

ANALYSIS OF SIMPLE GROUNDING ELECTRODES WITH ONE, TWO AND THREE RODS CONSIDERING THE HUMAN LIFE SAFETY

ANÁLISIS DE ELECTRODOS DE PUESTA A TIERRA SIMPLES CON UNA, DOS Y TRES VARILLAS CONSIDERANDO LA SEGURIDAD DE LA VIDA HUMANA

Juan David Ramírez¹ Miguel Argoti²

¹*Departamento de Energía Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador*

E-mail: juan.ramirezd@epn.edu.ec

²*Instituto Superior Tecnológico Central Técnico, Quito, Ecuador*

E-mail: rargoti@istct.edu.ec

RESUMEN

En este artículo se analiza el desempeño de electrodos de puesta a tierra simples formados por una, dos y tres varillas de metal debido a que este tipo de electrodos sencillos suele construirse en las instalaciones eléctricas residenciales sin estudios eléctricos y de manera antitécnica.

Se utiliza ETAP con su módulo de puestas a tierra con el método de elementos finitos FEM y se determina cómo se comportan estos electrodos en lo que se refiere a los voltajes de toque y de paso que producen.

Se determina que los electrodos de una y dos varillas son poco efectivos y peligrosos porque desarrollan voltajes de toque y paso muy elevados. El electrodo de tres varillas puede ser adecuado si se aplican algunos criterios descritos al final del artículo.

Palabras clave—electrodos de puesta a tierra; varillas de puesta a tierra; FEM; voltaje de toque; voltaje de paso, sistemas de puesta a tierra seguros.

ABSTRACT

This article analyzes the performance of simple grounding electrodes made up of one, two and three metal rods, since this type of simple electrodes is usually built in residential electrical installations without electrical studies and on an anti-technical way.

ETAP is used with its FEM finite element method grounding module and determines how these electrodes behave in terms of the touch and step voltages

Single and double-rod electrodes are found to be ineffective and dangerous because they develop very high touch and step voltages. The three-rod electrode may be suitable if some criteria described at the end of the article are applied.

Index terms—grounding electrodes; grounding rods; FEM; step voltage; touch voltage; safe grounding systems.

1. INTRODUCCIÓN.

Conectar los sistemas eléctricos a tierra es una decisión que debe ser tomada por los ingenieros dedicados a planificar o a modificar la distribución de la energía eléctrica. Generalmente esta conexión se recomienda, aunque existen excepciones, y también múltiples métodos y criterios que se pueden aplicar, y cada uno de esos métodos tiene su propio propósito (IEEE, 2013), (IEEE, 2007, p. 7).

Los Sistemas de Puesta a Tierra SPT que se aplican en las redes de distribución de energía eléctrica y en instalaciones de bajo voltaje residenciales e industriales suelen estar en concordancia con las normas: IEEE 80-2013 IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, IEEE 142-2007 IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems, NFPA 70 National Electrical Code, y a nivel nacional con la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC (MIDUVI, 2013), (MIDUVI, 2018).

En el caso de los sistemas eléctricos industriales, comerciales y residenciales las consideraciones de la NEC que están tomadas de la norma NFPA 70 contienen los requisitos y consideraciones mínimas para garantizar la protección de la vida y de la propiedad, y deben ser cuidadosamente revisadas durante el diseño del SPT. A esas consideraciones se les puede añadir, sin negar los requisitos de la NEC, los criterios dados en las normas IEEE 80 e IEEE 142.

Entonces existe un marco normativo nacional e internacional de aplicación en el Ecuador para el diseño de SPT en sistemas eléctricos de tipo industrial, comercial y residencial; sin embargo, la motivación de este artículo es presentar el peligro que puede representar un electrodo de puesta a tierra mal considerado. Esta motivación nace de la

realidad ecuatoriana, donde en los hogares no se cuenta con un buen sistema de puesta a tierra que en varios casos se limita a una varilla enterrada junto con la acometida de la red de distribución, según se especifica en las Unidades de Propiedad del Catálogo Digital de Redes de distribución de Energía Eléctrica del Ecuador, en la especificación PTO-OAC8-1 de puesta a tierra de acometidas (MEER, 2020).

La aplicación de este tipo de puestas a tierra simples puede representar un peligro para las personas debido a los elevados voltajes de toque y de paso que pueden producir y que se analizarán en el contenido de este artículo. Adicionalmente, la generalización de este tipo de puestas a tierra lleva a que personal sin el suficiente conocimiento técnico ejecute la construcción de puestas a tierra sin entender los riesgos asociados a la instalación de una o dos varillas de tierra, por ejemplo.

Con este antecedente el objetivo de este artículo es analizar el efecto de los electrodos sencillos de puesta a tierra en los voltajes de toque y de paso del sistema de puesta a tierra. Estos electrodos sencillos serán considerados a partir de las geometrías más simples utilizadas en las instalaciones industriales y residenciales, como son enterrar una, dos o tres varillas de metal en el suelo.

1.1. ESTADO DEL ARTE

El análisis de los voltajes de paso y de toque de los electrodos de puesta a tierra es un tema tan antiguo como el desarrollo de la ingeniería eléctrica. La evolución de los sistemas de cálculo computacionales permite tener en la actualidad herramientas útiles para hacer estos análisis con mayor facilidad. En los últimos años siguen publicándose artículos científicos que abordan esta temática. (Kumar & Bharadwaj, 2015) estudiaron el efecto de la variación de los parámetros de las

mallas de puesta a tierra para evaluar el desempeño del SPT, y observaron que: al incrementar el espacio entre conductores de la malla el voltaje de la malla se incrementa, pero el voltaje de paso disminuye. Que con la profundidad de entierro de los conductores el voltaje de la malla y el voltaje de paso se reduce, pero sólo hasta cierta profundidad y luego se incrementa al enterrarlos más profundo, encontraron que una profundidad de 60 cm de entierro es adecuada. También observan que al aumentar el número de varillas de puesta a tierra disminuye el voltaje de la malla y de paso. Por otro lado, el efecto de aumentar el área de la malla es reducir el voltaje de la malla y de paso. Y finalmente el efecto de la resistividad del suelo es directo, es decir a mayor resistividad mayores voltajes de la malla y de paso.

