

## **Análisis de la respuesta transitoria de una jabalina de puesta a tierra frente a descargas atmosféricas**

Corina Feltan <sup>a</sup>, Roberto Cabral <sup>a</sup>, Paolo Quintana <sup>a</sup>, Dario Yuchechech <sup>a</sup>, Aldo Caballero <sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.*

e-mails: feltan@fio.unam.edu.ar, robert\_rjc@hotmail.com, quintanaangelpaolo@gmail.com, darioyuchechech@gmail.com, aldoluiscaballero@fio.unam.edu.ar

---

### **Resumen**

Este trabajo se inscribe en el marco general del proyecto “Caracterización de las puestas a tierra y las protecciones contra descargas atmosféricas”. Particularmente aquí se aborda el caso específico del comportamiento de las puestas a tierra con un solo electrodo tipo jabalina frente a corrientes impulsivas. Para esta configuración se formula un modelo de parámetros concentrados planteándose un sistema de ecuaciones algebraicas que, en conjunto con una ecuación diferencial, conforman el modelo matemático del electrodo. Con este modelo se realizaron las simulaciones necesarias para analizar la respuesta transitoria en diferentes situaciones. Ese análisis conduce a la definición de un coeficiente de impulso, interesante como parámetro de caracterización de la respuesta de las puestas a tierra frente corrientes impulsivas. Por último, se muestra que el coeficiente definido es un indicador de la efectividad de una puesta a tierra frente a impulsos que constituye una herramienta interesante para el dimensionamiento de las puestas a tierra.

**Palabras Clave** – *Puestas a tierra, Jabalinas, Impedancia transitoria, Transitorios electromagnéticos, Técnicas de integración numérica.*

## 1. Introducción

Las puestas a tierra desempeñan un rol fundamental en la protección de sistemas e instalaciones eléctricas, pues su función es dispersar corrientes de falla y asegurar que el potencial de los elementos conectados a ellas no supere ciertos valores admisibles.

En cuanto a las sollicitaciones frente a las cuales las puestas a tierra deben comportarse satisfactoriamente es muy importante distinguir las que involucran corrientes y tensiones de frecuencia industrial de las asociadas a perturbaciones de alta frecuencia y, muy especialmente, las de naturaleza impulsiva, tales como las producidas por las descargas atmosféricas.

En términos generales, es bien conocido que el análisis del comportamiento de las puestas a tierra a frecuencias industriales no ofrece mayores dificultades, es suficiente con considerar la resistencia que ofrecen a la dispersión de corrientes senoidales de baja frecuencia. Sin embargo, cuando se trata de perturbaciones debidas a descargas atmosféricas, no pueden obviarse los efectos de la variación en el tiempo de la intensidad de corriente [1].

Téngase presente que la corriente de un rayo puede variar en magnitudes del orden de decenas de kA en pocos microsegundo, por lo tanto, los efectos dependientes de la rapidez de esa variación no pueden despreciarse. En otros términos, el análisis de la respuesta transitoria demanda necesariamente la consideración de los efectos de las variaciones de los campos asociados a la corriente dispersada por la puesta a tierra. Naturalmente, esto constituye un asunto más sensible cuando mayores son los niveles cerámicos correspondientes a la zona de emplazamiento de la instalación [2]-[4].

De acuerdo con la configuración de la puesta a tierra el análisis de su respuesta transitoria puede tratarse de diferentes maneras. Cuando se trata de electrodos de dimensiones relativamente pequeñas, tal el caso de las jabalinas, es aplicable un enfoque basado en la modelización mediante parámetros concentrados y la evaluación de la impedancia de impulso [5]-[6].

## 2. Formulación del modelo

Como se señaló en el epígrafe precedente, la evaluación de la impedancia de impulso es una manera de analizar el comportamiento dinámico de una puesta a tierra frente a corrientes impulsivas, tales como las originadas por descargas atmosféricas.

