



SISTEMAS ELÉCTRICOS INDUSTRIALES Y DE POTENCIA

EFICIENCIA A IMPULSO DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA

EFFICIENCY TO IMPULSE OF GROUNDING SYSTEMS

Ing. César Gallardo Sánchez¹, Dr. C. Ángel Valcárcel Rojas², Dr. Jorge Luis García Jacomino³

1-César Gallardo Sánchez. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba.

E-mail: cgallardo@uclv.cu

2- C. Ángel Valcárcel Rojas. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba.

E-mail: varca@uclv.edu.cu

3- Jorge Luis García Jacomino. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba.

E-mail: jacomino@uclv.edu.cu

Resumen: El presente trabajo de diploma tiene como objetivo determinar que parámetros de un sistema de puesta a tierra, el cual es diseñado para estado estable, deben de ser modificados para que su comportamiento ante un evento transitorio sea similar al de estado estable. Para lograr esto se realizó una búsqueda bibliográfica crítica sobre el tema, se desarrollaron diferentes modelos de mallas de tierra utilizando el software PAST; a partir de estos modelos se lograron determinar cuáles son los parámetros del sistema que deben de ser modificados para lograr la máxima eficiencia del mismo. Luego de realizar las simulaciones y de analizar los resultados se llegó a la conclusión de que el parámetro que más incidencia tiene en la eficiencia de un sistema de puesta a tierra es el lugar de impacto del rayo, mientras más al centro es el punto de impacto del rayo menor es el potencial máximo en la malla, logrando que el sistema se comporte de forma eficiente. Además, con el aumento del número de conductores en el área efectiva se logra casi que duplicar la eficiencia del sistema.

Abstract: *The present diploma work aims to determine which parameters of a grounding system, which is designed for stable state, must be modified so that its behavior before a transient event is similar to the stable state. In order to achieve this, a critical*





bibliographical search was made on the subject, different models of ground meshes were developed using PAST software; From these models were able to determine which are the parameters of the system that must be modified to achieve maximum efficiency of the same. After conducting the simulations and analyzing the results, it was concluded that the parameter that has the most incidence in the efficiency of a grounding system is the place of impact of the lightning, while the center is the point of impact of the smallest ray is the maximum potential in the mesh, making the system behave efficiently. In addition, increasing the number of drivers in the effective area almost doubles the efficiency of the system.

Palabras Clave: Sistemas de Puesta a Tierra, Mallas de Tierra, Eficiencia

Keywords: Grounding Systems, Earth Meshes, Efficiency

1. Introducción

Entender el comportamiento de la electricidad y sus aplicaciones es algo de gran importancia hoy en día. Es un hecho que todas las personas se ven involucradas con la electricidad, en la casa, en el trabajo o en cualquier actividad que desarrollen. De ahí surge la necesidad de las protecciones tanto para la vida del hombre como para la conservación de los aparatos eléctricos.

Uno de los elementos indispensables en la protección del equipamiento eléctrico y del hombre de las variaciones de corriente o de descargas atmosféricas son los sistemas de puesta a tierra.

Los sistemas de puesta a tierra, contribuyen de forma importante a la protección y el buen funcionamiento de los sistemas de energía eléctrica. La red de puesta a tierra tiene la función de garantizar una referencia de potencial y permitir la circulación de corrientes no equilibradas. Prácticamente todos los equipos eléctricos y electrónicos necesitan estar conectados a una red de tierra. Las torres que sostienen las líneas de transporte poseen este tipo de conexión, así como las subestaciones eléctricas requieren de una importante red de puesta a tierra que garantice el buen funcionamiento del sistema y la seguridad de las personas, animales y bienes que se encuentran en las cercanías.

La red de puesta a tierra debe ser capaz de tolerar corrientes de cortocircuito durante el tiempo transcurrido entre la producción del fallo y la actuación de las protecciones e interruptores que eliminan la falla, sin deteriorar sus propiedades mecánicas y eléctricas.





