

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Estudios Electroenergéticos



TRABAJO DE DIPLOMA

Eficiencia a Impulso de sistemas de puesta a tierra.

Autor: César Gallardo Sánchez

Tutores: Dr. C. Ángel Valcárcel Rojas

Ing. Luis Alberto Brunet Arias

Santa Clara

2016

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Estudios Electroenergéticos



TRABAJO DE DIPLOMA

Eficiencia a Impulso de sistemas de puesta a tierra.

Autor: César Gallardo Sánchez

Email: cgallardo@uclv.cu

Tutores: Dr. C. Ángel Valcárcel Rojas

Email: varca@uclv.edu.cu

Ing. Luis Alberto Brunet Arias

Email: lb Brunet@elecssp.une.cu

Santa Clara

2016



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería Eléctrica, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Autor

Firma del Jefe de
Departamento donde se
defiende el trabajo

Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica

*La ciencia puede divertirnos y fascinarnos, pero es la Ingeniería la que cambia
el mundo.*

Isaac Asimov

Dedicatoria

A mis padres por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo.

Todo este trabajo ha sido posible gracias a ellos.

Agradecimientos

*A todas las personas que participaron e hicieron posible este proyecto,
muchas gracias por su apoyo y enseñanza:*

A mi mamá y mi papá que nunca dejaron de apoyarme;

A mis primas que siempre estuvieron preocupadas por el progreso alcanzado;

Al amor de mi vida, que siempre me ayuda y apoya, aunque no esté a mi lado;

A mi tutor, que sin ellos no hubiera sido posible este trabajo;

A mis amigos, que siempre están ahí cuando hace falta.

Sin ustedes no hubiera sido posible...

Tarea Técnica

Se trazaron las siguientes tareas técnicas:

1. Revisión bibliográfica sobre eficiencia de sistemas de puesta a tierra.
2. Modelación de sistemas de puesta a tierra simples y complejos en el PAST.
3. Determinación de cuáles son los parámetros que tienen una influencia efectiva en la eficiencia de los sistemas de puesta a tierra.
4. Modificación de sistemas de puesta a tierra diseñados para estado estable que tenga la mayor eficiencia posible.

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.

Índice

Pensamiento	i
Dedicatoria.....	ii
Agradecimientos	iii
Tarea Técnica	iv
Resumen	v
Introducción.....	1
Capítulo I: Fundamentos teóricos de los sistemas de puesta a tierra	5
<i>1.1. Sistemas de puesta a tierra o SPT</i>	<i>5</i>
1.1.1. Concepto	5
1.1.2. Clasificación	6
1.1.3. Importancia	9
<i>1.2. Elementos que conforman un SPT</i>	<i>10</i>
1.2.1. El suelo	10
1.2.1.1. Factores que determinan la Resistividad del Terreno.....	11
1.2.2. Conductores	16
<i>1.3. Transitorios en los SPT.....</i>	<i>17</i>
1.3.1. Proceso de descarga de una nube.....	18
<i>1.4. Eficiencia de un sistema de puesta a tierra</i>	<i>19</i>
<i>1.5. Primeros pasos en los modelos de sistemas de puesta a tierra. Métodos empíricos y analíticos</i>	<i>23</i>
<i>1.6. Los métodos numéricos para modelar sistemas de puesta a tierra</i>	<i>25</i>
1.6.1. Teoría de circuitos.....	26
1.6.2. Teoría del campo electromagnético	29
1.6.3. Teoría híbrida.....	33
2.2.4. Teoría de la línea de transmisión	34
Conclusiones del capítulo	36

Capítulo II: Evaluación del efecto de diferentes parámetros en la eficiencia de sistemas de puesta a tierra	37
2.1. <i>Modelación de la malla</i>	37
2.2. <i>Resultados de las modelaciones</i>	38
2.2.1. Variando resistividad y tamaño de la malla	39
2.2.2. Variando calibre del conductor	42
2.2.3. Variando profundidad de enterramiento	43
2.2.4. Variando separación entre conductores.....	44
2.2.5. Variando punto de impacto	45
2.3. <i>Área efectiva.....</i>	48
Conclusiones del capítulo	52
Capítulo III: Comprobación de los resultados obtenidos	53
3.1. <i>Comparación de las mallas cuadrada de 60x60 m y 100x100 m con sus homólogas modificadas</i>	53
3.2. <i>Análisis económico de la comparación</i>	57
Conclusiones del capítulo	59
Conclusiones.....	60
Recomendaciones.....	61
Referencias	62

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.

Con respecto al análisis transitorio de las redes de puesta a tierra son de destacar, en primer lugar, los trabajos realizados por Rüdemberg, Bewley y Sunde, entre otros. Algunos autores han obtenido expresiones de tipo empírico para el cálculo de transitorios como es el caso de Gupta y Thapar, introduciendo el concepto de área efectiva o área de influencia.