Una puesta a tierra de electrodo simple tipo jabalina, tal como se esquematiza en la figura 1.a) puede modelizarse mediante una representación de parámetros concentrados como muestra la parte b) de la misma figura [7]-[8], que se corresponde con la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{dv}{dt} + \frac{v}{R \cdot C} - L \cdot \frac{d^2i}{dt^2} - \frac{L}{R \cdot C} \cdot \frac{di}{dt} - \frac{i}{C} = 0 \quad (1)$$

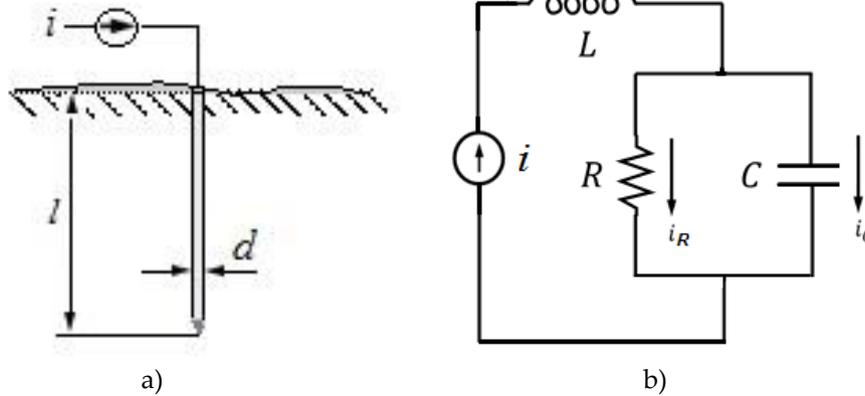


Fig. 1. a) Electrodo tipo jabalina

b) Modelo de parámetros concentrados

Con  $i$  se denota la corriente impulsiva dispersada por la puesta a tierra, mientras que  $v$  es la elevación del potencial causada por ese impulso de corriente.  $R$  es la resistencia de dispersión del electrodo,  $L$  su inductancia y  $C$  su capacitancia.

Los parámetros pasivos del modelo pueden calcularse de acuerdo con las expresiones que se dan a continuación [9]-[10].

$$L = 2 \cdot 10^{-7} \cdot l \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot l}{d}\right) \quad (2)$$

$$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln\left[\sqrt{1 + \left(\frac{2 \cdot l}{d}\right)^2} + \frac{2 \cdot l}{d}\right] \quad (3)$$

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \rho}{R} \quad (4)$$

En las fórmulas anteriores  $l$  es la longitud del electrodo y  $d$  su diámetro,  $\rho$  es la resistividad aparente del suelo y  $\varepsilon$  su permitividad dieléctrica media característica.

La impedancia transitoria  $Z_t$  se define como la relación entre el voltaje  $v$  originado por la corriente impulsiva  $i$  [11]:

$$Z_t = \frac{v}{i} \quad (5)$$

Para este trabajo se adoptó la representación convencional del impulso de corriente que responde a la formulación doble exponencial de la expresión (6), frecuentemente empleada de referencia para caracterizar la respuesta transitoria frente a descargas atmosféricas [12]-[14]

$$i = I_o \cdot (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (6)$$

### 3. Respuesta transitoria de una jabalina

En principio, se estudió la respuesta de una jabalina perturbada por un impulso de corriente dado por la expresión (6) con  $I_o = 1,5 \text{ kA}$ ,  $\alpha = 1,513 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$ ,  $\beta = 4,64 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$ , que se corresponde con un onda corrientemente denominada 5/50. Considerándose una jabalina de diámetro  $d = 14\text{mm}$ , en tanto que para el suelo se tomó una permitividad relativa media característica  $\epsilon_r=10$  [15]. El estudio se focalizó principalmente en el análisis de sensibilidad de la respuesta transitoria en función de la longitud del electrodo para diferentes valores de resistividad aparente de suelo. Para llevar a cabo las simulaciones correspondientes se implementó un código específico, capaz de resolver las ecuaciones algebraicas (2), (3), (4), (5) y (6), integrando simultáneamente la ecuación diferencial (1).