También debe ser capaz de drenar corrientes inyectadas a tierra, provenientes de descargas atmosféricas o por actuación de los pararrayos frente a sobretensiones, sin producir diferencias de potencial significativas que puedan ocasionar el deterioro prematuro de equipos importantes en la subestación, plantas industriales, edificaciones o líneas de transmisión. [1]

Modelar el comportamiento de un sistema de puesta a tierra, tanto desde el punto de vista del régimen permanente como del transitorio, es un problema complejo, debido a los múltiples factores que intervienen en su análisis.

El planteamiento analítico del problema se formuló hace muchos años por Rüdemberg y Sunde entre otros, pero la complejidad de las soluciones y de los métodos matemáticos involucrados, unida a la carencia de ordenadores, se hacía difícil el uso de los tratamientos analíticos a los diseñadores de sistemas de puesta a tierra. Por esta razón algunos investigadores intentaron simplificar el problema mediante la búsqueda de relaciones sencillas entre las diversas variables. Para este fin se utilizaron métodos empíricos.

Durante la década de los setenta, el rápido avance de la electrónica y el perfeccionamiento y la reducción de precio de los ordenadores hace atractiva la utilización de métodos numéricos en el análisis de los sistemas de puesta a tierra.

Se plantean las ecuaciones de campo electrostático, se aplica el método de las imágenes desarrollado por Maxwell y se utilizan los métodos de cálculo matricial para resolver el problema del comportamiento eléctrico en régimen permanente de una red de tierra inmersa en un terreno complejo, generalmente modelizado en dos estratos, con una reducción sustancial de los errores cometidos por los anteriores métodos empíricos.

Desde la década de los ochenta hasta hoy día, se han realizado numerosas aportaciones que permiten disponer actualmente de herramientas potentes para el análisis de los sistemas de puesta a tierra.

Una de las principales aportaciones son las realizadas por Leonid Grcev, quien desarrolló un método de análisis de la respuesta transitoria de redes de puesta a tierra para una configuración cualquiera de los electrodos, válido para toda frecuencia y fundamentado en el método de los momentos, la solución numérica de las integrales de Sommerfeld y la aplicación de la transformada rápida de Fourier. El método desarrollado por Grcev





resuelve de forma completa las ecuaciones de Maxwell utilizando las funciones de Green. Se obtiene la respuesta en frecuencia del sistema de puesta a tierra excitando la red con un impulso unitario. Su trabajo representa uno de los esfuerzos teóricos más importante en la solución del problema de los transitorios en redes de puesta a tierra, sin embargo, está restringido a modelos uniformes del subsuelo. Recientemente Grcev ha presentado algunas contribuciones que permiten simplificar el problema, acelerando la solución, especialmente cuando se reduce la frecuencia máxima de la excitación. [2]

Los parámetros para el diseño de un sistema de puesta a tierra se calculan para estado estable, pero al ocurrir un evento transitorio su comportamiento cambia, haciendo que el sistema no se comporte de igual forma y provocando que el sistema sea menos efectivo, en la medida en que sea posible diseñar un sistema cuyo comportamiento sea similar tanto en estado estable como en estado transitorio, se está hablando de un sistema más eficiente, por lo que se plantea la siguiente Interrogante Científica: *¿Cómo determinar sistemas de puesta a tierra que tengan un comportamiento similar tanto en estado estable como en estado transitorio, lo cual se traduce en una mayor eficiencia del sistema?* Lo que nos lleva a tener como objetivo general de la investigación: *Determinar qué parámetros del sistema de puesta a tierra diseñado para estado estable deben ser modificados para que su comportamiento sea similar en estado transitorio.*

1.1. Eficiencia de un sistema de puesta a tierra

Las configuraciones simples de electrodos horizontales y verticales sirven a menudo como la terminación de una descarga atmosférica en los sistemas de protección. Su función básica es dispersar la corriente de rayo a tierra sin causar alguna diferencia de potencial o voltajes inducidos que podrían poner en peligro a las personas o las instalaciones. Al poner a tierra sistemas que su comportamiento sea estable, los métodos que se utilizan para su diseño son ampliamente aceptados; sin embargo, durante una descarga atmosférica la función de sistemas de puesta a tierra (SPT) podría ser realmente diferente, y en algunos casos, crítico; deteriorando la eficiencia de la instalación. A pesar de todo el trabajo que ha sido dedicado a este tema, no hay todavía consenso en relación a la forma de aplicar los conocimientos para al diseño de un sistema real de puesta a tierra que logre un comportamiento similar en estado estable como lo es en estado transitorio, logrando que el sistema sea eficiente.[3]





La respuesta de los electrodos de tierra ante una onda de impulso depende en su mayor parte de tres factores fundamentales:

- La geometría de los electrodos.
- Las propiedades eléctricas del suelo.
- Las propiedades de la forma de onda de la corriente de rayo, principalmente, la intensidad de corriente y el tiempo del pulso delantero.

