

RELEVANCIA SOCIAL

DEL ANÁLISIS DE ELECTRODOS DE TIERRA ELÉCTRICA: PROTECCIÓN, SEGURIDAD Y BIEN-ESTAR EN COMUNIDADES

SOCIAL RELEVANCE OF ANALYZING ELECTRICAL GROUNDING ELECTRODES: PROTECTION, SAFETY, AND WELL-BEING IN COMMUNITIES

Cesar Augusto Navarro Rubio ^{1*}E-mail: cnavarro15@alumnos.uaq.mxORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7541-5841>Mario Trejo Perea ¹E-mail: mtp@uaq.mxORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7014-3379>José Gabriel Ríos Moreno¹E-mail: riosg@uaq.mxORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8988-2729>Hugo Martínez Ángeles ¹E-mail: hmartinez15@alumnos.uaq.mxORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8552-705X>Roberto Valentín Carrillo Serrano ¹E-mail: roberto.carrillo@uaq.edu.mxORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8246-8920>¹Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México.

*Autor a correspondencia

Cita sugerida (APA, séptima edición)

Navarro Rubio, C. A., Trejo Perea, M., Ríos Moreno, J. G., Martínez Ángeles, H. & Carrillo Serrano, R. V. (2025). Relevancia social del análisis de electrodos de tierra eléctrica: protección, seguridad y bienestar en comunidades. *Universidad y Sociedad*, 17(4), e5311.

RESUMEN

Este artículo presenta una revisión y análisis de las características, dimensiones y desempeño de varios electrodos de puesta a tierra utilizados en sistemas de puesta a tierra eléctrica. Los electrodos de puesta a tierra son componentes críticos para garantizar la seguridad y eficiencia de los sistemas eléctricos, proporcionando una ruta de baja impedancia para la corriente de falla a tierra. En esta revisión, se analizan y comparan tres tipos principales de electrodos: electrodo de rejilla, electrodos de varilla y electrodos de rejilla con varillas. La comparación se realiza considerando parámetros clave como la resistencia de puesta a tierra, la instalación y el comportamiento en diferentes condiciones de suelo. Los resultados de esta revisión brindan una descripción general completa de las ventajas y limitaciones de cada tipo de electrodo, ofreciendo una guía útil para ingenieros y diseñadores en la selección del electrodo más adecuado según los requisitos específicos del proyecto. Además, este análisis adquiere especial relevancia desde una perspectiva social, ya que la correcta selección e instalación de los electrodos de puesta a tierra contribuye directamente a la protección de la vida humana y al bienestar comunitario. Sistemas de puesta a tierra eficientes previenen accidentes eléctricos, protegen infraestructuras críticas y garantizan la continuidad de servicios esenciales en hogares, escuelas y hospitales. Así, la seguridad eléctrica no solo es un aspecto técnico, sino un factor clave para el desarrollo social, la equidad y la calidad de vida de las comunidades.

Palabras clave:

Ingeniería eléctrica y distribución, Propiedades eléctricas, Sistemas de puesta a tierra, Electrodos.



ABSTRACT

This article presents a review and analysis of the characteristics, dimensions, and performance of various grounding electrodes used in electrical grounding systems. Grounding electrodes are critical components to ensure the safety and efficiency of electrical systems by providing a low-impedance path for fault current to the ground. This review analyzes and compares three main types of electrodes: grid electrodes, rod electrodes, and grid electrodes with rods. The comparison is based on key parameters such as grounding resistance, installation, and behavior under different soil conditions. The results of this review provide a comprehensive overview of the advantages and limitations of each electrode type, offering a useful guide for engineers and designers in selecting the most suitable electrode according to the specific project requirements. Furthermore, this analysis holds particular social relevance, as the correct selection and installation of grounding electrodes directly contribute to the protection of human life and community well-being. Efficient grounding systems prevent electrical accidents, protect critical infrastructures, and ensure the continuity of essential services in homes, schools, and hospitals. Thus, electrical safety is not only a technical matter but also a key factor for social development, equity, and the quality of life within communities.

Keywords: Electrical engineering and distribution, Electrical properties, Grounding systems, Electrodes.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de puesta a tierra eléctrica son pilares fundamentales para la seguridad y el correcto funcionamiento de las instalaciones eléctricas, ya que protegen tanto a las personas como a los equipos frente a fallos y descargas eléctricas (Baka & Bakas, 2022; Kovacic & Cunningham, 2020; Obi, 2020). En este contexto, el electrodo de puesta a tierra juega un rol esencial al establecer el vínculo seguro entre el sistema eléctrico y la tierra, facilitando la disipación controlada de corrientes de falla hacia el suelo. La selección adecuada del tipo de electrodo impacta directamente en la eficiencia del sistema, lo que a su vez repercute en la seguridad y bienestar de las comunidades que dependen de estas infraestructuras (Moura et al., 2024).