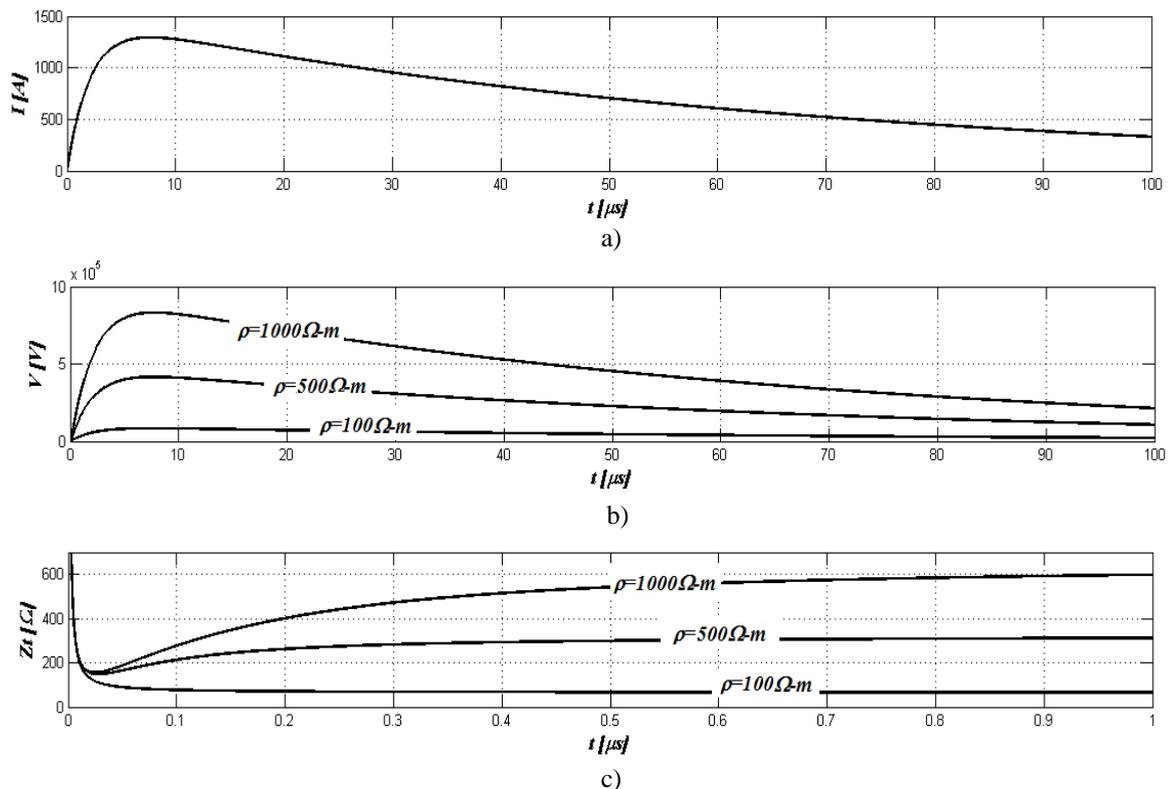


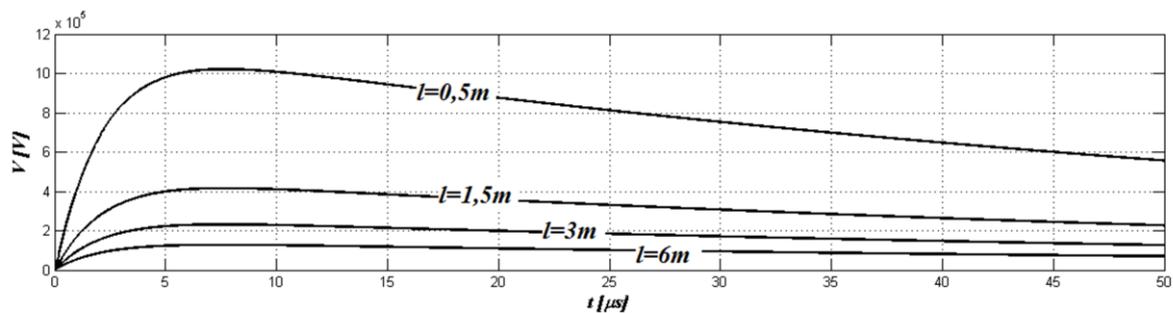
Fig 2. (a) Corriente impulsiva (b) Potencial en la jabalina (c) Impedancia transitoria  
 $l = 1,5 \text{ m}$

La figura 2 corresponde a estudios realizados sobre jabalinas de 1,5 m de longitud, enclavadas en tres terrenos diferentes cuyas resistividades aparentes son  $100 \Omega \cdot m$ ,  $500 \Omega \cdot m$  y  $1.000 \Omega \cdot m$ .

