

# Optimización de electrodos de puesta a tierra

César-S. Cañas-Peñuelas<sup>1</sup>, S. Catalan-Izquierdo<sup>1</sup>, José-M. Bueno-Barrachina<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Instituto de Tecnología Eléctrica  
Universidad Politécnica de Valencia  
Edificio 5E, Tercera Planta

Camino de Vera s/n 46022 Valencia (España)

Phone: +34 96 3877593, +34 963877599, email: [cscanas@ite.upv.es](mailto:cscanas@ite.upv.es), [scatalan@ite.upv.es](mailto:scatalan@ite.upv.es), [jmanuel.bueno@ite.es](mailto:jmanuel.bueno@ite.es)

## 1. Resumen.

El comportamiento de los electrodos de puesta a tierra de las instalaciones eléctricas es fundamental para la seguridad de las personas que conviven y manejan las infraestructuras, así como para el buen funcionamiento de ellas.

Las partes fundamentales de una instalación de puesta a tierra son:

- El electrodo. Geometría y dimensiones.
- Terreno. Resistividad y constante dieléctrica

En este artículo se va estudiar el comportamiento de electrodos (utilizando la técnica de análisis por elementos finitos) simples excitados con corrientes senoidales de frecuencia industrial e impulsos de corriente tipo rayo, para este tipo de excitación se va a tener en cuenta la posible ionización del terreno, en las proximidades del electrodo.

**Palabras clave:** Electrodos de puesta a tierra, elementos finitos, características del suelo, alta frecuencia.

## 2. Introducción.

Los electrodos de puesta a tierra se comportan de forma distinta en función del tipo de excitación y del comportamiento del terreno en el que está enterrado pudiéndose dibujar el siguiente circuito equivalente. (Figura 1.), donde la rama serie modeliza el electrodo y la rama paralelo al terreno

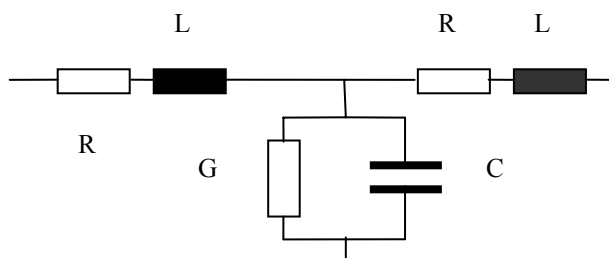


Figura 1. Circuito equivalente del electrodo de puesta a tierra

El análisis del circuito de la figura 1, permite obtener el valor de la resistencia de puesta a tierra (1) del electrodo pero no permite obtener en toda la zona de influencia del electrodo la distribución de tensiones el terreno, el campo eléctrico y la densidad de corriente. Estas dos últimas variables van a permitir:

- Obtener la longitud efectiva del electrodo. Para forma de onda tipo rayo el aumento del electrodo no da lugar a una disminución del valor de la puesta a tierra del electrodo. Existe una longitud a partir de la cual no vale la pena seguir aumentando el tamaño del electrodo.
- Obtener la distribución de campo eléctrico en el terreno. Existe un valor de campo eléctrico a partir del cual el terreno se convierte en conductor provoca un aumento del “tamaño” del electrodo que provoca una disminución del valor de la resistencia de puesta a tierra esperada.

$$R_t = \frac{V_t}{I_d} \quad (1)$$

## 3. Modelos

### 3.1. Simulación régimen permanente.

El primer modelo que se ha simulado es un pica de un metro de longitud y 25 mm de radio, enterrada en un terreno con una resistividad de 43.5  $\Omega\text{m}$ . y excitada con una corriente senoidal de frecuencia industrial [4]. Obteniéndose un valor de  $R_T = 23.86\Omega$  ( $I=37\text{ A}$   $V_{\text{max}}=907.6\text{ V}$ ) y la distribución de tensiones en el terreno que se ve en la figura 2.