Desde la década de los ochenta hasta el presente, se están desarrollando métodos que permiten el estudio de transitorios de sistemas de puesta a tierra complejos, de una forma práctica.

Otros trabajos a destacar son los de 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?

La interrogante científica condiciona el siguiente **Objeto de estudio**: Los sistemas de puesta a tierra.

El **Campo de acción**: Eficiencia de los sistemas de puesta a tierra.

En correspondencia con la interrogante científica y el objeto de estudio se determinó 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.

En correspondencia con el objetivo general se plantean los siguientes **Objetivos específicos**:

1. Determinar los sustentos teóricos sobre el tema.

2. Desarrollar en el PAST los modelos de sistemas de puesta a tierra que se deben evaluar.
3. Determinar qué parámetros de los sistemas de puesta a tierra deben ser modificados para lograr la máxima eficiencia del sistema.
4. Comparar sistemas de puesta a tierra diseñados para estado estable con sistemas modificados para que tenga la mayor eficiencia posible.

Organización del informe.

Para el desarrollo de este trabajo se elaboraron tres capítulos, además de la introducción, conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos correspondientes.

- **Capítulo I.**

Contiene un análisis crítico de la bibliografía relacionada con el tema de investigación.

- **Capítulo II.**

Contiene una evaluación de los diferentes modelos de puesta a tierra que aparecen en la bibliografía y una selección de los más idóneos para el presente trabajo.

- **Capítulo III.**

Contiene una comparación entre diferentes diseños de estado estable y sus homólogos modificados.

.

Capítulo I: Fundamentos teóricos de los sistemas de puesta a tierra

El ser humano desarrolla sus actividades sobre la superficie de la tierra, construye sobre ellas sus edificios, calles, lugares de trabajo y paseo, fábricas etc. Por otro lado, para garantizar el suministro de energía eléctrica que requiere una sociedad moderna es necesario instalar centrales generadoras, líneas de transmisión, subestaciones y líneas de distribución, elementos cada vez más integrados físicamente a la comunidad. Considerando esta relación íntima y frecuente entre el hombre y las instalaciones eléctricas, es imprescindible tomar las medidas requeridas para reducir al mínimo los riesgos a que puedan quedar sometidas las personas por el efecto directo o indirecto de estas instalaciones; estos riesgos se reducen mediante la instalación de sistemas de puesta a tierra.

1.1. Sistemas de puesta a tierra o SPT

Los sistemas de puesta a tierra, contribuyen de forma importante a la protección y al buen funcionamiento de estos 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 este tipo, las torres que sostienen las líneas de transmisión, las subestaciones eléctricas, también 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.

1.1.1. Concepto

Independientemente de las medidas de seguridad de que actualmente se equipan los aparatos eléctricos, todas las instalaciones eléctricas deben incorporar redes de tierra, como medida de protección contra contactos indirectos.

La puesta a tierra es una conexión conductora, ya sea intencional o accidental, por medio de la cual un circuito eléctrico o equipo es conectado a la tierra o a un cuerpo conductor de una extensión relativamente grande que sirve en lugar de la denominada tierra. Se emplea para establecer y mantener el potencial de tierra

(o del cuerpo conductor) o aproximadamente ese potencial en los conductores conectados a él, y para corrientes conducidas por la toma de tierra desde y hacia la tierra (o cuerpo conductor). [3]

Otro grupo de autores a la hora de referirse a una conexión a tierra hablan de la unión eléctrica directa, sin fusibles ni protección alguna, de una parte del circuito eléctrico o de una parte conductora no perteneciente al mismo mediante una toma de tierra con un electrodo o grupos de electrodos enterrados en el suelo.

Podemos definir la puesta o conexión a tierra como la conexión eléctrica directa de todas las partes metálicas de una instalación, sin fusibles ni otros sistemas de protección, de sección adecuada y uno o varios electrodos enterrados en el suelo, con objeto de conseguir que en el conjunto de instalaciones, edificios y superficies próximas al terreno, no existan diferencias de potencial peligrosas y que, al mismo tiempo, permita el paso a tierra de las corrientes de falla o la de descarga de origen atmosférico.

La finalidad principal de una puesta a tierra es limitar la tensión que, con respecto a tierra, puedan presentar, en un momento dado, las masas metálicas, asegurar la actuación de las protecciones y eliminar o disminuir el riesgo que supone una avería en los materiales eléctricos utilizados.

1.1.2. Clasificación

El propósito de colocar a tierra los sistemas eléctricos es para limitar cualquier voltaje elevado que pueda resultar de rayos, fenómenos de inducción o de contactos no intencionales con cables de voltajes más altos. Cuando se colocan a tierra los equipos eléctricos, es para eliminar los potenciales de toque que pudieran poner en peligro: la vida de cualquier persona que esté en contacto con dicho equipo, y las propiedades para que operen las protecciones por sobrecorriente de los instrumentos. Es decir que los SPT proporcionan una vía de baja impedancia y conducen a tierra corrientes provenientes de descargas atmosféricas. [4]

Uno de los aspectos importantes para la protección contra sobretensiones en los sistemas de potencia, es el disponer de un sistema de puesta a tierra adecuado,

a este se conectan los neutros del sistema, los pararrayos, los cables de guarda, las estructuras metálicas, los tanques de los equipos y todas aquellas partes metálicas que deben estar al potencial de tierra.