La eficiencia de un sistema de puesta a tierra, el cual drena a tierra corrientes provenientes de sobretensiones, determina el nivel de protección que provee contra de los efectos de una descarga atmosférica. Es bien sabido que los pulsos de corriente del rayo son inyectados a tierra por los sistemas de aterramiento, por la velocidad limitada de propagación del pulso de corriente a lo largo de los electrodos, la corriente inicial es inyectada a tierra a través de un punto de área relativamente pequeña en comparación con el sistema de tierra. El área se amplía cuando la corriente se extiende por el sistema de aterramiento y abarca todo el sistema después de varios microsegundos. Dos períodos pueden ser distinguidos: 1) el período inicial: antes de que el pulso alcance el fin del sistema de aterramiento y 2) el período estacionario: después de que el pulso ha alcanzado el fin del SPT. El período inicial de la descarga es caracterizado por una distribución grande e impar de potenciales a través del conductor; el período estacionario es caracterizado por la corriente descargada a tierra a través de todo el sistema de tierra con una distribución uniforme de potenciales que es típico para regímenes de baja frecuencia.[4]

El comportamiento de los sistemas de puesta a tierra cuando son afectados por una descarga atmosférica ha sido analizado completamente por Gupta y Thapar, los cuales para caracterizar el comportamiento de los sistemas de puesta a tierra ante una descarga introducen el termino impedancia de impulso (Z) [4], que no es más que la relación existente entre el potencial en el punto donde ocurre la descarga y el suelo remoto en volt y la corriente inyectada en ampere.

$$Z = \frac{V_m}{I_m} \quad (1)$$



La impedancia de impulso se puede relacionar con la resistencia de puesta a tierra en estado estable a través del coeficiente de impulso (A), brindando la posibilidad de comparar la repuesta del sistema bajo las condiciones de la descarga, con su repuesta en condiciones normales [4], dándonos un reflejo de cuan eficiente es el sistema. El coeficiente de impulso es la relación que existe entre la impedancia de impulso y la resistencia a frecuencia del sistema o lo que es lo mismo, la resistencia en estado estable.

$$A = \frac{Z}{R} \quad (2)$$

La impedancia de impulso de electrodos de masa con longitudes pequeñas es igual a la resistencia de tierra en estado estable, es decir, el coeficiente de impulso es igual a uno. La impedancia de impulso decrece con el incremento de la longitud de los electrodos, pero en una cierta longitud se convierte en constante, mientras la resistencia continúa decreciendo dando como resultado un coeficiente de impulso más grande que uno. Por consiguiente, sólo una cierta longitud del electrodo es efectiva, controlando la impedancia de impulso, que es referida como longitud efectiva. Así es que la longitud efectiva puede ser definida como la máxima longitud del electrodo para la cual el coeficiente de impulso es igual a uno.[3]

Las disposiciones múltiples de electrodo de tierra mejoran la resistencia de tierra de estado estable, mejorando así la eficiencia de impulso.

Varios autores analizaron la influencia de varios parámetros que afectan la impedancia de impulso y con ella la eficiencia de las mallas de tierra, incluyendo la resistividad del suelo, la dimensión de la malla, la posición del punto por donde es inyectada la corriente de falla, y el tiempo del pulso de corriente inyectada. Es digno destacar los trabajos realizados por Gupta y Thapar, quienes introdujeron el término área efectiva, tratándola como la dimensión de la cuadrícula, para la cual más incrementos en su tamaño no dan como resultado un cambio apreciable en el valor de la impedancia de impulso. Basados en los resultados de simulaciones por ordenador, proporcionaron fórmulas empíricas para el área efectiva y el coeficiente de impulso en mallas de tierra.

