



# Comportamiento dinámico de la impedancia de puesta a tierra.

Dr. Ing. Angel C. Valcárcel Rojas (Profesor Auxiliar)

Ing. Diosdado E. Marín Dorta.

Ing. Agbniel F. Díaz Ferro

## RESUMEN / ABSTRACT

Los Sistemas de aterramiento deben conducir a tierra la corriente de falla las corrientes provocadas por las descargas atmosféricas, la cual se comporta como una onda de impulso y por lo tanto el sistema está gobernado por su impedancia característica.

Bajo estas condiciones esta impedancia de conexión a tierra tiene un comportamiento dinámico. En este trabajo se propone un método de cálculo basado en la teoría de los circuitos eléctricos que permite obtener la variación que experimenta en el tiempo la impedancia de conexión a tierra, la cual está compuesta de dos componentes fundamentales, una impedancia de conexión y una impedancia de propagación cuya combinación es la impedancia total del sistema. Los resultados obtenidos, fundamentalmente en cuanto a la forma de variación de la de impedancia, son similares a los obtenidos por otros autores.

Palabras claves: Impedancia de puesta a tierra, tierras.

*The Grounding Systems should lead to earth the current of fault and the provoked currents for the lightning, which it behave like a wave of impulse and therefore the system is governed by their characteristic impedance.*

*Under these conditions this impedance of setting to earth has a dynamic performance. This paper proposes a method of calculation based on the theory of the electric circuits that allows to obtain the variation of this impedance, which it is a combination of two fundamental components, an impedance of connection and an impedance of propagation, whose combination is the total impedance of the system. The obtained results, fundamentally as for the form of variation of that impedance, are similar to them obtained by other authors.*

**Key words:** *Grounding Impedance, Grounds.*

## INTRODUCCIÓN.

El estudio de los transitorios en los sistemas de conexión a tierra ha sido tratado por varios investigadores. Existen dos corrientes fundamentales para el tratamiento de este problema:

- Enfoque empírico.
- Enfoque analítico.

Dentro del enfoque analítico existen tres variantes, las cuales se basan en:

- Teoría de los circuitos eléctricos.
- Teoría de las líneas de transmisión.
- Teoría del campo electromagnético.

La modelación propuesta en este trabajo se basa en la teoría de los circuitos eléctricos y la teoría de las líneas de transmisión. Ambas implican en la determinación de la impedancia que aparece en el sistema de puesta a tierra.

Los sistemas de puesta a tierra además de conducir la corriente de falla a ésta, también deben conducir a tierra la corriente provocada por las descargas atmosféricas, la cual se comporta como una onda de choque y, por lo tanto, se encuentra gobernada por la impedancia característica del sistema de puesta a tierra. Al arribar un frente de onda, la corriente que se propaga con el mismo, se filtra (a través de los electrodos) a tierra, pero en su camino

se encuentra con una impedancia de conexión con ésta y por otra parte la onda al propagarse por la tierra se encuentra con una oposición a su paso.

El cálculo de la impedancia de puesta a tierra, se encuentra dividido en dos partes fundamentales: Impedancia de conexión:

El comportamiento dinámico, en el tiempo, de la puesta a tierra denota que la impedancia del sistema no sólo se compone de una resistencia, sino que aparecen en esta una parte reactiva compuesta de un capacitor y un inductor.

En los cálculos de la impedancia de puesta a tierra por lo general sólo se determina el valor de la resistencia. En gran parte de la literatura científica relacionada con este tema se aborda el análisis de esta manera, por lo que en la mayoría de los trabajos publicados aparece solamente el valor de la resistencia. Para conocer el valor de la capacidad de la puesta a tierra se parte de la ecuación de la resistencia de puesta a tierra (por ejemplo la de un electrodo vertical), quedando entonces:

$$C = \frac{r}{4 \cdot \rho \cdot R} \cdot e \quad (1)$$

Siendo:  $\epsilon$   $\rightarrow$  permitividad eléctrica absoluta del medio en que se propaga.