En los sistemas de potencia, se utilizan dos tipos principales de puesta a tierra:

- Puesta a tierra de Protección.
- Puesta a tierra de Servicio.

La **puesta a tierra de protección**, es aquella que se instala con el objetivo primario de prevenir accidentes a las personas que interactúan con el sistema de potencia.[4]. En los sistemas de potencia, con el fin de prevenir el riesgo de choque eléctrico, se deben conectar todas las partes de una instalación que no se encuentren energizadas al sistema de puesta a tierra, en especial cuando estas piezas puedan entrar en contacto con partes energizadas por condiciones de averías o falla. Es una práctica muy común en los sistemas de potencia, conectar los siguientes elementos a tierra:

- Las carcasas de máquinas, cubas y tanques de transformadores, motores y equipos eléctricos similares.
- Los enrollados de los transformadores de medición, debido a que estos pueden ser sometidos a alta tensión, en los casos en que se produzca un daño en el aislamiento. En los transformadores de corriente (TC), se conecta a tierra uno de los bornes de baja tensión, y en los transformadores de potencial (TP), se conecta a tierra el neutro del circuito secundario trifásico, o bien una de las fases.
- En los transformadores y motores, se suele conectar a tierra el centro de la estrella (Y) o una fase.
- Las partes metálicas, bridas de aisladores, y todos aquellos elementos de metal que puedan bajo alguna circunstancia entrar en contacto con partes energizadas o que puedan ser sujetos a elevaciones de potencial, como consecuencia de la inducción electromagnética.
- Los elementos de maniobra (palanca, manivela, rejillas de protección) de metal de los equipos eléctricos del sistema de potencia.

La **puesta a tierra de servicio**, por su parte, es aquella conexión a tierra que pertenece al circuito de corriente de trabajo, es decir, el centro de la estrella de generadores y transformadores.[4]. Algunos autores incluyen en esta categoría los circuitos de tierra de los pararrayos y otros dispositivos de protección contra sobretensiones (bobinas, cables de tierra, etc.). En condiciones normales de operación del sistema de potencia, las conexiones a tierra, independientemente de su tipo, no deben conducir corrientes, y solo deben conducirla mientras funcionan los sistemas de protección de falla a tierra o los dispositivos de protección contra sobretensiones (pararrayos).

El estándar *An American National Standard (ANSI), IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. ANSI-IEEE Std.80 1986*, establece que el diseño de una puesta a tierra segura posee solamente dos objetivos:

- Proveer un medio para enviar la corriente eléctrica dentro de la tierra bajo condiciones normales o anormales, sin que se exceda ninguno de los límites operativos o de los equipos o afecte la continuidad del servicio.
- Asegurar que las personas en la vecindad de la instalación aterrada no sean expuestas a peligro de una descarga eléctrica.

Para lograr una instalación de puesta a tierra segura, se debe tener presente el control de la interacción de dos sistemas de tierras:

- La tierra intencional (protección o servicio), consistente en los equipos para descargar las corrientes a tierra (terreno).
- La tierra accidental, la establecida temporalmente por una persona expuesta al gradiente de potencial en la vecindad del sistema de puesta a tierra.

Las personas frecuentemente asumen que un objeto aterrado, puede ser tocado con seguridad; esta idea equivocada probablemente contribuyó con accidentes en el pasado, una instalación con una baja resistencia del SPT, por sí solo, no es una garantía de seguridad. Como quiera que sea, una instalación con una relativa baja resistencia de tierra puede ser peligrosa bajo algunas

circunstancias, mientras que otra con una muy alta resistencia puede ser segura con un cuidadoso diseño.[4]

1.1.3. Importancia

Hoy por hoy los sistemas de puesta a tierra adquieren su verdadero valor como uno de los componentes más importantes de los sistemas eléctricos, puesto que su función es la de forzar la derivación al suelo de las intensidades de corriente de cualquier naturaleza que se pueden originar, ya se trate de corrientes de falla, baja frecuencia industrial, o debidas a descargas atmosféricas, tipo impulso [5], lo que hace que estos jueguen un papel fundamental en los sistemas de potencia, por lo que debe de cumplir varios objetivos:

- Brindar seguridad a las personas.
- Proteger las instalaciones, equipos y bienes en general, al facilitar y garantizar la correcta operación de los dispositivos de protección.
- Establecer la permanencia, de un potencial de referencia, al estabilizar la tensión eléctrica a tierra, bajo condiciones normales de operación.
- Mejorar la calidad del servicio eléctrico, disipar la corriente asociada a descargas atmosféricas y limitar las sobre tensiones generadas.
- Permitir a los equipos de protección despejar rápidamente las fallas.
- Alta capacidad de conducción y disipación de corrientes.
- Resistentes a la corrosión.
- Vida útil mayor de 20 años.

