

Sistemas de puesta a tierra en los cerros

José Daniel Soto Ortiz*, Christian González Púa**
Grupo de sistemas de potencia

Resumen

Durante los montajes de los sistemas de puesta a tierra en los cerros los ingenieros electricistas nos encontramos con el problema que el diseño realizado no cumple su objetivo de llevar el valor de la resistencia de puesta a tierra a un valor mínimo; sino que este valor puede llegar a ser, en el mejor de los casos, una cifra de dos dígitos. En este artículo se propone explicar la razón del poco acierto en los diseños de los sistemas de puesta a tierra en los cerros, basados en resultados de mediciones de campo.

Palabras claves: Puesta a tierra eléctrica, resistencia de puesta a tierra, modelos de puesta a tierra eléctricas.

Abstract

Electrical engineers have found a lot of problems when they tried to install the grounding system at the mountain. This problem consists in the high value of the grounded resistance. In this papers our propose is to explain why the grounded grid desing at the mountain works sometimes.

Key words: Electrical grounding system, grounded resistance, electrical grounding models.

Fecha de recepción: Marzo 15 de 1999

* Ingeniero electricista y Master en sistemas eléctricos de potencia de la Universidad Técnica de Georgia, URSS. Miembro del grupo de investigación en Sistemas de Potencia adscrito al CIUN. Jefe del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica y Docente de la Universidad del Norte. (E-mail: jsoto@guayaquil.uninorte.edu.co)

** Ingeniero electricista de la Universidad Nacional de Colombia. Docente del Dpto. de Ingeniería Eléctrica y Electrónica y Coordinador de la Especialización en Gerencia de Proyectos de Ingeniería en la Universidad del Norte. Miembro del grupo de investigación en Sistemas de Potencia adscrito al CIUN. (E-mail: cgonzalez@guayaquil.uninorte.edu.co)

El objetivo de los sistemas de puesta a tierra es garantizar la protección de los seres vivos y de los equipos que éstos operan, mediante su conexión a una malla enterrada en el suelo, que proporciona una resistencia pequeña para la disipación de las intensidades de corriente de falla o de desbalance. El propósito es obtener una resistencia de puesta tierra, menor de cinco ohms, que garantice la estabilidad de funciona-

miento de los equipos, lo que redundará en la protección del personal que los opera. Esto se cumple con alta probabilidad en terrenos de bajas resistividades y que además son planos, pero no así en terrenos de determinadas altitudes y similar resistividad.

Durante el trabajo realizado en la Costa Atlántica de montaje de sistemas de puesta a tierra para una empresa del sector industrial, se tenía un modelo diseñado de malla de puesta a tierra que serviría tanto para terrenos planos como montañosos. El modelo se basó en un diseño convencional del sistema de puesta a tierra bajo los criterios de Koch y Schwartz, combinados con catalizadores artificiales que mejorarían las condiciones.

Durante la instalación del sistema de puesta a tierra en los sitios planos y con bajas resistividades se obtuvieron excelentes resultados, que además eran los esperados por el diseño. No sucedió lo mismo en el montaje de los sistemas de tierra en los cerros, a pesar de que durante la fase de diseño se había seleccionado el caso crítico para realizar un modelo para todos los lugares en donde se necesitarían las instalaciones. Los resultados iniciales de medición de campo en los cerros fueron resistencias con valores promedio de 20 Ohms que no se ajustaban al valor esperado de diseño.

El procedimiento para la reducción del valor de puesta a tierra en los cerros se logró mediante la combinación del diseño original con metodologías no

convencionales, por medio de sustancias artificiales y el modelo de «dominio de energía por almacenamiento» planteado en varios cursos sobre sistemas de puesta a tierra. Pero este resultado arrojó más dudas, puesto que mientras la combinación de estos métodos en un cerro mejoraba substancialmente el resultado de la resistencia de puesta a tierra ($R_{SPT} < 5 \text{ Ohms}$), en otras no sucedía igual. Por otro lado, los resultados en el caso de las mallas de menores dimensiones en combinación con el método de dominio de la energía por almacenamiento, arrojó mejores resultados que aquellos con mallas más grandes y costosas, lo que nos dejó más confundidos.