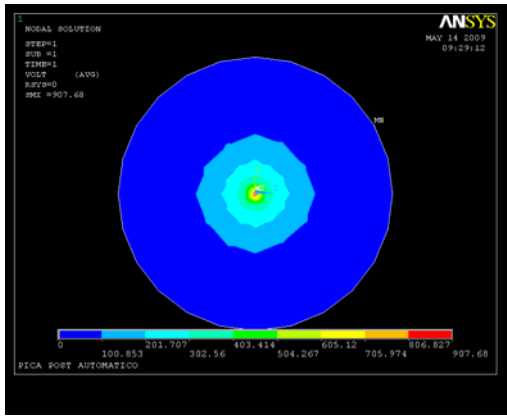


Figura 2. Distribución de tensiones en el terreno

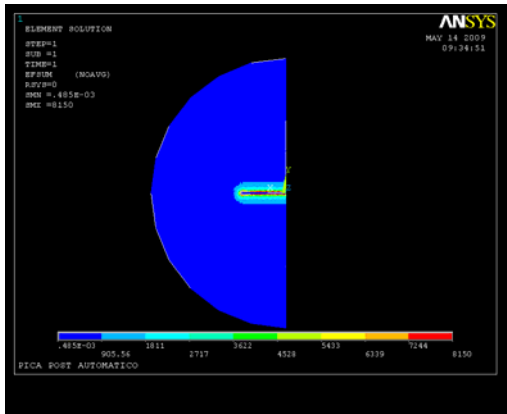


Figura 3. Distribución de campo eléctrico. Corte transversal en el terreno.

Este resultado coincide con el valor calculado por Leonid Grcev [1]

$$R_{l-rod} = \frac{\rho}{2\pi l} \left[ \ln\left(\frac{4l}{a}\right) - 1 \right] - l \gg a \quad (2)$$

donde  $\rho$  es la resistividad del terreno en  $\Omega m$ ,  $l$  es la longitud del electrodo en metros y  $a$  es el radio del electrodo en metros.

| Leonid Grcev   | EMF (autor) | Ensayo            |
|----------------|-------------|-------------------|
| 28.21 $\Omega$ | 23.86       | 23.2 $\Omega$ [4] |

Tabla 1. Resultados de los diferentes métodos de cálculo.

En las simulaciones anteriores se puede observar como el método de los elementos finitos da resultados correctos, con la ventaja añadida de que se obtiene la distribución de tensiones en el terreno y el campo eléctrico (figura 3) en una sección perpendicular al terreno, que corta la pica por su eje longitudinal.

### 3.2. Simulación en régimen transitorio.

El electrodo va a ser excitado con corrientes tipo rayo que alcanzan el pico cuando el tiempo transcurrido es de 1 microsegundo. Los resultados se pueden observar en la tabla 2.

| I (kA) | V <sub>máx</sub> (V) | E <sub>máx</sub> (V/m) | R <sub>t</sub> ( $\Omega$ ) |
|--------|----------------------|------------------------|-----------------------------|
| 4,992  | 11890                | 1*10 <sup>7</sup>      | 23.81                       |
| 9,984  | 237798               | 2*10 <sup>7</sup>      | 23.81                       |
| 19,968 | 475599               | 4,5*10 <sup>7</sup>    | 23.81                       |

Tabla 2. Resultados de simulación.

Estos datos difieren de los que se obtienen tanto por simulación como por ensayos debido a la posible ionización del terreno, que se alcanza cuando el campo eléctrico supera un cierto valor. En la bibliografía se utilizan diferentes valores de campo eléctrico crítico, entre 400 kV/m ó 300 kV/m, [9] ó expresiones validadas experimentalmente que dependen de la resistividad del terreno y la constante dieléctrica del medio [5]

$$E_c = 8.6083 * k_g^{-0.0103} * \sigma_g^{-0.1526} \quad (3)$$

El resultado de esta ecuación para un terreno, con una resistividad de 43.5  $\Omega m$  y una contante dieléctrica relativa igual a 5 (humedad de 5%), da un campo eléctrico crítico de 173 kV/m. que es ampliamente superado como se puede ver en la figura 4. ( $E_{máx} = 0.45 * 10^7$  V/m), de forma y manera que el resultado de la simulación que se puede observar en la tabla 2 no es correcto, es necesario incluir la zona ionizada (figura 5) en el modelo para obtener, la distribución de tensiones en el terreno y valor máximo de la tensión que permitirá obtener el valor de la resistencia de puesta a tierra del electrodo.

Observando la zona ionizada se puede deducir que la parte superior del electrodo (en la superficie del terreno) en donde hay una mayor cantidad de terreno ionizado. Conforme se adentra en el terreno se va reduciendo la cantidad de terreno que se ha vuelto conductor. De la observación de las figuras 3 y 4 se pueden sacar las siguientes conclusiones.