Los sistemas de puesta a tierra son un elemento fundamental en la protección de cualquier instalación eléctrica. Los sistemas de aterramiento tienen múltiples propósitos. No solamente aseguran un punto de referencia de potencial para los equipos, tanto eléctricos como electrónicos, y para el personal; además, proveen una baja resistencia que permite el paso de las corrientes de falla a tierra. Dichas corrientes de fallas pueden provenir tanto de fuentes internas como externas producidas por descargas eléctricas y electricidad estática de la generación industrial; la resistencia de los sistemas de aterramiento tiene una influencia muy importante en la protección de los sistemas aterrados. El comportamiento de las redes de aterramiento que son afectadas por relámpagos, determina el grado de

protección proporcionado, ello hace obvio la necesidad del análisis de los procedimientos pronosticando la respuesta transitoria de los sistemas de aterramiento.

1.2. Elementos que conforman un SPT

Los elementos que componen un sistema de puesta a tierra son: el suelo, conductores, la malla de tierra y los electrodos de tierra. Todos los elementos nombrados con anterioridad son factores de estudios muy independientemente, para después lograr concatenarlos obteniéndose un producto final satisfactorio.

A continuación, se detallarán dos elementos fundamentales de un SPAT: el suelo y los conductores.

1.2.1. El suelo

El suelo es el elemento encargado de disipar las corrientes a tierra, ya sean de falla, de descargas atmosféricas y de otras causas no deseables. Se estudiará desde el punto de vista eléctrico por lo que se define la resistividad del suelo como la resistencia de un cubo de un m^3 de suelo cuando es medido entre cualquiera de las dos caras opuestas. La mayoría de los suelos son malos conductores de electricidad, excepto los que tienen contenido mineral que por su naturaleza son conductores. Sin embargo, dado los volúmenes que entran en juego, es posible conseguir una conducción aceptable a través de este. Suelos arcillosos, arenosos y rocosos algunas veces tienen una resistencia elevada, por lo que pueden considerarse como conductores pobres. Cuando estos terrenos presentan un contenido de humedad, la resistividad disminuye considerablemente y en este caso se puede considerar como buenos conductores (pero en comparación con los metálicos algunos son muy pobres). [4]

La resistividad de suelo depende en gran parte de los elementos componentes que aportan electrones libres concatenados por un electrolito, que en la mayoría de las veces es el agua común. La conducción del terreno es fundamentalmente electroquímica y depende principalmente de:

- Volumen de los poros del material que compone el terreno.
- Dispersión y distribución de los poros.
- Porción de los poros rellenos de agua.
- Conductividad del agua que llena los poros.

La resistividad de un terreno vale aproximadamente:

$$\rho_T = a(c \times V_p) \quad 1.1$$

dónde:

a es la resistividad del agua que llena los poros,

c es una constante que depende de la distribución de los poros,

V_p es el volumen de los poros.

1.2.1.1. Factores que determinan la Resistividad del Terreno

Los factores, principales que determinan la resistividad del suelo son: tipo de suelo, salinidad, humedad del terreno, temperatura, tamaño del grano y distribución, resistividad de las aguas naturales, estratigrafía y por último efectos de la propiedades físico-químicas del suelo sobre la corrosión. [4]

a) Tipos de Suelos

Desafortunadamente los tipos de suelo no están definidos claramente, por ejemplo, al mencionar la palabra arcilla, se cubre una amplia variedad de suelo, es por ello que es difícil o prácticamente imposible decir cuál es la resistividad promedio, igual ocurre con otros; y peor aún en diferentes localidades el mismo tipo de suelo presenta diferentes valores de resistividad. [4]

A continuación, se presentan las tablas 1.1 y 1.2 que muestran los valores de resistividad de los terrenos de acuerdo a su naturaleza, los cuales son indicativos solamente. Tanto la temperatura y especialmente la humedad del suelo tienen una influencia sumamente importante en la resistividad del mismo. El conocimiento de la influencia de la humedad y la temperatura sobre la resistencia

a tierra de los electrodos, resulta indispensable para garantizar que el sistema de aterramiento mantenga en el tiempo características satisfactorias.

Tabla 1.1. Valores medios de resistividad de acuerdo al tipo de terreno.

<i>Naturaleza del terreno</i>	<i>Valor medio de la resistividad en Ω-m</i>
<i>Terrenos cultivables y fértiles, terraplenes compactos y húmedos</i>	50
<i>Terraplenes cultivables poco fértiles y terraplenes</i>	500
<i>Suelos pedregosos desnudos, arenas secas permeables.</i>	3.000

Tabla 1.2. Valores de resistividad de acuerdo al terreno.