En la práctica, existen diversos tipos de electrodos — como los de rejilla, varilla y combinaciones de ambos — que presentan características técnicas, costos y métodos de instalación distintos (Clark et al., 2021; Qamar et al., 2019). La correcta elección y aplicación de estos electrodos no solo mejora la resistencia de puesta a tierra y la estabilidad del sistema eléctrico, sino que también previene accidentes eléctricos, protege infraestructuras críticas (hospitales, escuelas, redes de agua potable) y

contribuye a la continuidad del suministro eléctrico, factores clave para el desarrollo social y económico.

Esta revisión realiza un análisis comparativo de los electrodos más utilizados, evaluando parámetros técnicos como la resistencia eléctrica, la facilidad y complejidad de instalación, y el desempeño en diferentes tipos de suelo. Estos aspectos son cruciales para garantizar que los sistemas de puesta a tierra funcionen de manera óptima en diversas condiciones geográficas y ambientales, asegurando la protección efectiva de las personas y bienes.

La búsqueda exhaustiva en bases de datos académicas reconocidas (IEEE Xplore, Scopus, MDPI, Springer, Web of Science) y la aplicación de criterios rigurosos para la selección de estudios garantizan que esta revisión esté basada en evidencia actualizada y relevante. El análisis crítico de estos datos permite identificar oportunidades para mejorar las prácticas de diseño e instalación de electrodos, con un enfoque en la seguridad comunitaria y la reducción de riesgos eléctricos.

En suma, el estudio y la optimización de las características de los electrodos en los sistemas de puesta a tierra tienen un impacto directo en la protección, seguridad y bienestar de las comunidades. La mejora en estos sistemas fortalece la resiliencia eléctrica, minimiza riesgos de accidentes y contribuye a la construcción de entornos más seguros y confiables, evidenciando la importancia social y técnica de esta área de investigación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Características de los sistemas de puesta a tierra. Electrodo.

Los sistemas de puesta a tierra son componentes fundamentales en cualquier instalación eléctrica, ya que garantizan la seguridad de los equipos y las personas ante fallas eléctricas. Estos sistemas proporcionan una ruta controlada para que la corriente de falla o descarga se disipe de manera segura en el suelo, minimizando el riesgo de descargas eléctricas, incendios o daños en los equipos (Obi, 2020). La efectividad de un sistema de puesta a tierra depende en gran medida del diseño adecuado y la selección correcta de los componentes, en particular los electrodos de tierra (Muhammad et al., 2022).

Electrodos de varilla:

Los electrodos de varilla son uno de los tipos más comunes y ampliamente utilizados en los sistemas de puesta a tierra eléctricos. Su popularidad se debe a su simplicidad, facilidad de instalación y eficacia en una variedad de condiciones del suelo. Estos electrodos suelen estar hechos de acero recubierto de cobre, lo que les proporciona una combinación de resistencia mecánica y protección contra la corrosión (Jovanović et al., 2015). Las varillas de puesta a tierra se instalan verticalmente en el

suelo, lo que les permite alcanzar capas más profundas del suelo donde la resistividad del suelo es generalmente menor, mejorando así la eficacia de la puesta a tierra (Clark et al., 2021; Kherif et al., 2019).

Electrodo de rejilla:

Los electrodos de malla o rejilla son una solución robusta y eficaz para la puesta a tierra en instalaciones eléctricas que requieren un alto nivel de seguridad y una distribución uniforme de la corriente de falla. Estos electrodos consisten en una red de conductores enterrados dispuestos en forma de rejilla o anillo, cubriendo una gran superficie del terreno. Esta configuración permite una dispersión eficiente de la corriente eléctrica, reduciendo significativamente la resistencia de la puesta a tierra y minimizando el riesgo de puntos calientes o concentraciones de corriente (Jovanović et al., 2015). La malla o rejilla proporciona una excelente protección contra fallas eléctricas, asegurando que la corriente de fuga se disipe de manera segura, incluso en suelos de alta resistividad (Fürnschuß et al., 2023; Gouda et al., 2018; Qamar et al., 2019).

Procedimiento de búsqueda y selección de fuentes bibliográficas

Para realizar el análisis comparativo de los electrodos de puesta a tierra, se llevó a cabo una revisión bibliográfica exhaustiva utilizando la base de datos ScienceDirect, una plataforma digital reconocida por su amplia cobertura de publicaciones científicas y académicas, principalmente de la editorial Elsevier. Esta base de datos fue seleccionada debido a su relevancia y prestigio en los campos de la ingeniería eléctrica y electrónica, garantizando el acceso a información actualizada y de alta calidad.