- La parte superior del electrodo drena la mayor parte de la corriente y provoca una mayor ionización del terreno [3]
- Al final del electrodo hay un aumento del campo eléctrico debido al efecto borde

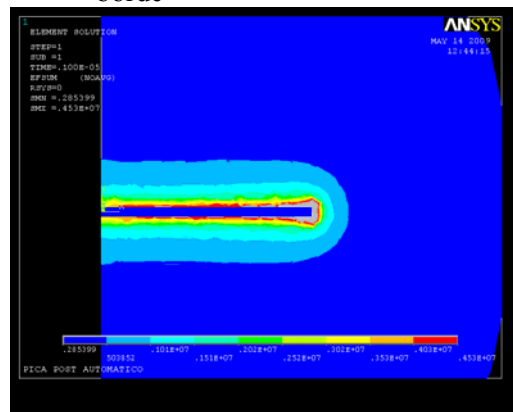


Figura 4. Campo eléctrico en pica excitada con 19,968 kA

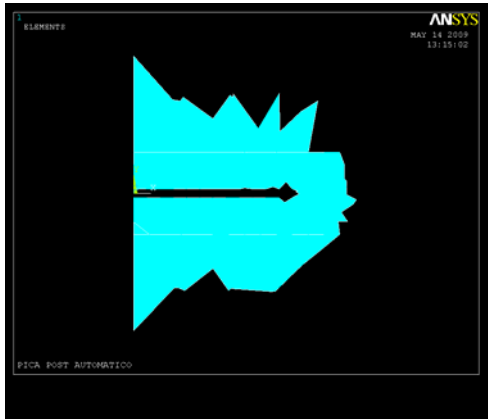


Figura 5. Zona del terreno ionizada

Para mejorar los modelos propuestos se va a realizar el proceso de modelización.(figura 6). Empleándose como tensión crítica el valor obtenido de la expresión (3) obtenida por T.K. Manna [5].

El resultado es la reducción del valor de la tensión de puesta a tierra. Se ha pasado de  $V_{\max}=475599$  V a una  $V_{\max}= 80040$  V con lo que la resistencia de puesta a tierra del electrodo se reduce a  $4 \Omega$  ( $23.81\Omega$ , sin ionización) que es muy inferior al resultado medido y calculado por [4]. donde la ionización daba como resultado una disminución de la resistencia de puesta a tierra a un valor de  $8\Omega$ . Esta desviación con los resultados medidos es debida al valor de la tensión crítica empleada en el proceso de simulación.  $E_c=173$  kV/m muy distinta a la manejada en [4] de  $350$  kV/m que es el valor medio entre  $400$  kV/m propuesto por CIGRE y los  $350$  kV/m propuestos por Mousa [9]

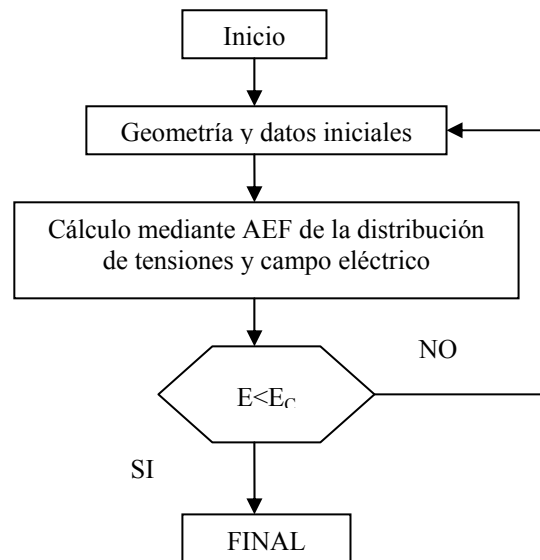


Figura 6. Organigrama de cálculo

#### 4. Optimización de la longitud del electrodo.

Las simulaciones realizadas durante todo el trabajo demuestran que la parte superior del electrodo (donde se inyecta la corriente) es la que drena una mayor parte de la corriente (fig 7y 8), lo que provoca que sea esta zona la que más “trabaja”. Este tipo de funcionamiento permite al autor establecer una línea de trabajo para determinar en cada tipo de electrodo y para cada terreno la longitud mínima de electrodo que minimiza la resistencia de puesta a tierra.