En las mallas de tierra, al igual que en un electrodo simple, cuando la dimensión de la malla es igual o más pequeña que el área efectiva, la impedancia de impulso es igual o





menor que la resistencia de estado estable, por lo cual, el coeficiente de impulso será igual o menor que uno, no sucediendo igual cuando la dimensión de la malla es mayor que el área efectiva, para este caso la impedancia de impulso permanecerá constante mientras la resistencia de estado estable decrece a medida que aumenta la dimensión de la malla, por lo que el coeficiente de impulso se vuelve más grande que uno e incrementa su valor con el tamaño de la malla.

Gupta y Thapar definieron el área efectiva como el área de la cuadrícula alrededor del punto por donde es inyectada la corriente a tierra y es efectivo el control de la impedancia de impulso. Importante, el área efectiva no está directamente relacionado con el área de los conductores que bajan a tierra la corriente; tal área cambia rápidamente. El área se origina en el punto inicial por donde se inyecta la corriente del rayo y se expande con la velocidad de propagación del pulso de corriente sobre los conductores. Esta velocidad es alta, es sólo ligeramente más lenta que la velocidad de la luz. Este proceso de propagación sobre la cuadrícula de aterramiento dura sólo algunos microsegundos. Luego de este período inicial de la descarga toda el área de la malla de tierra es efectiva, bajando toda la corriente de la descarga a tierra.[4]

El área efectiva de la malla de aterramiento es un parámetro importante para un diseño óptimo de sistemas de puesta a tierra. El área efectiva es lograda cuando un incremento en tamaño de la malla no da una mejora significativa de la impedancia de impulso.[5]. Como se mencionó anteriormente, el área efectiva no está relacionada con el área de los conductores encargados de drenar la corriente de la descarga atmosférica, sino más con el control de la impedancia de impulso, tratando que el sistema de puesta a tierra sea lo más eficiente posible.

1.2. Área efectiva

Esta área se origina en el punto de inyección de la corriente y se expande con la velocidad de propagación de la corriente del rayo que circula por los conductores. Esta velocidad es alta (es sólo ligeramente más lenta que la velocidad de luz). Este proceso de propagación dura solo unos pocos microsegundos. Después de este primer período inicial, durante la posterior fase estacionaria de la descarga, el área total de la malla se convierte en área efectiva que drena la corriente del rayo hacia la tierra. [4]



Gupta y Thapar definieron el área efectiva como un área limitada de la malla alrededor del punto de impacto, en la cual es posible un control efectivo de la impedancia de impulso Z . La figura 1 muestra como estos autores entienden esa área efectiva.

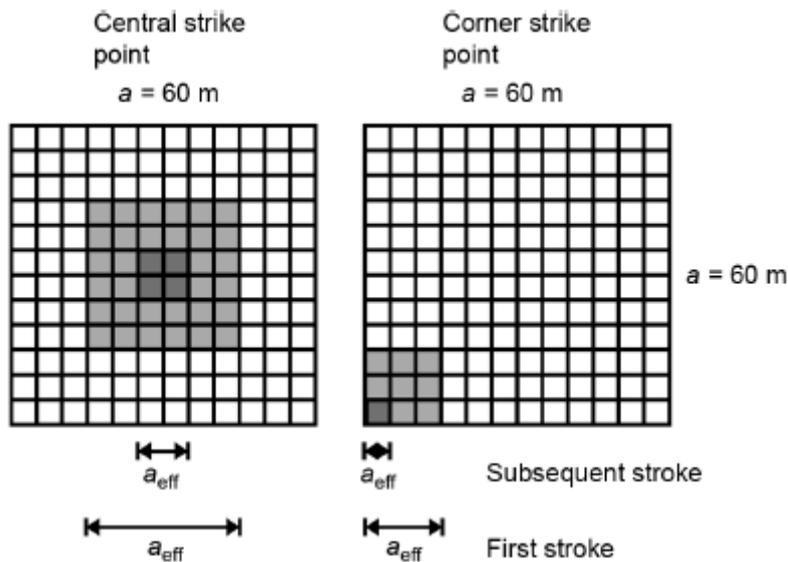


Figura 1. Área efectiva de una malla de tierra para impactos en el centro y en la esquina inferior izquierda. [4]

Leonid Grcev dedujo de sus estudios una expresión simple para el área efectiva:

$$a_{ef} = K * \exp(0.84 * (\rho_s * T1)^{0.22}) \quad (3)$$

donde:

$K= 1$ para impacto en el centro de la malla

$K= 0.5$ para impacto en la esquina.

Como se puede apreciar el área efectiva depende directamente de la resistividad del terreno y el tiempo de frente de la corriente del rayo y por lo tanto varía con este último parámetro, qué es distinto en cada corriente de rayo.

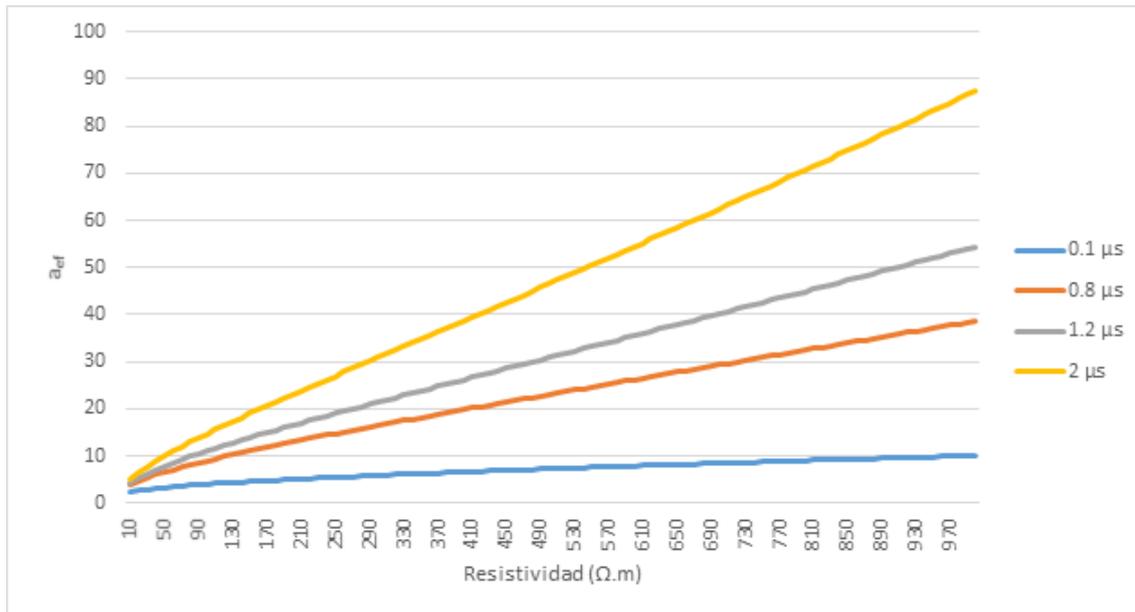


Figura 2. aef vs. resistividad del terreno para tiempos de frente entre 0.1 y 2 μs .

Se ha demostrado que mientras más densa es la cuadrícula, menor es la impedancia de impulso y por tanto mayor la eficiencia del sistema de puesta a tierra. Por lo tanto, una manera de mejorar la eficiencia puede ser haciendo más densa la malla en el área efectiva.

Lo anterior se puede comprobar en las gráficas 3, a) y b), en las cuales se toma una malla de 50 m de lado con una separación entre conductores de 10 m, 100 $\Omega.m$ de resistividad del terreno y un conductor 2/0.

En la gráfica 3 a) se aprecia el potencial máximo adquirido por la malla por la corriente del rayo y ya en la 3 b) se observa como este potencial disminuye al tomar el área efectiva y aumentar el número de conductores en ella.

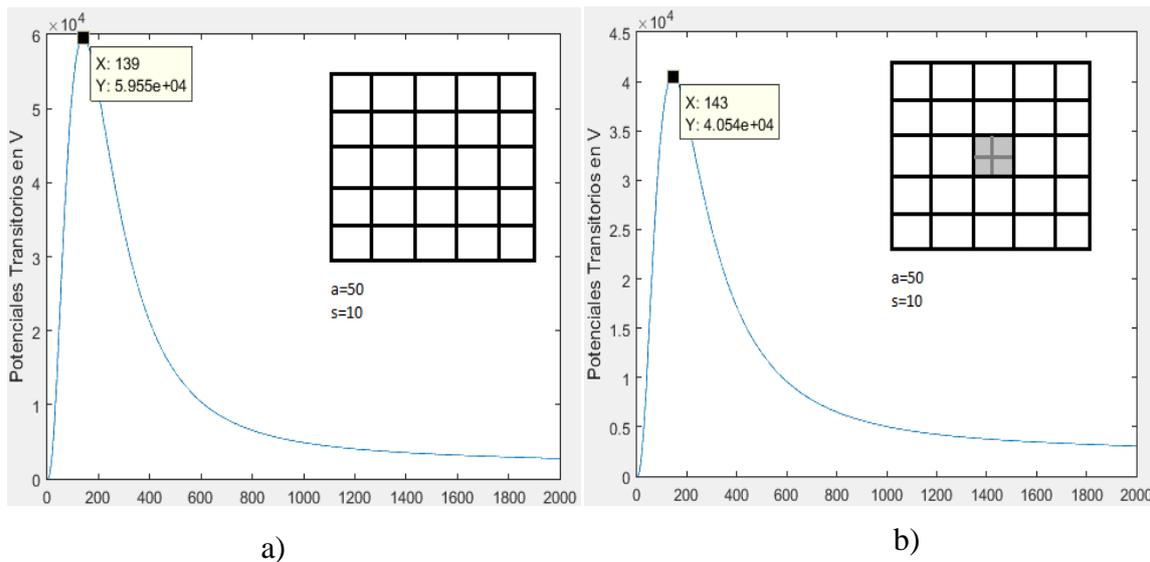


Figura 3. a) Potencial inducido en una malla de 50 m de lado. b) Potencial inducido en una malla de 50 m de lado cuando se aumenta el número de electrodos del área efectiva.

2. Metodología

Las modelaciones se realizaron a través del software PAST "Proyecto y Análisis de Sistemas de Tierra", implementado en MatLab y elaborado en el CEE "Centro de Estudios Electroenergéticos" de la facultad de Ing. Eléctrica de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, con el cual se procedió a modelar diferentes mallas de tierra. Estas mallas tenían como parámetros la resistividad del terreno en $\Omega.m$, la profundidad de enterramiento (h) en m, calibre de los conductores, la separación entre los conductores (s) en m y el tamaño de la malla, este último se aborda mediante la longitud del lado de la malla (a) en m; las mallas con las que se trabajan son mallas cuadradas. Las mallas quedarían como se observa en la figura 4, además también tienen sus ejes de coordenadas para localizar el punto de impacto del rayo y el lugar donde se quiere medir el potencial. Para las modelaciones se trabajó con un rayo de 30 kA y un tiempo de frente de 1.2 μs , y tiempo de cola de 50 μs .

