en qué partes el terreno conduce la electricidad mejor o peor y permite localizar capas del suelo con propiedades diferentes. Tomado de Teluometro (2022).

Para comprender mejor la zona de estudio es necesario tomar lecturas en varias direcciones. Esto se logra alineando las líneas de medición en ángulos de 0° , 45° , 90° y 135° en relación con el sistema de coordenadas definido previamente, al girar la línea de medida en pasos de 45° , se obtienen datos que reflejan la anisotropía del terreno, es decir, cómo las propiedades eléctricas cambian según la dirección. El usar varias direcciones es clave para detectar zonas diferentes en el subsuelo y asegurar que la interpretación de los perfiles de resistividad sea lo más precisa posible.

2.10. Cálculo de la Resistividad Promedio

Cuando se obtienen múltiples valores de resistividad aparente en un área de estudio, es posible calcular un valor promedio general del terreno. Según el IEEE (2013), en el Std 80, esta metodología permite caracterizar adecuadamente el comportamiento eléctrico del suelo, especialmente en terrenos con composición compleja.

La fórmula para la resistividad promedio es:

$$P_{a(avg)} = \frac{P_{a(1)} + P_{a(2)} + P_{a(3)} + \dots + P_{a(n)}}{n} \quad (2)$$

Donde:

- $P_{a(avg)}$: Resistividad promedio calculada a partir de todas las mediciones realizadas.
- $P_{a(n)}$: Resistividades aparentes obtenidas a distintas distancias.
- n : Número total de mediciones realizadas.

Es importante que se evalúen todas las direcciones del terreno disponible en el que se desee implementar el SPT en el caso de que la geometría de la malla a construir tenga un área de superficie diferente a una lineal. Por ejemplo, si la malla que se desea elaborar tiene una geometría cuadrada, es importante que se repita las mediciones del método Wenner en diferentes direcciones como 0, 45, 90, 135 grados en la extensión completa del terreno disponible y, por lo tanto, se repita los cálculos de la resistividad promedio.

$$P_{a(avg)} = \frac{P_{r(1)} + P_{r(2)} + P_{r(3)} + \dots + P_{r(n)}}{n} \quad (3)$$

Donde:

- $P_{a(avg)}$: Resistividad promedio calculada a partir de todos los promedios de las rutas evaluadas.
- $P_{r(n)}$: Resistividades promedio de cada distancia por rutas.
- n : Número total de rutas.

2.11. Normativa aplicada: IEEE estándar 80

El diseño de sistemas de puesta a tierra en subestaciones eléctricas está regido por normas técnicas que buscan garantizar la seguridad operativa del sistema eléctrico y la protección del personal que trabaja en condiciones de alto riesgo. Entre esas, la norma IEEE Std 80-2013 se ha consolidado como un referente internacional, al ofrecer orientaciones precisas dirigidas a la concepción, análisis y verificación de sistemas de puesta a tierra en subestaciones de corriente alterna (Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2013).

El presente documento normativo establece criterios de diseño cuyo propósito es contener las tensiones peligrosas susceptibles de manifestarse durante incidentes eléctricos, con particular atención a las tensiones de contacto definidas como el potencial entre el punto de contacto en el cuerpo humano y el terreno y a las tensiones de paso que corresponden al voltaje medido entre dos extremidades de un individuo al estar en posición de pie. La exposición descontrolada a estas formas de tensión eléctrica puede, al inferir corrientes letales en el organismo, conducir a lesiones de gravedad crítica.

Según EasyPower (2021), “la norma IEEE 80 proporciona los métodos necesarios para modelar el sistema de puesta a tierra, determinar los límites permisibles de voltaje y evaluar la capacidad del sistema para manejar corrientes de falla de manera segura”. (párr. 4)

Además, la norma considera factores como la resistividad del suelo, la configuración geométrica de las mallas de puesta a tierra, la duración y magnitud de la corriente de falla, y las condiciones fisiológicas del cuerpo humano ante el paso de corriente eléctrica. Como lo establece el Institute of Electrical and Electronics Engineer (2013) “es importante garantizar que la electricidad no represente un riesgo para las personas”.

Por ello, es necesario limitar la tensión de contacto y de paso a niveles que no provoquen fibrilación ventricular ni quemaduras. Para establecer estos límites se han definido normas de seguridad basadas en gráficas que representan la tolerancia del cuerpo humano. Dichas curvas consideran factores como el peso de la persona y la resistencia de la piel y los órganos, lo que permite fijar valores de seguridad adecuados.

De manera complementaria, la norma específica una serie de requisitos técnicos fundamentales que todo sistema de puesta a tierra debe cumplir para ser considerado seguro y funcional. Los especialistas Asdrúbal Herrera & Castro Hernández (2003) en su artículo los clasifica de la siguiente manera:

- **Resistencia adecuada:** El sistema debe presentar una resistencia eléctrica considerablemente baja (idealmente menor a 5 ohmios), que garantice una conexión efectiva con el terreno permitiendo una rápida disipación de la corriente de falla.
- **Estabilidad ante condiciones ambientales:** La resistencia del sistema se mantiene incluso cuando cambie la humedad, la temperatura o el tipo de suelo que lo rodee. Esto asegura un funcionamiento confiable y no hay alteraciones.
- **Baja impedancia para descargas atmosféricas:** La impedancia del sistema tiene que ser bien baja para que las descargas eléctricas, sobre todo de rayos, bajen al suelo sin poner en riesgo las instalaciones y equipos.

- **Control de potenciales peligrosos:** El SPT debe tenerse que hacerse de modo que, si algo sale mal, no se acumule mucha electricidad entre lugares que la gente puede tocar. Así, se evitan las peligrosas corrientes que pueden pasar por las piernas o por las manos al hacer contacto con algo.
- **Capacidad térmica del sistema:** La estructura completa del sistema de puesta a tierra debe ser capaz de conducir la corriente de falla durante el tiempo que sea necesario, sin alcanzar temperaturas que provoquen la fusión del metal o que comprometan su integridad mecánica.
- **Resistencia a la corrosión:** Los materiales que se usen tienen que ser resistentes y aguantar condiciones difíciles, así se evitan problemas por óxido o humedad que vienen del suelo.

La norma, además, sugiere pautas específicas para la inspección y el mantenimiento de los sistemas de puesta a tierra, extendiendo su relevancia desde el diseño hasta la operación a lo largo de toda la vida útil de la instalación. Se recomiendan prácticas para la verificación periódica del estado mecánico de los conductores, la medición de la resistencia global del sistema y la detección de fallas por corrosión, fractura o desconexión accidental (Dlada, 2023).

En definitiva, la adhesión estricta a la norma IEEE Std 80-2013 asegura que las instalaciones eléctricas satisfagan los niveles internacionales de seguridad, protejan la vida y faciliten la operación ininterrumpida de los equipos, además de atenuar de manera significativa el impacto de las fallas en la red. Su integración resulta imprescindible en cualquier iniciativa dirigida al diseño, la valoración o la optimización de sistemas de puesta a tierra en entornos de media y alta tensión.

2.12. Ecuaciones utilizadas en el dimensionamiento de un sistema de puesta a tierra

El diseño de un sistema de puesta a tierra requiere la realización de cálculos metódicos y precisos que aseguren tanto la protección de los equipos como la seguridad de las personas. En primer lugar, se establece la corriente de falla máxima que el sistema deberá disipar, lo cual determina la magnitud de la energía que se deberá manejar. Con este dato, se elige el diámetro del conductor de puesta a tierra, verificando que su sección transversal sea la adecuada para conducir dicha corriente sin que su temperatura exceda los límites normales de operación y sin que se produzcan deterioros estructurales. Finalmente, se calcula la resistencia total del sistema, de modo que su valor resultante sea inferior a los umbrales establecidos, garantizando así que la energía disipada se distribuya de manera rápida y segura, minimizando riesgos y corrientes de paso por el suelo (Domínguez Villa, 2022).

Para validar la seguridad del sistema, se calculan las tensiones de paso y de toque, comprobando que los valores estén dentro de límites tolerables. Gómez, Silva y Daza (2012) explican que también es necesario analizar el gradiente de potencial, evaluando la distribución de tensiones en el terreno para garantizar que no existan riesgos para las personas ni para los equipos.

2.12.1. Cálculo de la corriente máxima de falla

El cálculo de la corriente máxima de falla reviste especial importancia dentro de un sistema de puesta a tierra, puesto que define los escenarios extremos a los que el sistema deberá hacer frente en el transcurso de una falla. Esta corriente es de importancia debido a que la corriente generada en una falla tiende a desestabilizar el sistema, retornar por el neutro, blindajes de cables o estructuras metálicas, entre otros. Por lo que, es importante que se sepa cuál sería este valor en cada de falla para poder tener correctamente el dimensionamiento de los conductores y que sea

preciso y, así como de los elementos anexos, de modo que sean capaces de disipar la energía generada sin alcanzar temperaturas que comprometan su integridad estructural o funcional.

Además, es la base para calcular las tensiones de paso y de toque, asegurando que se mantengan dentro de límites seguros para las personas y equipos en contacto con el terreno. Cano Plata (2010) sostiene que este análisis garantiza que el sistema funcione eficientemente y cumpla con los estándares de seguridad establecido. Para ello, primero se debe tener en cuenta qué cálculos son los necesarios y debemos considerar la corriente máxima de falla asumida por la malla de puesta a tierra de la siguiente manera:

$$I_G = D_f * I_g \quad (4)$$

Donde:

- D_f : Factor de asimetría.
- I_g : Corriente simétrica de falla inyectada en la malla de tierra.
- I_G : Corriente máxima de falla asumida por la malla.

Por otro lado, la corriente máxima se consigue a través de la corriente simétrica de malla inyectada en la malla de puesta a tierra se calcula de la siguiente forma:

$$I_g = S_f * I_f \quad (5)$$

Donde:

- S_f : Factor divisor de corriente de falla.
- I_f : Corriente rms simétrica de falla a tierra.

El factor de división de corriente (S_f) es el porcentaje de corriente que el sistema de puesta a tierra disipa directamente hacia el suelo. Según la norma IEEE Std 80-2013, este valor depende

de la relación de impedancias entre la malla de puesta a tierra y los elementos conectados al sistema eléctrico. En aplicaciones típicas, el valor de (S_f) suele encontrarse alrededor del 0.20 a 0.40, dependiendo del diseño específico y las características del sistema

El valor del factor de asimetría (D_f) se obtiene de la tabla 1 proporcionada por la norma IEEE Std 80, calculada en función de la relación del cociente de la reactancia con la resistencia del sistema, es decir X/R , y el tiempo de duración de la falla; por ejemplo, si se quiere obtener el valor de factor de asimetría cuando la función de relación es igual a 20 y la duración de la falla es de 0.10 segundos, significa que será de 1.232.

En la tabla 1 se muestran los valores típicos del factor de decremento, los cuales dependen tanto de la duración de la falla como de la relación X/R . Esta última refleja la proporción que existe entre la reactancia y la resistencia del sistema. Los datos están organizados de acuerdo con el tiempo que dura la falla, expresado en segundos y en ciclos para una frecuencia de 60 Hz, y se presentan los factores de decremento correspondientes a distintas relaciones X/R (10, 20, 30 y 40).

Tabla 1

Valores típicos del factor de asimetría.

Duración de Falla (t_f)		Factor de asimetría (D_f)			
Segundos	Ciclos a 60 Hz	X/R=10	X/R=20	X/R=30	X/R=40
0.00833	0.5	1.576	1.648	1.675	1.688
0.05	3	1.232	1.378	1.462	1.515
0.10	6	1.125	1.232	1.316	1.378
0.20	12	1.064	1.125	1.181	1.232
0.30	18	1.043	1.085	1.125	1.163
0.40	24	1.033	1.064	1.095	1.125

0.50	30	1.026	1.052	1.071	1.101
0.75	45	1.018	1.035	1.052	1.068
1.00	60	1.013	1.026	1.039	1.052

Nota. Adaptado de *IEEE Std 80-2013: IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*, IEEE Standards Association, 2013.

Si el sistema tiene valores altos de inductancia esto significaría entonces que el componente que corriente continua o corriente offset decae lentamente y la corriente de falla, por lo tanto, es cada vez más asimétrica. Esto es un problema para el SPT debido a que la componente CC no fluye a tierra y afecta a la estabilidad del sistema porque es un fenómeno que se produce entre fases. Por el contrario, si el sistema es más resistivo, esto implicaría que la corriente de falla tendría un menor impacto en los componentes eléctricos del sistema. (Beltrán Espinoza & Luna López, 2023)

2.12.2. Cálculo del calibre del conductor

El cálculo preciso de la sección del conductor en un sistema de puesta a tierra debe garantizar que su capacidad de conducción resistive los cortocircuitos temporales sin que se produzcan daños por sobretemperatura ni por fuerzas mecánicas. Al seleccionar un conductor con la sección adecuada, se logra que la energía térmica desarrollada esté debajo de los límites que podrían causar fusión, deterioro del aislamiento o interrupción del lazo de tierra. Tal estará dando protección no solo a los equipos, sino que, además, disminuirá la resistencia de puesta a tierra, favoreciendo una diseminación ordenada y veloz de la corriente hacia el terreno, en cumplimiento con los umbrales de seguridad dictados por la normativa vigente.

Para estimar el área mínima del conductor se puede utilizar una fórmula empírica ampliamente aceptada en el diseño de SPT, que relaciona la corriente de falla, el tipo de material conductor y el tiempo de duración de la falla. Esta expresión de cálculo se obtiene con constantes inherentes al tipo de material como los de la tabla 2 y cuya fórmula se refleja en la ecuación 6.

$$A_{MCM} = I_f * K_f * \sqrt{T_c} \quad (6)$$

Donde:

- A_{MCM} : Área del conductor en MCM.
- I_f : Corriente asimétrica, se utiliza la mayor registrada.
- K_f : Constante del material dado a $T_a = 40$ °C.
- T_c : Duración de la corriente en segundos.

En la tabla 2 se exponen las características físico-eléctricas de los materiales comúnmente empleados en la edificación de sistemas de puesta a tierra: cobre, acero galvanizado y aluminio. La recopilación sistemática de estas propiedades permite fundamentar la elección del conductor más idóneo en función de las circunstancias particulares de funcionamiento, la intensidad probable de la corriente de falla y las normativas de seguridad eléctrica pertinentes.

Tabla 2

Constantes para determinar el área del conductor.

Descripción	α_r	K_0	$T_m(^{\circ}\text{C})$	ρ_r	$TCAP$	K_f
Cobre, recocido	0.00393	234	1083	1.72	3.42	7
Cobre comercial	0.00381	242	1084	1.78	3.42	7.06
Cobre estirado	0.00378	245	1084	4.4	3.85	10.45

Cable de acero revestido de cobre	0.00378	245	1084	5.86	3.85	12.06
Varilla de acero revestida de cobre	0.00378	245	1084	8.62	3.85	14.64
Aluminio de grado EC	0.00403	228	657	2.86	2.56	12.12
Aluminio aleación 5005	0.00353	263	652	3.22	2.6	12.41
Aluminio aleación 6201	0.00347	268	654	3.28	2.6	14.47
Cable de acero revestido de aluminio	0.0036	258	657	8.48	3.58	17.2
Acero 1020	0.00316	605	1510	15.9	3.28	15.95
Varilla de acero revestida de acero inoxidable	0.0016	605	1400	17.5	4.44	14.62
Varilla de acero revestida de zinc	0.0032	293	416	20.1	3.93	28.93
Acero inoxidable	0.0013	749	1400	72	4.03	30.5

Nota. Adaptado de *IEEE Std 80-2013: IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*, IEEE Standards Association, 2013.

Al momento de elegir el conductor adecuado es necesario considerar cuatro aspectos fundamentales: su capacidad de conducción eléctrica, el punto de fusión, el peso del material y el valor Kf , que indica cómo responde frente al calor. Estos factores determinan si el conductor podrá transportar corriente sin sobrecalentarse o dañarse en caso de un cortocircuito. Un buen ejemplo es el cobre, ya que presenta una buena conductividad y un punto de fusión suficientemente alto para soportar las temperaturas que se alcanzan durante las fallas por lo que lo convierte en uno de los materiales más seguros y confiables.

