

INFLUENCIA DE LA FORMA DEL ELECTRODO EN LA RESISTENCIA FINAL DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA.

INFLUENCE OF THE ELECTRODE FORM IN THE FINAL EARTH GROUNDING SYSTEM RESISTANCE.

Wagner Durán

Gestión Energética y Tecnologías Aplicadas GENTEC S.A.
e-mail: wagfus@hotmail.com

Daniel Andagoya Alba

Instituto Superior Tecnológico Central Técnico
E-mail: andagoyalba@gmail.com

Resumen

El presente trabajo analiza la influencia de la forma del electrodo en la resistencia final de un sistema de puesta a tierra. Para el análisis se ha realizado un estudio analítico en el cual se determina la formulación matemática que permite calcular la resistencia final de un sistema de puesta a tierra con diferentes formas de electrodo, adicionalmente se han realizado pruebas de campo que permiten contrastar las conclusiones teóricas determinadas por el estudio analítico. Las pruebas de campo, así como el estudio analítico se las realizó en las instalaciones del Instituto Superior Tecnológico Central Técnico y se utilizaron inicialmente tres formas de electrodo, varilla, cilindro y en forma de cubo. Se procuró que cada uno de estos modelos tenga la misma área de contacto con la tierra, así como el mismo medio para poder evaluar la influencia de cada uno en la resistencia final del sistema. Los resultados muestran que la variación del modelo de electrodo si influye en la resistencia final del sistema de puesta a tierra siendo el más favorable el modelo de tipo varilla antes que los otros modelos analizados.

Palabras clave— Campo eléctrico, Electrodo de puesta a tierra, Resistencia de Puesta a tierra, Resistividad, Sistema de Puesta a tierra.

Abstract

This paper analyzes the influence of the electrode forms on the final grounding system resistance. For the analysis an analytical study has been carried out in which the mathematical formulation is determined that allows to calculate the final resistance of a grounding system with different electrode forms, additionally field tests have been carried out in the Instituto Superior Tecnológico Central Técnico, which allowed to contrast the theoretical data determined by the analytical study. It was tried that each one of the models used has the same area of contact with the earth to be able to evaluate the influence of each one in the final resistance of the system. The results show that the variation of the electrode model has influence on the final resistance of the system, the rod type model being more favorable than the other models analyzed.

Keywords — Electric Field, Grounding Electrode, Grounding Resistance, Resistivity, Grounding System.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad cualquier sistema eléctrico debe necesariamente tener una conexión a tierra, esta conexión resulta necesaria sobre todo en circuitos altamente sensibles a los sobrevoltajes y sobrecorrientes. El sistema de puesta a tierra debe permitir cumplir parámetros de seguridad y confiabilidad tanto en un estado de funcionamiento normal como en un estado de funcionamiento en falla, para lo cual la llamada resistencia de puesta a tierra es el factor principal que define el diseño de este tipo de sistemas, ya sea residencial, comercial o industrial (*Salam & Rahman, 2016*).

La resistencia de una puesta tierra tiene directa influencia en la seguridad que presenta un sistema eléctrico ante una falla, esto debido a que una resistencia a tierra muy elevada no permitiría la dispersión de una corriente de falla hacia la tierra lo que provocaría niveles de corrientes altas en las redes del sistema y errores en los sistemas de medición (*Ingeman-Nielsen, Tomaškovičová, & Dahlin, 2016; Tomaškovičová et al., 2016*).