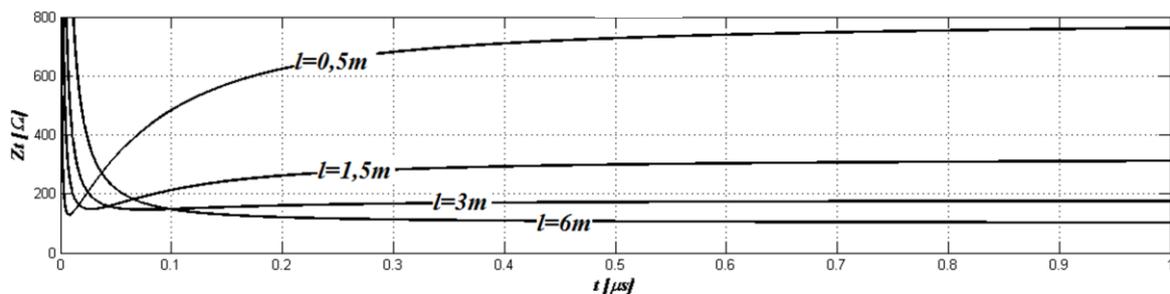
La figura 2.a) muestra la evolución en el tiempo de la corriente impulsiva dispersada, mientras que en las figuras 2.b) y 2.c) pueden visualizarse la variación en el tiempo del potencial de la jabalina y la impedancia transitoria, respectivamente.

Es notable que para resistividades grandes ( $\rho = 1.000 \Omega \cdot m$ ), durante los primeros instantes de crecimiento del impulso de corriente la impedancia transitoria decrece muy rápidamente, llegando incluso a ser menor que la de estado estable durante un lapso sumamente breve, pero luego tiende a aumentar estabilizándose en un valor igual al de la impedancia a frecuencia industrial. Esto se explica físicamente porque, ante una variación muy repentina y pronunciada de  $i$ , los fenómenos reactivos de interacción electromagnética modelizados mediante  $C$  y  $L$  prevalecen frente a la dispersión conductiva representada por  $R$ . Adviértase que a medida que la resistividad decrece ese efecto es cada vez menos acentuado, lo cual resulta razonablemente lógico pues concuerda con la prevalencia de la dispersión conductiva de la corriente a tierra.

La figura 3 corresponde a estudios realizados con jabalinas de distintas longitudes; a saber 0,5m, 1,5m, 3m y 6m, enclavadas todas en un suelo de resistividad aparente de  $500 \Omega \cdot m$ .



a)



b)

Fig 3. a) Potencial b) Impedancia transitoria  
 $\rho = 500 \Omega \cdot m$

En este estudio se observa que para jabalinas cortas se produce en  $Z_t$  un efecto similar al visto anteriormente para valores elevados de resistividad aparente sobre el inicio del transitorio, durante los primeros instantes del crecimiento del impulso. Tal efecto se atenúa notoriamente para longitudes mayores. En todos los casos, cuando el impulso evoluciona en el tiempo hacia su parte descendente,

la impedancia transitoria tiende al valor de impedancia de tierra a frecuencia industrial. Estos resultados son consistentes con los presentados en la figura 2.

#### 4. Efectividad de la respuesta transitoria: coeficiente de impulso

Los resultados presentados en el apartado anterior muestran que la impedancia de impulso varía en el tiempo y que depende de las características morfológicas de la perturbación constituida por el impulso de corriente. Por lo tanto, si bien permite analizar el comportamiento transitorio de una puesta a tierra, su empleo para establecer criterios técnicos útiles para orientar el dimensionamiento de una puesta a tierra implica ciertas dificultades, sobre todo por su variación en el tiempo. Esta dificultad puede superarse recurriendo a la definición de la impedancia de impulso  $Z_i$  como la relación entre el valor máximo del voltaje  $\hat{V} = \max(v)$  y el valor máximo del impulso de corriente  $\hat{I} = \max(i)$ .

$$Z_i = \frac{\hat{V}}{\hat{I}} \quad (7)$$

Según esta definición, la impedancia de impulso en realidad está dada por la relación entre dos valores que no necesariamente ocurren en un mismo instante. No obstante, como las puestas a tierra se diseñan para que su comportamiento facilite la dispersión conductiva de corrientes, la diferencia de tiempo entre los instantes en que ocurren  $\hat{V}$  e  $\hat{I}$  es insignificante y  $Z_i$  presenta la ventaja de no variar respecto del tiempo. En consecuencia, es un indicador del comportamiento de una puesta a tierra frente a impulsos de corriente que puede compararse con el valor de la impedancia de tierra a frecuencia industrial que, como es bien conocido, se acostumbra convencionalmente a tomar directamente como el valor de la resistencia de dispersión  $R$  (también llamada simplemente resistencia de puesta a tierra).