La correcta selección del conductor también implica considerar su resistencia a la corrosión, sobre todo en ambientes agresivos como zonas costeras, industriales o con suelos de alta humedad o acidez. En tales condiciones, se requiere un material que conserve su capacidad de

conducción a lo largo del tiempo, evitando pérdidas por oxidación o fallos por degradación mecánica. (Guillermina, 2019)

Adicionalmente, el valor del Kf incluido en la tabla es clave para determinar el área mínima necesaria del conductor, ya que este valor integra propiedades como la resistividad, la capacidad calorífica y la densidad del material. De este modo, la Tabla 2 constituye una herramienta de referencia para diseñar sistemas de puesta a tierra confiables, eficientes y ajustados a las exigencias normativas vigentes.

2.12.3. Cálculo de la resistencia total de la malla

Según el Institute of Electrical and Electronics Engineer (IEEE) (2013) indica que la ecuación 7 se utiliza para calcular la resistencia total de la malla de puesta a tierra R_g en función de las características geométricas de la malla, la resistividad del terreno y otros factores relacionados con el diseño. La resistencia es un parámetro clave en el diseño de sistemas de puesta a tierra, ya que afecta directamente la capacidad del sistema para disipar corrientes de falla y garantizar la seguridad.

$$R_g = p \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (7)$$

Donde:

- p : Resistividad del terreno (Ohm-metros).
- L_T : Longitud total de los conductores enterrados en la malla (metros). Incluye todas las conexiones de la malla (Varillas y Conductor).

- A : Área ocupada por la malla (metros cuadrados).
- h : Profundidad de enterramiento de la malla (metros).

2.12.4. Cálculo de tensión de paso y de toque

Es fundamental calcular la tensión de paso y la tensión de contacto en un sistema de puesta a tierra porque estos valores determinan si las condiciones del sistema son seguras para las personas y los equipos durante una falla eléctrica. La energía eléctrica que puede aparecer al dar un paso debido a la diferencia de potencial (tensión de paso) o entre una parte del cuerpo que toca un equipo y el suelo (tensión de contacto) se produce si hay problemas en la red y se llama corriente de falla. Cuando esta energía es más alta de lo que el cuerpo puede resistir, entramos en el territorio de una descarga eléctrica que puede ser muy peligrosa y también puede dañar cualquier equipo en los alrededores. Por eso, hacer el cálculo es clave y nos ayuda a diseñar un sistema que no entregue más de lo que el cuerpo puede aguantar. Así, se mantiene a la gente a salvo y los dispositivos en buen estado, y, de paso, se cumplen normas internacionales, una de ellas el IEEE Std 80.

Este análisis es esencial en el diseño de subestaciones, plantas industriales y cualquier instalación eléctrica crítica. La ecuación 8 es la proporcionada por la IEEE para el cálculo de la tensión de paso mientras que la ecuación 9 es para el cálculo de la tensión de toque.

$$E_p = (1000 + 6C_s * p_s) \frac{0.116}{\sqrt{T_s}} \quad (8)$$

Donde:

- E_p : Tensión de paso.
- p_s : Resistividad de la capa superficial del material del suelo, es decir, el que está por encima de la malla de puesta a tierra.

- C_s : Factor de aumento por material superficial.
- T_s : Tiempo de duración de la falla.

$$E_t = (1000 + 1.5C_s * p_s) \frac{0.116}{\sqrt{T_s}} \quad (9)$$

Donde:

- E_t : Tensión de toque.
- p_s : Resistividad de la capa superficial del material del suelo.
- C_s : Factor de resistencia de contacto por material superficial.
- T_s : Tiempo de duración de la falla.

2.12.5. Cálculo del gradiente de potencial

El cálculo del gradiente de potencial es esencial en sistemas de puesta a tierra para garantizar la seguridad y funcionalidad del sistema durante condiciones de falla eléctrica. Este parámetro evalúa la distribución de potenciales en la superficie del suelo, asegurando que los valores resultantes no representen un riesgo para las personas o equipos. La fórmula utilizada para este cálculo, presente en la norma IEEE Std 80, es:

$$GPR = I_G * R_G \quad (10)$$

Donde:

- GPR : Elevación del potencial de tierra.
- I_G : Corriente máxima de falla.
- R_g : Resistencia del sistema de puesta a tierra.

Los sistemas de puesta a tierra deben enfocarse en cumplir con los criterios de seguridad, es decir los valores de tensión de paso y de toque deben ser mayores a los valores de elevación de

potencial de tierra. Se usa estos parámetros fundamentados en el criterio de seguridad que es establecido por normativas como la canadiense donde se pone como prioridad frente a valores preestablecidos de resistencia del sistema en el que no se toma en cuenta los materiales usados en la superficie en contacto directo con las personas. (Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2007)

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

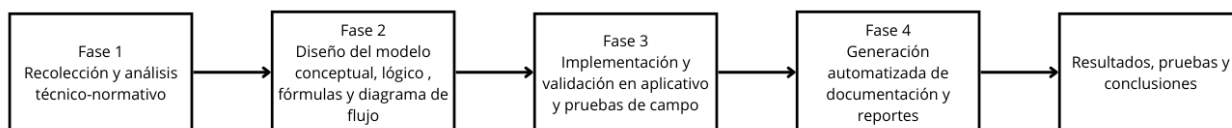
3.1. Enfoque metodológico

El desarrollo metodológico de esta investigación se estructuró en fases secuenciales que garantizan la coherencia entre el planteamiento del problema, la aplicación de fundamentos normativos y la validación experimental. Tal como se muestra en el diagrama de bloques de la figura 10, el proceso inicia con la definición de los objetivos y la adopción de un enfoque descriptivo–explicativo, que orienta la recolección y análisis de información técnica y normativa.

Posteriormente, se construye el modelo conceptual del sistema, se implementa la solución mediante programación en Python y se valida mediante pruebas de campo, contrastando los resultados medidos con los calculados. Finalmente, se automatiza la generación de reportes técnicos que integran los datos obtenidos, conduciendo a la presentación de los resultados, conclusiones y recomendaciones.

Figura 10

Diagrama de bloques de las fases de la metodología



Nota. Elaborado por los autores.

El presente proyecto utiliza un enfoque descriptivo-explicativo que resulta pertinente para la creación de una aplicación que automatice el dimensionamiento de sistemas de puesta a tierra

(SPT). Esta elección metodológica se fundamenta en la necesidad de articular un análisis pormenorizado de la normativa técnica vigente con un modelo capaz de generar resultados empíricos precisos y de fácil aplicación.

La parte descriptiva del proyecto tiene como objetivo la revisión bibliográfica y normativa, los procesos constructivos necesarios y la investigación inherente a la instalación una puesta a tierra correcta. Esta búsqueda minuciosa de cada uno de los aspectos revisados proporciona los cimientos teóricos y prácticos necesarios para el consecuente desarrollo del aplicativo.

El componente explicativo, en cambio, se ocupa de validar cómo el planteamiento conceptual de la aplicación supera las limitaciones de los procedimientos manuales y de los instrumentos actualmente en circulación. Al amalgamar bases de datos normativas y formulaciones de cálculo en una plataforma unificada, el proyecto logra simplificar, estandarizar y, por ende, incrementar la precisión y la operatividad del dimensionamiento práctico frente a las técnicas aritméticas aisladas que predominan en el ejercicio profesional.

3.2. Fases del desarrollo de la herramienta

Como se señala en la fase inicial, mostrada en el primer bloque de la figura 10, se procede a la recolección sistemática de información pertinente relativa a los principios teóricos, a los criterios técnicos y a la normativa que rige el diseño de sistemas de puesta a tierra. Se confrontan normas internacionales, tales como la IEEE Std 80 y 81, con la legislación nacional en vigor, con el propósito de identificar los parámetros de diseño, de seguridad y de operatividad que dirigirán en su totalidad el proceder investigativo.

Con la bibliografía debidamente organizada, se procede a la elaboración del modelo conceptual y lógico mediante el desarrollo de algoritmos. Además, en esta etapa se especifican las

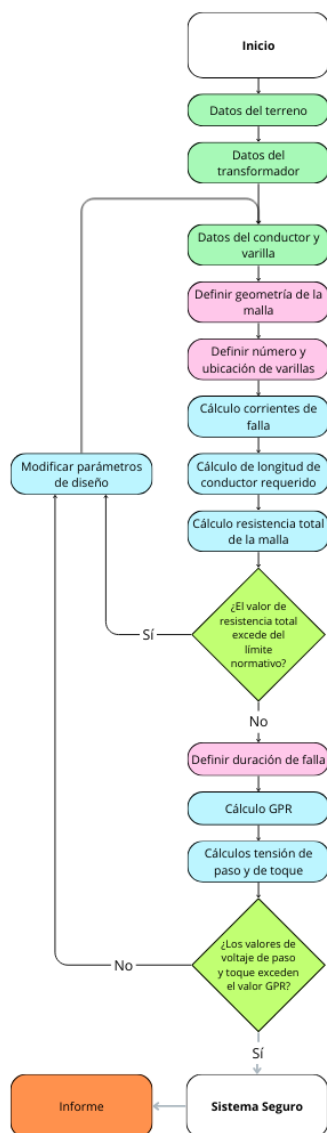
ecuaciones de cálculo, se establecen las interdependencias entre las magnitudes básicas. Para ello se elaboró un diagrama de flujo con el que se pretende establecer de forma clara y secuencias los pasos necesarios para la programación del sistema informático y cómo este opera con el usuario hasta el objetivo final que es el reporte y documentación del proceso realizado. Por lo que se jerarquizaron las fases del procedimiento en que se inicializa con la indagación de datos iniciales de características del transformador, terreno disponible conductores y la geometría de la malla propuesta, entre otros.

El modelo conceptual del programa se despliega en múltiples fases, tal como se sintetiza en el diagrama de flujo que se presenta en la figura 11. Este esquema orienta al usuario con el objetivo de obtener la producción de un informe exhaustivo que comprueba el apego del sistema a los criterios de seguridad que se han investigado previamente en la fase 1 de la metodología ya mencionada.

En la etapa subsiguiente, se lleva a cabo el diseño del aplicativo informático, implementado en Python, el cual incorpora de forma cohesiva los procedimientos de cálculo y el modelo previamente formulado. A continuación, se procede a la validación experimental a través de ensayos de campo, que contemplan la edificación de la malla de puesta a tierra y la determinación de la resistencia efectiva del sistema; por último, los datos medidos son confrontados con los resultados ofrecidos por el programa y dispuestos para el contraste.

Figura 11

Diagrama de flujo utilizado en la programación de la herramienta



Nota. Elaborado por los autores.

Los resultados del proceso experimental, junto a los de la simulación computacional, se presentan de manera consolidada, subrayando las concordancias y las discrepancias entre ambas. A partir de este análisis se derivan conclusiones que analizan la efectividad de la metodología y se

proponen recomendaciones orientadas a futuras aplicaciones y a la mejora continua del sistema de puesta a tierra.

Una vez terminado y validado el aplicativo en cuanto a cálculos confiables, se incorpora un módulo destinado a la generación automática de reportes para cumplir el objetivo final del proyecto. Este elemento agrupa los resultados en tablas, gráficos y análisis técnicos, lo que simplifica la interpretación de los datos y asegura la uniformidad en la presentación de los resultados. La documentación consigna magnitudes de resistencia, tensiones de paso y contacto, además de ilustraciones del gradiente de potencial.

3.3. Recursos Utilizados

Para la implementación de la malla que se pretende construir, y para la producción del aplicativo informático que se ha desarrollado, se han integrado diversos recursos que componen desde el talento humano, material y herramientas tecnológicas. Se expone a continuación la caracterización precisa de los recursos empleados en las fases sucesivas del proyecto.

3.3.1. Software

El aplicativo informático fue diseñado en el lenguaje de programación Python, debido a su versatilidad, capacidad para manejar cálculos complejos y su facilidad para integrar módulos gráficos y de exportación de datos gracias a un vasto catálogo de librerías. La elección de este lenguaje de programación fue en permitió que su implementación sea mucho más sencillo y escalable para, en un futuro, integrar nuevas funciones en otras versiones.

3.3.2. Equipo humano

El desarrollo del proyecto estuvo a cargo de dos estudiantes de ingeniería eléctrica, quienes lideraron tanto el diseño y la implementación del programa como las pruebas de campo en el

ámbito constructivo del mismo. Sus roles incluyeron la programación, el análisis de datos y la documentación del proyecto..

3.3.3. *Materiales y herramientas*

Los materiales de la tabla 3 se emplearon en la construcción de la malla física con fines didácticos, para ello se emplearon materiales comerciales que son comúnmente usados en una malla para un sistema de transformación. Se adicionó cemento conductivo con fines constructivos, pero es un elemento que se puede omitir si la resistividad del suelo o las condiciones climáticas de la zona son óptimas.

Tabla 3

Lista de materiales y costos estimados para la implementación del sistema de puesta a tierra.

N.º	Material / Herramienta	Descripción / Especificación	Cantidad	U	Precio Unitario (USD)	Precio Total (USD)
1	Conductor de cobre	Desnudo Calibre 2/0 AWG	12,5	M	13,63	170,38
2	Varilla de cobre	Diámetro 5/8" Longitud 1,80m Alta Camada	4	U	14,28	57,12
3	Soldadura exotérmica	Presentación de 125 gramos	4	U	5,36	21,42
4	Tubo de PVC	Diámetro 4 pulgadas 3m	1	M	2,74	2,74
5	Tapa de PVC	Compatible con tubo de 4 pulgadas	4	U	0,67	2,68
6	Gem P	Cemento conductivo para puesta a tierra 11Kg	1	U	15,36	15,36
TOTAL, IVA Incl.					\$ 310,16	

Nota. Los materiales seleccionados cumplen con los estándares técnicos requeridos para sistemas de puesta a tierra, garantizando propiedades como alta conductividad eléctrica, resistencia mecánica y durabilidad frente a la corrosión. Además, su disponibilidad en el mercado local facilita la implementación práctica del sistema sin comprometer la calidad ni la conformidad normativa.

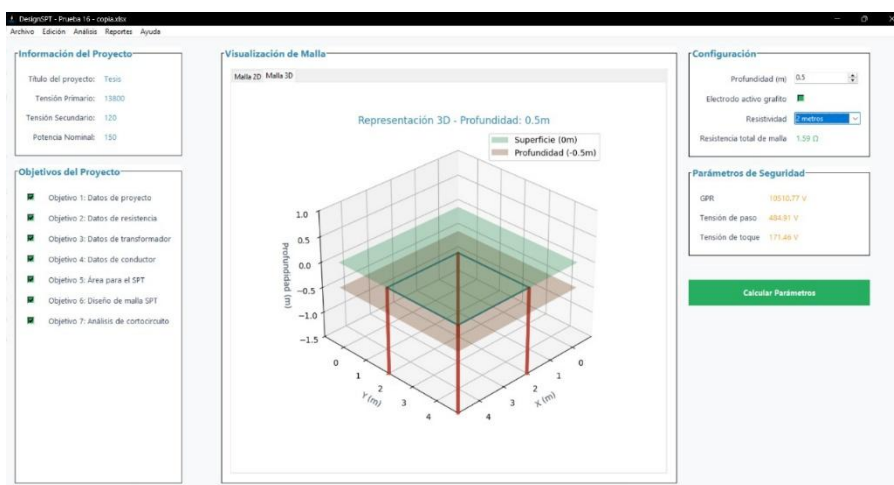
En cuanto a las herramientas usadas para la realización de la malla, se ocupó un telurómetro Fluke 1625-2 y un óhmetro ETCR2100A+. Además de herramientas menores como martillo, pala, entre otros. Por otro lado, es destacable mencionar que se ocuparon todos los implementos de seguridad para cada proceso en la construcción, ya sean guantes y botas dieléctricas, casco de seguridad y chaleco reflectivo.

3.4. Descripción de la herramienta desarrollada

Con el propósito de validar la funcionalidad y precisión de la herramienta informática desarrollada, se procedió a ejecutar el programa bajo distintos escenarios de diseño, utilizando como datos de entrada las condiciones reales del terreno y los parámetros eléctricos de la instalación.

Figura 12

Página principal del programa DesignSPT con visualización 3D de la malla.



Nota. Elaboración propia.

En este apartado se presentan los resultados obtenidos tras las simulaciones realizadas, así como una descripción general del funcionamiento del software, su estructura de cálculo y los

criterios técnicos implementados. La información recopilada permite verificar la conformidad del sistema de puesta a tierra con los límites establecidos por la normativa IEEE Std 80-2013.