La pregunta que nos hacíamos era: ¿Cuál es la lógica para el correcto diseño de un sistema de puesta a tierra en los cerros? pues

1. Los métodos convencionales de Koch y Schwartz basados en la guía IEEE 80 no eran acertados.
2. El método del dominio de energía por almacenamiento tampoco arrojaba siempre los resultados esperados.

Entonces, ¿cuál debería ser ese criterio esencial para los diseños de los sistemas de puesta a tierra?

Nosotros creemos conveniente plantear una nueva metodología para el diseño de los sistemas de puesta a tierra con base en lo observado en este y otros trabajos de campo con las puesta a tierra,

basados en las características «conductoras» del terreno, tomándolo como un todo, y analizando el procedimiento de disipación de la energía en los electrodos. Esta metodología tan sólo será planteada en este artículo, puesto que aún estamos trabajando en la comprobación de ellos en los laboratorios de la universidad.

El planteamiento consiste en considerar el comportamiento de la distribución de los potenciales del suelo. Para efectos de la demostración, hemos considerado un caso simple de un semicasquete enterrado en el suelo, como se muestra en la figura 1.

En la figura 1 se muestra un terreno plano en el cual la propagación de la corriente se hace como se indica en el hemisferio de la tierra.

La caída de potencial desde el hemisferio de radio r_0 hasta el hemisferio de radio x es igual a

$$V_x = \int_{r_0}^x e \cdot dr$$

donde e = campo eléctrico, en volts/metro.

dr = elemento diferencial del radio.

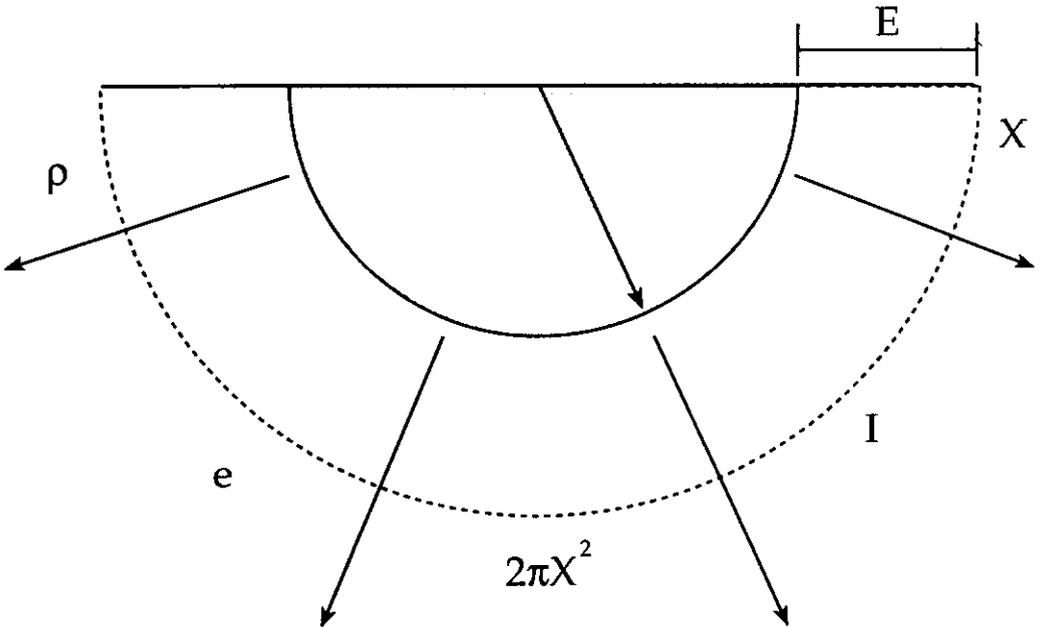


Figura 1

Se sabe que la densidad de campo eléctrico e es igual a:

$$e = pJ = pI / A$$

Donde ρ = resistividad del terreno en Ω - metro

J = densidad de corriente en Amp./m²

I = corriente, en amperio, que es constante

A = área normal a la dirección de propagación de la corriente en m²

Esta área A es igual a la superficie del hemisferio:

$$A = 2 \pi r^2$$

Por lo tanto, reemplazando:

$$V = \int_{r_0}^x p \cdot \frac{I}{A} dr = \int_{r_0}^x p \frac{I \cdot dr}{2\pi r^2} = \frac{pI}{2\pi} \int_{r_0}^x \frac{dr}{r^2}$$

$$V = \frac{p \cdot I}{2\pi} \left[\frac{1}{r_0} - \frac{1}{x} \right]$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} V = \frac{pI}{2\pi r_0} = R I$$

donde $R = \rho / (2 \pi r_0)$

La fórmula ya conocida.