Con estas consideraciones, se define el coeficiente de impulso  $A_i$  como la razón entre  $Z_i$  y  $R$  [16].

$$A_i = \frac{Z_i}{R} \quad (8)$$

Es evidente que si  $A_i > 1$  el electrodo presentará mayores dificultades para evacuar corrientes debidas a descargas atmosféricas que corrientes de frecuencia industrial, en tanto que, si  $A_i < 1$  sucederá lo contrario. Cuando  $A_i = 1$  la efectividad del electrodo será la misma para la dispersión de cualquier tipo de corriente, lo cual representa una situación interesante.

Para evaluar el comportamiento de las jabalinas se han realizado varios estudios considerando como perturbación los impulsos de corriente clásicos, comúnmente clasificados como  $1\mu\text{s}/50\mu\text{s}$  y  $5\mu\text{s}/50\mu\text{s}$ . Se consideraron resistividades aparentes de  $10 \Omega \cdot \text{m}$ ,  $50 \Omega \cdot \text{m}$ ,  $100 \Omega \cdot \text{m}$  y  $200 \Omega \cdot \text{m}$  y se evaluó el coeficiente de impulso  $A_i$  en función de la longitud de la jabalina. En la figura 4 se presentan los resultados obtenidos, que ponen de manifiesto algunas cuestiones relevantes.

Por un lado, en relación con el estudio realizado con el impulso  $1\mu\text{s}/50\mu\text{s}$  puede verse que, para cada valor de resistividad, existe una longitud máxima de jabalina hasta la que se mantiene  $A_i \cong 1$ , a partir de ese valor si se aumenta la longitud el valor de  $A_i$  crece de manera pronunciada. Cuando la resistividad aparente del suelo es mayor, aumenta la longitud a partir de la que el coeficiente de impulso  $A_i$  crece marcadamente.

Considerando ahora el sistema perturbado por un impulso  $5\mu\text{s}/50\mu\text{s}$ , cuyo frente es obviamente menos escarpado, se nota que la longitud de jabalina a partir de la cual la efectividad para dispersar corrientes debidas a descargas atmosféricas disminuye, es mayor.

De este análisis surge que, si bien con electrodos profundos se pueden lograr bajas resistencias de puesta a tierra -lo cual es bueno para la dispersión de corrientes de frecuencia industrial-, la efectividad para dispersar corrientes debidas a descargas atmosféricas disminuye. La explicación física de ello está en que, para un suelo de resistividad aparente determinada, el aumento de la longitud de la jabalina hace disminuir la resistencia de dispersión pero, al mismo tiempo, aumenta la inductancia del electrodo con lo que su efectividad frente a corriente de impulso disminuye. Naturalmente, cuando más escarpado es el impulso, la prevalencia de los efectos inductivos sobre los conductivos es todavía más significativa.