Aquí se muestra la ventana principal del software DesignSPT, en la cual se visualiza en tiempo real la malla de puesta a tierra diseñada. A la izquierda se encuentran los datos ingresados por el usuario, organizados por objetivos del proyecto. En el centro, la representación 3D permite observar la disposición geométrica de la malla y la profundidad seleccionada. A la derecha, se muestra el panel de configuración y los parámetros de seguridad resultantes, como la tensión de paso, de toque y el GPR, los cuales son generados automáticamente tras ejecutar el cálculo.

Figura 13

Ingreso de datos generales del proyecto en la interfaz DesignSPT

The screenshot displays the 'Datos de Proyecto' window with the following sections and fields:

- Información del Proyecto**
 - Profesional Responsable**
 - Nombre:
 - Documento ID:
 - Reg. SENESCYT:
 - Dueño del Proyecto**
 - Nombre:
 - Documento ID:
- Detalles del Proyecto**
 - Título del Proyecto:
 - Provincia:
 - Cantón:
 - Calle Principal:
 - Calle Secundaria:
 - Referencia:
 - Fecha de inicio:
 - Fecha de finalización:
- Imagen Satelital**
 -
 - No hay imagen cargada
- Coordenadas UTM**
 - Longitud:
 - Latitud:

At the bottom of the window are three buttons: (green), (orange), and (purple).

Nota. Elaboración propia.

Esta sección del aplicativo informático permite ingresar la información básica del proyecto, incluyendo datos del profesional responsable como el nombre completo, identificación de ciudadanía y de profesional técnico; del dueño del proyecto, de la ubicación física del sistema,

entre otros. Se incorporan campos para cargar una imagen satelital y definir coordenadas UTM. La correcta digitalización de estos datos garantiza una trazabilidad adecuada y facilita la elaboración automatizada del informe técnico final.

Figura 14

Ingreso de datos técnicos del transformador en el aplicativo



Datos del Transformador

Características

Tipo: Poste

Configuración: Δ -Delta

Nº de fases: Monofásico

Conexión: ABC

Tensiones Nominales de Línea

Bobinado Primario (V):

Bobinado Secundario (V):

Potencia e Impedancia

Potencia nominal (kVA):

Impedancia CC (Máx): %

Guardar Cancelar

Nota. Elaboración propia.

En esta sección se registran las características técnicas del transformador más importantes que se encuentran asociados al sistema de puesta a tierra, incluyendo el tipo de instalación, la configuración de devanados, el número de fases, el tipo de conexión; también se introducen las tensiones nominales de línea, la potencia nominal y la impedancia de cortocircuito, datos

fundamentales para el cálculo de corrientes de falla y el posterior dimensionamiento del sistema de puesta a tierra conforme a la norma IEEE Std 80-2013.

Figura 15

Ingreso de datos de resistividad del terreno en DesignSPT

Material de Superficie

Material de superficie: Suelo pedregoso desnudo

Resistividad (Ω-m): [Selecciona material](#)

Método Wenner

Separación entre picas: Seleccionar...

Ruta 1 (Ω): Calc

Ruta 2 (Ω): Calc

Ruta 3 (Ω): Calc

Ruta 4 (Ω): Calc

Limpiar Añadir Medición

Mediciones Registradas

Separación	Ruta 1	Ruta 2	Ruta 3
1 metro	13.5	17.3	18.46
2 metros	1.033	0.773	0.813
3 metros	0.503	0.385	0.426

Guardar Cancelar

Nota. Elaboración propia.

Esta ventana permite registrar las mediciones obtenidas en campo mediante el método Wenner para determinar la resistividad del terreno. El usuario puede seleccionar el tipo de suelo, introducir los valores de resistencia medidos a diferentes separaciones entre picas (1 metro, 2 metros y 3 metros) y obtener automáticamente los resultados de resistividad promedio por ruta. Estos datos son fundamentales para garantizar la precisión del diseño del sistema de puesta a tierra, especialmente en función de las condiciones geológicas del sitio.

Figura 16

Ingreso de datos de resistividad del terreno en DesignSPT

Datos de Conductor

Datos de Varilla

Diámetro: 5/8 in

Longitud (cm): 240

Datos de Conductor

Material: Cobre, recocido, trefilado blando

Calibre: 2/0 AWG

Propiedades Calculadas

Diámetro: 0.0093 m

Sección: 67.44 mm²

Conductividad: 100 %

Resistividad (20°C): 1.72 µΩ·cm

Guardar Cancelar

Nota. Elaboración propia.

En esta ventana se permite registrar las mediciones obtenidas en campo mediante el método Wenner para determinar la resistividad del terreno. El usuario puede seleccionar el tipo de suelo, introducir los valores de resistencia medidos a diferentes separaciones entre picas (por 1 metro, 2 metros y 3 metros) y obtener automáticamente los resultados de resistividad promedio por cada ruta. Entonces, esta información resulta fundamental para garantizar la precisión del diseño del sistema de puesta a tierra, especialmente en función de las condiciones geológicas del sitio.

3.4.1. Limitaciones

Un aspecto crítico del programa radica en su dependencia del método de Wenner para la determinación de resistividades. Pese a su aceptación general y su historial de fiabilidad, dicho método puede verse influido por variables extrínsecas como la estabilidad de los electrodos y las fluctuaciones meteorológicas. Un error puntual en la lectura, o bien la recolección de datos bajo condiciones anómalas de saturación, comprometen la exactitud de los cálculos, situación que afecta de manera sistemática a cualquier estrategia de dimensionamiento de puestas a tierra.

Resulta igualmente relevante considerar que la heterogeneidad del perfil edáfico — presencia de escombreras, cambios bruscos de humedad y estratos no homogéneos— puede modificar las conductividades medidas. Por ello, se sugiere limitar las campañas de medición eléctrica a la estación más seca (verano en Ecuador), de modo que el medio físico opere en el estado menos favorable. Este enfoque garantiza que la infraestructura diseñada sobrevivirá a las condiciones más severas que el entorno pueda presentar.

3.4.2. Alcance

El software ha sido creado para soportar proyectos de dimensiones y configuraciones variables, garantizando de este modo una operatividad flexible ante requerimientos heterogéneos. No obstante, su objetivo primordial es el aterrizaje de transformadores de media tensión, por lo que todos los algoritmos de cálculo y las ayudantías de diseño han sido calibrados para esta categoría de instalación.

Desde su concepción, la aplicación priorizó el ámbito profesional, permitiendo la entrega de documentación electrotécnica conforme a los lineamientos establecidos por CNEL Manabí.

Entre sus funciones se cuentan la producción de informes técnicos exhaustivos y la opción de incorporar requisitos locales adicionales, garantizando el pleno cumplimiento normativo.

El programa presenta, además, un notable margen para la ampliación. Su arquitectura permite la inclusión de candidaturas modulares que incorporen normativas foráneas y que se adapten a disparidades en los requerimientos de presentación de proyectos en las distintas regiones del país. De este modo, se consolida como una infraestructura escalable, con capacidad para sostener la utilidad en el escenario presente y para evolucionar conforme a ampliaciones o adecuaciones requeridas por el mercado futuro.

CAPÍTULO IV

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

4.1. Medición de resistividad del suelo

Como primer paso, se llevó a cabo un examen preliminar del terreno elegido para la instalación de la malla de puesta a tierra, la cual está destinada a fines educativos y experimentales, permitiéndonos, posteriormente, comparar los resultados obtenidos en los experimentos controlados con los datos de la situación real. En esta fase se definió con claridad la superficie de intervención y, a continuación, se determinó la resistividad del suelo mediante el procedimiento de Wenner, tal como fue expuesto en el apartado teórico anterior.

4.1.1. Características del terreno

El emplazamiento del proyecto, situado en una región costera del Ecuador donde predomina un régimen climático árido, exhibía un sustrato geotécnico poco consolidado. Este estaba constituido por una matriz de arenas y gravas intercaladas con fragmentos de hormigón derivados de trabajos de relleno antecedentes, resultando en una combinación heterogénea y potencialmente inestable. Adicionalmente, la topografía superficial estaba fragmentada por piedras en grandes coberturas dispersas, circunstancia que podía conducir a una mayor resistencia al flujo de corriente eléctrica y, por ende, a un deterioro acelerado de los componentes de puesta a tierra.

4.1.2. Condiciones climáticas

En el desarrollo de la evaluación experimental, las características climáticas del entorno impusieron una limitación significativa sobre la interpretación de los resultados. La localización del terreno corresponde a una zona de costa seca, donde se registran temperaturas elevadas y la humedad relativa se mantiene por debajo de niveles críticos. Durante el periodo de mediciones, el

déficit de lluvias recientes aseguró el suelo en un estado cuya capacidad de transporte de carga eléctrica se aproxima a su límite superior.

La ausencia de humedad, tanto en las capas superficiales como en los estratos más profundos, proporcionó lecturas de resistividad que se ajustan a un escenario límite de diseño. La época de escasez y la estacionalidad del régimen de precipitaciones en la región implican que estas condiciones describen de manera certera el comportamiento del terreno durante los intervalos interanuales. El hecho de que las mediciones se hayan tomado en un estado extremo del ciclo hídrico favoreció la validación del procedimiento en un contexto operativo, de tal modo que el diseño derivado permanece operativo, aun en circunstancias climáticas desfavorables.

Figura 17

Vista general del área de medición



Nota. Imagen tomada durante la ejecución del procedimiento de medición de resistividad eléctrica del terreno mediante el método de Wenner. La actividad se llevó a cabo en la parte lateral de la Facultad de Ingeniería Civil y Electricidad de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí (ULEAM), en un área despejada seleccionada para garantizar condiciones representativas del suelo.

Una vez delimitado el terreno de estudio, el equipo de trabajo procedió a la instalación de los electrodos. Se utilizó una cinta métrica para asegurar la uniformidad en la separación que exige el método, y las picas se insertaron firmemente mediante martilleo de manera vertical para lograr buen contacto con el suelo.

Tal como ilustra la figura 17, se colocaron cuatro electrodos metálicos dispuestos en línea y separados entre sí por la misma distancia, verificada con cinta métrica para asegurar la uniformidad de la separación. La ejecución del ensayo consistió en suministrar corriente alterna a los electrodos extremos y registrar la caída de tensión entre los electrodos del medio. Se realizaron determinaciones en tres distancias de separación entre picas, equivalentes a profundidades cercanas a 1 metro, 2 metros y 3 metros, lo que posibilitó la obtención de los valores de resistencia aparente requeridos para el cálculo posterior de la resistividad promedio del medio.

Para poder asegurar la uniformidad en la separación entre electrodos, se utilizó una cinta métrica, mientras que el correcto contacto con el terreno se logró mediante la inserción firme de las picas por medio de martilleo, cuidando de no malograr las picas e intentando conservar la perpendicularidad con el nivel del suelo. Esta disposición experimental permite calcular la resistividad aparente del terreno, un parámetro determinante para definir la geometría y profundidad óptima del sistema de puesta a tierra.

Figura 18

Disposición de electrodos para medición de resistividad del terreno



Nota. Proceso de posicionamiento inicial de los electrodos sobre el terreno seleccionado, como parte de la preparación para aplicar el método de Wenner.

Posteriormente, se realizaron las mediciones con un telurómetro digital marca Fluke, modelo 1625-2. El equipo fue configurado de acuerdo con las especificaciones del fabricante y conectado en el orden de colores que indica el fabricante en el manual de usuario de la herramienta (verde, negro, rojo y azul). Para evitar interferencias, se ubicó sobre una superficie limpia y llana.

Figura 19

Medición de resistividad del terreno con telurómetro



Nota. El valor de 13.5Ω mostrado en la imagen corresponde a la medición del Perfil 1 especificada en la tabla 4 a 1 m de distancia entre electrodos, bajo el método de Wenner. Esta lectura valida el dato registrado en la Tabla 4 para esa profundidad específica.

La primera lectura, que corresponde a una separación de 1 metro entre electrodos, arrojó un valor de 13.5 ohmios en el telurómetro. Este dato fue registrado como parte de los valores que son necesarios para el posterior cálculo de la resistividad promedio del terreno, que es un dato clave en el diseño técnico del sistema.

Figura 20

Medición de resistividad del terreno con telurómetro

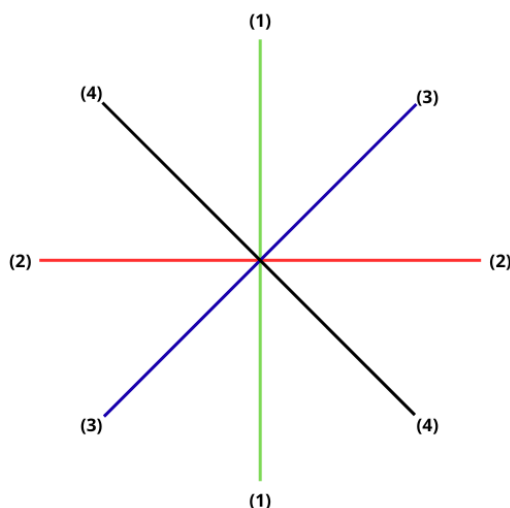


Nota. Medición de 1.030Ω tomada con telurómetro Fluke 1625-2 a 2 metros de separación en el perfil 1 especificada en la tabla 4, realizada en el área lateral de la Facultad de Ingeniería Civil y Electricidad.

Para complementar el análisis del subsuelo, se definieron cuatro perfiles de medición orientados en direcciones horizontal, vertical y diagonal (0° , 45° , 90° y 135°). Este enfoque permitió caracterizar mejor la variabilidad del terreno.

Figura 21

Representación esquemática de los perfiles de medición en el terreno



Nota. Se asignaron cuatro perfiles en los que se consideró el terreno de manera horizontal, vertical y en sus dos diagonales con el objetivo de abarcar la mayor parte del terreno y obtener resultados más precisos en el momento de aplicar el método para la medición de resistencia del terreno.

Los valores medidos en los distintos perfiles se recopilaron en la tabla 4, los cuales evidencian una reducción progresiva de la resistencia conforme aumenta la profundidad, típica de suelos estratificados.

Tabla 4

Mediciones de resistencia del terreno por perfil y profundidad mediante método de Wenner.

Perfil	Profundidad	1 metro	2 metros	3 metros
Perfil 1		13.5	1.033	0.503
Perfil 2		17.3	0.773	0.385
Perfil 3		18.46	0.813	0.426

Perfil 4	7.39	0.961	0.39
----------	------	-------	------

Nota. Las mediciones se realizaron con telurómetro digital Fluke siguiendo el método de Wenner, bajo condiciones controladas de campo, los valores mostrados son ohmios.

4.2. Ingreso de datos en el aplicativo

Una vez finalizado el proceso de medición de la resistividad del terreno mediante el método de Wenner, los datos obtenidos fueron sistemáticamente ingresados en la interfaz de la herramienta informática desarrollada. Este ingreso se efectuó a través del módulo correspondiente, donde se registraron las distancias entre electrodos y los valores de resistencia medidos con el telurómetro.

4.2.1. *Ingreso de datos de mediciones del terreno*

La aplicación procesó estos datos para calcular automáticamente la resistividad aparente del terreno a distintas profundidades a través de la ecuación 3. A continuación, los valores se almacenaron y utilizaron por el sistema para generar los perfiles de resistividad, que son necesarios para el dimensionamiento preciso del sistema de puesta a tierra por lo que este proceso permitió que se asegure que las condiciones reales del suelo fueran correctamente representadas en los cálculos que realiza el programa, haciendo que se garantice la confiabilidad del diseño final.

Figura 22

Ingreso de datos de la resistencia en la herramienta informática

Datos de Resistencia

Información de Resistencia

Material de Superficie

Material de superficie: Suelo pedregoso desnudo

Resistividad ($\Omega\cdot m$): 1500 - 3000

Mediciones Registradas

Separación	Ruta 1	Ruta 2	Ruta 3
1 metro	13.5	17.3	18.46
2 metros	1.033	0.773	0.813
3 metros	0.503	0.385	0.426

Método Wenner

Separación entre picas: Seleccionar...