Estrategia de búsqueda

Se utilizó el formulario de búsqueda avanzada de *ScienceDirect*, que permite combinar palabras clave, utilizar operadores booleanos (AND, OR, NOT) y símbolos especiales, así como restringir la búsqueda a campos específicos como título, resumen y palabras clave. Esta funcionalidad facilitó la focalización en documentos altamente pertinentes para el tema de estudio.

Palabras clave y filtros

Las palabras clave empleadas fueron: “*sistemas de puesta a tierra*”, “*electrodos*”, “*grounding electrodes*” y términos relacionados en inglés y español para ampliar la cobertura. Se aplicaron filtros para limitar los resultados a artículos publicados en los últimos 15 años, asegurando la actualidad de los datos. Además, se restringió la búsqueda a documentos en idioma inglés y español para facilitar el análisis.

Selección y análisis de documentos

Se recopilaron y revisaron artículos científicos, revisiones y estudios experimentales que abordaban las características técnicas, desempeño y métodos de instalación de electrodos de puesta a tierra, con especial énfasis en electrodos de varilla, rejilla y combinaciones. Los datos relevantes fueron extraídos y organizados en tablas comparativas y gráficos para facilitar la evaluación crítica y el análisis comparativo de los diferentes tipos de electrodos.

Validación y síntesis

La información recopilada fue contrastada entre diversas fuentes para garantizar la consistencia y confiabilidad de los resultados. Se identificaron tendencias, ventajas y limitaciones de cada tipo de electrodo, así como áreas que requieren mayor investigación, especialmente en relación con la influencia de factores ambientales y el comportamiento a largo plazo de los sistemas de puesta a tierra.

Este enfoque metodológico permitió obtener una visión integral y fundamentada para el análisis técnico y social de los electrodos en sistemas de puesta a tierra, contribuyendo a la mejora de la seguridad eléctrica y el bienestar comunitario.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se describen los estudios obtenidos con el análisis bibliométrico, imprescindible en el procesamiento de los resultados (Jiménez et al., 2020). Esta búsqueda proporciona un total de 30 publicaciones relevantes cuidadosamente seleccionadas para abordar aspectos específicos relacionados con la utilización de electrodos para sistemas de puesta a tierra eléctrica, donde se obtienen sus resultados, las variables utilizadas y sus modelos.

Al analizar los artículos de la tabla 1 se observa que la longitud, el radio y el material de los electrodos son determinantes para reducir la resistencia de puesta a tierra, especialmente en suelos de alta resistividad. Las varillas más largas

y los diseños optimizados muestran mayor eficacia, mientras que las varillas verticales superan a las horizontales en la disipación de corriente. Además, el acero galvanizado presenta un rendimiento superior al cobre en ciertos casos, destacando la importancia de ajustar las dimensiones y materiales según las condiciones del suelo.

Tabla 1. Comparación de resultados de estudios sobre electrodos de varilla en sistemas de puesta a tierra.

Referencia	Análisis de resultados
Kovacic et al. (2020)	El modelo de suelo de dos capas con longitudes de varilla de 1.2 a 4.8 m muestra que las varillas más largas reducen significativamente la resistencia de puesta a tierra, demostrando ser rentables.
Kherif et al. (2019)	La longitud efectiva de un electrodo vertical es donde se minimiza la impedancia de impulso, lo que resalta la necesidad de optimización en los diseños de puesta a tierra.
Muhammad et al. (2022)	El modelo de suelo de dos capas (84.96 $\Omega\cdot m$ y 892 $\Omega\cdot m$) demuestra que un electrodo de 1.5 metros de longitud conectado a una placa de cobre puede reducir la resistencia de 46 Ω a 14.3 Ω .
Fürnschuß et al. (2023)	Una varilla vertical (240 mm ² , 20 m) en un suelo de dos capas (120 $\Omega\cdot m$ y 160 $\Omega\cdot m$) mostró que la resistencia se ve significativamente afectada por la longitud de la varilla y la resistividad del suelo.
Dessouky et al. (2010)	Una varilla de 1,5 m en un suelo de dos capas (10,000 $\Omega\cdot m$ y 1,000 $\Omega\cdot m$) arroja una resistencia de 331 Ω , lo que indica la complejidad de los sistemas de puesta a tierra en suelos de varias capas.
Ayodele et al. (2018)	Las varillas verticales son más efectivas que las horizontales para disipar corriente, lo que ayuda a reducir el aumento del potencial de tierra durante fallas.
Faudzi et al. (2020)	Una comparación entre varillas de cobre y acero galvanizado de 0.6 metros muestra que el acero galvanizado proporciona una resistencia más baja (141 Ω) que el cobre (171 Ω), lo que indica un mejor rendimiento de puesta a tierra.