<i>Naturaleza del terreno</i>	<i>Resistividad en $\Omega\cdot m$</i>
<i>Terrenos pantanosos</i>	de algunas unidades a 30
<i>Limo</i>	20 a 100
<i>Humus</i>	10 a 150
<i>Turba húmeda</i>	5 a 100
<i>Arcilla plástica</i>	50
<i>Margas y arcillas compactas</i>	100 a 200
<i>Margas del jurásico</i>	30 a 40
<i>Arena arcillosa</i>	50 a 500
<i>Arena silíceas</i>	200 a 3.000
<i>Suelo pedregoso cubierto de césped</i>	300 a 500
<i>Suelo pedregoso desnudo</i>	1500 a 3.000
<i>Calizas blandas</i>	100 a 300
<i>Calizas compactas</i>	1000 a 5000
<i>Calizas agrietadas</i>	500 a 1000
<i>Pizarras</i>	50 a 300
<i>Rocas de mica y cuarzo</i>	800
<i>Granitos y gres procedente de alteración</i>	1.500 a 10.000
<i>Granitos y gres muy alterados</i>	100 a 600

b) Humedad del suelo

Debido a que la conducción de corriente es mayormente electrolítica, la humedad facilita la disociación de las sales en iones positivos y negativos; al haber más humedad hay mayor conductividad y por lo tanto menor resistividad.

Se puede decir que hay una variación considerable de la resistividad medida en temporada de lluvia y la medida en temporada de sequía, en la tabla 1.3 se presentan algunos ejemplos. Muchas veces, una manera de reducir la resistencia de puesta a tierra es humedeciendo el terreno a lo largo del tiempo, logrando así valores bajos de resistividad. Hay algunas instalaciones que tienen prevista una tubería de agua, la que utilizan para mantener una concentración de humedad en todas las épocas y durante años; manteniendo valores bajos de resistividad. [4]

Tabla 1.3. Efecto de la humedad en la resistividad del suelo.

<i>Contenido de humedad (% Por Peso)</i>	<i>Capa Vegetal</i>	<i>Arcilla Arenosa</i>
0	10^7	10^7
2,5	2500	1500
5	1650	430
10	530	185
15	190	105
20	120	63
30	64	42

c) Temperatura del suelo

La resistividad del suelo es aproximadamente independiente de la temperatura hasta que alcanza el punto de congelamiento; en ese momento la resistividad

del suelo se incrementa muy rápidamente pareciendo que no hay virtualmente ningún contacto con la tierra, la razón de ello es debido a que no hay disociación de sales. [4]

Para sitios de climas tropicales como Cuba, no es necesario penetrar o clavar un electrodo a grandes profundidades, procedimiento muy común en países donde generalmente no les conviene colocar conductores enterrados horizontalmente a poca profundidad porque los primeros uno o dos metros de la superficie del suelo se congelan en el invierno, lo que produce un aumento en la resistividad. También cabe decir, que existen lugares donde la resistividad puede bajar y subir a medida que aumenta la profundidad, o sea, un comportamiento de suelo estratificado.

d) Tamaño y distribución del grano del suelo

El suelo al estar compuesto de partículas más pequeñas (menor granulometría) es más compacto, denso y osmótico, en la mayoría de los casos. Una mayor compactación disminuye la distancia entre las partículas y se logra mejor conducción a través del líquido contenido. A medida que se aumenta el contenido de humedad, se alcanza una especie de saturación ya que el agua envuelve la mayoría de las partículas y un mayor acercamiento entre ellas no influye en la conducción. Esta es determinada, esencialmente, por las características del material y agua contenida. [4]

Al retener la humedad por períodos largos de tiempo lo hacen conductores independientes de las temporadas de lluvia y sequía; por lo que la resistividad varía poco a lo largo del año.

La estimación de la resistividad o resistividad promedio de un terreno con el fin de ser utilizadas en el diseño de un sistema de aterramiento, debe ser realizada sobre la base de la etapa más negativa del año al respecto, generalmente la época seca, ya que este define la peor condición en lo que a resistividad se refiere. [4]

e) Salinidad del suelo

Como es sabido la cantidad de agua presente en el suelo es un factor determinante en la resistividad del suelo y la del agua está determinada por la cantidad de sales disueltas en ella. A medida que aumenta la salinidad del suelo menor es la resistividad del terreno.

Las aguas que se encuentran en la naturaleza poseen conductividad apreciable, pues siempre tienen disuelta alguna cantidad de sales. La cantidad y clase de estas sales dependen de la naturaleza de las rocas con que las aguas hayan entrado en contacto en su marcha por la superficie del terreno o subterránea. La cantidad de sales de las aguas suele oscilar entre 0,1 y 35 gramos/litros, cifras que corresponden estas últimas a las aguas marinas.

f) Estratificación del suelo

Este término se refiere a que el suelo no es uniforme, sino que puede presentar diferentes capas cuya composición no es igual, por lo tanto, su resistividad variaría con cada una de ellas. Por lo general las capas más profundas tienen una resistividad media menor por ser más ricas en contenido mineral y humedad o se puede decir que están más cerca del nivel freático.