Ruta 1 (Ω): Pica

Ruta 2 (Ω): Pica

Ruta 3 (Ω): Pica

Ruta 4 (Ω): Pica

Limpiar Añadir Medición

Guardar Cancelar

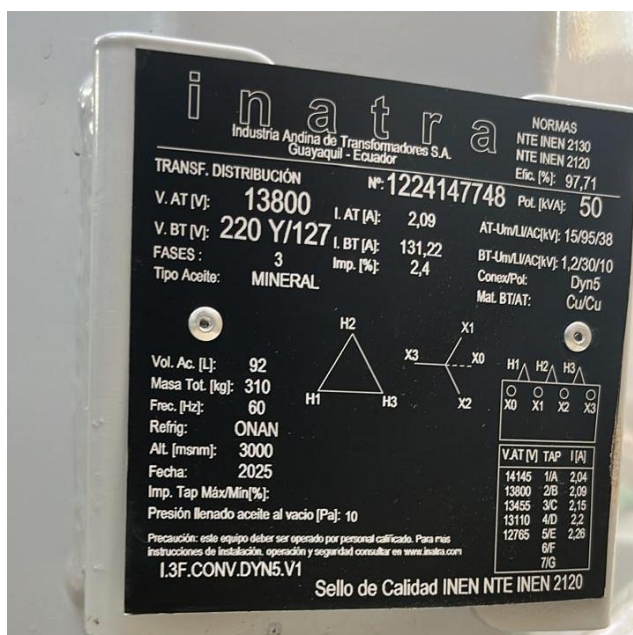
Nota. Captura de ventana de aplicativo para el ingreso de los datos obtenidos con el método Wenner en el terreno escogido. En la ventana se puede ver cómo se encuentran registradas las mediciones y el material de superficie.

4.2.2. Ingreso de datos de transformador ficticio

Para efectos de validación del funcionamiento del aplicativo desarrollado, se procedió al ingreso de datos correspondientes a un transformador no instalado físicamente, pero cuyas especificaciones técnicas son reales. En este caso, se utilizó como referencia un transformador de distribución de 50 kVA fabricado por Industria Andina de Transformadores S.A. (INATRA), empresa reconocida en el mercado ecuatoriano.

Figura 23

Placa de características de transformador de 50 kVA del fabricante INATRA



Nota. Fotografía realizada a un transformador nuevo.

Este equipo cuenta con un voltaje en el bobinado primario de 13.800 V y un secundario de 220 Y/127 V, configuración de conexión Dyn5, tres fases, frecuencia de 60 Hz, y una impedancia de 2.4 %. La información fue tomada directamente de la placa de características del transformador y cargada en la interfaz del software.

Figura 24

Ingreso de datos del transformador en la herramienta informática

Datos del Transformador

Información de Transformador

Características

Tipo: Poste

Configuración: Δ -Y

Nº de fases: Trifásico

Conexión: ABC

Tensiones Nominales de Línea

Bobinado Primario (V): 13800

Bobinado Secundario (V): 220

Potencia e Impedancia

Potencia nominal (kVA): 50

Impedancia CC (Máx): 2.4 %

Guardar **Cancelar**

Nota. Captura de ventana de aplicativo para el ingreso de los datos del transformador requerido para nuestro caso.

Entonces, la información obtenida de la placa de características del transformador fue la referencia para tomar los datos e ingresar en la interfaz correspondiente del aplicativo informático, habilitando el cálculo posterior de la corriente de falla y otros parámetros eléctricos requeridos para el diseño. A través de esta prueba, se comprobó la utilidad del software no solo para procesar los datos del transformador, sino también para integrarlos con los valores de resistividad del terreno y determinar con precisión las características óptimas de la malla de puesta a tierra.

4.2.3. Ingreso de datos de conductor

Como parte del proceso de diseño del sistema de puesta a tierra, se procedió al ingreso de los datos del conductor en el módulo correspondiente del aplicativo. En esta etapa se seleccionó una varilla de cobre de 5/8 pulgadas de diámetro y 180 cm de longitud, junto con un conductor de cobre recocido, trefilado blando, en calibre 2/0 AWG.

Figura 25

Ingreso de datos del conductor y varilla de puesta a tierra en la herramienta informática

The screenshot shows a mobile application window titled "Datos de Conductor". The window has a header bar with a lightning bolt icon and a close button. Below the header, the title "Informacion de Conductor" is displayed with a help icon. The main content area is divided into three sections: "Datos de Varilla", "Datos de Conductor", and "Propiedades Calculadas".

Datos de Varilla

Diámetro:	5/8 in
Longitud (cm):	180

Datos de Conductor

Material:	Cobre, recocido, trefilado blando
Calibre:	2/0 AWG

Propiedades Calculadas

Diámetro:	0.0093 m
Sección:	67.44 mm ²
Conductividad:	100 %
Resistividad (20°C):	1.72 μΩ·cm

At the bottom of the window, there are two buttons: "Guardar" (green) and "Cancelar" (red).

Nota. Captura de ventana de aplicativo para el ingreso de los datos del conductor requerido para nuestro caso.

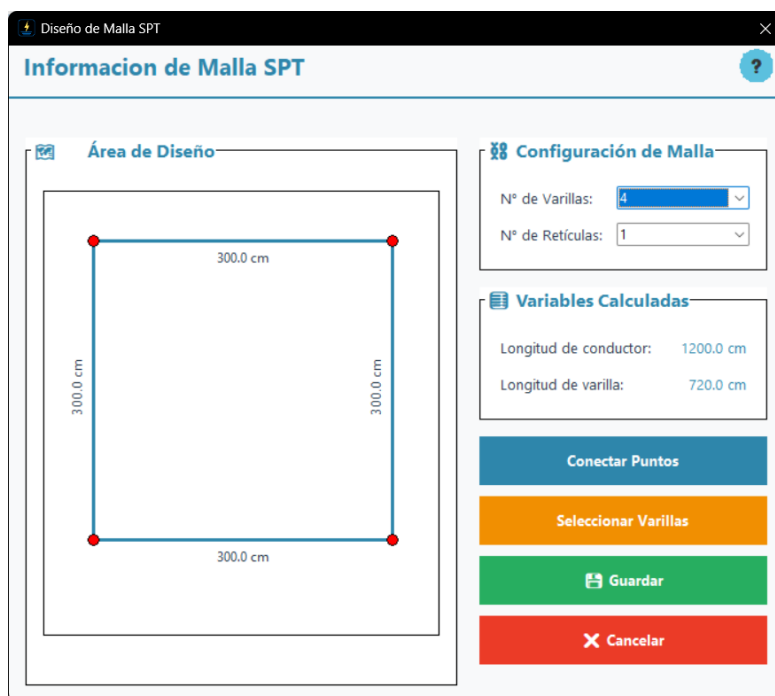
Una vez ingresada esta información, la herramienta calculó automáticamente las propiedades eléctricas del conductor, tales como el diámetro en metros, la sección transversal, la resistividad a 20 °C y la conductividad relativa del material. Estos parámetros son fundamentales para asegurar que el conductor pueda soportar adecuadamente la corriente de falla sin comprometer la integridad del sistema.

4.2.4. Configuración de la malla

Con el propósito de avanzar en la validación del software, se introdujo la descripción geométrica tanto del terreno como de la malla de puesta a tierra a examinar. Para el presente análisis se optó por una malla cuadrangular de 3 metros de lado, configuraciones que son frecuentemente elegidas. La disposición adoptada incluyó cuatro electrodos en disposición vertical, colocados en las esquinas del cuadrado.

Figura 26

Diseño geométrico de la malla de puesta a tierra en el aplicativo



Nota. Captura de ventana de aplicativo para el ingreso de los datos de la malla y su configuración para nuestro caso.

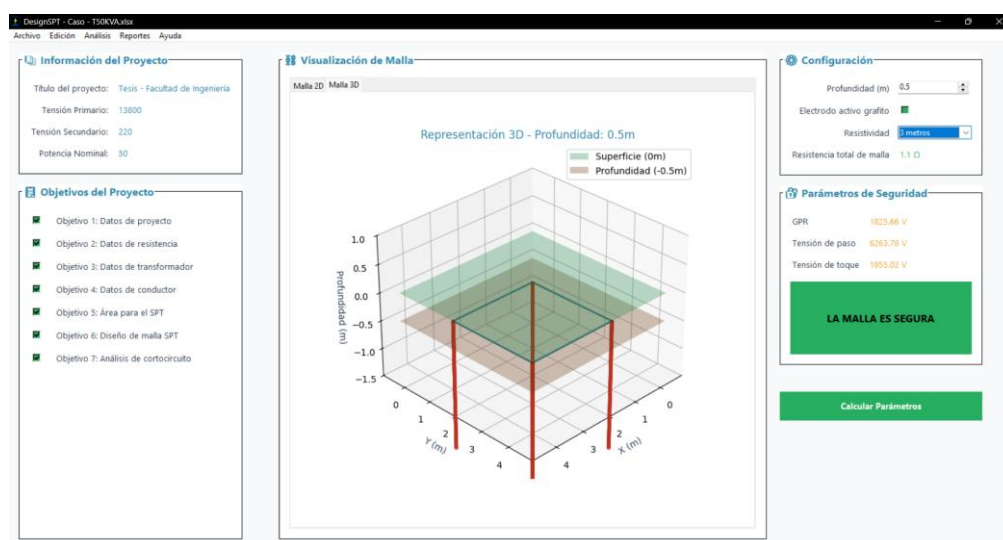
La herramienta calculó de manera automática la longitud total del conductor que es necesario, que fue de 12 metros, así como la longitud total de las varillas, que correspondió a 7.2 metros. Esta etapa fue fundamental para simular el comportamiento eléctrico del sistema completo y verificar la integración entre geometría, materiales y parámetros eléctricos ingresados.

4.3. Resultados de la aplicación

Una vez completado el ingreso de todos los datos requeridos en el aplicativo, incluyendo las características del transformador, valores de resistividad del terreno, propiedades del conductor, geometría de la malla y configuración del sistema. Entonces se procedió con el cálculo automatizado de los parámetros de seguridad del sistema de puesta a tierra. Todos los objetivos del proyecto fueron cumplidos exitosamente, tal como se indica en el panel lateral izquierdo de la interfaz.

Figura 27

Diseño geométrico de la malla de puesta a tierra en el aplicativo



Nota. Captura de ventana de aplicativo para el ingreso de los datos de la malla y su configuración para nuestro caso.

En la parte central de la pantalla se observa la representación tridimensional de la malla diseñada, ubicada a una profundidad de 0.5 m, con varillas verticales. Se puede apreciar una visualización clara de la superficie del terreno y los niveles de profundidad. La herramienta también muestra, en la parte derecha de la interfaz, los resultados calculados, destacando tres parámetros fundamentales para la validación del sistema:

- **GPR (Ground Potential Rise):** 1825.66 V
- **Tensión de paso:** 623.78 V
- **Tensión de toque:** 1955.02 V

Estos valores fueron evaluados de acuerdo con los límites establecidos por la normativa IEEE Std 80, y como resultado, el sistema emitió un mensaje indicando que “LA MALLA ES SEGURA”, lo cual valida que el diseño propuesto cumple con los criterios mínimos de seguridad eléctrica para personas y equipos. El resultado de la resistividad promedio del terreno es de $1.1 \Omega \cdot m$.

4.4. Validación experimental del método de cálculo mediante la construcción de una malla de puesta a tierra

Una vez establecidos los fundamentos teóricos del método de Wenner y de los sistemas de puesta a tierra, se procedió a validar la aplicación informática mediante la construcción real de una malla de puesta a tierra en condiciones controladas. Esta fase experimental tuvo como objetivo contrastar los parámetros eléctricos que serán calculados por la herramienta informática con los

valores medidos en campo, asegurando que el modelo teórico implementado en el software refleje adecuadamente el comportamiento real del sistema.

Figura 28

Unión mediante soldadura exotérmica en conductor de cobre desnudo



Nota. Imagen de Elaboración propia que muestra la conexión de los conductores de cobre del sistema de puesta a tierra, realizada mediante soldadura exotérmica para garantizar una unión eléctrica y mecánica duradera.

Concluida la instalación de la malla de puesta a tierra, se procedió a medir la resistencia global del sistema ya construido. Para ello se empleó un telurómetro tipo pinza marca ETCR modelo 2100A+, el cual permite realizar la medición sin desconectar ningún componente.

Figura 29

Vista general del terreno destinado para la construcción del sistema de puesta a tierra (después)



Nota. Imagen de Elaboración propia que muestra el área intervenida para la ejecución de zanjas, correspondiente a la instalación del sistema de puesta a tierra en el sector posterior de la Facultad de Ingeniería Civil y Electricidad.

El instrumento fue aplicado directamente sobre el conductor de cobre desnudo, después de realizar las uniones mediante soldadura exotérmica entre electrodos verticales y conductores horizontales. La lectura obtenida resultante fue de 0.12 ohmios, como se puede observar en la figura 30, valor que puede evidenciar un desempeño óptimo del sistema.

Figura 30

Medición de resistencia del sistema de puesta a tierra con pinza telurimétrica



Nota. Foto capturada durante la verificación final del SPT mediante el uso de una pinza telurómetro, obteniéndose una lectura de 0.12 ohmios.

Los resultados obtenidos mediante esta validación experimental confirman que el procedimiento aplicado y los valores medidos se alinean con los resultados esperados ya que se encuentra por debajo del valor de diseño confirmando una excelente conductividad del sistema construido.

4.5. Contraste de resultados

La comparación de resultados entre el valor calculado por el software y el valor medido en campo muestra una diferencia considerable. El aplicativo arrojó una resistencia total de la malla de 1.10 ohmios, mientras que la medición realizada en la malla construida reportó un valor significativamente menor, de 0.12 ohmios. Esta diferencia se debe, en gran parte, a las condiciones reales del terreno y a los materiales empleados durante la ejecución de la obra.

Tabla 5*Tabla comparativo de resultados de resistencia teórica y real*

Método de evaluación	Resultado
Cálculo mediante software aplicativo realizado	1.10 Ω
Medición en campo (malla construida)	0.12 Ω

Durante la fase de construcción se utilizó cemento conductivo en las zonas de contacto entre las varillas y el terreno, lo cual no fue considerado en el modelo de cálculo del software. Este material mejora de manera notable la conductividad eléctrica en el entorno inmediato del electrodo, disminuyendo la resistividad aparente del suelo. Además, la medición se realizó sobre una malla recién instalada, en condiciones de compactación reciente y con un nivel de humedad favorable, lo que también influye directamente en la reducción de la resistencia medida.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el presente análisis han cumplido en su totalidad los objetivos planteados al inicio de la investigación, confirmando tanto la efectividad como la viabilidad de la herramienta computacional diseñada para el diseño de sistemas de puesta a tierra. La plataforma integrada agrupó, en un entorno unificado, los datos eléctricos, geométricos y de los materiales, lo que facilitó la cadena de computación y generó resultados.

La validación del sistema de puesta a tierra a través de su construcción ofreció datos cuantitativos con el que se evidenció el desempeño del sistema desarrollado. Es decir, se pudo hacer la comparación entre los resultados simulados y los valores medidos en el campo y se reveló una discrepancia significativa, aunque justificada. Esta variación se explica gracias a la adición de cemento conductor que mejoró de manera sustancial la resistividad del suelo. Sin embargo, los resultados obtenidos por el aplicativo informático podemos caracterizarlos por conservadores ya que el programa ofrece datos que mantienen un margen de seguridad elevado.

La inclusión de los datos reales de un transformador fue parte de una suma de resultados más precisos habilitando un contexto operativo más cercano a la realidad. Es decir, tal incorporación contribuyó a la solidez de los datos en la fase de validación del aplicativo avalando su importancia y justificación.

La materialización de la herramienta informática propuesta representa un avance relevante en el campo de los sistemas de puesta a tierra, al presentar un recurso técnico que integra automatización, capacidad de ajuste a las condiciones geográficas y operatividad práctica. Los ensayos efectuados corroboran su validez para respaldar proyectos de ingeniería eléctrica, resultando idónea tanto en las etapas de diseño preliminar como en los procedimientos de verificación y calibración de las soluciones ya implantadas.

RECOMENDACIONES

El aplicativo informático está diseñado para las fases iniciales del diseño de un sistema de puesta a tierra de un proyecto eléctrico, por lo que los resultados deben ser revisados y contextualizadas a través de un profesional eléctrico en su construcción y verificación con mediciones in situ y el uso de alternativas constructivas que se aseguren en la práctica, redundancia y eficiencia operacional.

Para las mediciones de resistencia del terreno, se debe considerar realizarlas en la ubicación cercana a la futura ubicación del sistema de puesta a tierra para que los resultados sean más confiables respecto las medidas realizadas. También tener en cuenta la aridez del suelo, por ejemplo, en el litoral ecuatoriano conviene que se programe las mediciones una vez finalizado un ciclo prolongado de sequía de modo que el valor obtenido se represente en el estado más crítico del perfil geológico.