Fuente: elaboración propia.

En el caso de los electrodos de varilla, la resistencia tiende a disminuir a medida que aumenta la longitud (Tabla 2), lo que es coherente con la idea de que las varillas más largas proporcionan un mejor contacto con el suelo, lo que reduce la resistencia. El diámetro de la varilla también influye en la resistencia, aunque este efecto es menos significativo que el de la longitud. Sin embargo, en suelos de alta resistividad, la resistencia de las varillas aumenta significativamente, lo que potencialmente limita su eficacia. En suelos de resistividad extremadamente alta, la resistencia de las varillas puede llegar a ser prohibitivamente alta, lo que sugiere que pueden ser necesarias soluciones alternativas o acondicionamiento del suelo. Las rejillas más grandes, por otro lado, mantienen una resistencia relativamente baja incluso en suelos de alta resistividad, lo que las convierte en una opción más confiable en varios tipos de suelo.

Tabla 2. Valores de resistencia promedio para electrodos tipo varilla.

Referencia	Tipo de electrodo	Resistencia media (Ω)
Jovanović et al. (2015)	Varilla	43.5725
Kovacic et al. (2020)	Varilla	105.6125
Sekioka et al. (2005)	Varilla	113.2500
Muhammad et al. (2022)	Varilla	46.0000
Fürnschuß et al. (2023)	Varilla	7.6600
Dessouky et al. (2010)	Varilla	331.0000
Sengar et al. (2023)	Varilla	31.7333
Faudzi et al. (2020)	Varilla	156.0000

Fuente: elaboración propia.

Si bien las varillas son más simples y económicas, exhiben una resistencia significativamente mayor que las rejillas de la tabla 2, lo que limita su efectividad en suelos con alta resistividad. A pesar de esto, las varillas siguen siendo las más fáciles y rápidas de instalar. Sin embargo, las rejillas, si bien requieren más mano de obra y recursos para su

instalación, ofrecen una resistencia de puesta a tierra menor, lo que las hace más adecuadas para aplicaciones que manejan altas corrientes, como las subestaciones eléctricas (Tabla 3).

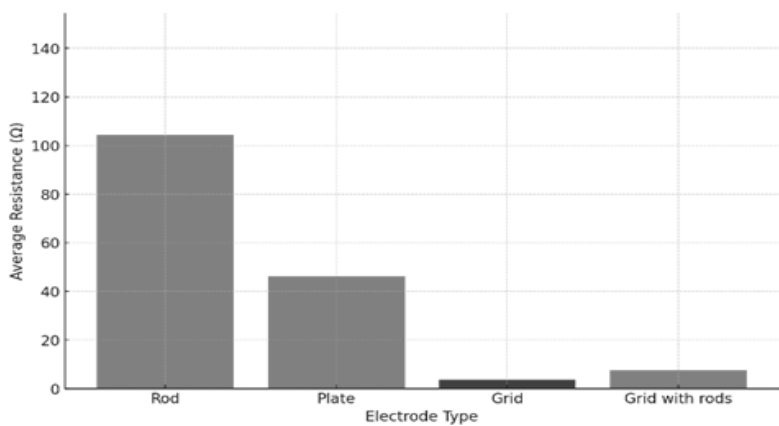
Tabla 3. Comparación de resultados de estudios sobre electrodos de rejilla en sistemas de puesta a tierra.