Un sistema de puesta tierra generalmente está constituido por electrodos de acero recubiertos de una película delgada de cobre interconectados entre sí, a esta estructura se le conoce como la malla de puesta a tierra, sin embargo un sistema de puesta a tierra sencilla podría estar constituida únicamente con un electrodo, estos electrodos son varillas que pueden ser enterradas de forma horizontal o vertical. El diseño de este sistema dependerá de la instalación y sobre todo del va-

lor de resistencia de puesta a tierra final deseado. Para tener valores bajos de resistencia de puesta a tierra estudios previos han demostrado que se necesita aumentar el número de electrodos enterrados o a su vez aumentar la longitud o el radio de los mismos, esto permite tener una mayor área de contacto con la tierra y dispersar de mejor manera la corriente que se desea enviar hacia la misma, sin embargo ha surgido la inquietud de saber cuál será la reacción del sistema de puesta a tierra cambiando la forma del electrodo ya que hasta ahora solamente se han utilizado electrodos en forma de varilla, y adicionalmente, si alguno de estos modelos es técnicamente más eficiente (*Nahman & Djordjevic, 1996*).

En el presente artículo se presenta un estudio técnico analítico de utilizar diferentes formas de electrodo en un sistema de puesta a tierra. Para esto se ha realizado el desarrollo matemático que permitió calcular teóricamente los valores de resistencia de puesta tierra con cuatro modelos de electrodo distinto (varilla, cubo, cilindro y en forma de plancha circular). Adicionalmente se realizaron las pruebas de campo que permitieron corroborar de forma real los resultados obtenidos.

Los resultados obtenidos permitieron observar la variación de la resistencia de puesta a tierra con cada tipo de electrodo y sobre todo observar que modelo es técnicamente el más adecuado para conseguir una resistencia de puesta a tierra baja.

METODOLOGÍA

En el presente trabajo se estudió la teoría necesaria para determinar la resistencia final de un sistema de puesta a tierra con diferentes modelos de electrodo, este análisis se basa en la determinación del campo eléctrico creado por el electrodo en contacto con la superficie de la tierra. Cada modelo presenta un análisis matemático distinto en función de su forma y superficie de contacto con la tierra. Adicionalmente se construyeron modelos de electrodos que fueron enterrados a 0.6m de la superficie y se tomaron medidas de la resistencia final de cada modelo para una comparación con los resultados teóricos. La metodología de análisis está basada en estudios previos realizados por diversos autores (Ingeman-Nielsen et al., 2016; Salam & Rahman, 2016; Tomaškovičová et al., 2016).

2.1. Resistividad del suelo.

La resistividad de un material se define como la resistencia que presenta el mismo al paso de la corriente por cada unidad de superficie. Este valor tiene su importancia puesto que determina la resistencia final de algún material en función de su composición, longitud y área («IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System», 2012; Salam & Rahman, 2016).

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (1)$$

Dónde:

- ρ = Resistividad del elemento. [Ω -m]
- R = Resistencia. [Ω]
- l =longitud. [m]
- A = Área. [m²]

En la práctica es importante determinar la resistividad de cualquier suelo que permiten determi-

nar las discontinuidades en las propiedades eléctricas que presenta el mismo.

Actualmente existen algunas metodologías que permiten determinar mediante pruebas de campo la resistividad del suelo.

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

En este método se realizan varias mediciones de la resistencia de una puesta a tierra a diferentes profundidades de un electrodo en forma de varilla, estas mediciones se la puede realizar a través de un teluometro de tres puntos (Aydiner, 2009; «IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System», 2012).

El valor de resistencia medido reflejara implícitamente la resistividad aparente para cada profundidad de la varilla.

La resistividad del terreno en este método se calcula mediante la expresión:

$$\rho = \frac{R2\pi l}{\ln\left(\frac{4l}{r}\right) - 1} \quad (2)$$

Dónde:

- ρ = Resistividad del terreno. [Ω -m]
- R = Resistencia medida. [Ω]
- l = longitud del electrodo bajo la superficie del suelo. [m]
- r =radio del electrodo utilizado.