Se aconseja efectuar varias mediciones a distintas profundidades y en múltiples orientaciones, especialmente en suelos heterogéneos o donde se acometan rellenos con materiales no compactos. Esta estrategia brinda resultados más íntegros de la resistividad lateral y contribuye a la reducción del error inherente a cualquier discontinuidad o estrato adulterado en el sustrato investigado.

Por último, se invita a instituciones educativas y profesionales del sector eléctrico a aprovechar esta herramienta en proyectos académicos, de investigación o en la práctica profesional, ya que representa una alternativa eficiente y técnica para el diseño de sistemas de puesta a tierra seguros y conformes con la normativa vigente.

BIBLIOGRAFÍA

- Asdrúbal Herrera, J., & Castro Hernández, O. (2003, Octubre). CALCULO DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA DE UNA SUBESTACIÓN. *Scientia et Technica*, 9(22), 37-42.
<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4846270.pdf>
- Barría, O. E. (2008, junio 06). Importancia de la puesta a tierra en el Sistema Eléctrico. *El Tecnológico*, 13(1), 6. <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/el-tecnologico/article/view/1/html>
- Beltrán Espinoza, D. F., & Luna López, E. G. (2023). *Diseño de un sistema puesta a tierra para aplicación en una industria utilizando la normativa IEEE 80 – 2000*. Tesis de Grado, Universidad Politécnica Salesiana. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/26010>
- Briceño, J. H. (2015). *Manual para la medición de resistividad del suelo*.
https://www.researchgate.net/publication/271074412_MANUAL_PARA_LA_MEDICION_DE_RESISTIVIDAD_DEL_SUELO
- Cámara de Comercio Empresarial. (2021). *Caso práctico de estudio: Cálculo de Malla de Pozo a Tierra*. Cámara de Comercio Empresarial: https://camaradecomercioempresarial.org/wp-content/uploads/wpcf7_files/46c89a061e1a1402f26cfa2fc4cdb3eet14%20-%20Mod14.pdf
- Cango Andrango, C. E., & Pichogagón Pulamarín, C. A. (2009). *Elaboración de un manual para el diseño y mantenimiento de mallas de puesta a tierra*. Escuela Politécnica Nacional, Escuela de formación de tecnólogos, Quito.
<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/8524/3/CD-1944.pdf>

Cano Plata, E. (2010). *Seguridad eléctrica en subestaciones: Aplicación de la norma IEEE Std 80-2000*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
<https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/6287>

Chauvin Arnoux Group. (2024). *Guía de la medición de tierra*. Chauvin Arnoux Group.

Universidad del Bío-Bío:
http://patricioconcha.ubb.cl/eleduc/public_www/capitulo5/mallas_de_tierra.html

Dlada, V. M., Nnachi, A. F., & Tshubwana, R. P. (2023). Design, modeling, and analysis of IEEE Std 80 earth grid design refinement methods using ETAP. *Applied Sciences*, 13(13), 7491.
[doihttps://doi.org/10.3390/app13137491](https://doi.org/10.3390/app13137491)

Domínguez Villa, E. A. (2022). *Diseño de mallas de puesta a tierra bajo la norma IEEE STD 80-2013 con macros en Excel*. Trabajo de Grado, Institución Universitaria Pascual Bravo.

EasyPower: <https://www.easypower.com/resources/article/touch-and-step-voltage-calculations>

Electric Power Research Institute (EPRI). (2021, febrero). *Effective Grounding for Inverter-Connected DER: Final Report*. Electric Power Research Institute:
https://dps.ny.gov/system/files/documents/2022/11/nyserda-final-report-on-effective-grounding.pdf?utm_source=chatgpt.com

Electricity Magnetism. (2021). *6 tipos de técnicas de puesta a tierra más comunes*.

Nuestros servicios: <https://elektrokorrosion.com.ar/sistema-de-puesta-a-tierra/>

Empresa Eléctrica Quito S.A. (EEQ). (2024). *DI-EP-P001-D001-A-12*. Guía de diseño de redes de distribución. <https://www.eeq.com.ec/documents/d/empresa-electrica-quito/parte-a-seccion-a-12-2024-10-18-signed>

Escuela de Servicios y Suministros de Agua (ESSA). (2020, mayo 31). *NTR-01 Redes aéreas de media tensión (Norma técnica de puesta a tierra)*. Macroproceso planeación empresarial.

Fluke Corporation: https://assets.fluke.com/manuals/T6____qreng0300.pdf

Geoelectric Earthing Meter. (2024, julio 11). *Qué es la resistividad del terreno y por qué es necesario un estudio geoeléctrico*. Aplicaciones Tecnológicas: <https://at3w.com/blog/que-es-la-resistividad-del-terreno-y-por-que-es-necesario-un-estudio-geoelectrico/>

Gómez, P., Silva, & Daza. (2012). *Diseño del sistema de puesta a tierra de la Universidad de la Costa aplicando las reglamentaciones vigentes*. Corporación Universidad de la Costa: <http://hdl.handle.net/11323/610>

Grupo Perteo. (2023, octubre 13). *Descubre los diferentes tipos de puesta a tierra: Guía completa para un sistema eléctrico seguro*. Sistema de puesta a tierra para los equipos electrónicos: <https://grupoperteo.es/tipos-de-puesta-a-tierra>

Guillermina, B. G. (2019). *Análisis de modelos de sistemas de puesta a tierra para diferentes electrodos y condiciones de suelos*. Universidad Politécnica Salesiana. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/18119/1/UPS%20-%20ST004379.pdf>

Ibrahimi, N. (2019). *Design and safety analysis of grounding grid for substations in arid soil conditions*. <https://doi.org/10.3390/en12244753>

Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). (2007). *IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems (Color Book® series)*. IEEE Industry Applications Society. <https://standards.ieee.org/ieee/142/3548>

- Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). (2012, 12 28). *Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System (IEEE Std 81-2012)*. IEEE Industry Applications Society. <https://standards.ieee.org/ieee/81/4889/>
- Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). (2013). *Guide for Safety in AC Substation Grounding (IEEE Std 80-2013)*. IEEE Industry Applications Society.
- <https://www.inteleclda.cl/productos/quimica/index.html>
- J&D Eléctricos. (2020). *Los 5 tipos de puesta a tierra y características*. Suministro de Materiales Eléctricos: <https://jdelectricos.com.co/tipos-de-puesta-a-tierra-y-caracteristicas/>
- Jowett, J. R. (2021, mayo 22). *Earth Resistivity Test Methods and Evaluations*. NETAWorld Journal: <https://netaworldjournal.org/earth-resistivity-test-methods-and-evaluations/>
- Llorente, M. (2009). *Sistemas de puesta a tierra*.
- Martins-Britto, A. (2020, 07). *Realistic Modeling of Power Lines for Transient Electromagnetic Interference Studies*. Universidade de Brasília, Faculdade de Teconologia. ResearchGate: <https://www.researchgate.net/publication/342916469>
- Mora Villagómez, E. G., & Muñoz Valencia, C. E. (2010). *Análisis del sistema de puesta a tierra de la Casa de la Cultura Núcleo del Guayas*. Universidad Politécnica Salesiana. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/2192>
- Ostadráhi, A. &. (2021). *Simulation of step and touch voltages in grounding systems by using COMSOL Multiphysics*. https://www.researchgate.net/figure/Potential-contour-of-the-linear-array-ground-electrode_fig14_349354605

- Paktechpoint. (2022). *Earth Rod Installation and Diagram*. Paktechpoint:
<https://paktechpoint.com/earth-rod-installation-and-diagram/>
- Para-Rayos. (2021, agosto 18). *Sistema de puesta a tierra: Funcionamiento e importancia*. para-rayos: <https://www.para-rayos.com/funcionamiento-e-importancia-de-una-puesta-a-tierra/>
- Peñafiel Padilla, H. S., & Vallejo Herrera, D. R. (2020). *Modelación y simulación de mallas de puesta a tierra utilizando el método de elementos finitos en tres dimensiones y un modelo físico real a escala*. Trabajo de titulación, Escuela Politécnica Nacional, Quito.
<https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20809>
- Pérez. (2023, abril). *Método Wenner para medición de resistividad*. Ingeniería Eléctrica Online:
<https://www.ingenieriaelectronica.com/metodo-wenner-medicion-de-resistividad/>
- Pyramid Geophysical Services Inc. (2020). *Electrical Resistivity*. Pyramid Geophysical Services:
<https://pyramidgeophysics.com/electrical-resistivity/>
- Rendueles, D. (2022). *Puesta a Tierra en Instalaciones Eléctricas: Todo lo que Necesitas Saber*. KKK Electro materiales: <https://www.kkk.es/puesta-a-tierra-en-instalaciones-electricas/>
- Retie Eléctrica. (2024, 04 20). *Sistema de puesta a tierra (Requisitos generales)*. Retie Eléctrica:
<https://retielectronica.com/requisitos-generales-puesta-tierra-retie/>
- Ruelas Gómez, R. (2024). *Teoría y diseño de sistemas de tierras según las normas oficiales mexicanas (NOM) e IEEE*. <https://www.ruelsa.com/notas/tierras/pe70.html>
- Saravanan, E. &. (2021). *Numerical Analysis of Ground Potential Rise and Fault Current Distribution in Substation Grounding Grid*.

Schneider Electric. (2018). *Puesta a tierra: conceptos y tecnologías aplicadas*. Schneider Electric

Blog: <https://bloges.se.com/energia-y-sostenibilidad/2018/09/20/puesta-a-tierra-conceptos-tecnologias/>

Sinchi, F. (2025). *Plantilla 2 Mallas de Puesta a Tierra*.

Teluometro: <https://teluometro.com/metodo-wenner/>

Vásquez Díaz, & Cristian Alejandro. (2023). *Diseño e implementación de un sistema de puesta a tierra para una industria*. Universidad Politécnica Salesiana (UPS), Ecuador.

<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/24658/1/TTS1287.pdf>

Villa-Acevedo, W., Rodríguez-Serna, J., & Saldarriaga Loaiza, J. (2013). *Estimación de parámetros del suelo de dos capas usando el método de Wenner*.

ANEXOS



MANUAL DE USUARIO

Sistema de Diseño de Puesta a Tierra

Propósito General

El presente software ha sido desarrollado con el objetivo de facilitar el diseño, dimensionamiento y validación técnica de sistemas de puesta a tierra (SPT), aplicados especialmente a instalaciones eléctricas con transformadores de distribución. A través de una interfaz gráfica intuitiva y módulos especializados, permite al usuario ingresar datos del terreno, parámetros eléctricos y configuración geométrica para obtener un diseño confiable, acorde a criterios técnicos normativos y con soporte gráfico e informes automáticos.

Público Objetivo

Este programa está dirigido a:

- Estudiantes de último nivel de la carrera de Ingeniería Eléctrica que desarrollen proyectos de titulación o prácticas profesionales.
- Ingenieros eléctricos dedicados al diseño de sistemas de protección eléctrica y puesta a tierra.
- Técnicos electricistas que deseen validar cálculos o generar informes profesionales de sus instalaciones.
- Docentes o profesionales del sector académico que busquen una herramienta pedagógica para enseñar conceptos de dimensionamiento de SPTs.

Índice General

1	Estructura general del programa	1	7.2	Variables Calculadas.....	19
1.1	Ventana principal de aplicación.....	1	8	Ventana: Análisis de Cortocircuito	20
1.2	Secciones de la Ventana Principal	1	8.1	Secciones de la Ventana.....	20
1.3	Barra de Menú Principal	4	9	Ventana: Análisis de Resistividad	21
1.4	Menú Archivo (Menú superior).....	4	9.1	Secciones de la Ventana.....	21
1.5	Menú Edición (Menú Superior).....	5	10	Ventana: configuración de reporte.....	22
1.6	Menú Análisis (Menú Superior)	6	10.1	Secciones de la Ventana.....	23
1.7	Menú Reportes (Menú Superior)	7	10.2	Funciones y Controles.....	23
1.8	Menú Ayuda (Menú Superior).....	8	11.	Ecuaciones utilizadas en el dimensionamiento de un sistema de puesta a tierra	24
2	Ventana: Información del Proyecto	8	11.1.	Cálculo de la corriente máxima de falla.....	24
2.1	Secciones de la Ventana.....	9	11.2.	Cálculo del calibre del conductor.....	24
3	Ventana: Datos de Resistencia.....	10	11.3.	Cálculo de la resistencia total de la malla	25
3.1	Secciones de la Ventana.....	11	11.5.	Cálculo del gradiente de potencial.....	26
4	Ventana: Datos del Conductor	12			
4.1	Secciones de la Ventana.....	13			
5	Datos de transformador.....	14			
6	Ventana: Geometría Definida	16			
6.1	Secciones de la Ventana.....	16			
6.2	Ventanas de Edición por Tipo de Geometría	17			
7	Ventana: Diseño de Malla SPT.....	18			
7.1	Secciones de la Ventana.....	18			

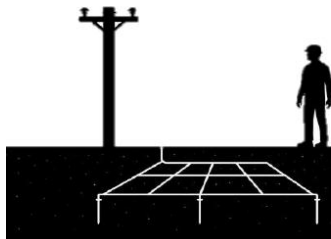
1 Estructura general del programa

1.1 Ventana principal de aplicación



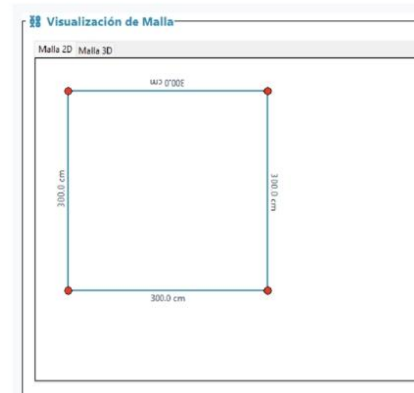
Propósito General:

La ventana principal de la aplicación tiene como objetivo brindar al usuario una visualización clara y control total sobre el diseño del sistema de puesta a tierra. Desde aquí se puede observar y configurar la malla de conductores, verificar el cumplimiento de los criterios técnicos, y acceder a las herramientas necesarias para generar el informe final del proyecto.



1.2 Secciones de la Ventana Principal

a) Vista 2D

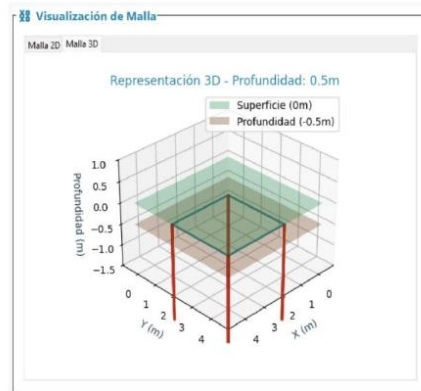


- Conductores: Representados en color azul, indican la trayectoria de los cables enterrados.
- Varillas: Indicadas en color rojo, muestran los puntos donde se insertan los electrodos verticales. Esta vista permite verificar fácilmente la distribución geométrica del sistema.

Autores:

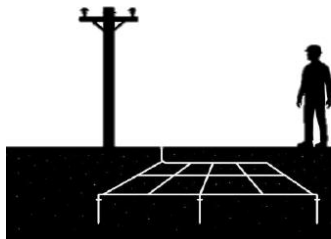
Pinargote Rosero Darwin Andrés, Baque Durán Alex Darío.
Facultad de Ingeniería Eléctrica. UIEAM 2025

b) Vista 3D



La pestaña de vista 3D ofrece una visualización tridimensional interactiva del sistema.

- El usuario puede rotar la vista haciendo clic y arrastrando dentro del área gráfica.
- Se distingue la superficie (altura 0) y la profundidad de instalación del conductor.
- Los conductores (azules) y varillas (rojas) se visualizan con su tamaño y ubicación real.
- Esta vista ayuda a evaluar la dimensión espacial y profundidad de los elementos del sistema.



c) Ventana de Objetivos

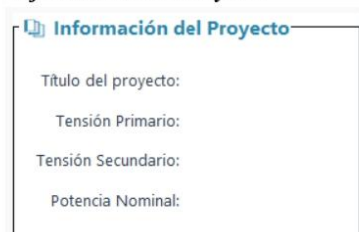
En esta sección se listan los requisitos técnicos necesarios para completar el diseño.