1.2.2. Conductores

Los elementos conductores que conforman el SPT deben de poseer una sección apropiada a la intensidad de corriente que ha de recorrerlos durante su operación, de forma que no se produzca un calentamiento inadmisibles. Los conductores utilizados en los sistemas de tierra son de cable de cobre de calibres por encima de 2/0 AWG dependiendo del sistema que se utilice, esto obedece a razones mecánicas, ya que eléctricamente pueden usarse cables de cobre hasta #2 AWG.[4]. El cobre se utiliza como conductor en los sistemas de tierra, debido a su mejor conductividad, tanto eléctrica como térmica, y, sobre todo, por ser resistente a la corrosión ya que este es catódico respecto a otros materiales que pudieran estar enterrados en las vecindades de él.

El tendido de los conductores de tierra ha de realizarse con conductor desnudo, sin aisladores, al descubierto, de forma visible y de tal forma que no resulte fácil su deterioro por acciones mecánicas o químicas. En la medida de lo posible, los conductores de puesta a tierra han de tener un contacto eléctrico perfecto, tanto con las partes metálicas que se desea poner a tierra, como con la placa o electrodo que constituye la toma de tierra propiamente dicha; de tal forma, que es necesario que las conexiones de los conductores de tierra con las partes metálicas y la toma de tierra, se realice con sumo cuidado, utilizando piezas de conexión y empalme adecuados; de igual forma los contactos han de disponerse limpios, sin la presencia de humedad y de tal forma que los posible efectos electroquímicos no destruyan con el tiempo las conexiones realizadas. Es una práctica muy general, proteger los contactos con pasta o revestimientos de tipo químicos, siempre que la resistencia eléctrica del contacto no resulta elevada.[4]

1.3. Transitorios en los SPT

El término transitorios se utiliza en el análisis de los sistemas eléctricos para referirse a un evento indeseable y momentáneo en su funcionamiento. Se puede definir como un cambio súbito en el estado estable de la tensión, la corriente o una determinada carga, que se manifiesta como una variación en la forma de onda, cuya duración es una fracción del ciclo de la frecuencia natural. Los transitorios pueden clasificarse en dos categorías: oscilatorios e impulsivos. [6]

- Transitorios tipo oscilatorios.

Es un cambio súbito en la condición de estado estable de la tensión, la corriente o ambas, que incluye las polaridades negativa y positiva. Consiste en voltajes o corrientes cuyos valores instantáneos cambian rápidamente. [6]

- Transitorio tipo impulso.

Es un cambio súbito en la condición de estado estable de la tensión, la corriente o ambas, que es unipolar. Los transitorios impulsivos se caracterizan por sus tiempos de elevación y caída, debido a que alcanzan altos valores de voltaje en periodos de tiempo muy cortos, pero su caída es más lenta y suave. La causa más común de este tipo de transitorios son las descargas atmosféricas. [6]

Debido a las altas frecuencias involucradas, la forma de los transitorios impulsivos puede cambiar rápidamente por los componentes del circuito y puede presentar características significativamente diferentes al ser visto desde distintos puntos del sistema de potencia. Estos transitorios pueden excitar la frecuencia natural de los circuitos del sistema de potencia y provocar transitorios oscilatorios.

1.3.1. Proceso de descarga de una nube

Uno de los principales objetivos de los SPT es prevenir las sobretensiones causadas por los transitorios tipo impulso debidos a una descarga atmosférica, por lo que hay que tener un buen conocimiento del comportamiento de estas.

El rayo es una descarga transitoria de elevada intensidad; la mitad de estos rayos ocurren en el interior de la nube, y la otra mitad entre nube y tierra.

En el estudio y cálculo de sobretensiones un rayo puede ser visto como una fuente de corriente que puede tener polaridad positiva, negativa o ambas en una misma descarga, lo que se conoce como onda bipolar. En general, se han identificado cuatro tipos de rayo entre nube y tierra. Las descargas negativas forman el 90 % de las descargas que caen a tierra a lo largo de todo el planeta (categoría 1); menos del 10 % de las descargas son positivas (categoría 3). También existen descargas iniciadas desde tierra hasta la nube (categorías 2 y 4), sin embargo, estas descargas son relativamente raras y ocurren normalmente en zonas de gran altitud, desde los picos de las montañas o desde altas estructuras construidas por el hombre. En la figura 1.1 se pueden ver las diferencias entre las cuatro categorías comentadas. [7]