La norma IEEE 80 presenta un método de cálculo para mallas de puesta a tierra simples y con geometrías cuadrangulares. Sin embargo, cuando se requiere analizar geometrías diferentes como triangulares, circulares o irregulares, existen otros métodos matemáticos para el cálculo de los voltajes de la malla. Uno de esos métodos es el método de los elementos finitos FEM, este método matemático resuelve el sistema de ecuaciones diferenciales de un problema de manera gráfica, por lo que es adaptable a softwares de diseño de tipo de dibujo asistido por computadora CAD, y permite visualizar hasta en 3 dimensiones el fenómeno físico estudiado, estos fenómenos en el área de la ingeniería eléctrica están dominados por las ecuaciones diferenciales de Maxwell que rigen el electromagnetismo, y por lo general la solución de estos problemas son los voltajes en el espacio (Ramírez et al., 2020), (Cabezas et al., 2020).

Por ejemplo, (Abdelkader et al., 2020) utilizan el método FEM con el programa COMSOL multiphysics para el diseño de sistemas de puesta a tierra y presentan con ejemplos la forma de utilizar un programa de tipo FEM para resolver los

voltajes de un electrodo de puesta a tierra. Por su parte (Brenna et al., 2018) utilizan el programa Ansys para ejecutar el diseño de electrodos de puesta a tierra con FEM. (Kasim et al., 2017) estudian de la misma manera mediante el método FEM con el programa ETAP el efecto de la geometría de una malla de puesta a tierra. En estos tres artículos se puede apreciar visualmente la utilidad de una herramienta FEM ya que se puede observar en el espacio 3D la solución del problema y observar cómo funciona un electrodo de puesta a tierra. Con el fin de observar ese efecto de los electrodos de puesta a tierra de manera gráfica, este artículo utiliza el método FEM para el análisis de los electrodos de puesta a tierra.

1.2. CONCEPTOS BÁSICOS DE LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA

El aterrizamiento de un sistema eléctrico es la conexión intencional a tierra de un conductor ya sea de fase o neutro con el propósito de controlar el voltaje respecto a tierra dentro de límites predecibles y para proveer un camino para el flujo de corriente que permitirá la detección de una conexión indeseable entre los conductores y la tierra, esta detección iniciará la operación de los dispositivos de protección del sistema eléctrico (IEEE, 2007).

Cuando en el sistema eléctrico ocurre una falla o hay una descarga atmosférica, la corriente fluye y se disipa a tierra por el electrodo de tierra. El electrodo de tierra es un conductor embebido en el suelo que recolecta esas corrientes y las disipa en el suelo. El electrodo de tierra posee una resistencia al paso de la corriente y es la resistencia de la puesta a tierra, o la resistencia del sistema de puesta a tierra. El producto de la corriente que fluye por el electrodo de puesta a tierra y su resistencia es un voltaje llamado elevación del potencial de tierra GPR, y este es un voltaje que el SPT puede alcanzar con referencia a un punto

lejano que se asume a potencial cero. El GPR se puede apreciar en la Figura 1 (IEEE, 2013).

El suelo no tiene un valor fijo de resistencia eléctrica, sino que varía en función de sus propiedades geológicas, y es poco uniforme en la mayoría de los casos, eso genera que el perfil de voltaje de la Figura 1 no sea regular, sino que se eleva en las cercanías del electrodo y va decayendo. Esto genera que en la superficie del suelo donde se ha construido el electrodo de puesta a tierra se presenten diferentes voltajes en diferentes posiciones. A la diferencia de voltaje que una persona puede experimentar en la superficie del suelo cuando está parada con los pies abiertos a una distancia de 1 m, se le conoce como voltaje de paso, por otra parte, a la diferencia de potencial que entre el GPR y una superficie donde una persona puede apoyarse con una mano mientras con sus pies está en contacto con el suelo se llama voltaje de toque (IEEE, 2013). El voltaje de paso se puede apreciar en la Figura 1.

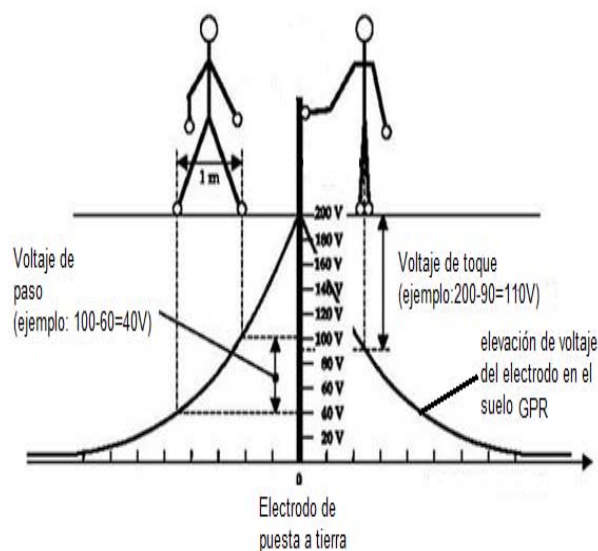


Figura 1 : Voltaje de paso y de toque de un sistema de puesta a tierra.
Fuente: adaptado de IEEE 80-2013

1.3.SEGURIDAD DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

Cuando un diseñador crea un sistema de puesta a tierra busca tener una resistencia del electrodo que sea baja, pero no debe ser el único objetivo de su diseño. Deberá considerar los voltajes GPR, de toque y de paso que genera el electrodo porque sobre el electrodo existirá el tránsito de personas, que pueden quedar expuestas a estos voltajes cuando se descarga una corriente por el electrodo y si estos voltajes son más altos de los que puede tolerar el cuerpo de una persona pueden causar su muerte.

En (IEEE, 2013) se definen los voltajes de toque y de paso tolerables por una persona de 50 kg y de 70 kg, y el criterio de seguridad del electrodo es que los voltajes de toque y de paso que se generan no deben superar a los voltajes de toque y de paso tolerables por una persona. El voltaje de toque tolerable por una persona de 50 kg está dado en (1), el voltaje de paso tolerable por una persona de 50 kg está dado en (2), el voltaje de toque tolerable por una persona de 70 kg está dado en (3) y el voltaje de paso tolerable por una persona de 70 kg está dado en (4). Una forma de reducir los voltajes de toque y de paso es colocar una capa superficial de protección sobre el suelo de un material de alta resistividad como piedras, ripio lavado, cemento.

$$E_{toque50} = (1000 + 1.5C_s \cdot \rho_s) \left(\frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \right) \quad (1)$$

$$E_{paso50} = (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \left(\frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \right) \quad (2)$$

$$E_{toque70} = (1000 + 1.5C_s \cdot \rho_s) \left(\frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \right) \quad (3)$$

$$E_{paso70} = (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \left(\frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \right) \quad (4)$$

Donde:

E_{toque} voltaje de toque en voltios

E_{paso} voltaje de toque en voltios

C_s factor de decrecimiento de la capa superficial

t_s duración de la corriente de falla en segundos

ρ_s resistividad de la capa superficial en $\Omega \cdot m$

Cuando no se utiliza una capa superficial de protección $C_s = 1$ y $\rho_s = \rho$ resistividad de suelo.