Si en vez de considerar la propagación hemisférica de la corriente, tomamos una sección cilíndrica de radio r_0 :

$$V_x = \int_{r_0}^L p \cdot \frac{I}{A} dx$$

donde I y A son constantes, y $A = \pi r_0^2$

$$V_x = \int_0^L p \cdot \frac{I}{\pi r_0^2} dx = \frac{pI}{\pi r_0^2} L = \frac{pL}{\pi r_0^2} \cdot I$$

$$R = p \frac{L}{\pi r_0^2}$$

Otra fórmula conocida.

Ahora, consideremos un cerro que podemos representar por un cono de revolución truncado con un ángulo α en su vértice.

En este caso, la propagación de la corriente se hace en el casquete hemisférico indicado y que tiene un área de $S_{h_0} = 2 \pi h_0^2$

$$\begin{aligned} d_{S_x} &= 2 \pi y ds \\ &= 2 \pi y \sqrt{dx^2 + dy^2} \\ &= 2 \pi y \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx \\ &= 2 \pi y \sqrt{1 + \left(\frac{-x}{y}\right)^2} dx \\ &= 2 \pi \sqrt{x^2 + y^2} dx \end{aligned}$$

$$dS_x = 2 \pi r dx$$

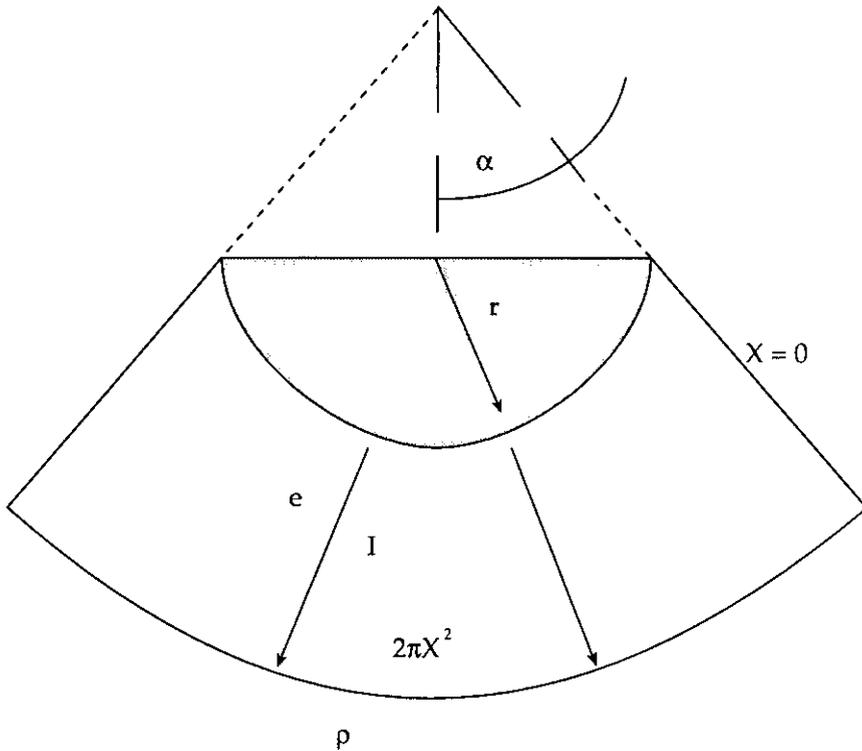


Figura 2

Caso límite: $\alpha = 90^\circ \Rightarrow r \cos 90^\circ = 0$

$$dS_x = 2\pi r dx$$

$$S = 2\pi r \int_{r \cos \alpha}^r dx = 2\pi r [r - \cos \alpha]$$

$$S = 2\pi r^2 [1 - \cos \alpha]$$

$$V = \int_{r_0}^x \rho \cdot \frac{I}{A} dr = \int_{r_0}^x \rho \cdot \frac{I dr}{2\pi r^2 [1 - \cos \alpha]}$$