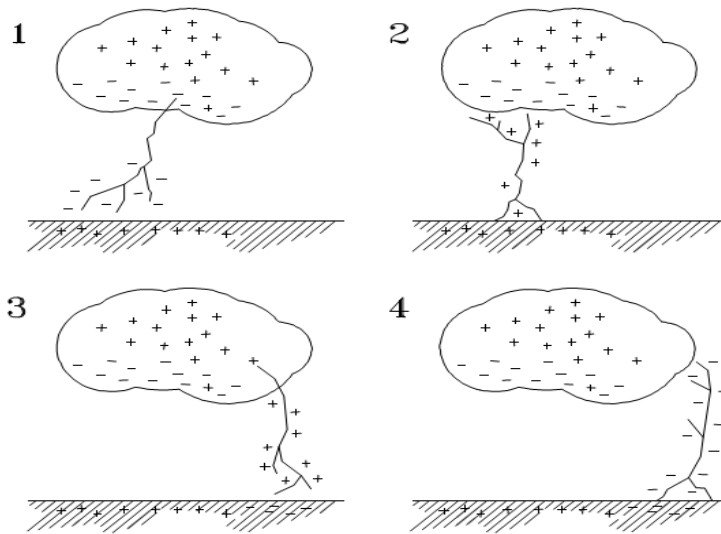


Figura 1.1. Tipos de rayos entre nube y tierra.

Los rayos procedentes de una nube tienden a impactar en tierra dentro de un área circular de aproximadamente 10 km de diámetro, dentro de esta área el impacto es casi aleatorio. Existe una probabilidad alrededor de un 20 % de que una segunda descarga caiga a 2, 3, o 4 km de la primera, y existe una probabilidad más pequeña de que una descarga caiga a unos 8 km o más de la primera. El valor medio de la distancia entre sucesivos puntos de impacto se encuentra en unos 3.5 km. El comportamiento de las descargas atmosféricas tiene un marcado carácter aleatorio, por lo que generalmente es necesario un elevado número de medidas para determinar con precisión su distribución. [7]

Los rayos de polaridad positiva (ver figura 1.1, categoría 3) tienen un considerable interés práctico porque tanto la corriente de pico como la carga total transferida pueden ser mucho más grandes que las de la mayoría de los rayos con polaridad negativa más comunes. La información archivada sobre elevados picos de corriente, en el rango de 200 a 300 kA, proviene de rayos positivos.

1.4. 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.[8]

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.[9]

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) [9], 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.

$$Z = \frac{V_m}{I_m} \quad 1.2$$

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 [9], 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.

$$A = \frac{Z}{R} \quad 1.3$$

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.[8]

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.[9]

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.[10]. 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.

1.5. Primeros pasos en los modelos de sistemas de puesta a tierra. Métodos empíricos y analíticos

Las primeras investigaciones experimentales y teóricas del comportamiento transitorio de los sistemas de puesta a tierra surgieron en 1934 con trabajos realizados por Bewley. Su labor formó parte de una investigación para la protección contra rayos de los sistemas eléctricos de potencia, donde Bewley derivó la impedancia de un conductor de tierra en el punto de inyección para un voltaje paso unitario, esta impedancia, como se muestra en la ecuación 1.4, fue derivada asumiendo que el conductor es una línea de transmisión con pérdidas de parámetros constantes por unidad de longitud. [11]

$$Z_c(t) = \frac{1}{GI_c \left\{ 1 - \sum_{k=1}^{\infty} \frac{8e^{\delta t}}{(2k-1)^2 2\pi^2} \left[\cos \omega_k t + \left(\frac{G}{4\omega_k C} - \frac{\omega_k C}{G} \right) \sin \omega_k t \right] \right\}} \quad 1.4. a$$

$$\omega_k = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{(2k-1)^2 2\pi^2}{LC l_c^2} - \frac{G^2}{C^2}} \quad 1.4. b$$

$$\delta = \frac{G}{2C} \quad 1.4. c$$

En la ecuación (1.4), l_c es la longitud del conductor de tierra, G , L y C son la conductancia de dispersión por unidad de longitud, inductancia y capacitancia del conductor respectivamente. La ecuación (1.4.a) indica que el comportamiento de la impedancia transitoria del conductor comienza con un efecto inicial de impedancia transitoria $\sqrt{\frac{L}{C}}$ y termina como un efecto final de resistencia de dispersión $\frac{1}{G l_c}$, el tiempo de transición entre estos dos efectos depende de la resistividad del suelo y del voltaje aplicado.

En 1943, Bellaschi y Armington calcularon analíticamente la respuesta de voltaje de electrodos de tierra en el punto de inyección para una corriente de

impulso con diferentes formas de onda. Ellos dieron las expresiones para el cálculo del voltaje en el punto de inyección de la corriente mediante una serie que converge lentamente. [11]. Por ejemplo, para una corriente de impulso paso unitaria, el voltaje en el punto de inyección está dado por:

$$e(t) = \frac{1}{G_t} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{n^2 \pi^2}{G_t L_t}} \right] \quad 1.5$$

En la ecuación (1.5), L_t es la inductancia total del electrodo en Henry, G_t es la conductancia total de la tierra en Siemens. Comparando las ecuaciones 1.4 y 1.5, se puede observar que Bellaschi negó el efecto capacitivo en sus modelos.