Referencia	Análisis de resultados
Jovanović et al. (2015)	Se encuentran que la resistencia eléctrica de un electrodo de rejilla de 30 m por 20 m era más baja que la de los electrodos de varilla tanto en los resultados de COMSOL como en los experimentales, lo que indica una mejor eficiencia del material.
Qamar et al. (2019)	Se simula una rejilla de puesta a tierra cuadrada de 4 x 4 m con un espaciamiento de 2 x 2 m utilizando electrodos de varilla de acero vertical en un suelo homogéneo con una resistividad de 5 Ω·m. La configuración optimizada mejora significativamente la disipación de corriente de falla.
Ladanyi (2007)	El análisis de las rejillas de puesta a tierra en un suelo uniforme (resistividad de 20 Ω·m) revela que reducir el espaciamiento de la rejilla y aumentar el área superficial disminuye la resistencia, con efectos menores del diámetro y material del conductor.
Nahman et al. (2006)	Un estudio que utiliza varios métodos encuentra que el área de la rejilla es el factor más importante para la resistencia a tierra, lo que hace que los modelos simples sean útiles en las fases iniciales del diseño.
Pan et al. (2016)	Dos rejillas de puesta a tierra (100 x 100 m y 50 x 50 m) enterradas a 0.8 m en un suelo con resistividad de 200 Ω·m enfatizan la necesidad de un diseño cuidadoso de la distancia y el área de la malla externa para soluciones rentables.
Sengar et al. (2023)	Combinar un electrodo vertical con una rejilla proporciona una ruta de baja impedancia y una distribución uniforme del potencial de tierra, como se demuestra a través de múltiples métodos analíticos.
Ayodele et al. (2018)	La evaluación de configuraciones de rejilla (triangular, rectangular, en forma de L, en forma de T) reveló que la rejilla en forma de L tuvo la menor resistencia (0.292 Ω usando IEEE y 0.195 Ω usando FEM), destacando la importancia de seleccionar la configuración adecuada para un aterrizaje efectivo.

Fuente: elaboración propia.

Tanto las configuraciones de rejilla como de varillas muestran una fuerte dependencia de la resistividad del suelo, y las rejillas generalmente ofrecen una resistencia menor en comparación con las varillas en niveles de resistividad del suelo similares (Figura 1). Esto sugiere que las configuraciones de rejilla pueden ser más efectivas para reducir la resistencia en los sistemas de puesta a tierra (Tabla 4), en particular en suelos con una resistividad moderada a alta.

Fig 1. Resistencia promedio comparativa por tipo de electrodo.



Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Valores de resistencia promedio para electrodos tipo rejilla.

Referencia	Tipo de electrodo	Resistencia media (Ω)
Jovanović et al. (2015)	Rejilla	1.1950
Gouda et al. (2018)	Rejilla	0.0472

Nahman et al. (2006)	Rejilla	2.3770
Guemes-Alonso et al. (2006)	Rejilla	3.8200
Pan et al. (2016)	Rejilla	0.9606
Sengar et al. (2020)	Rejilla	0.2660
Sengar et al. (2019)	Rejilla	0.0970
Ayodele et al. (2018)	Rejilla	0.5250

Fuente: elaboración propia.

La incorporación de varillas verticales en las rejillas de puesta a tierra ha mejorado significativamente la distribución de la corriente de falla y ha reducido la resistencia del sistema en condiciones de suelo difíciles (Tabla 5). Además, los estudios indican que la incorporación de varillas verticales en las rejillas de puesta a tierra ha mejorado significativamente la distribución de la corriente de falla y ha reducido la resistencia del sistema en condiciones de suelo difíciles.

Tabla 5. Valores de resistencia promedio para rejilla con electrodos tipo varilla.

Referencia	Tipo de electrodo	Resistencia media (Ω)
Qamar et al. (2019)	Rejilla con varillas	0.2828
Ladanyi (2007)	Rejilla con varillas	2.3080
Gouda et al. (2018)	Rejilla con varillas	0.0332
Sengar et al. (2023)	Rejilla con varillas	27.6000

Fuente: elaboración propia.

Los artículos de la tabla 6 destacan que las rejillas, especialmente las rectangulares y combinadas con varillas verticales, ofrecen menor resistencia y mejoran la disipación de corriente. Métodos avanzados como el Hybrid DE-SCA optimizan rendimiento y costos. En suelos de alta resistividad, varillas más largas y ajustes en la rejilla reducen el potencial de tierra, asegurando eficiencia frente a fallos eléctricos o rayos. Además, la tabla 6 examina métricas de rendimiento clave como geometría y diseño, valores de resistencia, eficiencia de disipación de corriente y el impacto de la combinación de componentes de rejilla y varilla en la efectividad general de la puesta a tierra.

Tabla 6. comparación de resultados de estudios sobre rejillas con electrodos de varilla en sistemas de puesta a tierra.