En el diseño del electrodo de puesta a tierra, en la práctica resulta difícil controlar los voltajes de toque y de paso sin comprometer el costo de la obra de construcción, ya que se puede reducir estos voltajes con el incremento de varillas, del área, el cambio del suelo o el cambio de espaciamientos de los conductores del electrodo (Kasim et al., 2017), (Kumar & Bharadwaj, 2015).

Esta dificultad hace que el diseñador deba encontrar un equilibrio entre un diseño seguro y económico (S. S. M. Ghoneim & Taha, 2016), (Unde & Kushare, 2012). El proceso de diseño se convierte en un proceso repetitivo e iterativo donde se debe corregir el diseño hasta obtener un resultado satisfactorio. Para ello el diseñador debe conocer también cómo se comporta el electrodo a través de la obtención de perfiles de voltaje en el espacio que le permitan observar los efectos del cambio de sus diseños (S. Ghoneim et al., 2006).

Cuando se trabaja en un SPT en áreas pequeñas, como el caso de instalaciones residenciales o comerciales resulta más difícil reducir estos voltajes y se deben considerar las mejores opciones para reducirlos (Rock et al., 2018).

En áreas pequeñas o suelos muy resistivos también es difícil diseñar un electrodo de baja resistencia, por lo que en la actualidad existen electrodos activados químicamente y que tienen grafito, estos electrodos son cilindros de longitudes y diámetros seleccionables y que presentan bajos valores resistivos, en especial por la presencia del grafito que es un material que puede manejar altas corrientes y tiene resistencias muy bajas (Tang et al., 2016), (Huang et al., 2019).

La gran efectividad de los electrodos activados para reducir la resistencia de puesta a tierra tiene como efecto negativo que algunos constructores los instalen sin ningún tipo de diseño, simplemente se entierran los electrodos y se obtienen resistencias de puesta a tierra muy bajas. Pero no se analiza el efecto de los voltajes de toque y de paso, debido a que la forma de un electrodo activado es prácticamente similar al de una varilla, el análisis que se realiza en este artículo para una varilla es aplicable para un electrodo activado.

2. MÉTODOS

2.1. Software y método de solución

Para la solución de los voltajes de los electrodos de puesta a tierra se utilizó el software ETAP con su módulo de puestas a tierra y con el método de solución de elementos finitos FEM. El estudio se limita a redes de bajo voltaje de tipo residencial e industrial, con dos capas de suelo, y con la puesta a tierra independiente. Los parámetros de simulación comunes basados en la experiencia en el trabajo de campo y valores típicos publicados (Hatzigrygiou & Lorentzou, 1997) fueron los siguientes:

- Temperatura ambiente de 20 °C
- Tiempo de falla t_s 0.5 s
- Relación X/R=1
- Factor de división $S_f = 100 \%$
- Factor de crecimiento $C_p = 100 \%$
- Capa de material superficial de 20 cm y $\rho_s = 2500 \Omega \cdot m$
- Varillas de cobre comercial, de 1.80 m de longitud, 16 mm de diámetro, conductividad de 97 S
- Capa 1 del suelo con profundidad de 5 m
- Profundidad de enterramiento del electrodo de 0.6 m

Tabla 1
Casos de estudio para el análisis de electrodos de puesta a tierra

Electrodo	Caso	Corriente de Falla [A]	Resistividad Capa inferior Suelo [Ω .m]	Resistividad Capa superior Suelo [Ω .m]	Resistividad Capa superficial [Ω .m]
1 varilla	1	1 000	100	100	2 500
	2	200	100	100	2 500
	3	3 000	100	100	2 500
	4	1 000	100	100	0
	5	200	100	100	0
	6	3 000	100	100	0
	7	1 000	1 000	1 000	2 500
	8	200	1 000	1 000	2 500
	9	3 000	1 000	1 000	2 500
	10	1 000	50	50	2 500
	11	200	50	50	2 500
	12	3 000	50	50	2 500
2 varillas, conductor de cobre 35 mm ² (AWG 2), espacio entre varillas 3 m	13	1 000	100	100	2 500
	14	200	100	100	2 500
	15	3 000	100	100	2 500
2 varillas, conductor de cobre 70 mm ² (AWG 2/0), espacio entre varillas 3 m	16	1 000	100	100	2 500
	17	200	100	100	2 500
	18	3 000	100	100	2 500
2 varillas, conductor de cobre 35 mm ² (AWG 2), espacio entre varillas 5 m	19	1 000	100	100	2 500
2 varillas, conductor de cobre 35 mm ² (AWG 2), espacio entre varillas 10 m	20	1 000	100	100	2 500
2 varillas, conductor de cobre 70 mm ² (AWG 2/0), espacio entre varillas 5 m	21	1 000	100	100	2 500
2 varillas, conductor de cobre 70 mm ² (AWG 2/0), espacio entre varillas 10 m	22	1 000	100	100	2 500
3 varillas, conductor de cobre 35 mm ² (AWG 2), espacio entre varillas 5 m en línea	23	1 000	100	100	2 500
3 varillas, conductor de cobre 35 mm ² (AWG 2), espacio entre varillas 5 m en triángulo	24	1 000	100	100	2 500
sin varillas, conductor de cobre 35 mm ² (AWG 2), espacio entre varillas 5 m en triángulo	25	1 000	100	100	2 500
3 varillas, conductor de cobre 70 mm ² (AWG 2/0), espacio entre varillas 5 m en triángulo	26	1 000	100	100	2 500

Fuente: Propia.

2.2. Casos de estudio

Con el fin de analizar los voltajes de los electrodos se definieron varios casos de estudio que permitieron observar efectos comunes de los electrodos con varillas y conductores de cobre. Los casos de estudio se presentan en la Tabla 1. El sistema eléctrico de tipo residencial e industrial en

el que se consideran estos electrodos la corriente de falla puede estar en un rango de centenas a un par de miles de amperios (Tleis, 2007). Se escogieron tres valores de corriente con el fin de observar el efecto de un cambio en ella en los voltajes del electrodo.

3. RESULTADOS

La simulación de los casos de estudio descritos en la sección dos se presentan en este apartado.