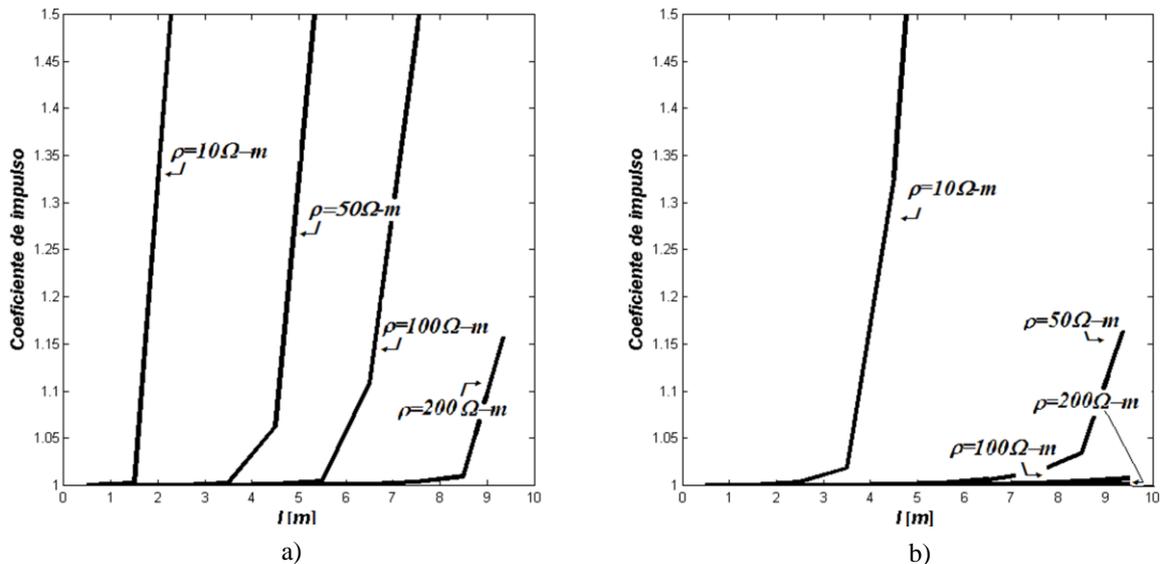


Fig 4. Coeficiente de impulso a) Impulso  $1\mu\text{s}/50\mu\text{s}$  b) Impulso  $5\mu\text{s}/50\mu\text{s}$

## 5. Conclusiones

Partiendo de una representación de parámetros concentrados se modelizó el comportamiento de los electrodos de puesta a tierra tipo jabalina. Con esa representación se formuló un modelo matemático que permite describir adecuadamente la respuesta de las jabalinas tanto frente a ondas de frecuencia industrial como a impulsos.

El modelo formulado permitió realizar un conjunto de estudios simulando el comportamiento en distintos tipos de suelo, con dos formas de impulso para tener en cuenta la dependencia de la impedancia de impulso respecto de las características de la perturbación. Para salvar los inconvenientes que esa dependencia origina en relación con el dimensionamiento de las puestas a tierra, se definieron la impedancia transitoria y el coeficiente de impulso.

El análisis del significado del coeficiente de impulso y de los valores que puede alcanzar, en función de la longitud de una jabalina enclavada en suelos de diferente resistividad aparente, pone en evidencia que hay longitudes máximas de jabalina a partir de las cuales su comportamiento frente a descargas atmosféricas se vuelve ineficiente comparado con el que presenta a frecuencia industrial.

## 6. Referencias

- [1] IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding IEEE Std 80™-2013
- [2] Protección contra rayos Parte 11: Guía para la elección de la protección contra rayos (SPCR) para usar en la República Argentina. Norma IRAM 2184-11. Segunda Edición 2016.
- [3] M. Nicora. Actividad eléctrica atmosférica en Sudamérica. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de La Plata. 2014.
- [4] C. Feltan, et al. Estudio de la variación estacional de la resistencia de las puestas a tierra utilizando inteligencia artificial. Unijuí. Ijuí, Brasil. 2017.
- [5] M. Salam, et al. High-Voltage Engineering, Theory and Practice. 2000.
- [6] P. Bellaschi, R. Armington. Impulse and 60-Cycle Characteristics of Driven Grounds--III Effect of Lead in Ground Installation. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 1943, vol. 62, N°6, p. 334-345.
- [7] C. Mazzetti, G. Veca. Impulse behavior of ground electrodes. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1983, N°9, p. 3148-3156.
- [8] I. Gonos; F. Topalis.; I. Stathopoulos. Transient impedance of grounding rods. *High Voltage Engineering Symposium*. 1999. p. 272-275.
- [9] A. Caballero. Las puestas a tierra en los Sistemas Eléctricos. Editorial Universitaria. Colección Cátedra, 1998.
- [10] J. Grainger, W. Stevenson, Análisis de Sistemas de Potencia, McGraw-Hill, México. 2020.
- [11] R. Verma, D. Mukhedkar. Fundamental Considerations and Impulse Impedance of Grounding Grids. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1981, N°3, p. 1023-1030.
- [12] V. Rakov, et al. CIGRE technical brochure on lightning parameters for engineering applications. *International Symposium on Lightning Protection (XII SIPDA)*. IEEE, 2013. p. 373-377.
- [13] V. Cooray, Return stroke models for engineering applications, in *Lightning Protection* (V. Cooray, Ed.), Institute of Engineering and Technology, London, UK, 2010.
- [14] N. Plooster. Numerical model of the return stroke of the lightning discharge. *The Physics of Fluids*, 1971, vol. 14, N°10, p. 2124-2133.
- [15] L. Grcev. Impulse efficiency of ground electrodes. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, vol. 24, N°1, p. 441-451.
- [16] Y. Liu, N. Theethayi, and R. Thottappillil, Investigating the validity of existing definitions and empirical equations of effective length/area of grounding wire/grid for transient studies, *Journal of Electrostatics*, 2007, vol. 65, N° 5-6, p. 329-335.