La determinación de la resistividad final del suelo se la puede determinar de forma visual (cuando ya se tenga un valor constante), sin embargo, también se puede utilizar modelos estadísticos que permiten determinar un valor de re-

sistividad con un porcentaje determinado de ser el valor real. Algunos métodos son simples como determinar el modelo del suelo a través de un promedio pero también existen otras metodologías como el método estadístico de BoxCox en la que se determina un valor de resistividad del suelo con una probabilidad del 70% de ser el real (Datta, Taylor, & Ledwich, 2015; Fundamentos e ingeniería de las puestas a tierra, 2007; Ramírez Castaño & Cano Plata, 2010).

Esta metodología estadística parte de los valores de resistividad medidos a través de cualquier metodología que se considere la adecuada. Con estos insumos se puede seguir los siguientes pasos para determinar un valor de resistividad del suelo a través del método de Box Cox (Fundamentos e ingeniería de las puestas a tierra, 2007; «IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding», 2015; RA6-014MEDIDADERESISTIVIDAD_V3.pdf, s. f.).

a. Tabular los datos de resistividad aparente medida ρ_i .

b. Calcular los logaritmos naturales de cada una de las medidas de resistividad

$$X_i = \ln(\rho_i) \quad (3)$$

c. Se calcula la resistividad promedio del suelo x como:

$$x = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} X_i}{n} \quad (4)$$

d. Se calcula

$$(X_i - x)^2 \quad (5)$$

e. Se calcula la desviación estándar S como:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (X_i - x)^2}{n}} \quad (6)$$

f. Se toma el valor de 0.524411 que corresponde al valor mostrado en la función de distribución normal para un valor de Z de 70%.

g. El valor final de la resistividad del suelo (con probabilidad del 70% de no ser superada) viene determinada por:

$$\rho = \ln^{-1}(S * Z + x) \quad (7)$$

2.2. Determinación de resistencia final de puesta a tierra con diferentes modelos de electrodo.

2.2.1. Potencial eléctrico (Salam & Rahman, 2016).

La resistencia de puesta a tierra está directamente relacionada con el potencial eléctrico. Si se considera que existe una carga de prueba q que se encuentra en el punto A y que debe moverse hasta un punto B .

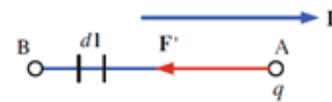


Figura 1: Carga de prueba separada por una distancia (Salam & Rahman, 2016).

La diferencia de potencial dV entre el punto A y B se define mediante la siguiente ecuación:

$$V_A - V_B = V_{AB} = \int_A^B E \cdot dl \quad (8)$$

Dónde:

- V_{AB} : es el voltaje del punto A con referencia al punto B.
- E : Intensidad de campo eléctrico.
- dl : diferencial de distancia.

2.2.2. Resistencia de puesta a tierra con un electrodo de forma de cilindro (Salam & Rahman, 2016).

Un electrodo en forma de cilindro de radio r y longitud l se inserta en el suelo.

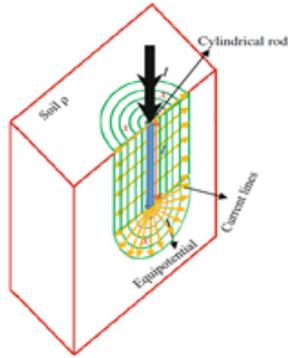


Figura 2: Electrodo en forma de cilindro enterrado en el suelo (Salam & Rahman, 2016).

En este caso en particular, el área superficial del electrodo a cualquier distancia radial x desde el eje longitudinal del cilindro puede escribirse como.

$$A = \pi x^2 + \pi x^2 + 2\pi x l \quad (9)$$

A cualquier distancia radial x , el campo eléctrico se puede escribir como,

$$E(x) = \rho J(x) = \rho \frac{I}{A} \quad (10)$$

Remplazando la expresión del área tenemos:

$$E(x) = \rho \frac{I}{2\pi x^2 + 2\pi x l} \quad (11)$$

El voltaje desde la distancia r hasta el infinito según la ecuación (8) se puede determinar mediante:

$$V = \frac{\rho I}{2\pi} \int_r^\infty \frac{1}{x(l+x)} dx \quad (12)$$

Realizando el desarrollo matemático tenemos:

$$V = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\ln \frac{r+l}{r} \right] \quad (13)$$