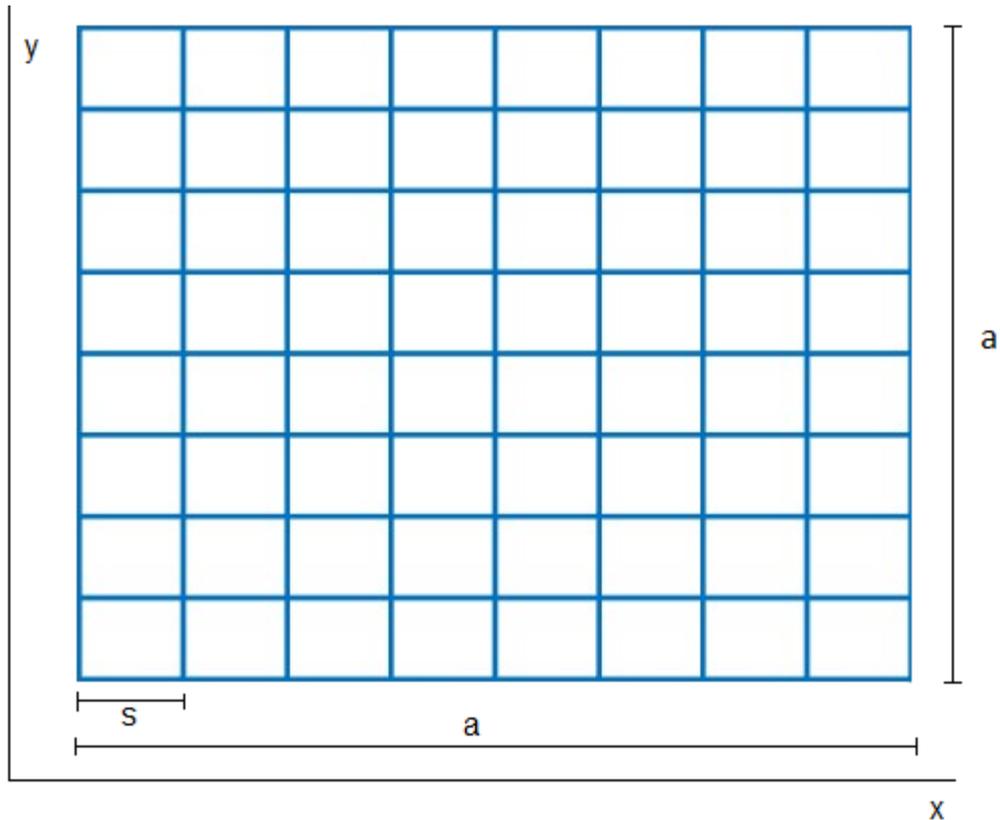


Figura 2.1. Ejemplo de una malla de tierra.

En cada modelación se obtiene, a partir del voltaje máximo medido y la corriente inyectada a la malla por el rayo, la impedancia de impulso por la ecuación 1. Al obtener la resistencia de estado estable se procede a calcular el coeficiente de impulso por la ecuación 2. Con este coeficiente se puede llegar a conclusiones de cuan eficiente será la malla de tierra.

Luego de realizar cada modelación se procede a su análisis de acuerdo a que parámetro se varió. Primeramente, se varia la resistividad y el tamaño de la malla para ver como varia el coeficiente de impulso, luego se toma una malla cuadrada de 60 m con una resistividad de $100 \Omega \cdot m$ y se comienza a variar el punto de impacto de la descarga, la



profundidad de enterramiento y otros parámetros para ver su influencia de forma individual.

3. Resultados y discusión

Se compararán dos mallas cuadradas, una de 60x60 m y otra de 100x100 m, con sus homólogas modificadas a las cuales se les cambiará el calibre del conductor de 2/0 a 4/0 y la profundidad de enterramiento de 0.5 m a 1 metro. Además, se hará más densa el área efectiva de cada malla, siendo la misma para ambas mallas, ya que esta depende del tiempo de frente de la onda y de la resistividad del terreno, ecuación 2.1, como la resistividad del terreno es la misma para ambas mallas y el rayo es el mismo, con un tiempo de frente de 1.2 μ s (valor medio de tiempos de frente), el área efectiva será la misma, con un valor de lado de 11.11 m que se aproxima a 10 m para facilitar el modelado.

En la tabla 1 y 2 se muestran los valores del máximo potencial adquirido por la malla y su eficiencia al cambiar la profundidad de enterramiento de la malla de 0.5 m a un metro, como se observa el potencial disminuye en 2610 y 2620 volts respectivamente.

Tabla 1. Valor del potencial máximo y la eficiencia en la malla cuadrada de 60x60 m al cambiar la profundidad de enterramiento.

	h=0.5 m	h=1 m
Potencial (V)	40910	38300
Eficiencia (%)	55.9	57.8

Tabla 2. Valor del potencial máximo y la eficiencia en la malla cuadrada 100x100 m al cambiar la profundidad de enterramiento.

	h=0.5 m	h=1 m
Potencial (V)	40910	38290
Eficiencia (%)	33.1	33.6

En la tabla 3 y 4 se muestran los valores del potencial inducido en la malla y su eficiencia al cambiar el calibre del conductor de un 2/0 a un 4/0, como se observa el potencial disminuye en 1160 y 1160 volts.