$$= \frac{\rho}{2\pi(1 - \cos \alpha)} \int_{r_0}^x \frac{dr}{r^2} = \frac{\rho}{2\pi(1 - \cos \alpha)} \left[\frac{1}{r_0} - \frac{1}{x} \right]$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\rho}{2\pi(1 - \cos \alpha)} \left[\frac{1}{r_0} - \frac{1}{x} \right]$$

$$V = \frac{\rho I}{2\pi(1 - \cos \alpha) r_0}$$

donde $R = \rho / (2\pi r_0(1 - \cos \alpha))$

Este es un valor mayor comparado con el que se obtendría por la fórmula de la superficie plana, y que explicaría lo sucedido en las puestas a tierra de los cerros.

En la siguiente tabla se muestran los resultados definitivos de las resistencias de puesta a tierra.

como el ETAP 1000 y el ALGOR, sin descuidar los modelos prácticos a escala que se desarrollen en los laboratorios de la

Lugar	Dimensiones m ²	R, ohm - m	Observ.
Estación Arenosa - Barranquilla	16.0 x 8.0	0.57	Plano
Estación Arenosa - Barranquilla	5.0x 5.0	0.24	Plano
Estación Heroica - Mamonal	16.0x8.0	0.7	Plano
Estación Heroica - Mamonal	4.5x3.0	0.27	Plano
Cerro la Piche - Sucre	16.0x3.0	0.94	Cerro
Cerro la Piche - Sucre	3.0x2.0	2.05	Cerro
Cerro Kennedy - Magdalena	16.0x3.0	3.05	Cerro
Cerro Kennedy - Magdalena	3.5x2.0	3.89	Cerro
Cerro Bañaderos - Guajira	94	2.89	Cerro
Cerro Bañaderos - Guajira	5.0x5.0	4.15	Cerro
Cerro La barra - Córdoba	135	7.99	Cerro
Cerro La barra - Córdoba	5.0x5.0	9.46	Cerro

Se nota que en los lugares planos se obtuvieron mejores resultados, mientras en los cerros sólo se alcanzaron estos valores por la combinación de las metodologías convencionales y las no tradicionales.

Conclusión

Con base en los datos experimentales y en el análisis del sistema de puesta a tierra de acuerdo con el modelo del conductor, se hace necesario encontrar una solución eficaz para el modelamiento de las mallas de puesta tierra en los cerros. Nosotros seguiremos buscando este modelo, que estaremos probando con *softwares* de simulación, tales

universidad. En cuanto a la incongruencia de los resultados obtenidos entre las mallas pequeñas (resistencias de puesta a tierra pequeñas) y las mallas de mayores dimensiones (resistencias de puesta a tierra grandes), no hemos encontrado aún una solución aceptable, pero continuamos trabajando en este problema.

Bibliografía

VISAGRO, S.F. y PORTELA, C. M. «Modelamiento de puestas a tierra eléctricas para fenómenos rápidos». Seminario Internacional de puesta a tierra. Abril 1994 - Bogotá.

VISAGRO, S. «Curso de sistemas eléctricos de puesta a tierra». Seminario Internacional de puesta a tierra. Abril 1994 - Bogotá.

GARCÍA, R. *La puesta a tierra de instalacio-*

nes eléctricas y el RAT. España, Marcombo 1991.

SANTOYA, B. «Mantenimiento de sistemas de puesta a tierra». Trabajo de I+D. Universidad del Norte, 1997.

SOTO, J.D. «Curso de sistemas de puesta a tierra», CEC - Universidad del Norte, 1997.

ACIEM - Capítulo Atlántico. «Sistemas de

puesta a tierra con hidrosolta». 1997.

IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms. New York, IEEE, 1984.

CASABLANCA, M. «Problemas Resueltos de Cálculo Integral». Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá.