

Respuesta transitoria de las puestas a tierra en la protección contra rayos. *Software* GTIERRAS

*Héctor David Gómez Montoya, Esteban Velilla Hernández, Germán Moreno O. *, Jaime Alejandro Valencia*

(Recibido el 16 de marzo de 2005. Aceptado el 8 de noviembre de 2005)

Grupo de Investigación en Manejo Eficiente de la Energía Eléctrica, GIMEL. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Antioquia. A. A. 1226, Medellín, Colombia.

Resumen

Se usa un programa computacional desarrollado en Matlab (GTIERRAS) que implementa un modelo de base electromagnética, para determinar la impedancia de puesta a tierra de configuraciones arbitrarias y su comportamiento ante excitaciones tipo impulso. Impedancia, corrientes y voltajes, u otras variables eléctricas de sistemas de puesta a tierra se pueden presentar en el dominio de la frecuencia o del tiempo usando la transformada rápida de Fourier. La base general del modelo considerado se usa para valorar no sólo sobretensiones por descargas atmosféricas, sino también, otros transitorios típicos asociados con problemas de compatibilidad electromagnética. Los resultados muestran la influencia de algunas variables en la respuesta del sistema de puesta a tierra y revelan algunas diferencias que se deben tener en cuenta cuando se aplican criterios basados en el desempeño a baja frecuencia, para esfuerzos impulsivos de puestas a tierra. Adicionalmente, se presentan ejemplos de cálculo y comparaciones con resultados de otros autores para ilustrar algunos comportamientos que de ninguna manera son evidentes. Se investiga además, el efecto de la geometría de los electrodos y la resistividad del suelo, así como del frente de onda y el número de puntos de inyección. También se presentan resultados de tensiones de contacto y de paso, así como, el estudio de un sistema de protección contra rayos como ampliación de las aplicaciones del modelo. Finalmente, se derivan algunas conclusiones útiles para el diseño de sistemas de puesta a tierra.

----- *Palabras clave:* sistemas de puesta a tierra, sobretensiones, descargas atmosféricas, modelación, transitorios electromagnéticos.

* Autor de correspondencia. Teléfono: +57+4+210 55 58/5, fax: +57+4+211 05 07, Correo electrónico: gmoreno@udea.edu.co (G. Moreno).

Grounding transient response of lightning protection GTIERRAS software

Abstract

A computer program developed in *Matlab* (GTIERRAS) from an electromagnetic-based model is used to assess grounding impedances and the behavior of grounding electrodes of arbitrary shapes under lightning impulses. Impedance, currents and voltages, or other electric variables of the grounding system can be presented as well in frequency or in time domain with the use of Fast Fourier Transform. The generality of the model allows its use for assessing lightning overvoltages, but also for other typical transients associated with electromagnetic compatibility problems. Results show the influence of some variables on the response of grounding system and shed light on some differences that must be taken into account when applying criteria based on low frequency performance to groundings stressed by surges. Calculation examples and comparison with results from other authors are presented and analyzed so as to illustrate some grounding behaviors that by no means are evident. Effects of electrode geometry and soil resistivity, as well as of wave front and number of injection points are also investigated. Results of touch and step potentials are shown. A study of a lightning protection system is presented as an extension of the model application capabilities. Some conclusions useful for grounding system design are derived.

----- *Key words:* grounding system, overvoltages, lightning, modeling, electromagnetic compatibility.

Introducción

En un anterior artículo [1] fueron presentados un modelo de base electromagnética y algunos resultados de simulaciones entre el dominio de la frecuencia. El análisis de estos resultados mostró fuertes diferencias entre el comportamiento de puestas a tierra (PaT) a la frecuencia del sistema eléctrico (60 Hz) y a frecuencias mucho mayores. Esto llama la atención ya que es común aplicar sin restricciones criterios derivados del análisis de fallas a tierra, en las que el desempeño es el característico de baja frecuencia. Resulta así muy interesante desarrollar criterios a partir de una visión en el dominio del tiempo del desempeño de PaT, que integre todas las respuestas en el rango de frecuencias asociadas a la señal de excitación. Para construir criterios que puedan ayudar en el diseño de PaT considerando el comportamiento transitorio, en este artículo se exploran algunas respuestas de arreglos simples de electrodos. Se pretende proveer alguna orientación basada en resultados de simulaciones como contribución adicional al análisis y criterios propuestos por otros autores [2-3]. Entonces es importante “manejar” algunas características como la geometría y su efecto en la impedancia de PaT, puesto que juegan un papel importante en el nivel de las sobretensiones. Esto es bien conocido bajo condiciones estacionarias desde algunas décadas atrás [4-5], pero no lo es cuando nos referimos al funcionamiento en estado transitorio. De hecho, hay gran cantidad de publicaciones que difieren en concepción, modelación y métodos de cálculo, reflejando la búsqueda de un método confiable que permita optimizar los diseños de PaT teniendo en cuenta la respuesta ante esfuerzos impulsivos, como descargas atmosféricas, para minimizar no solo las salidas de funcionamiento de líneas de transmisión, sino también los daños en equipos sensibles y en sistemas de comunicación.

En medio de la diversidad de propuestas consideramos más seguro un camino basado directamente en la teoría electromagnética. Esta clase de acercamiento ha sido desarrollado por Visacro [2, 6, 7] y más recientemente por Greev

[8, 9, 10] y el trabajo aquí presentado aprovecha sus contribuciones.

Un modelo de base electromagnética

El sistema de PaT es considerado como una red de segmentos conductores cilíndricos interconectados, con cualquier orientación y posición. El modelo está basado en la derivación de los elementos de la matriz de impedancias del sistema, partiendo del potencial escalar eléctrico (V) y el potencial vectorial magnético (A) en un punto, debidos a una fuente longitudinal de corriente enterrada, que corresponde a las fórmulas presentadas en [1, 2].

Dominio de la frecuencia

Un modelo apropiado de la PaT debe tener en cuenta tres consideraciones básicas [2, 11, 12]:

- Las características físicas del electrodo (en particular su geometría)
- Los parámetros eléctricos del suelo, conductividad σ , permitividad ϵ y permeabilidad magnética μ , y su dependencia con la frecuencia.
- La propagación de la onda electromagnética en el suelo, guiada por los electrodos de PaT, que determinan la impedancia para la onda de corriente.

La metodología implementada permite calcular las impedancias transversales (debidas a acoples conductivos y capacitivos) y longitudinales (debidas a acoples inductivos) entre cada segmento y todos los demás, siendo posible tener en cuenta el efecto piel y las consideraciones anteriores [13]. Este acercamiento es válido mientras no se presente ionización del suelo, lo que exigiría ampliar el método, por ejemplo considerando un radio equivalente de electrodo que tenga en cuenta este fenómeno [2].

Con las relaciones matriciales entre todos los segmentos y haciendo uso de la técnica de análisis

nodal para circuitos [3], la cual permite generalizar la herramienta computacional para la evaluación de cualquier configuración de PaT, es posible generar un conjunto de ecuaciones expresadas en forma matricial como $AV = I_c$, donde I_c es el vector de corrientes nodales impuestas, frecuentemente con un solo elemento no nulo, que corresponde al nodo por donde ingresa la corriente a la PaT; V es el vector de voltajes nodales y A es la matriz que contiene toda la información acerca de las relaciones determinadas por la topología de los segmentos y por sus acoples. Los elementos de la diagonal principal de esta matriz corresponden a la impedancia de la PaT vista en cada nodo para la frecuencia analizada, lo que equivale a la función de transferencia del sistema [8]. Es posible obtener una matriz A para cada frecuencia de interés y caracterizar la PaT con su impedancia Z_g en cada una de ellas. Resolviendo la ecuación matricial descrita se obtiene el vector V y pueden ser calculadas otras variables eléctricas en cualquier segmento, como las corrientes transversales y longitudinales, sus caídas de potencial y el campo eléctrico, así como potenciales y campo en la superficie del suelo.

Dominio del tiempo

El potencial de la puesta a tierra (GPR) en condiciones transitorias es una función temporal y espacial y depende del tipo de onda de corriente que energiza el sistema de PaT. En el punto de ingreso de la corriente a la PaT se presenta el mayor valor de este y es obtenido en el dominio del tiempo usando la siguiente ecuación:

$$v(t) = \mathfrak{F}^{-1} \{ Z_g(f) \cdot \mathfrak{F} [i(t)] \}$$

Donde \mathfrak{F} y \mathfrak{F}^{-1} son la transformada de Fourier y su inversa, respectivamente [10,11]. La aplicación computacional es posible utilizando un algoritmo de FFT, el cual exige determinar la máxima frecuencia (Nyquist) F_m a ser tomada en cuenta para garantizar una representación adecuada en el dominio de la frecuencia; su valor es tal que el 99% de la energía de la onda está concentrado en la banda de frecuencias menor a F_m .

Similarmente, algunos otros resultados en el dominio del tiempo pueden ser obtenidos a partir del dominio de la frecuencia usando esta transformación.

Ampliación del modelo para dos medios

El modelo puede ser ampliado para la consideración de segmentos del sistema de PaT en dos medios diferentes y su influencia en sistemas vecinos. Un estudio global debe incluir el comportamiento transitorio de las estructuras que se encuentran en el aire, las cuales pueden ser entre otras, torres y cables de guarda de sistemas de transmisión de energía, sistemas de protección contra rayos de edificaciones o torres de telecomunicaciones.

Haciendo uso de la teoría de imágenes modificada [3, 9], pueden ser tenidas en cuenta las reflexiones y transmisiones de la onda electromagnética en la interfaz de separación de los dos medios y calcular las impedancias mutuas de acople entre segmentos.

Resultados de simulaciones y análisis

El programa GTIERRAS, desarrollado en Matlab, y del cual se ilustra su ambiente gráfico en la figura 1, permite evaluar la impedancia de PaT de cualquier configuración de electrodos y optimizar diseños que minimizan las sobretensiones que se presentan ante cualquier excitación de origen eléctrico [14,15]. Los resultados han sido comparados satisfactoriamente con los publicados por otros autores (experimentales y de simulación) [4, 7, 10]. En esta sección se presentan tanto resultados para ilustrar el comportamiento de la impedancia de la PaT en el dominio de la frecuencia, como sobretensiones y potenciales en la superficie del suelo, en el dominio del tiempo, producidos por algunas fuentes de excitación. Adicionalmente se incluyen resultados de un sistema de protección contra rayos para edificaciones. Los resultados en el dominio del tiempo pueden ser obtenidos para cualquier tipo de onda. Los aquí presentados corresponden a corrientes impulsivas 1/50 μ s, a menos que se indique lo contrario.

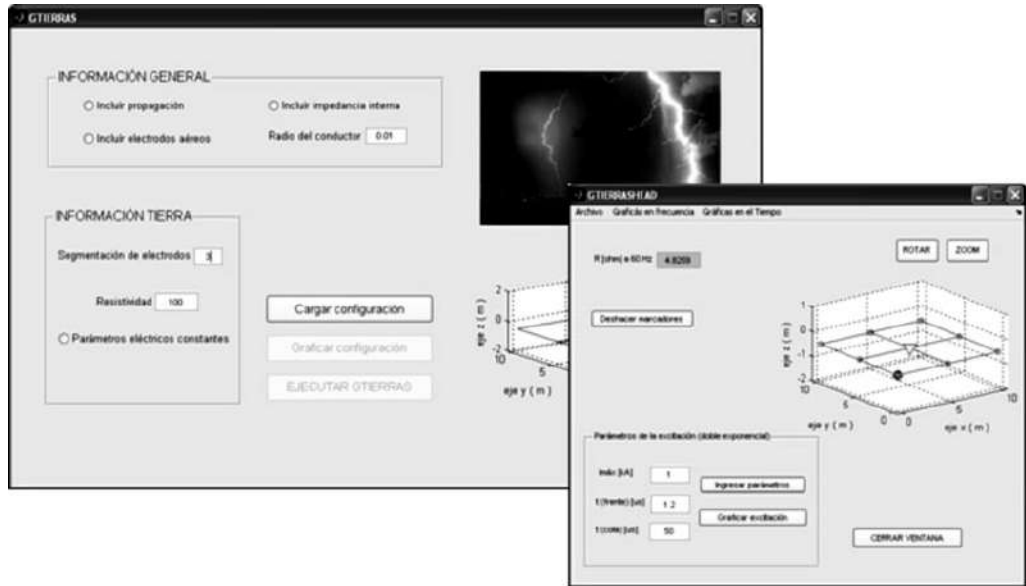


Figura 1 Ambiente gráfico de GTIERRAS

La figura 2 muestra el efecto de considerar la dependencia de los parámetros eléctricos del suelo con la frecuencia en electrodos horizontales [11, 12]. La curva A fue calculada con valores fijos de ρ y ϵ , el primero medido a baja frecuencia ($\rho = 94,4 \Omega \text{ m}$)

y para el segundo fue asumido un valor de 100; la curva B calculada con valores medidos de ρ y ϵ en un suelo con 14% de humedad; la curva C es para valores de ρ y ϵ calculados con la fórmula propuesta en [2].

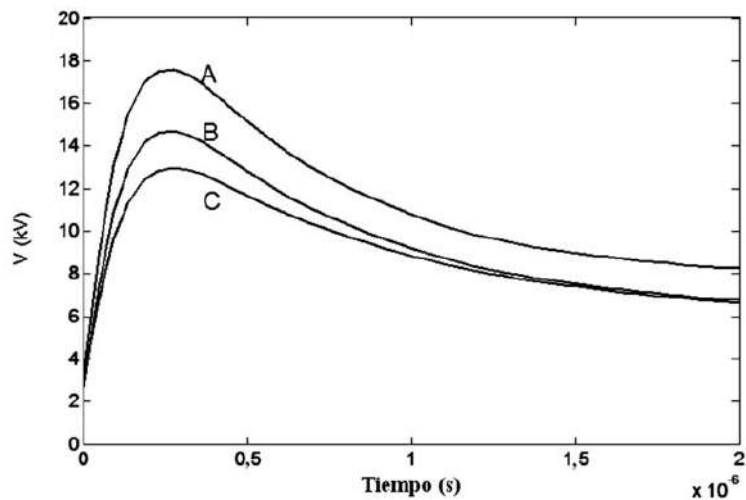


Figura 2 Influencia de la dependencia de los parámetros del suelo con la frecuencia en el máximo GPR transitorio

En la figura 3 se presentan las sobretensiones en el punto de alimentación para tres arreglos de PaT de igual longitud de electrodo (20 m), ilustrando la efectividad de la geometría en el valor del GPR transitorio, siendo destacable la reducción del pico de tensión para el electrodo cuadrado.

La figura 4 muestra resultados para un electrodo horizontal de 20 m, enfrentando ondas de corriente con diferentes tiempos de crecimiento. Se puede notar cómo los frentes de onda más rápidos generan mayores sobretensiones. Esto puede ser inferido del comportamiento de la impedancia con la frecuencia (altos valores para altas frecuencias) y la presencia de importantes

componentes de alta frecuencia en los frentes de onda rápidos.

En la figura 5 se muestra el GPR transitorio en los puntos A y E de la malla cuando la corriente es inyectada en A (A-1), en A y B (A-2) y en A, B, C y D (A-4). El GPR es normalizado para el valor pico de la corriente de la descarga I_p . La simetría de los puntos de ingreso permite suponer porcentajes iguales de inyección de corriente en cada nodo. Al aumentar el número de puntos de ingreso el pico de la sobretensión se reduce en estos. El GPR en el centro de la malla (E-1/2/4) es igual para todos los casos y menor que en A debido al efecto de la propagación de la onda.

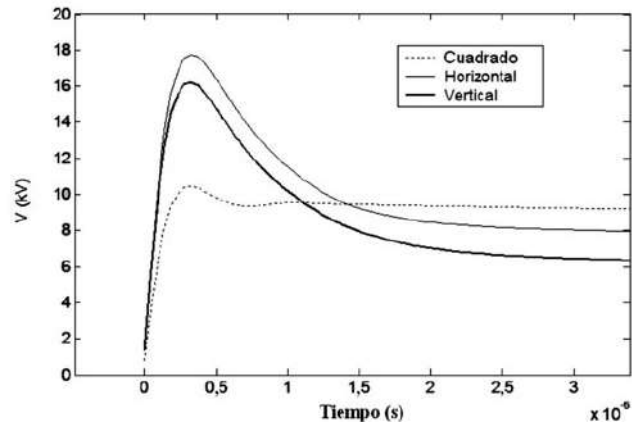


Figura 3 GPR transitorio para diferentes geometrías

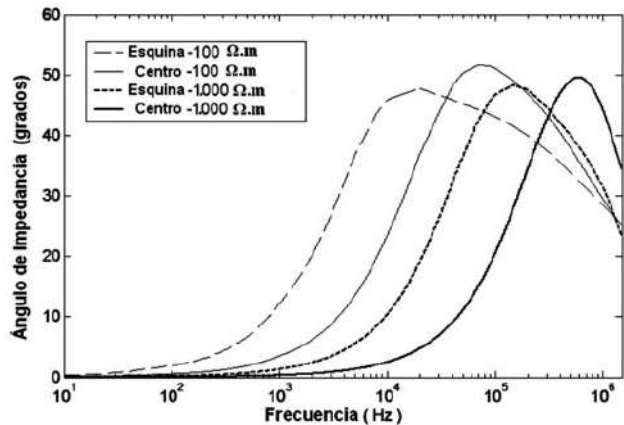


Figura 4 GPR transitorio para diversos frentes de onda

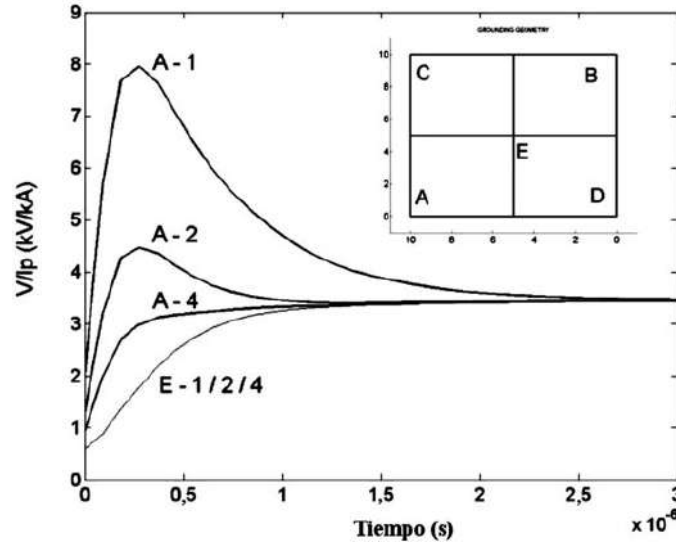


Figura 5 GPR transitorio normalizado para diversos puntos de inyección de corriente

La figura 6 ilustra la impedancia de PaT (magnitud y fase) en función de la frecuencia para una malla de 60x60 m con retículas de 10x10 m a una profundidad de 0,5 m. Se puede observar el efecto del punto de ingreso de la corriente, en dos suelos diferentes (uno con $\rho=100 \Omega\text{m}$ y $\epsilon_r=36$ y el otro con $\rho=1000 \Omega\text{m}$ y $\epsilon_r=9$).

En la figura 7 se puede ver el GPR transitorio en el punto de inyección para los casos de las figuras 5 y 6.

La figura 8 presenta el GPR en 3 puntos de un contrapeso de 15 m cuando una corriente (35A 1/50 μs) es inyectada en un extremo. Se evidencia cómo la onda es atenuada a lo largo del electrodo. Los resultados de las figuras 7 y 8 fueron comparados con mediciones y simulaciones publicadas [3, 9, 10] encontrándose mucha similitud en la forma del transitorio y valores con diferencias máximas, alcanzadas solo en muy altas resistividades de cerca del 15%.

En la figura 9 se presenta el efecto de la variación de la longitud de un contrapeso en la impedancia de PaT, el cual se encuentra enterrado 0,5 m en un suelo de $\rho=100 \Omega\text{m}$ y $\epsilon_r=100$.

Los resultados ponen en evidencia que algunos razonamientos comúnmente aceptados para el comportamiento en el rango de baja frecuencia no pueden ser directamente extendidos para transitorios rápidos y altas frecuencias. Tal es el caso de “aumentando la longitud del electrodo se disminuye la impedancia”, que se puede ver invertido a frecuencias altas debido a la acumulación de efectos inductivos.

La figura 10 muestra la impedancia impulso (razón entre el pico de tensión y el de corriente, V_p/I_p) como función de la longitud de un contrapeso para suelos con $\rho=1.000 \Omega\text{m}$ y $\epsilon_r=9$ (caso A) y $\rho=100 \Omega\text{m}$ y $\epsilon_r=100$ (caso B). La impedancia de impulso es el análogo, ante impulsos, de la resistencia de PaT ante cortocircuitos. Es evidente la existencia de un valor de la longitud del contrapeso (30 m para el caso A y 10 m para el B) a partir del cual no se logra reducción de la impedancia impulso. Este valor corresponde a la longitud efectiva del contrapeso.

Para el caso de un contrapeso de 10 m, se muestran en la figura 11 las tensiones de contacto y de paso sobre el punto de ingreso de la corriente y en la figura 12 el potencial eléctrico en algu-

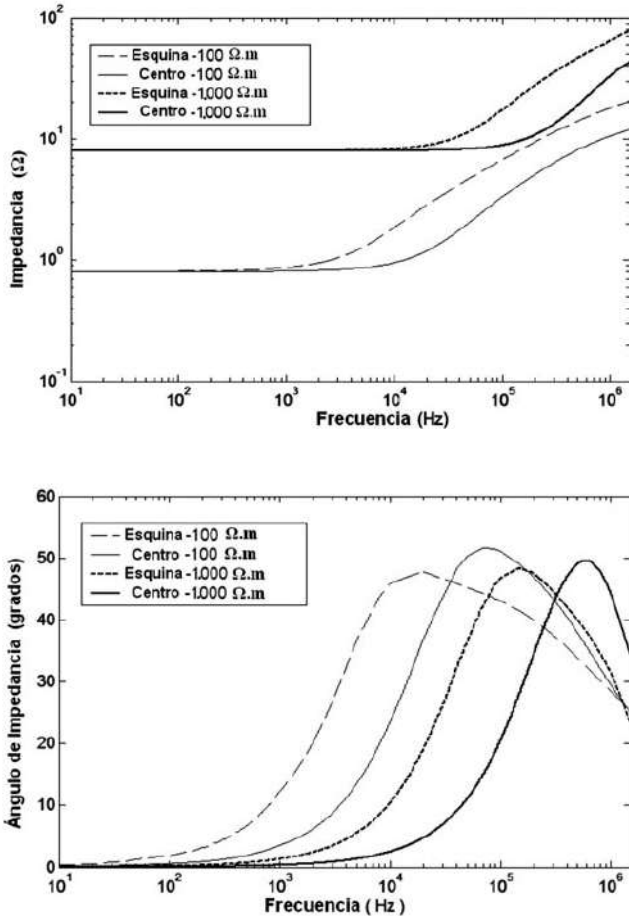


Figura 6 Influencia de ρ y ϵ_r y de la localización del punto de inyección en la impedancia de PaT.