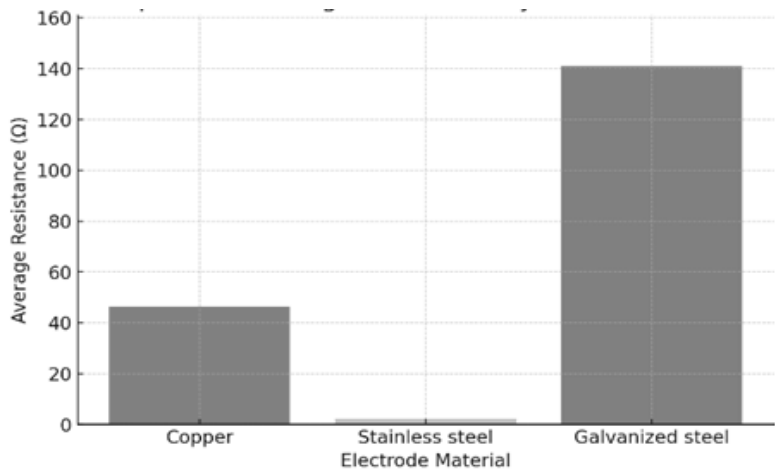
Referencia	Análisis de resultados
Jovanović et al. (2015)	Una comparación entre un electrodo de rejilla de 30 m por 20 m y electrodos de varilla verticales y horizontales revela que el electrodo de rejilla logra valores de resistencia más bajos y utiliza menos material.
Qamar et al. (2019)	El estudio destaca que las varillas de puesta a tierra verticales conectadas a una rejilla son fundamentales para disipar de manera eficiente las corrientes de falla en configuraciones optimizadas.
Gouda et al. (2018)	En un modelo de suelo de dos capas, se encuentra que las varillas verticales reducen la resistencia y la corriente a través de cada conductor, mejorando el rendimiento de la rejilla.
Guemes-Alonso et al. (2006)	Los resultados de simulación para las rejillas de puesta a tierra en suelos uniformes coinciden estrechamente con las mediciones experimentales, lo que llevó a una ecuación propuesta para calcular la resistencia del suelo con discrepancias mínimas.
Ackerman et al. (2013)	El análisis destaca la importancia del aumento del potencial de tierra (GPR, por sus siglas en inglés) en suelos de alta resistividad y recomendó el uso de varillas más largas y la reducción del espaciado de la rejilla para disminuir la resistencia, a pesar de los posibles costos.
Sengar et al. (2020)	Varias configuraciones de rejilla mostraron que la rejilla rectangular produjo la resistencia más baja (0.339 Ω usando IEEE y 0.193 Ω usando FEM), además de ser la más rentable.
Sengar et al. (2019)	Entre los diferentes métodos de diseño de rejillas de puesta a tierra, la técnica Hybrid DE-SCA (HDESCA) proporciona la resistencia más baja (0.073 Ω) y redujo los costos de diseño en un 6.3%.
Sengar et al. (2023)	Se encuentra que la combinación de varillas verticales y una rejilla crea un camino de baja impedancia y asegura una distribución efectiva del potencial de tierra, especialmente durante fallos de alta magnitud o eventos de rayos.

Fuente: elaboración propia.

La Figura 1 muestra que los electrodos de rejilla y rejilla con varillas tienen las resistencias más bajas, mientras que los de varilla presentan la mayor resistencia. Esta comparación permite comprender claramente cómo funciona cada configuración en términos de resistencia eléctrica, lo que brinda información valiosa sobre su eficacia relativa.

A partir de las investigaciones, se observa que el material del electrodo juega un papel importante en la determinación de los valores de resistencia promedio, como se muestra en la Figura 2. En el caso de la investigación analizada, el acero galvanizado exhibe la resistencia más alta, mientras que el acero inoxidable ofrece la más baja, lo que lo convierte en una opción más eficiente para los sistemas de puesta a tierra donde minimizar la resistencia es crucial. Esta variación en la resistencia en función del material subraya la importancia de seleccionar materiales de electrodos apropiados junto con otros factores como la resistividad del suelo y la configuración de los electrodos para lograr una puesta a tierra óptima.

Fig 2. Resistencia promedio comparativa por material del electrodo.



Fuente: elaboración propia.

La selección del tipo de electrodo y su configuración debe basarse en una evaluación exhaustiva de las condiciones del suelo y los requisitos de instalación. La combinación de diferentes tipos de electrodos puede mejorar la eficiencia y la seguridad de los sistemas de puesta a tierra en diversas aplicaciones. Si bien los electrodos de rejilla brindan beneficios en cuanto a la resistencia y la distribución de la corriente, los electrodos de varilla pueden ser más económicos y fáciles de instalar, en particular cuando su longitud y diámetro están optimizados para condiciones específicas del suelo.

La mejora y correcta selección de electrodos en los sistemas de puesta a tierra contribuye directamente al cumplimiento de varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), reflejando su impacto social y ambiental, la tabla 7 refleja lo anteriormente descrito.

Tabla 7. Relación de la investigación con los ODS.