Tabla 2
Resultados de la simulación del electrodo de puesta a tierra con una varilla.
Resistividad del suelo 100 Ωm

Resultado	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6
Voltaje de toque máximo [V]	47 604.6	9 520.9	142 813.8	47 604.6	9 520.9	142 813.8
Voltaje de paso máximo [V]	3 643.1	728.6	10 929.3	3 643.1	728.6	10 929.3
E _{toque70} [V]	907.8	907.8	907.8	255.3	255.3	255.3
E _{paso70} [V]	2 956.3	2 956.3	2 956.3	355.3	355.3	355.3
E _{toque50} [V]	670.8	670.8	670.8	188.7	188.7	188.7
E _{paso50} [V]	2 190.9	2 190.9	2 190.9	262.5	262.5	262.5
GPR [V]	48 314.0	9662.8	144 941.9	48 314	9 662.8	144 941.9
Resistencia de puesta a Tierra [Ω]	48.161	48.161	48.161	48.161	48.161	48.161

Fuente: Propia.

Tabla 3
Resultados de la simulación del electrodo de puesta a tierra con una varilla.
Resistividad del suelo 50 y 1000 Ωm

Resultado	Caso 7	Caso 8	Caso 9	Caso 10	Caso 11	Caso 12
Voltaje de toque máximo [V]	476 045.9	95 209.2	1 428 137.6	23 802.3	4 760.5	71 406.9
Voltaje de paso máximo [V]	36 431	7 286.2	109 293.1	1 821.6	364.3	5 464.7
E _{toque70} [V]	962.9	962.9	962.9	904.8	904.8	904.8
E _{paso70} [V]	3 185.5	3 185.5	3 185.5	2 953.3	2 953.3	2 953.3
E _{toque50} [V]	711.4	711.4	711.4	668.5	668.5	668.5
E _{paso50} [V]	2 353.6	2 353.6	2 353.6	2 181.8	2 181.8	2 181.8
GPR [V]	483 139.7	96 627.9	1 449 419.1	24 157.0	4 831.4	72 471.0
Resistencia de puesta a Tierra [Ω]	481.609	481.609	481.609	24.08	24.08	24.08

Fuente: Propia.

En la Tabla 2 se encuentran los resultados del análisis de un electrodo formado por una varilla simple enterrada en el suelo con diferentes corrientes de falla y con un suelo uniforme.

En la Tabla 3 se encuentran los resultados del análisis de un electrodo formado por una varilla simple enterrada en el suelo con diferentes corrientes de falla y con un suelo de diferentes resistividades.

En la Tabla 4 se encuentran los resultados del

análisis de un electrodo formado por dos varillas enterradas en el suelo con diferentes corrientes de falla y unidas por un conductor de cobre a con una separación de 3 m.

En la Tabla 5 se encuentran los resultados del análisis de un electrodo formado por dos varillas enterradas en el suelo con diferentes corrientes de falla y unidas por un conductor de cobre a con una separación de 5 y 10 m.

Tabla 4
Resultados de la simulación del electrodo de puesta a tierra con dos varillas.
Separación entre conductores de 3 m

Resultado	Caso 13	Caso 14	Caso 15	Caso 16	Caso 17	Caso 18
Voltaje de toque máximo [V]	19 397.5	3 879.5	58 192.5	19 144.6	3 828.9	57 433.9
Voltaje de paso máximo [V]	3 184.3	636.9	9 552.8	3 243	648.6	9 729.0
E _{toque70} [V]	907.8	907.8	907.8	907.8	907.8	907.8
E _{paso70} [V]	2 965.3	2 965.3	2 965.3	2 965.3	2 965.3	2 965.3
E _{toque50} [V]	670.8	670.8	670.8	670.8	670.8	670.8
E _{paso50} [V]	2 190.9	2190.9	2 190.9	2 190.9	2 190.9	2 190.9
GPR [V]	200 068.6	4 013.7	60 205.9	19 815.8	3 963.2	59 447.4
Resistencia de puesta a Tierra [Ω]	20.005	20.005	20.005	19.753	19.753	19.753

Fuente: Propia.

Tabla 5
Resultados de la simulación del electrodo de puesta a tierra con dos varillas.
Separación entre conductores de 5 y 10 m

Resultado	Caso 19	Caso 20	Caso 21	Caso 22
Voltaje de toque máximo [V]	15 840.5	10 993.8	15 570.5	10 754.6
Voltaje de paso máximo [V]	2 574.9	1 771.0	2 608.1	1 781.3
E _{toque70} [V]	907.8	907.8	907.8	907.8
E _{paso70} [V]	2 965.3	2 965.3	2 965.3	2 965.3
E _{toque50} [V]	670.8	670.8	670.8	670.8
E _{paso50} [V]	2 190.9	2 190.9	2 190.9	2 190.9
GPR [V]	16 489.0	1 159 334.0	16 219.1	11 354.1
Resistencia de puesta a Tierra [Ω]	16.437	11.557	16.168	11.318

Fuente: Propia.

En la Tabla 6 se encuentran los resultados del análisis de un electrodo formado por tres varillas enterradas en el suelo con diferentes corrientes de

falla y unidas por un conductor de cobre a con una separación de 5 en configuración lineal y de triángulo.

Tabla 6
Resultados de la simulación del electrodo de puesta a tierra con tres varillas.

Resultado	Caso 23	Caso 24	Caso 25	Caso 26
Voltaje de toque máximo [V]	10 186.8	9 468.5	12 273.6	11 903.3
Voltaje de paso máximo [V]	1 638.6	1 974.1	2 687.6	2 688.7
$E_{toque70}$ [V]	907.8	907.8	907.8	907.8
E_{paso70} [V]	2 965.3	2 965.3	2 965.3	2 965.3
$E_{toque50}$ [V]	670.8	670.8	670.8	670.8
E_{paso50} [V]	2 190.9	2 190.9	2 190.9	2 190.9
GPR [V]	10 785.4	10 262.3	13 067.2	16 296.9
Resistencia de puesta a Tierra [Ω]	10.751	10.23	13.026	12.65

Fuente: Propia.

Con el fin de observar las formas de los voltajes de los electrodos estudiados se presentan los perfiles de elevación de voltaje de los electrodos formados por una varilla con una corriente de falla de 1 000 A en la Figura 2 y 200 A en la Figura 3.