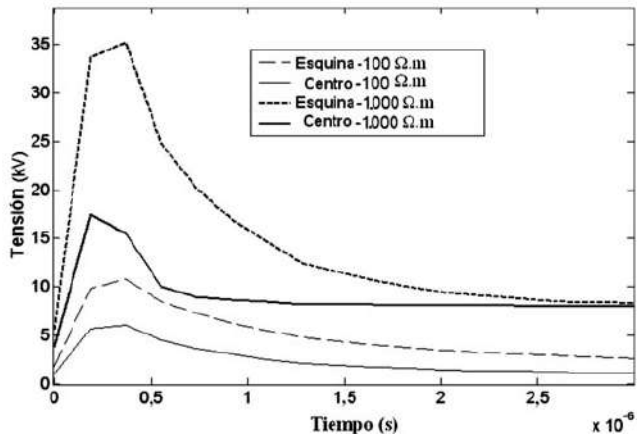


Figura 7 GPR transitorio para los casos de las figuras 5-6

-----□

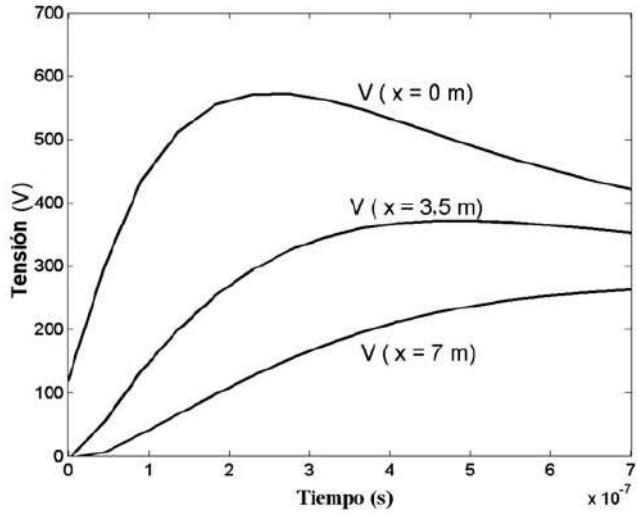


Figura 8 Efecto de la atenuación de las sobretensiones en un contrapeso de 15 m

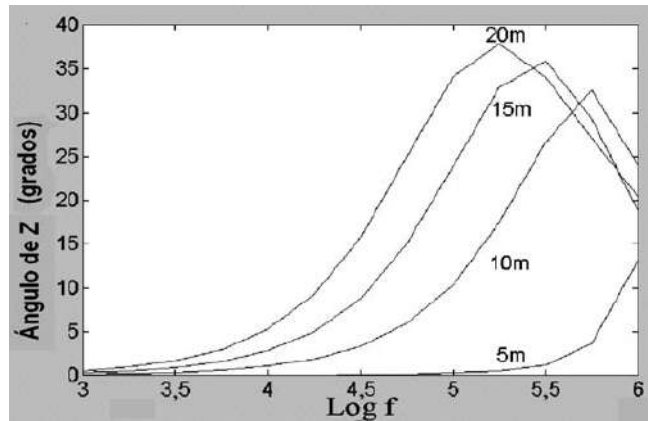
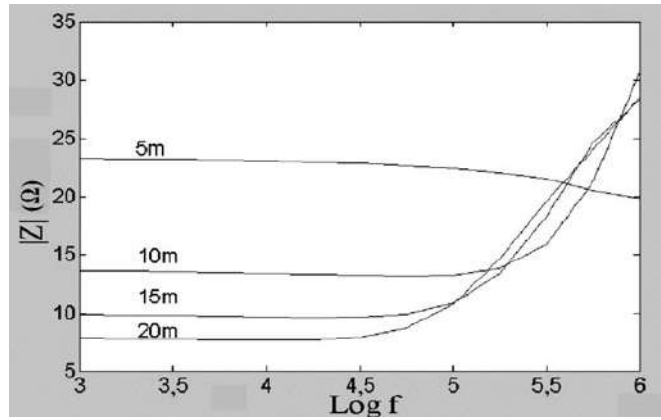


Figura 9 Variación de la impedancia con la frecuencia para diferentes longitudes de electrodos horizontales

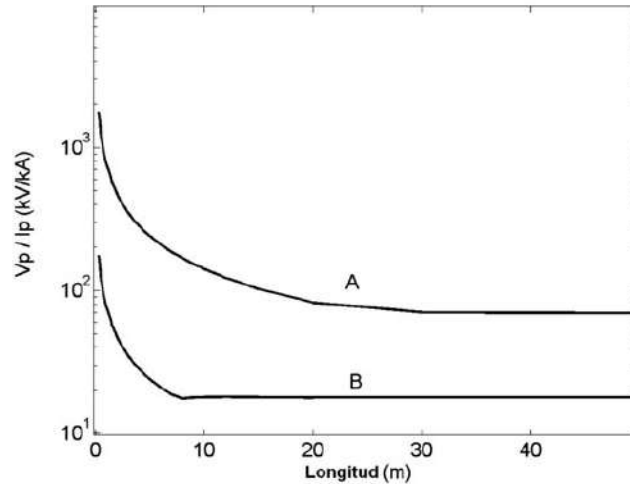


Figura 10 Impedancia impulso en función de la longitud de un contrapeso en dos suelos diferentes.

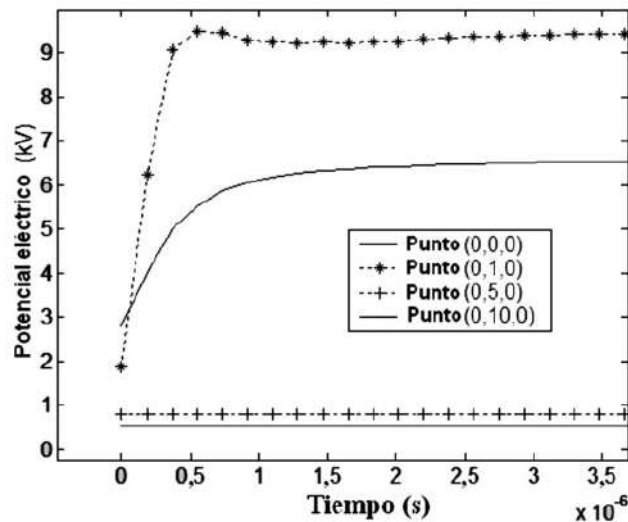


Figura 11 Tensiones de contacto y de paso sobre un contrapeso

nos puntos en la superficie del suelo. A partir de estos cálculos es posible evaluar condiciones de seguridad para la vida humana.