Tabla 3. Valor del potencial y la eficiencia en la malla cuadrada de 60x60 m al cambiar el calibre del conductor.

	Conductor 2/0	Conductor 4/0
Potencial (V)	40910	39750
Eficiencia (%)	55.9	57.1



Tabla 4. Valor del potencial y la eficiencia en la malla cuadrada 100x100 m al cambiar el calibre del conductor.

	Conductor 2/0	Conductor 4/0
Potencial (V)	40910	39750
Eficiencia (%)	33.1	34.0

En ambas situaciones el potencial máximo disminuye, lo que favorece la respuesta del sistema contra una descarga atmosférica, mejorando su eficiencia.

En la tabla 5 y 6 se muestran los potenciales máximos adquiridos por la malla y su eficiencia al aumentar el número de conductores del área efectiva, sin variar ningún otro parámetro.

Tabla 5. Valor del potencial máximo y la eficiencia en la malla cuadrada de 60x60 m al aumentar el número de conductores en el área efectiva.

	Sin aumentar el número de conductores en el área efectiva	Al aumentar el número de conductores en el área efectiva
Potencial (V)	40910	21650
Eficiencia (%)	55.9	101.1

Tabla 6. Valor del potencial máximo y la eficiencia en la malla cuadrada 100x100 m al aumentar el número de conductores en el área efectiva.

	Sin aumentar el número de conductores en el área efectiva	Al aumentar el número de conductores en el área efectiva
Potencial (V)	40910	21650
Eficiencia (%)	33.1	60.9

En la tabla 7 y 8 se muestran los potenciales máximos adquiridos y la eficiencia de la malla y su homóloga con el calibre del conductor y la profundidad de enterramiento cambiadas, de 0.5 m a un metro y de un 2/0 a 4/0, respectivamente; aumentándole además el número de conductores en el área efectiva.

Tabla 7. Potenciales máximos adquiridos por la malla cuadrada de 60x60 m y su eficiencia al cambiar el calibre del conductor y la profundidad de enterramiento, además de aumentar la densidad de conductores en el área efectiva.

Malla	Potencial (V)	Eficiencia (%)
a=60, s=5, h=0.5 m, conduct 2/0	40910	55.9
a=60, s=5, h=1 m, conduct 4/0 y aef más densa	19670	112.1



Tabla 8. Potenciales máximos adquiridos por la malla cuadrada 100x100 m y su eficiencia al cambiar el calibre del conductor y la profundidad de enterramiento, además de aumentar la densidad de conductores en el área efectiva.

Malla	Potencial (V)	Eficiencia (%)
a=60, s=5, h=0.5 m, conduct 2/0	40910	33.1
a=60, s=5, h=1 m, conduct 4/0 y aef más densa	19670	65.2

4. Conclusiones

Luego de haber analizado los resultados del presente trabajo se arriban a las siguientes conclusiones:

- El software PAST es una herramienta efectiva para modelar el comportamiento transitorio de sistemas de puesta a tierra.
- El parámetro que más incide en la eficiencia de los sistemas de puesta a tierra es el punto de impacto del rayo, siendo este el factor que determina el concepto de área efectiva, parámetro clave para el diseño de mallas más eficientes.
- Con el aumento del número de conductores en el área efectiva se logra casi que duplicar la eficiencia del sistema.

5. Referencias bibliográficas

- [1] D. I. A. C. V. Rojas, "Sistemas de puesta a tierra y protección de equipos electrónicos sensibles," 2007.
- [2] Z. C. Salcedo Torres, "Las practicas de laboratorio en la enseñanza de la química en educacion suerior," 2006.
- [3] L. Grcev, "Impulse efficiency of ground electrodes," Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 24, pp. 441-451, 2009/1.
- [4] L. Grcev, "Lightning Surge Efficiency of Grounding Grids," Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 26, pp. 1692-1699, 2011.
- [5] W. H. S. F. Hanaffi, I. Timoshkin, Hailiang LU, Yu Wang, Lei Lan, Xishan Wen, "Evaluation of Grounding Grid's Effective Area," 2014.