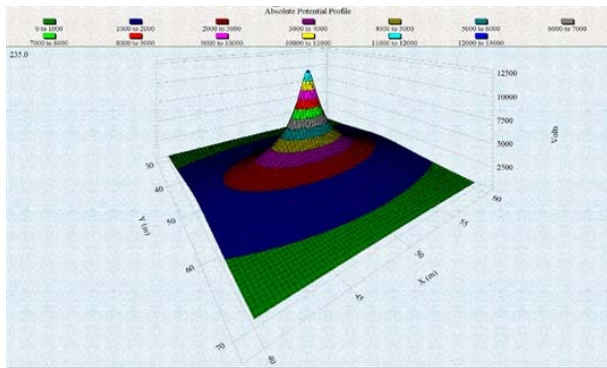


Figura 2 : Voltaje del electrodo de 1 varilla caso 1.
Fuente: propia

En la Figura 4 se presentan los perfiles de elevación de voltaje de los electrodos formados por dos varillas con una corriente de falla de 1 000 A con una separación de 3 m entre varillas, y en la Figura 5 el electrodo tiene 2 varillas separadas 5 m con una corriente de falla 200 A.

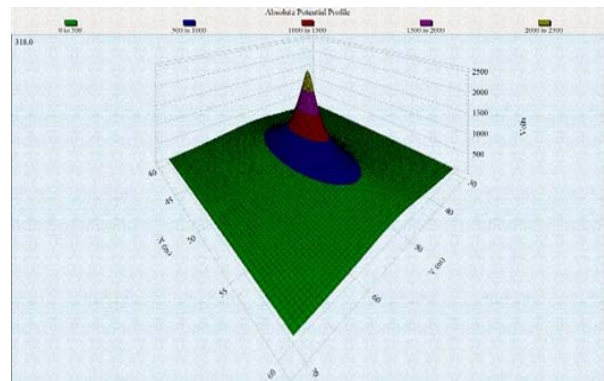


Figura 3 : Voltaje del electrodo de 1 varilla caso 2.
Fuente: propia

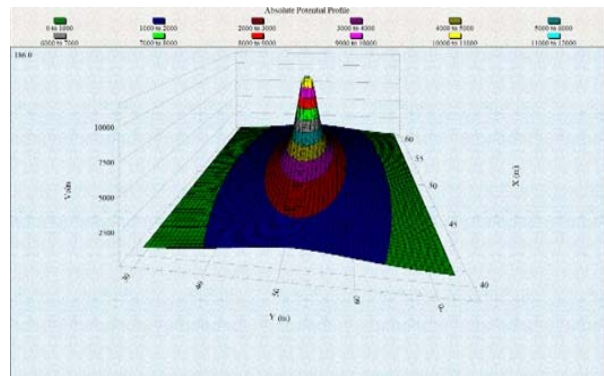


Figura 4 : Voltaje del electrodo de 2 varillas caso 13.
Fuente: propia

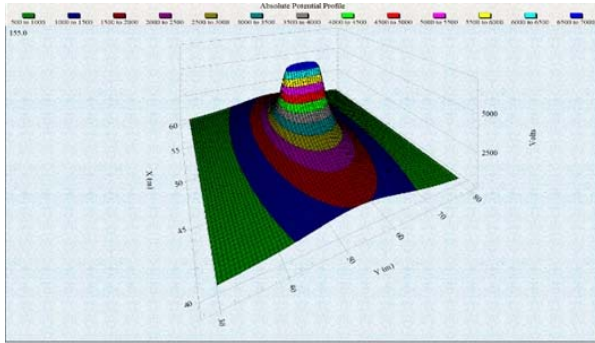


Figura 5 : Voltaje del electrodo de 2 varillas caso 22.
Fuente: propia

En la Figura 6 se presentan los perfiles de elevación de voltaje del electrodo formado por tres varillas con una corriente de falla de 1 000 A con una separación de 5 m en forma de triángulo.

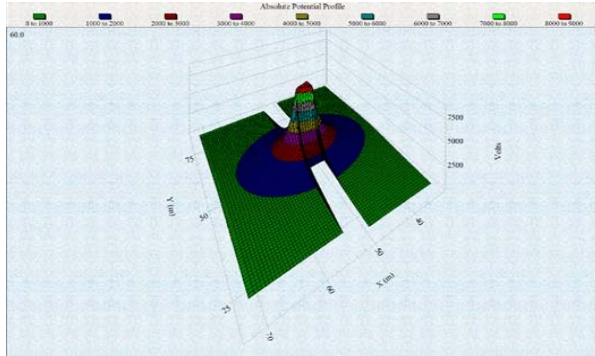


Figura 6 : Voltaje del electrodo de 3 varillas caso 26.
Fuente: propia

En la Figura 7 se puede apreciar la forma de los voltajes de paso del electrodo formado por una varilla con una corriente de falla de 1 000 A.

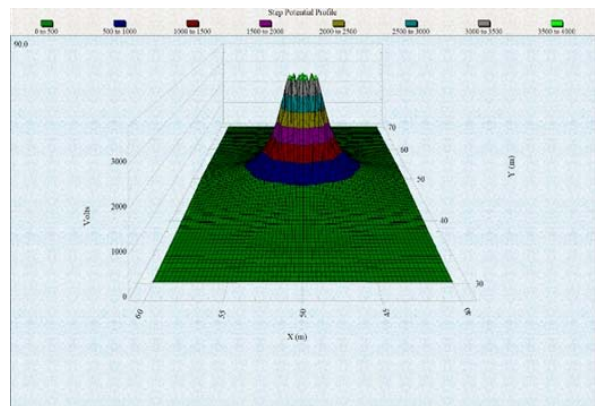


Figura 7 : Voltaje de paso del electrodo de 1 varilla caso 1.
Fuente: propia

En la Figura 8 se puede apreciar la forma de los voltajes de paso del electrodo formado por dos varillas con una separación entre varillas de 3 m y una corriente de falla de 1 000 A.

En la Figura 9 se puede apreciar la forma de los voltajes de paso del electrodo formado por tres varillas con una separación entre varillas de 5 m en forma de triángulo y una corriente de falla de 1 000 A.