Sabiendo que:

$$Rg = \frac{V}{I} \quad (14)$$

Entonces la Resistencia de puesta a tierra de un electrodo en forma de cilindro es:

$$Rg = \frac{\rho}{2\pi} \ln \frac{r+l}{r} \quad (15)$$

2.2.3. Resistencia de puesta a tierra con un electrodo de placa circular (Salam & Rahman, 2016).

Una placa circular tiene un radio r insertado horizontalmente en el suelo. En la figura 3 se muestra una sección transversal del suelo con un electrodo de placa circular enterrado. Las líneas de corriente que salen de la placa circular tienen dos direcciones diferentes.

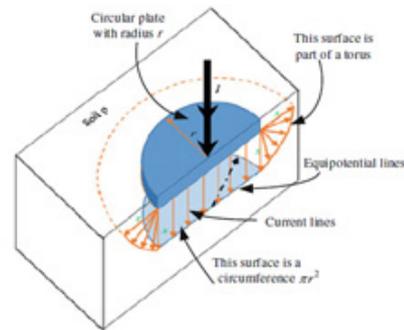


Figura 3: Sección transversal de Placa circular enterrada en el suelo (Salam & Rahman, 2016).

Las líneas de corriente que salen de los bordes son radiales y crean una superficie similar a un cuarto de toro, mientras que las líneas de corriente que salen de la parte inferior de la placa circular son verticales y forman una circunferencia de radio r . El radio interno de dicho toro es r y el radio externo es x como se muestra en la figura 3. En la figura 4 se muestra una representación bidimensional de una placa circular insertada en el suelo. En este caso, necesitamos encontrar el área de una parte del toro usando el primer teorema de Pappus (Salam & Rahman, 2016), que determina el área de superficie del toro de revolución como:

$$A = p \times d = p \times 2\pi x_c \quad (16)$$

Dónde:

- A : es el área del cuarto de toro de revolución.
- p : Perímetro del arco de cuarto de círculo.
- d : diámetro que dibuja el toro en la superficie horizontal
- x_c : Centroide del arco de cuarto de círculo.

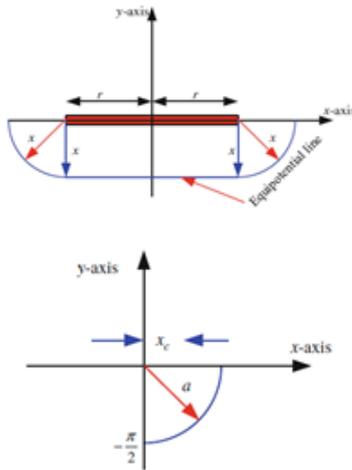


Figura 4: Placa circular enterrada en el suelo en dos dimensiones (Salam & Rahman, 2016).

El radio del arco se considera como a . El centroide del arco de cuarto de círculo se puede determinar cómo,

$$X_c = \frac{1}{\frac{\pi a}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} y a d\theta \quad (17)$$

$$X_c = \frac{2}{\pi a} \int_0^{\frac{\pi}{2}} (a \sin \theta) a d\theta \quad (18)$$

Como el arco de un cuarto de círculo se desplaza del eje externo por una distancia r , el valor del centroide es, (Salam & Rahman, 2016)

$$X_c = \frac{2x}{\pi} + r \quad (19)$$

El perímetro del arco es,

$$p = \frac{x\pi}{2} \quad (20)$$

Sustituyendo las ecuaciones. (19) y (20) en la ecuación. (16), el área en revolución es,

$$A = \frac{2x}{\pi} \left[2\pi \left(\frac{2x}{\pi} + r \right) \right] = 2\pi x^2 + \pi^2 r x \quad (21)$$