- Cada objetivo se marcará en verde al ser cumplido (por ejemplo, resistencia dentro del valor permitido, disposición de varillas, entre otros).
- Cuando todos los objetivos estén completados, se habilita la generación automática del informe técnico en formato Word.

Autores:

Pinargote Rosero Darwin Andrés, Baque Durán Alex Darío.
Facultad de Ingeniería Eléctrica. UIEAM 2025

d) Información del Proyecto



Información del Proyecto

Título del proyecto:

Tensión Primario:

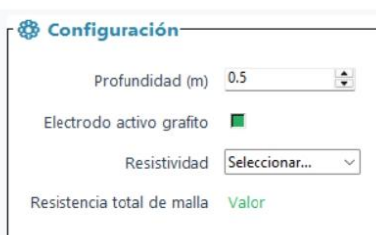
Tensión Secundario:

Potencia Nominal:

Aquí se ingresan los datos fundamentales del sistema eléctrico:

- Título del proyecto.
- Tensión del primario y del secundario del transformador.
- Potencia nominal del transformador.
- Estos datos se incluirán automáticamente en el informe técnico.

e) Configuración de Criterios de Cálculo



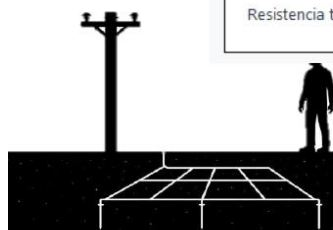
Configuración

Profundidad (m) 0.5

Electrodo activo grafito ☒

Resistividad Seleccionar...

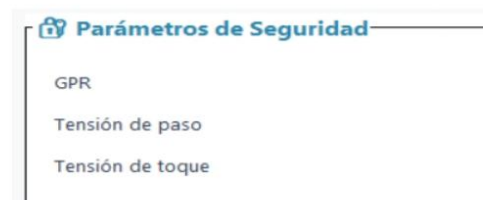
Resistencia total de malla Valor



Esta ventana permite al usuario definir los parámetros técnicos del diseño, incluyendo:

- Profundidad de la malla.
 - Uso o no de electrodo activo.
 - Inclusión de mejorador de suelo.
- Estas configuraciones impactan directamente en los resultados de los cálculos eléctricos y en el cumplimiento de los objetivos.

f) Parámetros de Seguridad



Parámetros de Seguridad

GPR

Tensión de paso

Tensión de toque

En esta sección se muestran los valores eléctricos que permiten validar la seguridad del sistema de puesta a tierra.

- **GPR (Ground Potential Rise):**
Representa el aumento de potencial del sistema durante una falla eléctrica.
- **Tensión de paso:**
Diferencia de potencial que puede existir entre los pies de una persona al caminar cerca de una falla.

Autores:

Pinargote Rosero Darwin Andrés, Baque Durán Alex Darío.
Facultad de Ingeniería Eléctrica. UIEAM 2025

- **Tensión de toque:**

Diferencia de potencial entre una estructura metálica conectada a tierra y el suelo que puede ser tocada por una persona.

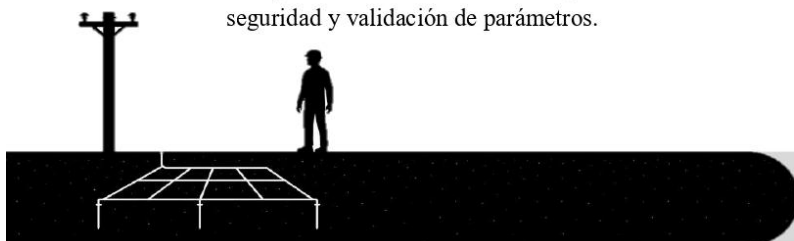
1.3 Barra de Menú Principal



En la parte superior de la interfaz de usuario se encuentra la barra de menús, desde la cual se accede a todas las funcionalidades principales del software **DesignSPT – Sistema de Puesta a Tierra**.

Los menús disponibles son:

- **Archivo:**
Permite crear nuevos proyectos, abrir archivos existentes, guardar el trabajo actual y cerrar la aplicación.
- **Edición:**
Contiene herramientas para modificar entradas previas y restablecer formularios.
- **Análisis:**
Ejecuta los cálculos eléctricos del sistema, incluyendo resistencia de tierra, tensiones de seguridad y validación de parámetros.



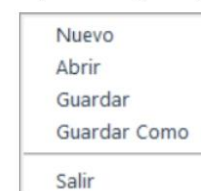
- **Reportes:**

Genera el informe técnico automático en formato Word con todos los resultados del diseño.

- **Ayuda:**

Proporciona acceso a documentación de usuario y soporte técnico básico.

1.4 Menú Archivo (Menú superior)



Propósito General

El menú Archivo permite gestionar el ciclo de vida de los proyectos dentro del programa. Aquí el usuario puede crear, abrir, guardar o cerrar proyectos con sus respectivos datos y configuraciones.

Importante:

Los archivos que maneja esta aplicación están basados en formato Excel (.xlsx), pero están codificados internamente para que solo puedan ser abiertos por el mismo programa. Esto garantiza la integridad de los datos y evita la manipulación externa no controlada.

Autores:

Pinargote Rosero Darwin Andrés, Baque Durán Alex Darío.
Facultad de Ingeniería Eléctrica. *UIEAM 2025*

Opciones del Menú

- **Nuevo:**

Inicia un nuevo proyecto en blanco. Al usar esta opción, se restablecen todos los formularios, configuraciones y campos del programa.

- **Abrir:**

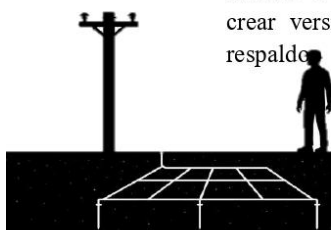
Permite cargar un archivo de proyecto previamente guardado. Solo se pueden abrir archivos generados por el mismo software, ya que contienen una estructura interna específica y codificada.

- **Guardar:**

Guarda el proyecto actual, incluyendo todos los datos ingresados, configuraciones de malla, cálculos, gráficos, etc., en un archivo codificado con extensión .xlsx.

- **Guardar Como:**

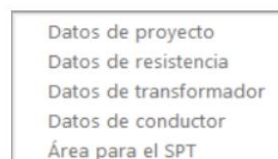
Permite guardar el proyecto actual con un nombre distinto o en una ubicación diferente. Útil para crear versiones del mismo diseño o copias de respaldo.



- **Salir:**

Cierra completamente la aplicación. Se recomienda guardar los cambios antes de salir para evitar pérdida de información.

1.5 Menú Edición (Menú Superior)



Propósito general:

El menú Edición permite acceder rápidamente a las diferentes ventanas de ingreso de datos del proyecto. Desde aquí, el usuario puede completar o modificar toda la información necesaria para el diseño del sistema de puesta a tierra (SPT), de forma ordenada y segmentada por categoría.

Opciones del Menú

- **Datos de proyecto**

Abre la ventana para ingresar la información general del proyecto, como nombre, ubicación, fechas, responsable técnico, cliente, y coordenadas UTM. También permite cargar una imagen satelital del terreno.

Autores:

Pinargote Rosero Darwin Andrés, Baque Durán Alex Dario.
Facultad de Ingeniería Eléctrica. *UIEAM 2025*

- **Datos de resistencia:**

Permite ingresar los valores medidos de resistencia del terreno utilizando el método Wenner. Incluye la selección del material superficial, la separación entre picas y las rutas de medición. Estos datos se utilizarán para calcular la resistividad del suelo.

- **Datos de transformador:**

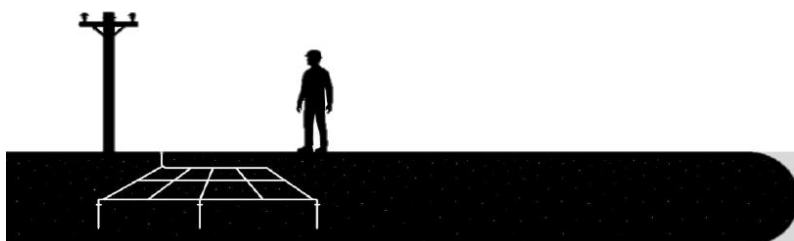
Se ingresan las características eléctricas del transformador asociado, incluyendo tipo, configuración, número de fases, tensiones de línea, potencia nominal y su impedancia.

- **Datos de conductor:**

Permite configurar las características del conductor y las varillas que formarán la malla. Aquí se eligen materiales, calibres, dimensiones y se muestran propiedades eléctricas calculadas automáticamente.

- **Área para el SPT:**

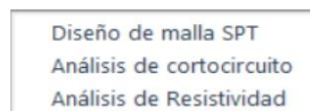
Abre la interfaz para definir la geometría del terreno donde se instalará la malla, seleccionando entre formas como rectángulo, línea o L, y permitiendo establecer sus dimensiones exactas.



- **Análisis de resistividad:**

Evalúa los datos obtenidos en campo (método Wenner) o permite simular perfiles de terreno para obtener una resistividad promedio. Es fundamental para un diseño acorde a la realidad del suelo.

1.6 Menú Análisis (Menú Superior)



Propósito general:

El menú Análisis permite acceder a las herramientas de cálculo y evaluación técnica del sistema de puesta a tierra. Desde este apartado, el usuario puede realizar simulaciones y cálculos eléctricos fundamentales para validar el diseño y evaluar el comportamiento del terreno.

Opciones del Menú

- **Diseño de malla SPT**

Abre la interfaz de diseño de la malla de puesta a tierra. Aquí se puede trazar el recorrido del conductor, ubicar varillas y calcular automáticamente la longitud de materiales requeridos según el área definida previamente.

Autores:

Pinargote Rosero Darwin Andrés, Baque Durán Alex Darío.
Facultad de Ingeniería Eléctrica. *UIEAM 2025*

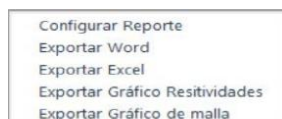
- **Análisis de cortocircuito:**

Permite calcular o ingresar los valores de corriente de falla simétrica y máxima (asimétrica), además de definir el tiempo de falla y la relación X/R del sistema. Esta herramienta es esencial para evaluar la capacidad del sistema ante eventos de cortocircuito.

- **Análisis de resistividad:**

Muestra un gráfico que representa la variación de la resistividad del terreno en función de la profundidad y las rutas de medición. El análisis visual ayuda a identificar capas del terreno y a justificar decisiones técnicas en el diseño.

1.7 Menú Reportes (Menú Superior)



Propósito general:

Desde este menú ubicado en la parte superior de la ventana principal, el usuario puede generar y exportar los informes del sistema de puesta a tierra en diferentes formatos, incluyendo documentos técnicos, hojas de cálculo y gráficos.



Opciones del Menú

- **Configurar Reporte:**

Abre la ventana para seleccionar los datos y gráficos que se incluirán en el informe final. Desde allí se puede personalizar el contenido antes de la exportación.

- **Exportar Word**

Genera un informe técnico completo en formato Microsoft Word (.docx), incluyendo datos del proyecto, configuración del sistema, cálculos realizados, gráficos y conclusiones.

- **Exportar Excel:**

Crea un archivo Excel (.xlsx) con los datos del proyecto, incluyendo resistividades, parámetros eléctricos, resultados y otras variables relevantes. Es útil para análisis adicionales o respaldos técnicos.

- **Exportar Gráfico Resistividades:**

Permite guardar el gráfico generado a partir del análisis de resistividades del suelo en formato de imagen (por ejemplo, PNG o JPG), útil para anexarlo a informes o presentaciones.

- **Exportar Gráfico de Malla:**

Guarda una imagen del diseño de la malla de puesta a tierra creada en el área de diseño, mostrando los conductores y varillas configurados

Autores:

Pinargote Rosero Darwin Andrés, Baque Durán Alex Darío.
Facultad de Ingeniería Eléctrica. *UIEAM 2025*

1.8 Menú Ayuda (Menú Superior)



Propósito general:

El menú Ayuda brinda soporte informativo al usuario. Desde aquí se puede acceder a orientación básica sobre el uso del programa, datos de contacto del equipo de desarrollo, y la información técnica sobre la versión del software.

Opciones del Menú

- Ayuda:**

Proporciona una guía resumida o una introducción rápida al uso del sistema. Incluye enlaces a manuales, tutoriales y preguntas frecuentes.

- Contactos:**

Muestra la información de contacto del equipo desarrollador, como correo electrónico, sitio web o redes de soporte. Es útil en caso de requerir asistencia técnica o reportar errores.



- Acerca de:**

Presenta los datos generales del software, incluyendo el nombre de la aplicación, versión actual, autoría y créditos. También puede incluir los términos de licencia o el año de publicación.

2 Ventana: Información del Proyecto

Propósito general:

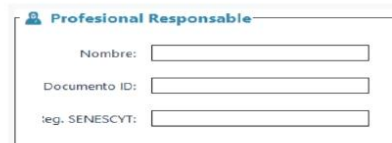
Esta ventana permite registrar todos los datos administrativos y técnicos relevantes al proyecto de puesta a tierra. La información ingresada aquí se incorpora automáticamente al informe final generado por la aplicación.

Autores:

Pinargote Rosero Darwin Andrés, Baque Durán Alex Darío.
Facultad de Ingeniería Eléctrica. *UIEAM 2025*

2.1 Secciones de la Ventana

a) Profesional Responsable



Formulario Profesional Responsable:

Nombre:

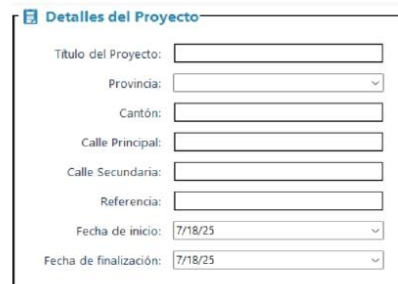
Documento ID:

leg. SENESCYT:

En este apartado se ingresan los datos del técnico o ingeniero a cargo del diseño del sistema.

- **Nombre:** Nombre completo del profesional.
- **Documento ID:** Cédula o número de identificación profesional.
- **Registro SENESCYT:** Número de registro del título profesional ante la SENESCYT (si aplica).

b) Detalles del Proyecto



Formulario Detalles del Proyecto:

Título del Proyecto:

Provincia:

Cantón:

Calle Principal:

Calle Secundaria:

Referencia:

Fecha de inicio:

Fecha de finalización:

Esta sección permite definir la información básica de ubicación y denominación del proyecto:

- **Título del Proyecto:** Nombre del sistema o instalación a diseñar.
- **Provincia / Cantón:** Selección de la ubicación geográfica desde listas desplegables.
- **Calles y Referencia:** Dirección exacta del sitio donde se ejecutará el sistema de puesta a tierra.
- **Fechas:** Campos para indicar fecha de inicio y fecha estimada de finalización del proyecto.

c) Coordenadas UTM



Formulario Coordenadas UTM:

Longitud: Latitud:

Aquí se ingresan las coordenadas geográficas en formato UTM:

- **Longitud y Latitud:** Permiten ubicar con precisión el sitio del proyecto en el mapa.

d) Dueño del Proyecto



Formulario Dueño del Proyecto:

Nombre:

Documento ID:



Autores:

Pinargote Rosero Darwin Andrés, Baque Durán Alex Darío.
Facultad de Ingeniería Eléctrica. *UIEAM 2025*

Aquí se colocan los datos del cliente o entidad contratante:

- **Nombre:**

Nombre de la persona natural o jurídica propietaria del proyecto.

- **Documento ID:**

Cédula, RUC o número de identificación legal del propietario.

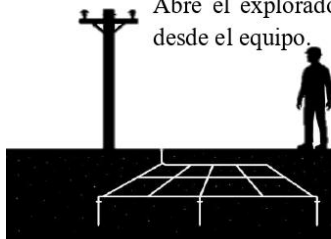
e) **Imagen Satelital**



Este módulo permite adjuntar una imagen satelital del terreno:

- **Botón "Examinar":**

Abre el explorador de archivos para cargar una imagen desde el equipo.



- **Visualización previa:**

Muestra la miniatura de la imagen cargada.

- Si no se ha cargado ninguna imagen, aparecerá el mensaje "No hay imagen cargada".

a) **Botones de Acción**

- **Guardar (verde):**

Almacena los datos ingresados.

- **Limpiar (amarillo):**

Borra todos los campos para permitir un nuevo ingreso.