Finalmente, la figura 13 ilustra el esquema de la configuración de un sistema de protección contra rayos de un edificio impactado en una esquina por una descarga de 1kA y $1/50\mu s$ [7]. Las líneas gruesas representan los conductores aéreos y las delgadas los subterráneos. Se demarcan 4 puntos de observación.

Resulta claro de las figuras 14 y 15, cómo el nivel de las sobretensiones y la distribución de las corrientes dependen de la cercanía al punto de impacto. El potencial tiende a ser el mismo en los cuatro puntos de observación a partir de los $6\mu s$, cuando la velocidad de cambio de la onda ha disminuido y tiende a equipotencializarse. El cambio brusco de pendiente en la onda de tensión es debido a las reflexiones ocasionadas por el cambio de medio. Al sumar los picos de

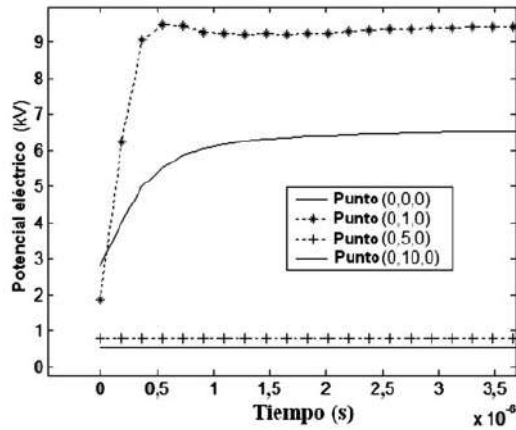


Figura 12 Potencial eléctrico en varios puntos de la superficie del suelo

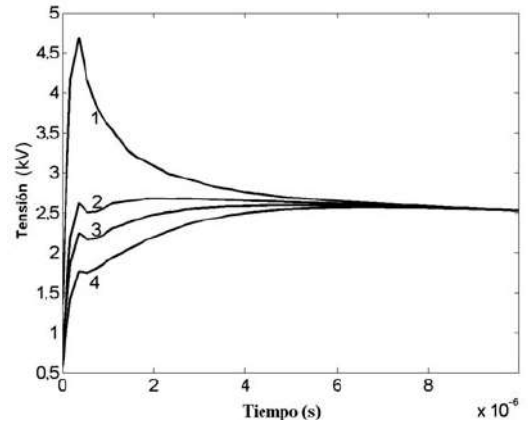


Figura 14 Sobretensiones en los puntos de observación

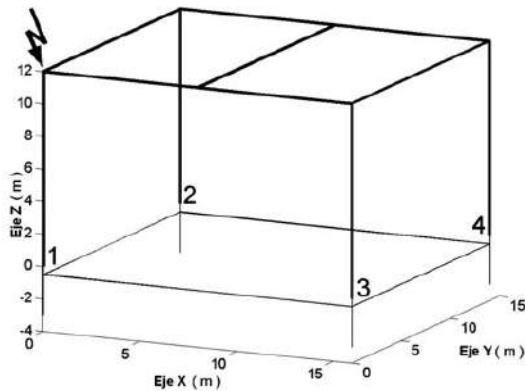


Figura 13 Sistema de protección contra rayos y ubicación de puntos de observación (1 a 4)

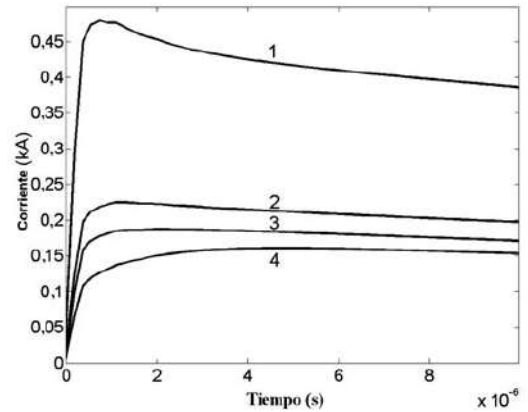


Figura 15 Corrientes en los puntos de observación

las ondas de corriente el resultado es 1kA, lo que concuerda con la casi nula disipación de corriente en el aire.

Conclusiones

Varios componentes para un correcto análisis del comportamiento transitorio de PaT han sido presentados: dependencia de los parámetros del suelo con la frecuencia; acoples inductivos, capacitivos y conductivos; atenuación a lo largo de los electrodos. Un apropiado método para tener en cuenta todos estos componentes ha sido propuesto y resultados de un programa compu-

tacional que implementa este método han sido mostrados.