Finalmente, el área completa en revolución es la suma del área de parte del toro y el área de la circunferencia del radio r , que es,

$$A(x) = 2\pi x^2 + \pi^2 r x + \pi r^2 \quad (22)$$

Sustituyendo la ecuación. (22) en la ecuación. (10) tenemos,

$$E(x) = \frac{\rho l}{2\pi x^2 + \pi^2 r x + \pi r^2} \quad (23)$$

Sustituyendo la ecuación. (23) en la ecuación. (8) rendimientos,

$$V_{\infty} = \int_0^{\infty} \frac{\rho l}{2\pi x^2 + \pi^2 r x + \pi r^2} dx \quad (24)$$

Desarrollando la expresión anterior y sustituyendo en la Ecuación (14). La expresión de la resistencia del terreno se puede escribir como,

$$R_g = \frac{\rho}{4.5r} \quad (25)$$

2.2.4. Resistencia de puesta a tierra con un electrodo en forma de cubo.

El cubo consta de 6 placas rectangulares, cada una puede ser analizada de la misma forma que en la placa circular, es decir una superficie rectangular plana y una superficie de un cuarto de toro en los vértices del cubo.

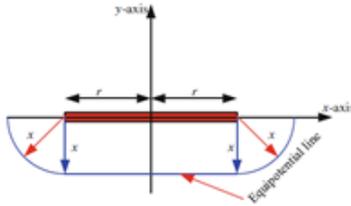


Figura 5: Sección transversal de placa rectangular enterrada en el suelo en dos dimensiones (Salam & Rahman, 2016).

El área del toro de revolución que se forma en cada límite de la placa es:

$$A = p \times d = p \times 2\pi x_c \quad (26)$$

El valor del centroide en este caso según la ecuación (17) y (18) es:

$$X_c = \frac{2x}{\pi} + \frac{1}{2} \quad (27)$$

El perímetro del arco es,

$$p = \frac{x\pi}{2} \quad (28)$$

Sustituyendo las ecuaciones. (27) y (28) en la ecuación. (26), el área en revolución es,

$$A_r = 2x^2\pi + \frac{xl\pi^2}{2} \quad (29)$$

Finalmente, el área completa en revolución es la suma del área de parte del toro y el área del rectángulo de lado l .

$$A_{(x)} = 12 \left[2x^2\pi + \frac{xl\pi^2}{2} \right] + 5l^2 \quad (30)$$

Sustituyendo la ecuación. (30) en la ecuación. (10) tenemos,

$$E_{(x)} = \frac{\rho l}{12 \left[2x^2\pi + \frac{xl\pi^2}{2} \right] + 5l^2} \quad (31)$$

Sustituyendo la ecuación. (31) en la ecuación. (8) rendimientos,

$$V_{\infty} = \int_0^{\infty} \frac{\rho l}{12 \left[2x^2\pi + \frac{xl\pi^2}{2} \right] + 5l^2} dx \quad (32)$$

La expresión de la resistencia del terreno se puede escribir como,

$$R_g = \frac{0.097\rho}{l} \quad (33)$$

RESULTADOS OBTENIDOS

La primera parte del estudio consiste en determinar la resistividad del terreno en el que se desarrollaron las pruebas de campo y que se utilizó como dato para los análisis teóricos. Posteriormente y con el dato de resistividad del suelo determinada se procede a presentar los datos de la resistencia de puesta a tierra con tres modelos de electrodos desarrollados en la parte práctica (Cubo, Cilindro y varilla). Se procuró que el área de contacto de cada electrodo con el suelo sea el mismo, esto con el objetivo de determinar la influencia de la forma de cada electrodo sin la in-

fluencia de otros parámetros que podrían intervenir en la resistencia final de la puesta a tierra.

3.1. Resistividad del suelo.

Se realizaron mediciones de la resistencia de puesta a tierra través de un electrodo en forma de varilla enterrado a diferentes profundidades de forma vertical.