- **Cancelar (rojo):**

Cierra la ventana sin guardar los cambios.

3 Ventana: Datos de Resistencia

Autores:

Pinargote Rosero Darwin Andrés, Baque Durán Alex Dario.
Facultad de Ingeniería Eléctrica. **UIEAM 2025**

Propósito general:

Esta ventana permite registrar los datos del terreno necesarios para calcular la resistividad del suelo mediante el método Wenner. Esta información es clave para dimensionar correctamente el sistema de puesta a tierra.

3.1 Secciones de la Ventana**a) Material de Superficie**

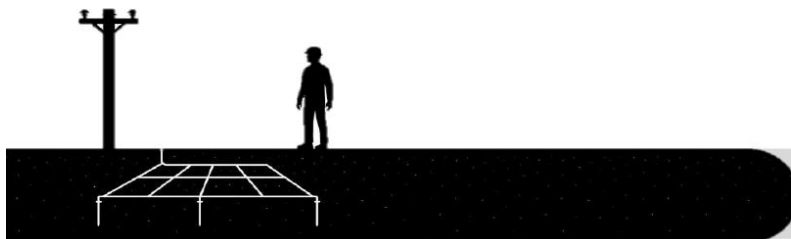
En esta sección se debe seleccionar el tipo de material presente en la superficie del terreno.

- **Material de superficie:**

Desplegable con diferentes opciones (por ejemplo: tierra vegetal, arena, grava, etc.).

- **Resistividad ($\Omega \cdot m$):**

Se asigna automáticamente al seleccionar el material, en base a valores típicos de resistividad.

**b) Método Wenner**

Aquí se ingresan las mediciones de resistencia obtenidas en campo, siguiendo el método de cuatro picas.

Separación entre picas: Este valor también representa la profundidad de medición (puede seleccionarse hasta 10 metros).

- **Rutas de medición:**

- **Ruta 1:** Medición sobre el eje horizontal.
- **Ruta 2:** Medición sobre el eje vertical.
- **Ruta 3:** Medición sobre la diagonal superior.
- **Ruta 4:** Medición sobre la diagonal inferior.

Cada ruta representa una dirección distinta para evaluar la homogeneidad del terreno.

Autores:

Pinargote Rosero Darwin Andrés, Baque Durán Alex Darío.
Facultad de Ingeniería Eléctrica. UIEAM 2025

- Cada campo permite ingresar el valor en ohmios (Ω) y asociarlo con una captura o documento de respaldo si fuera necesario.

- **Botón “Añadir Medición”:**

Almacena las mediciones actuales en la tabla de registros.

- **Botón “Limpiar”:**

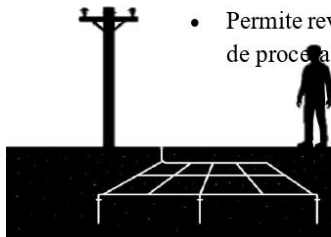
Borra todos los valores ingresados en el formulario.

c) Mediciones Registradas

Separación	Ruta 1	Ruta 2	Ruta 3

Esta tabla muestra un historial de las mediciones realizadas para diferentes separaciones entre picas.

- Las columnas corresponden a cada ruta (Ruta 1, 2, 3 y 4), y la primera columna indica la separación utilizada en metros.
- Permite revisar, comparar o exportar los datos antes de procesar los cálculos de resistividad.



d) Botones de Acción

- **Guardar (verde):**

Confirma y guarda las mediciones ingresadas.

- **Cancelar (rojo):**

Cierra la ventana sin guardar cambios.

4 Ventana: Datos del Conductor

Datos del Transformador

⚡ Características

Tipo:

Poste

Configuración:

Y-Estrella

Nº de fases:

Monofásico

Conexión:

ABC

💡 Tensiones Nominales de Línea

Bobinado Primario (V):

Bobinado Secundario (V):

💡 Potencia e Impedancia

Potencia nominal (kVA):

Impedancia CC (Máx):

%

Guardar

Cancelar

Autores:

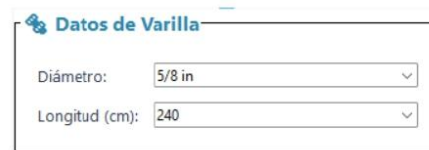
Pinargote Rosero Darwin Andrés, Baque Durán Alex Darío.
Facultad de Ingeniería Eléctrica. *UIEAM 2025*

Propósito general:

Esta ventana permite definir las características físicas y eléctricas tanto de la varilla de puesta a tierra como del conductor principal de la malla. Los datos ingresados influyen directamente en los cálculos de resistencia del sistema.

4.1 Secciones de la Ventana

a) Datos de Varilla



Datos de Varilla

Diámetro: 5/8 in

Longitud (cm): 240

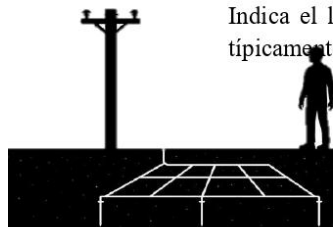
Permite configurar las dimensiones de las varillas verticales que forman parte del sistema:

- Diámetro:**

Selección del grosor de la varilla (por ejemplo: 5/8 in, 3/4 in, etc.).

- Longitud (cm):**

Indica el largo total de la varilla en centímetros, típicamente 240 cm o más.



b) Datos de Conductor



Datos de Conductor

Material: Cobre, recocido, trefilado blando

Calibre: 2/0 AWG

Se establecen las propiedades del material conductor que se utilizará en la malla:

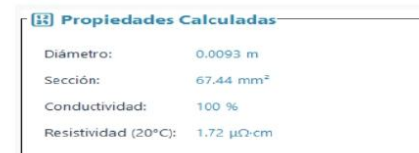
- Material:**

Selección del tipo de conductor (ej. cobre recocido trefilado, cobre desnudo, etc.).

- Calibre:**

Escoge el calibre del conductor en unidades AWG (ej. 2/0 AWG, 1 AWG, etc.).

c) Propiedades Calculadas



Propiedades Calculadas

Diámetro:	0.0093 m
Sección:	67.44 mm ²
Conductividad:	100 %
Resistividad (20°C):	1.72 μΩ·cm

Autores:

Pinargote Rosero Darwin Andrés, Baque Durán Alex Darío.
Facultad de Ingeniería Eléctrica. UIEAM 2025

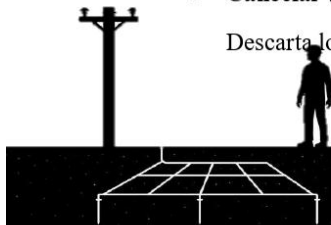
Una vez ingresado el material y el calibre, el sistema calcula automáticamente las siguientes propiedades:

- **Diámetro:**
Medido en metros, basado en el calibre seleccionado.
- **Sección:** Área de la sección transversal del conductor (mm^2).
- **Conductividad:**
Porcentaje de eficiencia de conducción respecto al cobre puro.
- **Resistividad (a 20 °C):**
Valor característico del material, expresado en $\mu\Omega \cdot \text{cm}$.

Estos valores se utilizan internamente en los cálculos del sistema de puesta a tierra.

d) Botones de Acción

- **Guardar (verde):**
Guarda la configuración seleccionada.
- **Cancelar (rojo):**
Descarta los cambios y cierra la ventana.



5 Datos de transformador

Datos del Transformador

Características

Tipo: Poste
Configuración: Y-Estrella
Nº de fases: Monofásico
Conexión: ABC

Tensiones Nominales de Línea

Bobinado Primario (V):
Bobinado Secundario (V):

Potencia e Impedancia

Potencia nominal (kVA):
Impedancia CC (Máx): %

Guardar Cancelar

Propósito general:

Esta ventana permite ingresar los parámetros eléctricos del transformador asociado al sistema de puesta a tierra. Estos datos son fundamentales para los cálculos de dimensionamiento y verificación del sistema de protección.

Autores:

Pinargote Rosero Darwin Andrés, Baque Durán Alex Darío.
Facultad de Ingeniería Eléctrica. UIEAM 2025

Secciones de la Ventana

a) Características del Transformador



Características

Tipo:

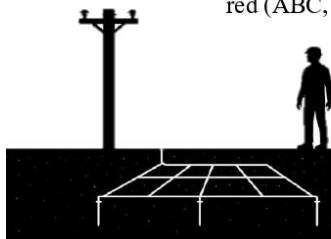
Configuración:

Nº de fases:

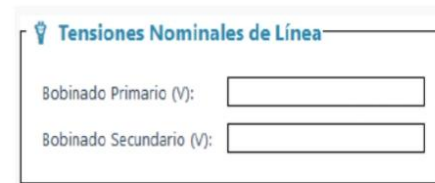
Conexión:

Esta sección define las propiedades generales del equipo:

- **Tipo:**
Selecciona el tipo de instalación del transformador (por ejemplo: Poste, Pedestal, Subestación, etc.).
- **Configuración:**
Permite elegir la disposición del devanado (Y-Estrella, Delta, etc.).
- **N.º de fases:**
Define si el transformador es **Monofásico** o **Trifásico**.
- **Conexión:**
Indica la combinación de fases que se conecta a la red (ABC, A-B, A-C, etc.).



b) Tensiones Nominales de Línea



Tensiones Nominales de Línea

Bobinado Primario (V):

Bobinado Secundario (V):

Aquí se ingresan los valores de tensión del transformador:

- **Bobinado Primario (V):**
Valor de tensión nominal en el lado de alta tensión.
- **Bobinado Secundario (V):**
Valor de tensión nominal en el lado de baja tensión.

Estos datos son necesarios para los análisis eléctricos y para la identificación del sistema a proteger.

c) Potencia e Impedancia



Potencia e Impedancia

Potencia nominal (kVA):

Impedancia CC (Máx): %

Autores:

Pinargote Rosero Darwin Andrés, Baque Durán Alex Darío.
Facultad de Ingeniería Eléctrica. *UIEAM 2025*

Se ingresan los datos relacionados a la capacidad del transformador:

- **Potencia nominal (kVA):**

Capacidad total de carga del transformador.

- **Impedancia CC (Máx.):**

Valor de impedancia en corriente continua, expresado en porcentaje. Este valor influye en el cálculo de la corriente de cortocircuito.

d) Botones de Acción

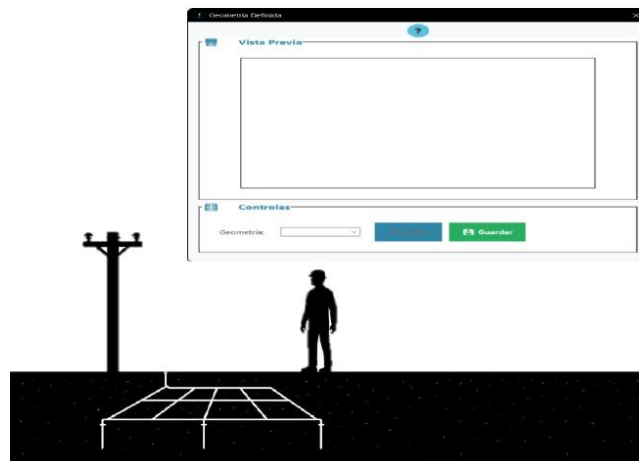
- **Guardar (verde):**

Confirma y almacena los datos ingresados del transformador.

- **Cancelar (rojo):**

Cierra la ventana sin guardar los cambios.

6 Ventana: Geometría Definida



Propósito general:

Esta ventana permite al usuario definir la forma y las dimensiones del área disponible para el diseño de la malla de puesta a tierra. La selección y edición de la geometría permite establecer los límites físicos de trabajo antes de trazar los conductores.

6.1 Secciones de la Ventana

Vista Previa

Espacio gráfico donde se muestra la geometría seleccionada, una vez configurada. Permite visualizar de forma clara los límites del área de diseño.

a) Controles

- **Geometría:**

Lista desplegable para seleccionar la forma del terreno disponible. Las opciones incluyen:

- **Rectángulo**
- **L** (forma en ángulo recto)
- **Línea** (espacio alargado en un solo eje)

- **Editar:**

Botón que permite abrir una ventana específica para definir las dimensiones de la forma seleccionada. Se habilita solo después de elegir una opción en el menú desplegable.

Autores:

Pinargote Rosero Darwin Andrés, Baque Durán Alex Darío.
Facultad de Ingeniería Eléctrica. *UIEAM 2025*

- **Guardar:**

Guarda la forma y dimensiones elegidas, y las envía al canva de diseño.

6.2 Ventanas de Edición por Tipo de Geometría



Una vez seleccionada la geometría, se abre una ventana contextual donde se deben especificar sus dimensiones:

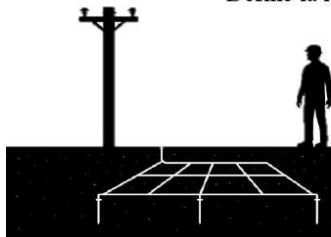
a) Rectángulo

- **Base (cm):**

Define el ancho del área rectangular.

- **Altura (cm):**

Define la longitud vertical del área.



b) L (forma en ángulo)



- **Segmento Vertical (cm):**

Define la altura del tramo más largo.

- **Segmento Horizontal (cm):**

Define el largo del brazo corto en forma de L.

c) Línea



Autores:

Pinargote Rosero Darwin Andrés, Baque Durán Alex Darío.
Facultad de Ingeniería Eléctrica. UIEAM 2025

- **Longitud (cm):**

Define el tamaño total de la línea recta que representa el área de trabajo, útil para terrenos estrechos o lineales.

En cada ventana, el botón **Guardar** confirma los valores ingresados, mientras que **Cancelar** cierra la edición sin aplicar cambios.

7 Ventana: Diseño de Malla SPT



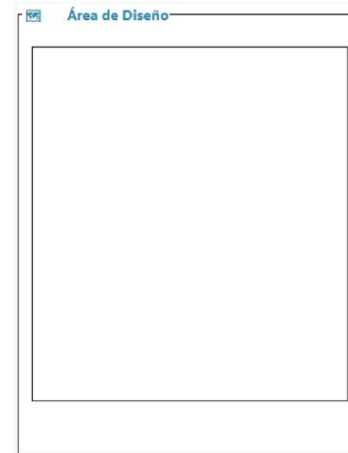
Propósito general:

Esta ventana permite configurar y visualizar el diseño físico de la malla de puesta a tierra. Aquí se definen las conexiones del conductor entre puntos y la ubicación de las varillas, permitiendo estimar la longitud total de materiales a utilizar.



7.1 Secciones de la Ventana

a) Área de Diseño



Es el espacio gráfico donde se trazará la malla.

- En este panel se muestran los vértices definidos previamente en la geometría del terreno.
- El usuario podrá conectar los puntos disponibles (vértices, medios o extremos) para trazar el recorrido del conductor.

Autores:

Pinargote Rosero Darwin Andrés, Baque Durán Alex Darío.
Facultad de Ingeniería Eléctrica. *UIEAM 2025*

7.1.1 Pasos para el Diseño de la Malla

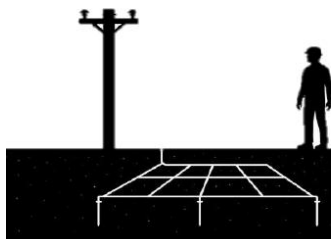
1. Conectar puntos

- Luego de definir la geometría del terreno, el usuario debe hacer clic en el botón **“Conectar Puntos”** para trazar manualmente la malla.
- Las conexiones deben seguir la figura geométrica elegida previamente, creando una red de líneas conductoras.

2. Seleccionar varillas



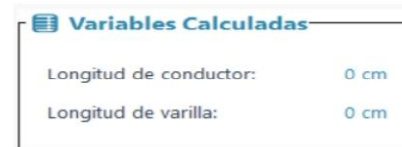
- Una vez conectados los puntos, se habilita el botón **“Seleccionar Varillas”**.
- El usuario podrá asignar la ubicación de cada varilla sobre los puntos azules visibles en el área de diseño.
- La cantidad de varillas permitidas está determinada por el valor seleccionado en el campo **“N.º de Varillas”** en la sección **Configuración de Malla**.



3. Ajustar cantidad de retículas

- El campo **“N.º de Retículas”** permite aumentar el número de puntos de conexión disponibles en la figura geométrica, generando una subdivisión del área de diseño para mayor precisión en el trazado.

7.2 Variables Calculadas



Esta sección muestra automáticamente los resultados generados durante el diseño:

- **Longitud de conductor:**

Suma total del cable conductor necesario, basada en las conexiones creadas.