Como se conoce toda onda que se propaga en un medio lo realiza con una velocidad igual a:

$$v = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \quad (2)$$

Siendo:  $L$   $\rightarrow$  inductancia del medio por que se propaga.

$C$   $\rightarrow$  capacidad del medio.

$v$   $\rightarrow$  velocidad de propagación de la onda.

Y que también se puede expresar por:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \cdot \mu}} \quad (3)$$

Siendo:  $\mu$   $\rightarrow$  permeabilidad magnética absoluta del medio.

Igualando las ecuaciones (2) y (3), obtenemos

$$L = \frac{\epsilon \cdot \mu}{C} \quad (4)$$

Con estos datos la impedancia de conexión del sistema de puesta a tierra viene dado por un circuito equivalente, a través de un modelo de una línea mediana, el cual se puede apreciar en la Fig. 1

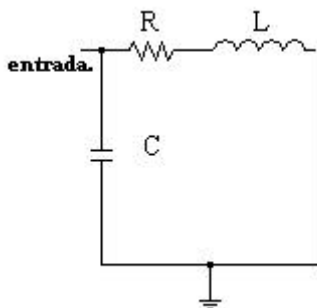


Fig. 1. Modelo de la impedancia de conexión.

Por tanto la impedancia total del sistema viene dada por:

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{(R + i \cdot \omega \cdot L)} + i \cdot \omega \cdot C} \quad (5)$$

Siendo:  $\omega$   $\rightarrow$  la frecuencia angular de la onda que se propaga.

Según J.G. Anderson [2] para el desarrollo de una función no periódica y para tiempos de análisis muy pequeños se puede tomar la frecuencia angular como

$$\omega = \frac{1}{t} \quad (6)$$

Siendo:  $t$   $\rightarrow$  el tiempo que dura la onda.

Por tanto la ecuación (5) se transforma en

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{\left(R + i \cdot \frac{L}{t}\right)} + i \cdot \frac{C}{t}} \quad (7)$$

Esta ecuación refleja el comportamiento de la impedancia de conexión en el tiempo.

**Impedancia de propagación:**

La tierra aunque no es un conductor por excelencia, posee baja resistencia pues el área por la cual circula la corriente a través de esta es grande. La resistencia de esta al igual que todo conductor es afectada por la frecuencia, lo cual se conoce por efecto pelicular.

El efecto pelicular decide la magnitud del amortiguamiento de cualquier onda al aumentar la resistencia, por lo que se puede plantear, que esta resistencia en un medio conductor como la tierra, satisface la siguiente expresión:

$$R = \frac{1}{h} \cdot \sqrt{\frac{r \cdot w}{p}} \quad (8)$$

Siendo::  $r$   $\Rightarrow$  resistencia equivalente de la capa de tierra.

$h$   $\Rightarrow$  altura del conductor del cable protector sobre la tierra.

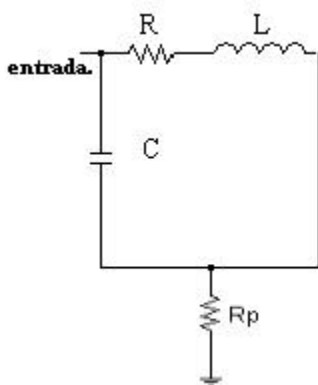
$w$   $\Rightarrow$  frecuencia angular.

Sustituyendo (6) en (8) se obtiene

$$R = \frac{1}{h} \cdot \sqrt{\frac{r}{p \cdot t}} \quad (9)$$

Como se puede apreciar, se tiene la expresión de la resistencia en función del tiempo.