El análisis de la impedancia de PaT entre frecuencias de 10² y 10⁶ Hz ha mostrado que algunos comportamientos común y correctamente aceptados en baja frecuencia, como la reducción de la impedancia con incrementos de la longitud de los electrodos o la mayor efectividad de los verticales que de los horizontales, deben ser considerados con cautela cuando eventos de alta frecuencia están involucrados, ya que a estas frecuencias corresponden altas impedancias para grandes longitudes, debido a efectos inductivos, y bajas

impedancias cuando se presentan perpendicularidades que anulan este efecto.

Evaluaciones en el dominio del tiempo pueden ser derivadas del análisis en el dominio de la frecuencia y algunos ejemplos presentados lo han ilustrado.

La impedancia de PaT juega un papel importante en la solución de problemas de sobretensiones en sistemas de potencia, particularmente cuando son impactados por rayos. Entonces, es de gran importancia contar con herramientas de cálculo y simulación que tengan en cuenta de la mejor manera posible los diferentes fenómenos presentes.

Con la herramienta desarrollada es posible hacer estudios no solo de sistemas de puesta a tierra o sistemas de protección contra rayos, sino de inducciones en sistemas vecinos o evaluación de esfuerzos de aisladores, entre otros.

Los efectos considerados en la metodología propuesta son los mismos que determinan varios problemas de compatibilidad electromagnética, lo cual muestra una aplicación potencial de la metodología y llama a trabajar en esta dirección.

Reconocimientos

Presentamos nuestro reconocimiento al Comité de desarrollo de la investigación, CODI, de la UdeA, por el apoyo financiero y a los estudiantes Walter M. Villa y Andrés M. Vanegas, integrantes del GIMEL, por su apoyo al trabajo de simulación.

Referencias

1. G. Moreno, J. Valencia, F. Villada. "Modelación de puestas a tierra para simulación de sobretensiones transitorias en transmisión de energía eléctrica". En: *Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia*. No. 25. Medellín. Abril, 2002. pp 106-116.
2. S. Visacro, "Modelagem de Aterramentos Elétricos". Rio de Janeiro. Tesis de Doctorado, Universidad Federal de Rio de Janeiro. 1992.
3. A. Otero, J. Cidrás, "Frequency-Dependent Grounding System Calculation by Means of a Conventional Nodal Analysis Technique". En: *IEEE Transactions on Power Delivery*. Vol. 14. No 3. Nueva York. Julio, 1999. pp 873-877.
4. G. Moreno, "Projeto de Aterramento de Subestações Combinando Métodos Simplificado e de duas Camadas". En: *I Seminário Internacional de Distribuição de Energia Elétrica. I SIDEE*. Belo Horizonte. 1990.
5. C. Portela "Cálculo de parâmetros e comportamento de malhas de terra". En: *Aterramento em sistemas de potência*. Rio de Janeiro. ABNT. 1983. pp 01-14.3.
6. S. Visacro, C. Portela. "Modelling of Earthing Systems for Lightning Protection Applications, Including Propagation Effects". En: *21th International Conference on Lightning Protection, 21th ICLP*. Berlín, 1992. pp 133- 138.
7. S. Visacro. "Evaluation of current and potential distribution for lightning protection system including the behavior of grounding electrodes". En: *25th International Conference on Lightning Protection, 25th ICLP*. Grecia, 2000. pp 464-468.
8. L. Grcev, M. Heimbach. "Grounding Systems Analysis in Transients Programs Applying Electromagnetic Field Approach". En: *IEEE Transactions on Power Delivery*. Vol. 12. No 1. Nueva York. Enero, 1996. pp 186-193.
9. L. Grcev. "Computer Analysis of Transients Voltages in Large Grounding Systems". En: *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 11, No 2, April, 1996. pp 815-821.
10. L. Grcev, M. Heimbach. "Frequency Dependent and Transient Characteristic of Substation Grounding Systems". En: *IEEE Transactions on Power Delivery*. Vol. 12. No 1. Enero. 1996. pp 172-178.
11. H. Gómez, E. Velilla. "Modelación de Puestas a Tierra para Evaluación de Sobretensiones Transitorias". Medellín. *Proyecto de grado, Universidad de Antioquia*. 2002.
12. J. Henao, H. Ramírez. "Variación de resistividad y permitividad de suelos con la frecuencia". Medellín. *Proyecto de grado, Universidad de Antioquia*. 1990.
13. C. Portela. "Regimes Transitórios". Rio de Janeiro. COPPE/UFRJ-Eletrabras. 1983.
14. G. Moreno, E. García, H. Gómez, E. Velilla, J. Valencia, J. Correa. "Modelación de puestas a tierra para evaluación de sobretensiones transitorias". VI *Congreso Latinoamericano y III iberoamericano en Alta Tensión y Aislamiento Eléctrico, ALTAE 2003*. Costa Rica, 2003. pp 300-305.
15. E. Velilla, H. D. Gómez, G. Moreno, J. Valencia. "Assessing of grounding transient behavior and the Gtierras computer program". *International Conference on Grounding and Earthing, Ground'2004*. Belo Horizonte, 2004. pp 160-164.