ODS	Relación con los electrodos en sistemas de puesta a tierra
ODS 3: Salud y bienestar	La instalación adecuada de electrodos garantiza la seguridad de las personas al minimizar riesgos de electrocución y fallas eléctricas en viviendas, hospitales y espacios públicos.
ODS 7: Energía asequible y no contaminante	Sistemas de puesta a tierra eficientes aseguran la continuidad y confiabilidad del suministro eléctrico, protegiendo infraestructuras críticas y reduciendo interrupciones.
ODS 9: Industria, innovación e infraestructura	La innovación en tipos y técnicas de electrodos mejora la infraestructura eléctrica, aumentando la resiliencia y eficiencia de los sistemas eléctricos.
ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles	La protección contra fallas eléctricas y descargas atmosféricas mediante electrodos adecuados contribuye a entornos urbanos más seguros y resilientes.
ODS 12: Producción y consumo responsables	El uso de materiales y técnicas que prolongan la vida útil de los electrodos y reducen la corrosión contribuye a un consumo más responsable de recursos.
ODS 13: Acción por el clima	Sistemas de puesta a tierra bien diseñados ayudan a mitigar daños por fenómenos eléctricos asociados a eventos climáticos extremos, protegiendo infraestructuras críticas.

Fuente: elaboración propia.

La correcta selección, diseño e instalación de electrodos en sistemas de puesta a tierra no solo optimiza la seguridad eléctrica, sino que también fortalece la sostenibilidad y resiliencia de las comunidades, alineándose con metas globales de desarrollo sostenible.

CONCLUSIONES

La comparación entre los electrodos de varilla y rejilla revela diferencias significativas en los valores de resistencia obtenidos a través de experimentos y simulaciones. Aunque los electrodos de varilla son más simples y económicos, presentan una resistencia considerablemente mayor, lo que limita su eficacia en suelos con alta resistividad. La optimización de la longitud de estos electrodos se identifica como una estrategia viable para mejorar la eficiencia del sistema de puesta a tierra en condiciones de suelo complejas. La comparación entre electrodos de varilla y rejilla evidencia que la selección adecuada del tipo y configuración del electrodo, considerando las características específicas del suelo, es fundamental para garantizar la eficiencia y seguridad de los sistemas de puesta a tierra. Esta decisión técnica tiene un impacto social directo, ya que un sistema de puesta a tierra óptimo reduce significativamente los riesgos de accidentes eléctricos, protege la integridad de infraestructuras críticas y asegura la continuidad del suministro eléctrico para comunidades y sectores productivos.

La sensibilidad de los electrodos de varilla a la resistividad del suelo y la superioridad de los electrodos de rejilla en condiciones adversas resaltan la necesidad de un diseño personalizado que responda a las condiciones locales, promoviendo entornos más seguros y resilientes. Además, la optimización de parámetros como la longitud del electrodo contribuye a soluciones más económicas y accesibles, facilitando la implementación en zonas rurales o marginadas donde la infraestructura eléctrica es más vulnerable. Finalmente, las áreas identificadas para futuras investigaciones —como la corrosión, el envejecimiento y el comportamiento bajo condiciones extremas— son clave para desarrollar sistemas de puesta a tierra duraderos y confiables, lo que se traduce en una mayor protección a largo plazo para las comunidades. La mejora en métodos predictivos también permitirá diseñar sistemas más adaptados a la realidad ambiental, fortaleciendo la seguridad eléctrica y el bienestar social, especialmente en regiones con suelos heterogéneos y climas variables. En suma, esta investigación no solo aporta conocimiento técnico, sino que también contribuye a la construcción de comunidades más seguras, con infraestructuras eléctricas robustas que protegen vidas y fomentan el desarrollo sostenible.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por los recursos otorgados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ayodele, T. R., Ogunjuyigbe, A. S. O., & Oyewole, O. E. (2018). Comparative assessment of the effect of earthing grid configurations on the earthing system using IEEE and finite element methods. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 21(5), 970–983. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.07.003>
- Baka, A. D., & Bakas, A. D. (2022). Preventing electric shock accidents in workplaces. *Ain Shams Engineering Journal*, 13(6), Article 101702. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.10170>
- Clark, D., Mousa, S., Harid, N., Griffiths, H., & Haddad, A. (2021). Lightning current performance of conventional and enhanced rod ground electrodes. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 63(4), 1179–1188. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2021.3059277>
- Dessouky, S. S., Ghoneim, S., & Awad, S. (2010). Grounding resistance, step and touch voltages for a driven vertical rod into two-layer model soil. 2010 International Conference on Power System Technology (POWERCON), 1–4. <https://doi.org/10.1109/POWERCON.2010.5666612>
- Faudzi, A. H. M., et al. (2020). A study on copper and galvanized grounding performance using palm oil fuel ash as new additive material. *Journal of Physics: Conference Series*, 1529, Article 012037. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1529/1/012037>
- Fürnschuß, M., Pack, S., Schmutzter, E., & Kollegger, J. (2023). Investigations of electrical interference of vertical earth rod arrangements. *Elektrotechnik und Informationstechnik*, 140, 132–140. <https://doi.org/10.1007/s00502-023-01121-9>
- Gouda, O. E., Dessouky, S. S., Kalas, A. E., & Hamdy, M. A. (2018). Current distribution in grounding grid conductors with and without vertical rods buried in two-layer soil model. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 13, 1276–1284. <https://doi.org/10.1002/tee.22693>
- Guemes-Alonso, J. A., Hernando-Fernández, F. E., Rodríguez-Bona, F., & Ruiz-Moll, J. M. (2006). A practical approach for determining the of grounding grids. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 21(3), 1261–1266. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2006.874121>
- Jiménez Borges, R., Bermúdez Chou, A. D. L. C., Morales León, C., Martínez Padrón, Á., & Álvarez González, A. L. (2020). Análisis bibliométrico aplicado a estudios sobre ciencia, tecnología y sociedad. *Conrado*, 16(76), 90–94. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1990-86442020000500090&script=sci_arttext&tlng=pt