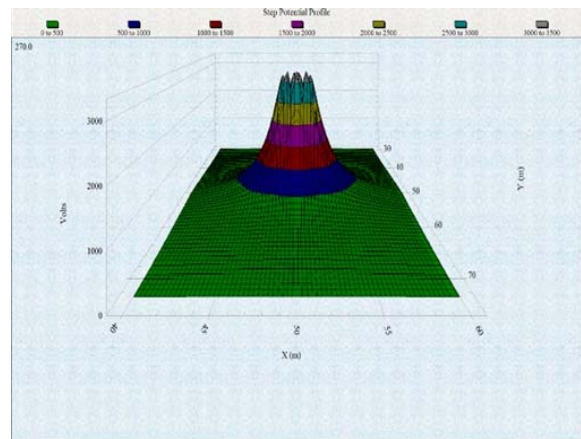


Figura 8 : Voltaje de paso del electrodo de 2 varillas caso 13.
Fuente: propia

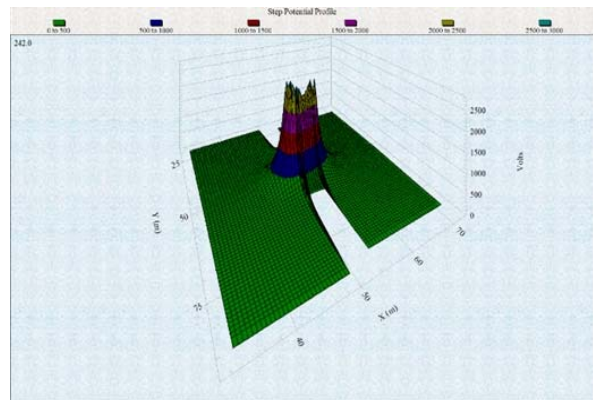


Figura 9 : Voltaje de paso del electrodo de 3 varillas caso 26.
Fuente: propia

En la Figura 10 se puede apreciar la forma de los voltajes de toque del electrodo formado por una varilla con una corriente de falla de 1 000 A.

En la Figura 11 se puede apreciar la forma de los voltajes de toque del electrodo formado por dos varillas con una separación entre varillas de 3 m y

una corriente de falla de 1 000 A.

En la Figura 12 se puede apreciar la forma de los voltajes de toque del electrodo formado por tres varillas con una separación entre varillas de 5 m en forma de triángulo y una corriente de falla de 1 000 A.

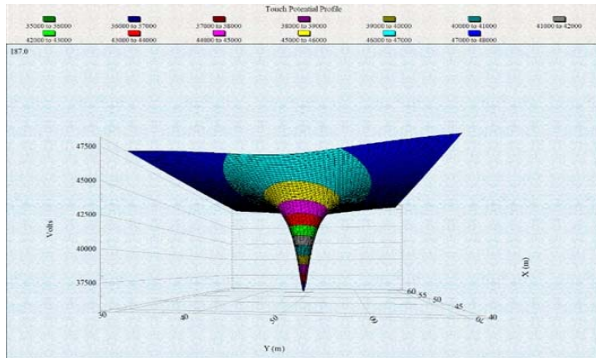


Figura 10 : Voltaje de toque del electrodo de 1 varilla caso 1.

Fuente: propia

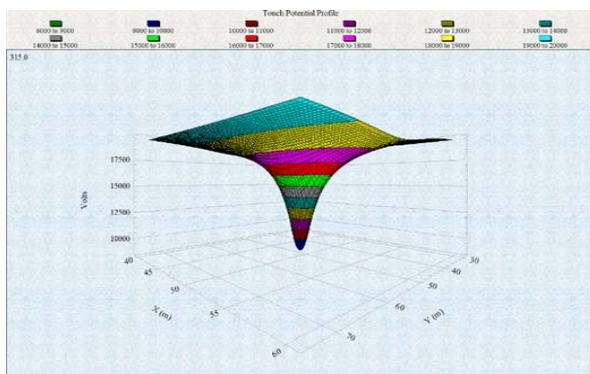


Figura 11: Voltaje de toque del electrodo de 2 varillas caso 13.

Fuente: propia

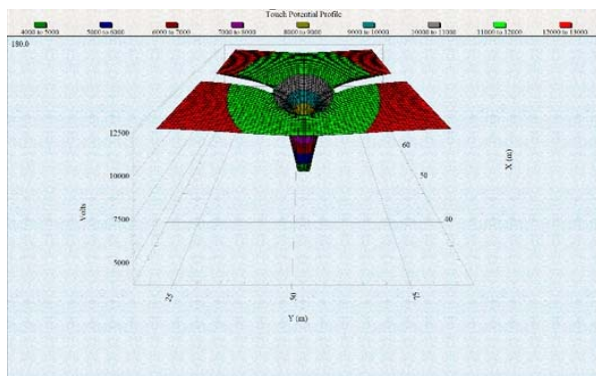


Figura 12 : Voltaje de toque del electrodo de 3 varillas caso 26.

Fuente: propia

4. DISCUSIÓN.

Las simulaciones de los electrodos de puesta a tierra formados por una varilla permiten observar y comprender su funcionamiento. En la Tabla 2 en los casos 1, 2 y 3 se probó el efecto de inyectar 1 000, 200 y 3 000 A con un suelo uniforme de 100 Ω .m. Estos valores de corriente son típicos para una red de bajo voltaje tanto residencial como industrial y considerando un suelo con un valor medio en resistividad. Lo que podemos observar en primer lugar es los altos valores de voltajes de toque y de paso que produce el electrodo, por ejemplo, en el caso 1 produce un voltaje de toque de 47.6 kV, en el caso 2 de 9.5 kV y en el caso 3 de 142.8 kV. Podemos observar que los voltajes de toque y de paso tolerables tanto de 50 kg como de 70 kg son independientes de estas corrientes y son iguales en los tres casos. De esta manera en el caso 1 y caso 3 los voltajes del electrodo superan los valores tolerables y en el caso 2 sólo el voltaje de paso del electrodo no supera al voltaje de paso tolerable. Esto se puede observar también en la Figuras 2 y 3 donde la gráfica indica la forma de la elevación de voltaje del electrodo, la cual tiene una forma cónica que alcanza su valor máximo GPR en el electrodo y decae rápidamente a medida que se aleja del electrodo. Esto produce que la diferencia de voltaje a 1 metro de espaciamiento, es decir el voltaje de paso sea alto. La forma de este voltaje de paso en el espacio se aprecia en la Figura 7. Por su parte el voltaje de toque de 1 varilla se puede apreciar en la Figura 10 y se observa que el voltaje de toque es elevado al alejarnos del electrodo. También podemos cuantificar la resistencia de puesta a tierra del electrodo que es de 48.161 Ω en los casos 1, 2 y 3, este valor es alto y no representa un buen valor para una correcta derivación de las corrientes a tierra. De los casos 1, 2 y 3 se puede indicar que un electrodo formado por una varilla es peligroso porque genera altos voltajes de toque y de paso, y estos voltajes crecen con la corriente de falla.

En la Tabla 2, los casos 4, 5 y 6 ponen a prueba el electrodo de 1 varilla de los casos 1, 2 y 3 pero sin una capa superficial de protección, y el efecto no se da en los voltajes de toque del electrodo sino en los voltajes de toque y de paso tolerables que disminuyen, si los valores tolerables disminuyen el efecto en la práctica es que el electrodo es más inseguro para un ser humano.