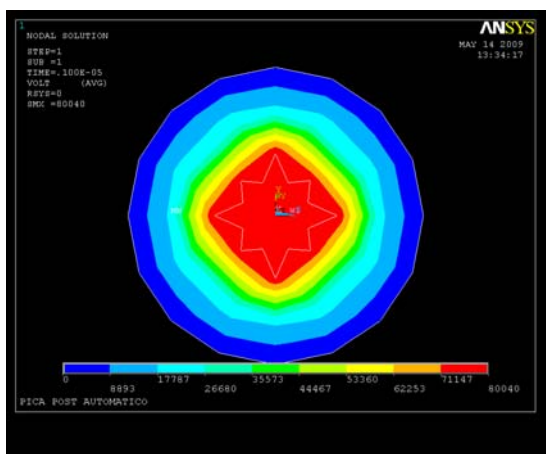


Fig. 7. Distribución de tensiones en el terreno considerando el efecto de la ionización.

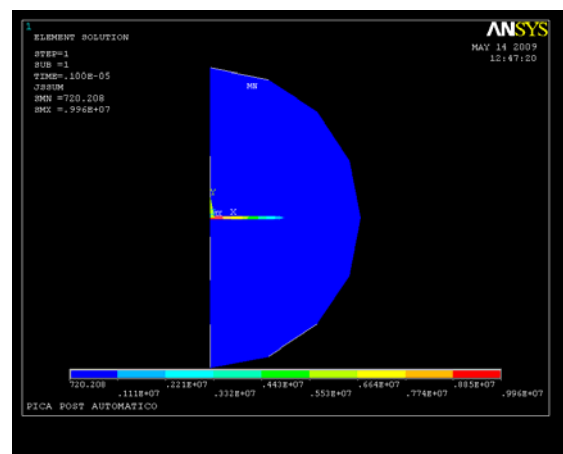


Figura 8. Densidad de corriente

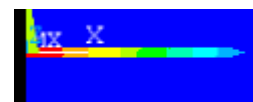


Figura 9. Detalle figura 8.

## 5. Conclusiones.

El método de análisis por elementos finitos es una herramienta válida para obtener todas las variables necesarias para optimizar la puesta a tierra de una instalación eléctrica. Permite obtener la distribución de tensiones en todo el terreno, el campo eléctrico y la densidad de corriente. Esta capacidad de cálculo asociada a las expresiones obtenidas por Anton Habjanic [4] permiten modelizar el efecto de la ionización del terreno, para cada tipo de terreno, que conlleva una disminución efectiva de la resistencia de puesta a tierra del electrodo, y una disminución del gradiente de tensiones en la superficie del terreno.

## 6. Referencias.

- [1] Leonid Grcev, Impulse efficiency of ground electrodes. IEE Transactions on power delivery. Vol. 24, NO 1. January 2009.
- [2] Silvério Visacro. A comprehensive Approach to the grounding response to lightning currents. IEE Transactions on power delivery. Vol. 22, NO 1. January 2007.
- [3] Joao Clavio Salari, Carlos Portela, Grounding systems modelling including soil ionization IEE Transactions on power delivery. Vol. 23 NO 4 October 2008.
- [4] Anton Habjanic , Mladen Trlep. The simulation of the soil ionization phenomenon around the grounding system by the finite element method. IEE Transactions on magnetics. Vol. 42, NO 4. April 2006.
- [5] T.K. Manna , P. Chowdhuri. Generalised equation of sol critical electric field  $E_c$  based on impulse tests and measured soil electrical parameters..IET Gener. Transm. Distrib., 2007,1, (5), pp. 811-817.
- [6] A. C. Liew, M. Darveniza, "Dynamic Model of Impulse Characteristics of concentrated Earths". Proc. IEE. Vol. 121. N° 2. February 1974. pp. 123-135.
- [7] Jinliang He, Yanqing Gao, Rong Zeng. Effetive length of counterpoise wire under lightning current. IEE Transactions on power delivery. Vol. 20. n° 2. April 2005.
- [8] Kenneth J. Nixon, Ian R. Jandrell. Andrew J. Philips. A simplified model of the lightning performance of a driven rod earth electrode in multi-layer soil that includes the effect of soil ionisation. IEEE 2006.
- [9] Abdul M. Mousa. Burnaby B.C. The soil ionisation gradient associated with discharge of high currents into concentrated electrodes. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 9. No. 3. July 1994.