Los resultados obtenidos y el caculo de la resistividad del suelo se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1: Determinación de resistividad de suelo

	Profundidad de la Varilla. [m]	Resistencia medida. [Ω]	Resistividad Aparente. [ρ _s]	$x_i = \ln \rho_i$	$(X_i - \bar{x})^2$
TRAYECTORIA A	0.3	no det	no det		
	0.6	600	469.58	6.15	0.02
	0.9	560	606.37	6.41	0.01
	1.2	450	615.76	6.42	0.01
	1.5	320	526.04	6.27	0.00
	1.8	240	458.84	6.13	0.03
TRAYECTORIA B	0.3	no det	no det		
	0.6	620	485.23	6.18	0.02
	0.9	550	595.54	6.39	0.01
	1.2	380	519.98	6.25	0.00
	1.5	330	542.48	6.30	0.00
	1.8	290	554.44	6.32	0.00
TRAYECTORIA C	0.3	no det	no det		
	0.6	610	477.40	6.17	0.02
	0.9	580	628.02	6.44	0.02
	1.2	550	752.60	6.62	0.10
	1.5	330	542.48	6.30	0.00
	1.8	280	535.32	6.28	0.00
TRAYECTORIA D	0.3	no det	no det		
	0.6	600	6.41	6.12	0.04
	0.9	560	6.36	6.39	0.01
	1.2	450	6.31	6.49	0.03
	1.5	320	5.80	6.33	0.00
	1.8	240	5.63	6.21	0.01
	SUMA		11072.34	126.16	0.33
	PROM		553.62	6.31	0.02
	DESV STA				0.13
	ρ		587.21		

Fuente: Propia.

3.2. Resistencia de puesta a tierra con electrodo en forma de cubo.

Las siguientes tablas presentan los resultados obtenidos tanto teóricos como prácticos de la resistencia final de un sistema de puesta a tierra con un electrodo en forma de cubo.

El lado del electrodo es de 0.25m y el área de contacto es 0.375m².

Tabla 2: Medidas de resistencia de puesta a tierra con un electrodo en forma de cubo.

Número de medida	Resistencia de puesta a tierra. [Ω]
1	200
2	200
3	190
4	190
5	190
PROMEDIO	194

Fuente: Propia.

Tabla 3: Comparación de Resistencia de tierra medida y calculada con un electrodo en forma de cubo.

	Cubo
Lado	0.25
Área de contacto	0.375
Resistencia calculada	227.84
Resistencia medida	194

Fuente: Propia.

3.3. Resistencia puesta a tierra con electrodo en forma de varilla.

La siguiente tabla presenta los resultados obtenidos tanto teóricos como prácticos de la resistencia final de un sistema de puesta a tierra con un electrodo en forma de varilla. El diámetro del electrodo es de 9/16" (radio = 7.14mm), con una longitud de 8.22m.

Tabla 4: Medidas de resistencia de puesta a tierra con un electrodo en forma de varilla.

Numero de medida	Resistencia de puesta a tierra. [Ω]
1	90
2	95
3	90
4	80
5	80
PROMEDIO	87

Fuente: Propia.

Tabla 5: Comparación de Resistencia de tierra medida y calculada con un electrodo en forma de varilla.

	Varilla
longitud	8.22
Radio	0.00714
Área de contacto	0.369
Resistencia calculada	80.13
Resistencia medida	88

Fuente: Propia.

3.4. Resistencia puesta a tierra con electrodo en forma de cilindro.

La siguiente tabla presenta los resultados obtenidos tanto teóricos como prácticos de la resistencia final de un sistema de puesta a tierra con un electrodo en forma de cilindro. El diámetro del electrodo es de 2" (radio = 25.4mm), con una longitud de 2.32m.

Tabla 6: Medidas de resistencia de puesta a tierra con un electrodo en forma de cilindro.