Con ambas ecuaciones (7) y (9) se desarrolló un programa en MatLab mediante el cual se obtuvo la dependencia con el tiempo de todo el sistema. Ambas impedancias se pueden apreciar interrelacionadas en las Fig.2 y Fig. 3:



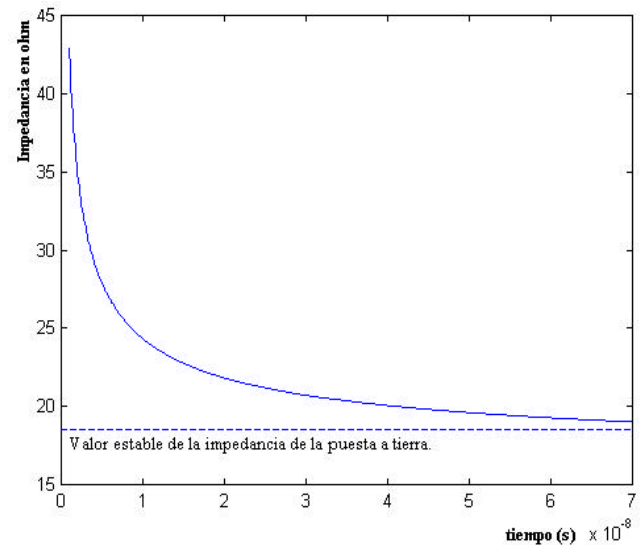
**Fig..2. Impedancia total del sistema de puesta a tierra**

$L \Rightarrow$  inductancia de la impedancia de conexión.

$C \Rightarrow$  capacitancia de la impedancia de conexión.

$R \Rightarrow$  resistencia de la impedancia de conexión.

$R_p \Rightarrow$  resistencia de la impedancia de propagación.



**Fig. 3. Gráfico de impedancia de puesta a tierra vs. tiempo.**

Para brindar una idea de la validez del método propuesto, se establece una comparación con los resultados obtenidos por M.E. Almeida en [1] cuyo resultado fundamental se puede apreciar en la Figura 4.

Este método se basa en considerar que la resistividad del medio depende del campo eléctrico, ya que este no es uniforme al ocurrir un fenómeno de ionización en la tierra. En esta figura se puede apreciar que la variación con respecto al tiempo de la puesta a tierra es semejante en los dos métodos, lo cual confirma los resultados del modelo desarrollado. Es de señalar que el método de M.E Almeida esta avalado por resultados obtenidos experimentalmente.

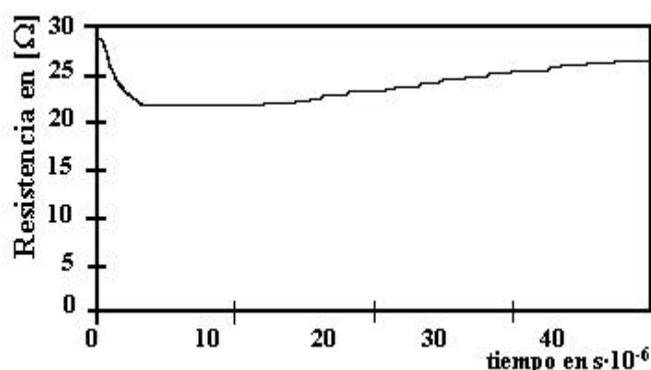


Fig. 4. Comportamiento ante impulso de la puesta a tierra, según [1].

## CONCLUSIONES

- El modelo propuesto en este trabajo permite obtener la variación que experimenta la resistencia de puesta a tierra de una instalación al enfrentarse a una onda de impulso, lo cual permite realizar análisis del comportamiento ante rayos de redes eléctricas con una mayor precisión al poder considerar este fenómeno.

- El modelo propuesto coincide con los resultados obtenidos

## Bibliografía:

- [1].-Almeida M. E. *Accurate modeling of rod driven tower footing*. *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 11, No. 3, July 1996.
- [2].-Anderson, J.G and T. A. Short, "Algorithms for calculation of lightning induced voltages on distribution lines", presented at the 1992 summer power meeting for publication in the *IEEE Trans. on Power Delivery*. 1992.
- [3].-Gupta B.R and Thapar B., "Impulse Impedance of Grounding Grids", *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-99, pp. 2357 - 2362, 1980.

## Autores:

Dr. Ing. Angel C. Valcárcel Rojas (Profesor Auxiliar)  
 Ing. Diosdado E. Marín Dorta.  
 Ing. Agbníel F. Díaz Ferro  
 Centro de Estudios Electroenergéticos (CEE)  
 Fac. Ingeniería Eléctrica.  
 Universidad Central de Las Villas  
 email: valca@uclv.edu.cu