- Jovanović, D. B., Cvetković, N. N., Ristić, A. T., & Stanković, V. B. (2015). Different calculation methods and experimental validation for various ground electrode types. 2015 9th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), 337–342. <https://doi.org/10.1109/ATEE.2015.7133827>
- Kherif, O., Chiheb, S., Teguar, M., Mekhaldi, A., & Harid, N. (2019). Investigation of horizontal ground electrode's effective length under impulse current. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 61(5), 1515–1523. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2018.2864130>
- Kovacic, M., & Cunningham, K. (2020). Lighting jobs: Easy work or easy death. 2020 IEEE IAS Electrical Safety Workshop (ESW), 1–8. <https://doi.org/10.1109/ESW42757.2020.9188331>
- Ladanyi, J. (2007). Analyses of the earthing resistance of HV/MV transformer stations with different earth electrode arrangements and soil structures. 2007 7th International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology, 36–39. <https://doi.org/10.1109/EMCECO.2007.4371640>
- Muhammad, U., Mohamad Nor, N., Ramli, A. M., & Ahmad, N. N. (2022). Effect of ground electrodes on the susceptibility to damage of customer premises equipment (CPE) under impulse conditions. *Energies*, 15(3), Article 1247. <https://doi.org/10.3390/en15031247>
- Nahman, J., & Paunovic, I. (2006). Resistance to earth of earthing grids buried in multi-layer soil. *Electrical Engineering*, 88, 281–287. <https://doi.org/10.1007/s00202-004-0282-y>
- Pan, W., Sun, H., Chai, S., & Zhou, J. (2016). Research of optimal distance of external grounding grid. 2016 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON), 1–4. <https://doi.org/10.1109/POWERCON.2016.7753964>
- Qamar, A., Ul Haq, I., Alhaisoni, M., & Qadri, N. N. (2019). Detecting grounding grid orientation: Transient electromagnetic approach. *Applied Sciences*, 9(24), Article 5270. <https://doi.org/10.3390/app9245270>
- Sengar, K. P., & Chandrasekaran, K. (2019). Designing of cost minimum substation grounding grid system using DE, SCA, and HDESCA techniques. *IET Science, Measurement & Technology*, 13(10), 1260–1267. <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2019.0021>
- Sengar, K. P., & Chandrasekaran, K. (2020). Effects of cost-optimized grid configuration on earthing system performance: A comparative assessment. *IET Science, Measurement & Technology*, 14(6), 610–620. <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2019.0192>
- Sengar, K. P., & Chandrasekaran, K. (2023). Analysis of grounding system transient with consideration of soil ionization and mutual coupling effect. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 10, Article 53. <https://doi.org/10.1186/s43067-023-00120-2>
- Moura, R. A. R., Silva, G. C. P., Oliveira, E. M. A., Almeida, J. A. C., Assis, F. A., & Schroeder, M. A. O. (2024). Grounding grid effective area and impulsive impedance considering statistical-probabilistic characteristics of lightning currents. *Electric Power Systems Research*, 236, Article 110916. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110916>
- Obi, P. (2020). Electrocution, accidents and electrical injuries in Nigerian homes and work sites: Causes, effects and remedies. *Journal of Engineering and Technology*, 15(2), 53–61. <https://doi.org/10.9790/1676-1502025361>