Número de medida	Resistencia de puesta a tierra. [Ω]
1	190
2	180
3	180
4	180
5	180
PROMEDIO	182

Fuente: Propia.

Tabla 7: Comparación de Resistencia de tierra medida y calculada con un electrodo en forma de varilla.

	Cilindro de 2"
Longitud	2.32
radio	0.0254
Área de contacto	0.374
Resistencia calculada	181.86
Resistencia medida	180

Fuente: Propia.

CONCLUSIONES

Según los resultados encontrados se puede concluir que la forma del electrodo si influye en la resistencia final de un sistema de puesta a tierra, esto debido a que este valor está directamente relacionado con el campo eléctrico formado por el electrodo que a su vez depende de la forma del mismo.

Los resultados muestran que la forma más adecuada para un electrodo en forma de varilla puesto que mientras más pequeño es el diámetro de la varilla para una misma área de contacto presenta una resistencia de puesta a tierra menor.

Los tipos de electrodos fueron enterrados a una misma profundidad y colocados de forma ho-

rizantal. En el caso de la varilla y de los cilindros podrían tener inclusive una resistencia de puesta a tierra menor si se los colocara de forma vertical.

En el caso de los electrodos en forma de cilindro se puede concluir que mientras más pequeño es el diámetro del mismo, mejor será la resistencia de puesta a tierra del sistema.

Con los resultados obtenidos se puede generalizar para mallas con varios electrodos, en este sentido una malla con electrodos en forma de varilla será mucho mejor que una malla con cualquier otra forma de electrodo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aydiner, M. G. (2009). Grounding Design Analysis. Recuperado de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.632.9673&rep=rep1&type=pdf>
- Datta, A. J., Taylor, R., & Ledwich, G. (2015). Earth grid safety criteria determination with the standards IEEE-80 and IEC-60479 and optimization of installation depth. 2015 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 1-5. <https://doi.org/10.1109/AUPEC.2015.7324834>
- Fundamentos e ingeniería de las puestas a tierra: Respuestas ante fallas eléctricas y rayos. (2007). Universidad de Antioquia.
- IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System. (2012). IEEE Std 81-2012 (Revision of IEEE Std 81-1983), 1-86. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2012.6392181>
- IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. (2015). IEEE Std 80-2013 (Revision of IEEE Std 80-2000/ Incorporates IEEE Std 80-2013/ Cor 1-2015), 1-226. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2015.7109078>
- Ingeman-Nielsen, T., Tomaškovičová, S., & Dahlin, T. (2016). Effect of electrode shape on grounding resistances — Part 1: The focus-one protocol. *GEOPHYSICS*, 81(1), WA159-WA167. <https://doi.org/10.1190/geo2015-0484.1>
- Nahman, J. M., & Djordjevic, V. B. (1996). Resistance to ground of combined grid-multiple rods electrodes. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 11(3), 1337-1342. <https://doi.org/10.1109/61.517488>
- RA6-014MEDIDADERESISTIVIDAD_V3.pdf. (s. f.). Recuperado de https://www.epm.com.co/site/Portals/0/centro_de_documentos/proveedores_y_contratistas/normas_y_especificaciones/normas_aereas/grupo_6_Normas_de_montajes_complementarios/RA6-014MEDIDADERESISTIVIDAD_V3.pdf
- Ramírez Castaño, J., & Cano Plata, E. (2010). SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA: Diseñado con IEEE-80 y evaluado con MEF.
- Salam, M. A., & Rahman, Q. M. (2016). Power Systems Grounding. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-0446-9>
- Tomaškovičová, S., Ingeman-Nielsen, T., Christiansen, A. V., Brandt, I., Dahlin, T., & Elberling, B. (2016). Effect of electrode shape on grounding resistances — Part 2: Experimental results and cryospheric monitoring. *GEOPHYSICS*, 81(1), WA169-WA182. <https://doi.org/10.1190/geo2015-0148.1>