- **Longitud de varilla:**

Longitud total de varillas colocadas en el diseño

Botones de Acción

- **Conectar Puntos (azul):**

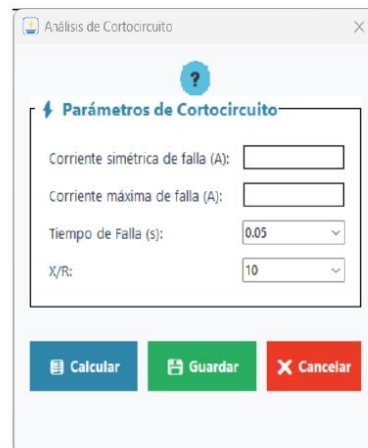
Inicia el trazado de conexiones entre los vértices.

Autores:

Pinargote Rosero Darwin Andrés, Baque Durán Alex Darío.
Facultad de Ingeniería Eléctrica. *UIEAM 2025*

- **Seleccionar Varillas (naranja):**
Permite ubicar las varillas en los puntos disponibles.
- **Guardar (verde):**
Guarda el diseño de la malla.
- **Cancelar (rojo):**
Sale sin guardar los cambios realizados.

8 Ventana: Análisis de Cortocircuito



Propósito general:

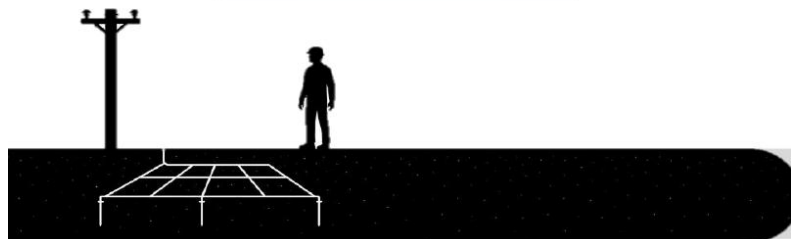
Esta ventana permite ingresar y analizar los parámetros eléctricos relacionados a un cortocircuito en el sistema. Específicamente, se calcula o registra la corriente simétrica y asimétrica de falla, valores esenciales para verificar la seguridad del sistema de puesta a tierra ante condiciones extremas.

8.1 Secciones de la Ventana

a) Parámetros de Cortocircuito

Aquí se ingresan los valores necesarios para realizar el análisis:

- **Corriente simétrica de falla (A):**
Representa el valor de corriente de cortocircuito sin considerar el efecto de la componente DC transitoria. Puede ser ingresada manualmente o calculada a partir de otros datos.
- **Corriente máxima de falla (A):**
También conocida como corriente asimétrica, incluye el componente DC de la falla. Puede ser calculada automáticamente si se proporcionan los demás parámetros.
- **Tiempo de Falla (s):**
Tiempo estimado de duración del cortocircuito, en segundos. Este valor afecta el nivel de energía disipada durante la falla.



Autores:

Pinargote Rosero Darwin Andrés, Baque Durán Alex Darío.
Facultad de Ingeniería Eléctrica. *UIEAM 2025*

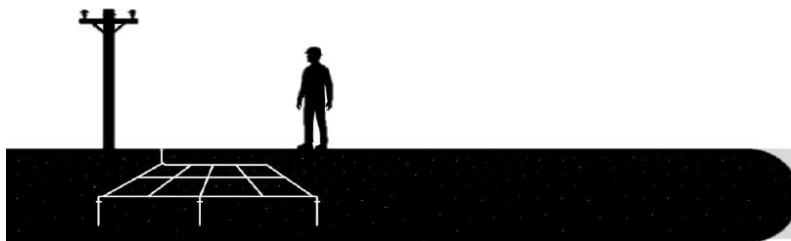
- **Relación X/R:**

Cociente entre la reactancia y la resistencia del sistema en el punto de falla. Este valor se utiliza para calcular la componente asimétrica.

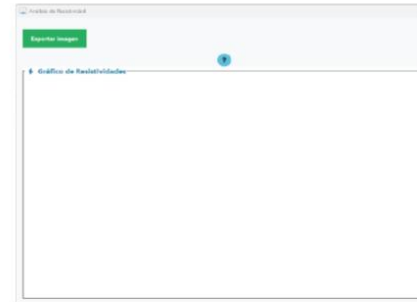
- Nota: Si se ingresan solo algunos valores, la aplicación puede calcular automáticamente la corriente asimétrica basándose en los parámetros restantes.

b) Botones de Acción

- **Calcular (azul):**
Realiza el análisis eléctrico y determina la corriente máxima de falla con base en los datos ingresados.
- **Guardar (verde):**
Almacena los parámetros y resultados para ser utilizados en los cálculos posteriores del sistema.
- **Cancelar (rojo):**
Cierra la ventana sin guardar ni ejecutar cálculos.



9 Ventana: Análisis de Resistividad



Propósito general:

Esta ventana permite visualizar el comportamiento de la resistividad del suelo en función de la profundidad, a partir de las mediciones registradas mediante el método Wenner. El análisis gráfico facilita la interpretación de la estratificación del terreno para un diseño más preciso del sistema de puesta a tierra.

9.1 Secciones de la Ventana

a) Gráfico de Resistividades

En este espacio se genera automáticamente un gráfico luego de registrar y procesar las mediciones de campo.

Autores:

Pinargote Rosero Darwin Andrés, Baque Durán Alex Darío.
Facultad de Ingeniería Eléctrica. *UIEAM 2025*

- El eje horizontal suele representar las diferentes rutas o distancias de separación entre picas.
- El eje vertical muestra los valores de **resistividad aparente** obtenidos para cada medición.
- La curva resultante permite observar la homogeneidad o variación del terreno según profundidad.

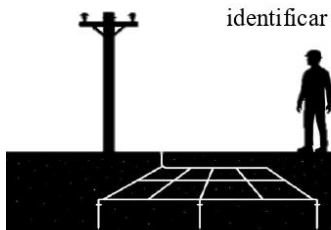
Este gráfico es fundamental para decidir si se requiere tratamiento del suelo o si se puede trabajar con los valores naturales.

b) Botón “Exportar imagen”

Permite guardar el gráfico generado en un archivo de imagen (por ejemplo, PNG o JPG) para su inclusión en el informe técnico del sistema de puesta a tierra.

Observaciones

- El gráfico se genera automáticamente una vez se hayan registrado suficientes datos válidos en la ventana **Datos de Resistencia**.
- Esta visualización también ayuda a comparar la calidad de las distintas rutas de medición y a identificar zonas con alta o baja conductividad.



10 Ventana: configuración de reporte



Propósito general:

Esta ventana permite personalizar el contenido del informe final generado por el programa. Aquí el usuario puede seleccionar o excluir datos y gráficos relevantes del proyecto para incluir únicamente la información deseada en el reporte de la malla de puesta a tierra (SPT).

Autores:

Pinargote Rosero Darwin Andrés, Baque Durán Alex Darío.
Facultad de Ingeniería Eléctrica. *UIEAM 2025*

10.1 Secciones de la Ventana

a) Datos del Proyecto

Muestra un resumen de los datos generales del proyecto: información del profesional responsable, cliente, ubicación, transformador, y configuración básica del sistema. Esta sección es generada automáticamente a partir de las ventanas previamente completadas.

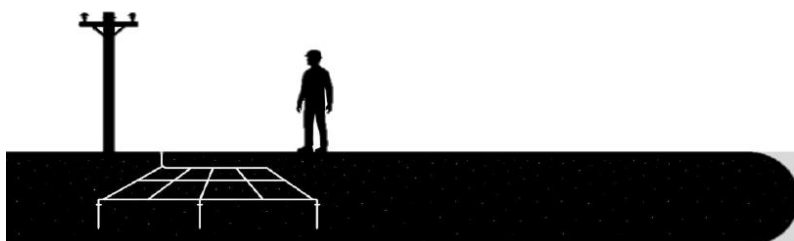
b) Gráficos Disponibles

Aquí aparecerán los gráficos generados a lo largo del diseño, como:

- Gráfico de resistividades.
- Vista de la malla diseñada en 2D o 3D.
- Cualquier otro gráfico asociado a cálculos eléctricos o mediciones.

Si no se han ingresado datos suficientes o no se ha completado el diseño de malla o resistividades, aparecerá el mensaje:

“No hay gráficos disponibles. Asegúrese de tener datos de malla o resistencias para generar gráficos.”



10.2 Funciones y Controles

• Pantalla Completa (azul):

Amplía la ventana para revisar los datos con mayor comodidad.

• Seleccionar Todo (verde):

Marca todos los elementos disponibles para que se incluyan en el informe.

• Deseleccionar Todo (naranja):

Quita la selección de todos los datos y gráficos, permitiendo una selección personalizada.

• Ver Variables (gris):

Muestra en detalle las variables internas que se usarán para el cálculo o para el informe técnico (puede estar deshabilitado si no hay datos cargados).

• Guardar Configuración (verde):

Almacena las preferencias de contenido para el informe.

• Cancelar (rojo):

Cierra la ventana sin guardar cambios.

Autores:

Pinargote Rosero Darwin Andrés, Baque Durán Alex Darío.
Facultad de Ingeniería Eléctrica. UIEAM 2025

11. Ecuaciones utilizadas en el dimensionamiento de un sistema de puesta a tierra

El dimensionamiento de un sistema de puesta a tierra requiere calcular la corriente máxima de falla, seleccionar el conductor adecuado y asegurar una resistencia baja.

11.1. Cálculo de la corriente máxima de falla

La corriente máxima de falla define el dimensionamiento del sistema de puesta a tierra y garantiza que sus componentes disipen energía de forma segura.

$$I_G = D_f * I_g$$

Donde:

D_f : Factor de asimetría

I_g : Corriente simétrica de falla inyectada en la malla de tierra

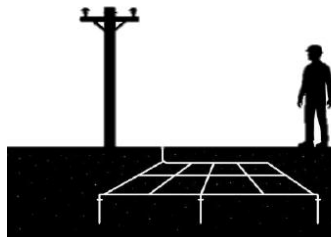
I_G : Corriente máxima de falla asumida por la malla

$$I_g = S_f * I_f$$

Donde:

S_f : Factor divisor de corriente de falla

I_f : Corriente rms simétrica de falla a tierra



El factor de división de corriente (S_f) indica el porcentaje que el sistema disipa al suelo, mientras que el factor de asimetría (D_f) se determina según la relación X/R y el tiempo de falla conforme a la norma IEEE Std 80.

Duración de Falla (t_f)		Factor de asimetría (D_f)			
Segundos	Ciclos a 60 Hz	X/R=10	X/R=20	X/R=30	X/R=40
0.00833	0.5	1.576	1.648	1.675	1.688
0.05	3	1.232	1.378	1.462	1.515
0.10	6	1.125	1.232	1.316	1.378
0.20	12	1.064	1.125	1.181	1.232
0.30	18	1.043	1.085	1.125	1.163
0.40	24	1.033	1.064	1.095	1.125
0.50	30	1.026	1.052	1.071	1.101
0.75	45	1.018	1.035	1.052	1.068
1.00	60	1.013	1.026	1.039	1.052

La tabla muestra el factor de decremento según la duración de la falla y la relación X/R.

11.2. Cálculo del calibre del conductor

El dimensionamiento correcto del conductor en un SPT garantiza su capacidad para disipar corrientes de falla sin daños, reduciendo la resistencia a tierra y cumpliendo normas técnicas de seguridad.

$$A_{MCM} = I_f * K_f * \sqrt{T_c}$$

Donde:

A_{MCM} : Área del conductor en MCM

I_f : Corriente asimétrica, se utiliza la mayor registrada

Autores:

Pinargote Rosero Darwin Andrés, Baque Durán Alex Darío.
Facultad de Ingeniería Eléctrica. UIEAM 2025

K_f : Constante del material dado a $T_a = 40\text{ }^\circ\text{C}$

T_c : Duración de la corriente en segundos

Este procedimiento equilibra seguridad eléctrica, eficiencia técnica y uso óptimo de materiales, asegurando un diseño confiable del sistema de puesta a tierra.

Descripción	α_r	K_0	$T_m(^{\circ}\text{C})$	ρ_r	$TCAP$	K_f
Cobre, recocido	0.00393	234	1083	1.72	3.42	7
Cobre comercial	0.00381	242	1084	1.78	3.42	7.06
Cobre estirado	0.00378	245	1084	4.4	3.85	10.45
Cable de acero revestido de cobre	0.00378	245	1084	5.86	3.85	12.06
Varilla de acero revestida de cobre	0.00378	245	1084	8.62	3.85	14.64
Aluminio de grado EC	0.00403	228	657	2.86	2.56	12.12
Aluminio aleación 5005	0.00353	263	652	3.22	2.6	12.41
Aluminio aleación 6201	0.00347	268	654	3.28	2.6	14.47
Cable de acero revestido de aluminio	0.0036	258	657	8.48	3.58	17.2
Acero 1020	0.00316	605	1510	15.9	3.28	15.95
Varilla de acero revestida de acero inoxidable	0.0016	605	1400	17.5	4.44	14.62
Varilla de acero revestida de zinc	0.0032	293	416	20.1	3.93	28.93
Acero inoxidable	0.0013	749	1400	72	4.03	30.5

La tabla anterior reúne las propiedades físico-eléctricas clave de materiales como cobre, acero galvanizado y aluminio, fundamentales para elegir el conductor óptimo y garantizar un sistema de puesta a tierra seguro, eficiente y



duradero.

11.3. Cálculo de la resistencia total de la malla

Esta ecuación permite calcular la resistencia total de la malla de puesta a tierra según su geometría, resistividad del terreno y factores de diseño, asegurando su capacidad para disipar corrientes de falla de forma segura.

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

p : Resistividad del terreno (Ohm-metros)

L_T : Longitud total de los conductores enterrados en la malla (metros). Incluye todas las conexiones de la malla (Varillas y Conductor).

A : Área ocupada por la malla (metros cuadrados).

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

11.4. Cálculo de tensión de paso y de toque

Calcular las tensiones de paso y contacto en un sistema de puesta a tierra es esencial para garantizar la seguridad de personas y equipos, manteniéndolas dentro de los límites establecidos por normas como la IEEE Std 80.

$$E_p = (1000 + 6C_s * p_s) \frac{0.116}{\sqrt{T_s}}$$

Autores:

Pinargote Rosero Darwin Andrés, Baque Durán Alex Darío.
Facultad de Ingeniería Eléctrica. UIEAM 2025

Donde:

E_p : Tensión de paso.

p_s : Resistividad de la capa superficial del material del suelo.

C_s : Factor de aumento por material superficial.

T_s : Tiempo de duración de la falla.

$$E_t = (1000 + 1.5C_s * p_s) \frac{0.116}{\sqrt{T_s}}$$

Donde:

E_t : Tensión de toque.

p_s : Resistividad de la capa superficial del material del suelo

C_c : Factor de resistencia de contacto por material superficial.

T_s : Tiempo de duración de la falla

11.5. Cálculo del gradiente de potencial

El cálculo del gradiente de potencial, según la norma IEEE Std 80, permite evaluar la distribución de voltajes en el suelo y garantizar que no representen riesgos para personas o equipos durante una falla eléctrica.

$$GPR = I_G * R_G$$

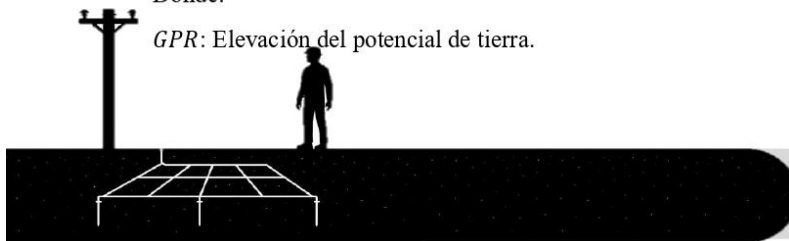
Donde:

GPR : Elevación del potencial de tierra.

I_G : Corriente máxima de falla.

R_g : Resistencia del sistema de puesta a tierra

Los sistemas de puesta a tierra deben cumplir criterios de seguridad priorizando que las tensiones de paso y toque superen la elevación de potencial de tierra, conforme a normativas como la canadiense.



Autores:

Pinargote Rosero Darwin Andrés, Baque Durán Alex Darío.
Facultad de Ingeniería Eléctrica. *UIEAM 2025*