En la Tabla 3, se pone a prueba el electrodo de una varilla con un suelo más resistivo de $1\,000\ \Omega\cdot\text{m}$, que es un valor alto pero típico en lugares secos. Podemos observar que al compararlos con los casos 1, 2 y 3 han aumentado en 10 veces los voltajes de toque y de paso del electrodo, de la misma manera la resistencia del electrodo. Y, por otro lado, los casos 10, 11 y 12 ponen a prueba el electrodo con un suelo de $50\ \Omega\cdot\text{m}$, que es un buen suelo típico en zonas húmedas y con suelos con vegetación, en este caso los voltajes de toque y de paso del electrodo han bajado y también la resistencia del electrodo a $24\ \Omega$. De aquí se entiende que el suelo juega un papel importante a la hora de controlar los voltajes de toque, de paso y la resistencia del electrodo, por lo que en la construcción de un electrodo resulta beneficioso reducir la resistividad del suelo para reducir los voltajes del electrodo. Sin embargo, de todos los casos con una varilla, los voltajes del electrodo y las resistencias de puesta a tierra son altas, por lo que este tipo de electrodo no es recomendable. El mismo efecto puede tenerse con un electrodo activado, que por su forma es prácticamente un electrodo de una varilla, por lo que un electrodo activado debe usarse considerando otros medios para reducir los voltajes de toque y de paso y no tomar como único criterio la reducción de la resistencia del electrodo.

En la Tabla 4, se pone a prueba otro electrodo simple y común, que consiste en enterrar dos varillas unidas por un cable de cobre a una cierta distancia. En los casos 13, 14 y 15 se utiliza un conductor de calibre AWG 2 y en los casos 16, 17 y

18 un conductor AWG 2/0, con el objetivo de observar el efecto del tamaño del conductor. Para todos estos casos la separación entre varillas es de 3 m.

De la misma manera que un electrodo de una varilla, este tipo de electrodo produce voltajes de toque y de paso muy altos que superan los valores tolerables, es decir es un electrodo peligroso. En lo que respecta al calibre del conductor podemos apreciar que con un conductor más grande se reducen los voltajes de toque, pero aumentan los voltajes de paso. Sin embargo, el cambio es poco representativo, por ejemplo, entre el caso 13 y el caso 16 el voltaje de toque cambia de $19\,397.5\ \text{V}$ a $19\,144.6\ \text{V}$, que es un cambio del 1.3 %. Podemos observar que el mejor efecto que tiene este electrodo de dos varillas frente al de una es que reduce la resistencia del electrodo a $20\ \Omega$, pero sigue siendo un valor alto.

En la Tabla 5, se pone a prueba el electrodo de dos varillas, pero con distancias de separación mayores, de 5 y de 10 metros entre varillas y con los dos tipos de conductores AWG 2 y AWG 2/0. A medida que se aumenta la distancia de separación se reducen los voltajes de toque y de paso y también se reduce la resistencia de puesta a tierra. Esto quiere decir que el electrodo de dos varillas es mejor que el electrodo de una varilla si se colocan las varillas con separaciones grandes en el orden de 10 m, lo que en la práctica puede resultar factible en ciertos casos. Este efecto se observa en las Figuras 4 y 5, en la Figura 4 la forma del voltaje del electrodo es cónica porque la separación entre varillas no es muy grande, pero en la Figura 5 se puede apreciar como el voltaje se alarga en forma de una línea siguiendo el perfil del electrodo, y eso hace que en esa zona el voltaje de paso y de toque baje.

Como se puede intuir del caso de dos varillas, aumentar el número de varillas puede mejorar el desempeño del electrodo. Por lo que en la Tabla 6 se observa el efecto de poner a prueba un

electrodo de 3 varillas. En el caso 23 se tienen 3 varillas en línea recta con una separación de 5 m. En los casos 24, 25 y 26 se tienen tres varillas formando un triángulo, porque el electrodo triangular es bastante común en sistemas de puesta a tierra, residenciales e industriales y en especial en pararrayos.

En el caso 23 tenemos voltajes de toque y de paso menores que con dos varillas, de la misma manera una resistencia del orden de 10.7Ω . El voltaje de toque es muy alto pero el voltaje de paso cumple con lo requerido. Considerando que la separación es de 5 m, se podría mejorar aumentando la distancia entre varillas como en los casos antes descritos.

Por su parte, el caso 24 y 25 son triángulos equiláteros de 5 metros de lado, en el caso 25 sin embargo no se pusieron varillas, sino sólo un conductor enterrado. El efecto de no tener varillas aumenta el voltaje de toque y de paso por lo que no es conveniente evitar las varillas en este tipo de electrodo del caso 25. Por su parte el triángulo con varillas tiene mejores resultados que un electrodo de 3 varillas en línea recta, pero aún el voltaje de toque es muy alto, el diseño podría mejorarse al hacer el triángulo más grande. El caso 26 prueba el triángulo con varillas espaciadas a 5 m pero con un conductor más grueso y es interesante observar que los voltajes de toque, de paso y la resistencia del electrodo aumentan.

La Figura 5 presenta la forma del voltaje del electrodo triangular, se puede observar como el voltaje se eleva con la forma del electrodo, esto permite entender también que para reducir los voltajes de paso y de toque conviene tener formas geométricas en lugar de líneas o puntos que sería tener una o dos varillas. Y hacer más grande el área de ese electrodo. Por lo que de este análisis es evidente que los electrodos normalmente deben tener varias varillas, áreas grandes y eso se logra con los electrodos en forma de malla.

Una vez que se ha observado como funciona un electrodo de puesta a tierra podemos aseverar que los electrodos de una o dos varillas enterradas en el suelo que se utilizan muchas veces por desconocimiento en las instalaciones residenciales no son buenos electrodos de puesta a tierra, pues generan altos voltajes de toque y de paso que pueden llegar a ser peligrosos para la vida de las personas que transitan por el lugar en donde están enterradas estas varillas; este electrodo también es poco efectivo a la hora de derivar la corriente a tierra porque tiene resistencias altas.

Con los resultados obtenidos es posible entender y realizar recomendaciones de tipo constructivo en este tipo de electrodos simples:

- Mejorar la resistividad del suelo, con métodos como el cambio de suelo, uso de cementos y geles conductivos para reducir tanto la resistencia de puesta a tierra como los voltajes de toque y de paso.
- Siempre colocar una capa superficial sobre el área del electrodo con el fin de elevar el voltaje de toque y de paso tolerable. Esto se puede hacer colocando capas de piedras, cemento, ripio lavado que tenga alta resistividad en el orden de los miles de $\Omega.m$.
- En la medida de lo posible en cada proyecto buscar la forma de construir electrodos con varias varillas para reducir los voltajes de toque y de paso. Pero analizando la distancia de separación, no basta con colocar varias varillas en paralelo sino colocarlas a una distancia grande entre ellas.
- La utilización de electrodos activados es muy útil porque estos reducen enormemente la resistencia de puesta a tierra. Sin embargo, no se los debería utilizar solos ya que equivalen a un electrodo de una varilla, y sus voltajes de toque y de paso son muy elevados. Una

utilización prudente de este tipo de electrodos puede hacerse colocándolos como una varilla en un electrodo más complejo, por ejemplo, en el centro de una malla triangular, o cuadrada. De esa manera el electrodo activado reduciría la resistencia del electrodo y la geometría del electrodo ayudaría a controlar los voltajes del electrodo.

- Utilizar programas de cálculo computacionales de tipo gráfico, donde además de obtener los valores resultantes del electrodo se puede observar como desarrolla sus voltajes. De manera que el diseño del electrodo se haga considerando el criterio de seguridad para las personas que habitarán cerca de ese electrodo. No asumir diseños o ejecutar construcciones de esos electrodos sin un estudio previo desarrollado por un profesional.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Este artículo desarrolló un análisis de los voltajes de toque y de paso de electrodos de puesta a tierra simples compuestos por una, dos y tres varillas. Se presentan los argumentos en la sección 4 para aseverar que un electrodo formado por una varilla no es efectivo como una puesta a tierra y además es peligroso porque desarrolla voltajes de paso y de toque muy altos incluso con corrientes bajas de falla. De esta manera se debe evitar usar una varilla de metal enterrada como una puesta a tierra y se debe evitar su aplicación en instalaciones de tipo residenciales donde las personas están cerca de los electrodos y podrían sufrir un choque eléctrico cuando exista una descarga en el electrodo.

Utilizar dos varillas tampoco ayuda mucho y sigue siendo un electrodo poco eficiente y peligroso.

Al incrementar las varillas y la geometría del electrodo se puede obtener un electrodo efectivo y más seguro. En la medida de lo posible se debe

buscar construir electrodos de tipo malla, y se debe hacer el diseño y el estudio de voltajes del electrodo que se desea construir en cada caso. No construir el electrodo con un diseño tipo o en base a experiencia, porque cada suelo, cada caso particular tendrá resultados diferentes. Este tipo de diseños puede costar más, pero garantizará la seguridad de las instalaciones y la vida de las personas que es un factor invaluable.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

Abdelkader, B., Boubakeur, Z., Tahar, S., & Yahia, S. (2020). Implementation and Design of Grounding Systems Using COMSOL multiphysics. *020 1st International Conference on Communications, Control Systems and Signal Processing (CCSSP)*, 513-517.
<https://doi.org/10.1109/CCSSP49278.2020.9151798>

Brenna, M., Foadelli, F., Longo, M., & Zaninelli, D. (2018). Particular grounding systems analysis using FEM models. *2018 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 1-6.
<https://doi.org/10.1109/ICHQP.2018.8378860>

Cabezas, K., Jiménez, P., Ramirez, J. D., & Canelos, R. (2020). Simulación del campo electromagnético en una línea de transmisión de extra alto voltaje mediante el método de los elementos finitos. *MASKAY*, 11(1), 1-12.
<https://doi.org/10.24133/maskay.v11i1.1724>

Ghoneim, S., Hirsch, H., Elmorshedy, A., & Amer, R. (2006). Effect of profile location on step and touch voltages of grounding grids. *2006 Eleventh International Middle East Power Systems Conference, 1*, 228-233.

Ghoneim, S. S. M., & Taha, I. B. M. (2016). Control the cost, touch and step voltages of the grounding grids design. *IET Science, Measurement Technology*, 10(8), 943-951.
<https://doi.org/10.1049/iet-smt.2016.0153>

Hatziargyriou, N. D., & Lorentzou, M. (1997). Grounding systems design using EMTP. *Proc. 23rd European EMTP Users Group Meeting*, 9-11.

Huang, D., Xia, J., Ruan, J., Wu, Y., & Quan, W.

- (2019). Characteristics of the Flexible Graphite Grounding Material and its Engineering Application. *IEEE Access*, 7, 59780-59787. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2913558>
- IEEE. (2007). *IEEE 142-2007—IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems*. <https://standards.ieee.org/standard/142-2007.html>
- IEEE. (2013). *IEEE 80-2013—IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*. <https://standards.ieee.org/standard/80-2013.html>
- Kasim, I., Abduh, S., & Fitryah, N. (2017). The effect of mesh size, number of rod, length of rod towards touch voltage, step voltage, and ground resistance in grounding system. *2017 International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS)*, 356-361. <https://doi.org/10.1109/ICHVEPS.2017.8225870>
- Kumar, A., & Bharadwaj, P. D. (2015). *EFFECT OF GRID PARAMETER VARIATION ON THE PERFORMANCE OF GROUNDING SYSTEM*. 3(11), 7.
- MEER. (2020). *PTO - OAC8_1 (ACOMETIDA)*. http://www.unidadespropiedad.com/index.php?option=com_content&view=article&id=371&Itemid=308
- MIDUVI,. (2013). CAPÍTULO 15 INSTALACIONES ELECTROMECÁNICAS. En *NORMA ECUATORIANA DE CONSTRUCCIÓN*.
- MIDUVI,. (2018). INSTALACIONES ELÉCTRICAS. En *NORMA ECUATORIANA DE CONSTRUCCIÓN*.
- Ramirez, J. D., Cabezas, K., Jiménez, P., Canelos, R., & Escobar, B. (2020). Cálculo de la Distribución de Voltajes en las Cadenas de Aisladores de una Línea de Transmisión de 500 kV utilizando el Método de los Elementos Finitos. *Enfoque UTE*, 11(3), 1-14. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v11n3.619>
- Rock, M., Müller, K.-P., Shulzhenko, E., & Schünge, R. (2018). Mesh width of ground grids in shelters with small base areas for low step voltages at lightning currents. *2018 34th International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICLP.2018.8503353>
- Tang, K., Ruan, J., Huang, D., Zhan, Q., Xiao, W., & Li, H. (2016). Application study of flexible graphite grounding electrode in typical tower grounding grid. *2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, 1-4. <https://doi.org/10.1109/ICHVE.2016.7800591>
- Tleis, N. (2007). *Power systems modelling and fault analysis: Theory and practice*. Elsevier.
- Unde, M. G., & Kushare, B. E. (2012). Cost effective design of grounding grid using ground rods—A case study. *2012 IEEE Fifth Power India Conference*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/PowerI.2012.6479520>