Uno de los libros de texto clásico sobre los sistemas de tierra fue escrito por Sunde, este libro hoy en día es usado por muchos ingenieros para resolver problemas de aterramiento. Su enfoque se basa en la teoría del campo electromagnético, comenzando con las ecuaciones de Maxwell. Sunde fue, además, el primero en introducir el concepto de líneas de transmisión con parámetros por unidad de longitud dependientes de la frecuencia para el modelado del comportamiento transitorio de un único conductor de tierra horizontal en la superficie del suelo, ante la caída directa de un relámpago usando las ecuaciones del telegrafista dadas a continuación: [11]

$$\frac{dI(x, j\omega)}{dx} = -YV(x, j\omega) \quad 1.6.a$$

$$\frac{dV(x, j\omega)}{dx} = -ZI(x, j\omega) \quad 1.6.b$$

En la ecuación (1.6.a y b), Z es la impedancia longitudinal por unidad de longitud del conductor, Y es la admitancia transversal por unidad de longitud del conductor.

$$Y(\Gamma) = \left[Y_i^{1-} + \frac{1}{\pi(\sigma_{soil} + i\omega\epsilon_{soil})} \log\left(\frac{1.12}{\Gamma a}\right) \right]^{-1} \quad 1.7.a$$

$$Z(\Gamma) = Z_s + \frac{i\omega\mu_0}{2\pi} \log \frac{1.85}{a(\Gamma^2 + \Gamma^2)^{1/2}} \quad 1.7.b$$

Por todo lo dicho anteriormente; está claro que la modelación para el análisis transitorio de los sistemas de tierra comenzó desde el principio de la teoría de

las líneas de transmisión y fue deducido analíticamente bajo ciertas aproximaciones para soluciones rápidas debido a la ausencia de poderosas computadoras. Por lo tanto, aquellos modelos se limitaron a un sistema de tierra simple, por ejemplo, un solo conductor horizontal o un único electrodo de tierra. Para sistemas complejos de tierra tales como grandes mallas de tierra el análisis empírico era solamente en pensamiento, el cual fue desarrollado por Gupta en 1980.

1.6. Los métodos numéricos para modelar sistemas de puesta a tierra

Desde los inicios de los ochenta, con el dramático desarrollo que se comenzó a alcanzar en el campo de los ordenadores hizo posible solucionar problemas complejos en la rama ingenieril, problemas prácticos que se basaban en métodos matemáticos complejos. Consecuentemente, el modelaje del comportamiento transitorio de los sistemas de aterramiento complejos bajo los ataques de relámpagos se ve en vías de un mejor futuro, específicamente por las siguientes razones:

- Los anteriores modelos empíricos tienen varias suposiciones para lograr ecuaciones de primer grado, de fácil solución. Pero con el desarrollo de las computadoras las complejas ecuaciones de los métodos numéricos pueden ser solucionadas y los errores derivados de las aproximaciones desaparecerían.
- Los sistemas de aterramiento complejo pueden ser modelados fácilmente en los ordenadores por la gran capacidad de memoria y su velocidad de procesamiento.

Los diversos métodos numéricos desarrollados desde 1980 hasta la actualidad para modelar los sistemas de puesta a tierra en estado transitorio se pueden clasificar de la siguiente forma:

- Teoría de circuitos.
- Teoría del campo electromagnético.
 - ✓ Método de los momentos.
 - ✓ Método de los elementos finitos.
- Teoría híbrida.

- Teoría de la línea de transmisión.

1.6.1. Teoría de circuitos

Uno de los modelos numéricos usado frecuentemente para modelar el comportamiento transitorio de los sistemas de tierra con geometrías complejas es la teoría de circuitos. Los principales pasos involucrados en este modelo son los siguientes:

- Dividir el sistema de tierra en pequeños segmentos.
- Crear el circuito equivalente de parámetros concentrados para cada segmento y calcular sus parámetros tales como inductancia propia y mutua (ΔL), la capacitancia (ΔC), conductancia (ΔG) y la resistencia interna (Δr_e).
- Resolver las ecuaciones de nodo del circuito equivalente que representa todo el sistema de tierra basado en las leyes de Kirchhoff. Las ecuaciones de nodo pueden ser representadas de diferentes formas basadas en el circuito equivalente adoptado para el sistema de tierra.

La teoría de circuitos para el análisis transitorio de sistemas de puesta a tierra fue desarrollada por primera vez por Meliopoulos en 1983. Él definió parámetros de frecuencia independiente para cada segmento (ΔL , ΔC , ΔG y Δr_e), sus cálculos se basan en la ecuación Laplaciana ($\nabla^2 V = 0$) en el medio semi-infinito de conducción de la tierra. La parte interesante de este trabajo es que cada segmento del cable de tierra fue reemplazado por una línea de transmisión sin pérdidas y dos conductancias adicionales de fuga a tierra como se muestra en la Fig. 1.2.a, en la Fig. 1.2.b se muestra cómo puede ser transformado el circuito.

[11]

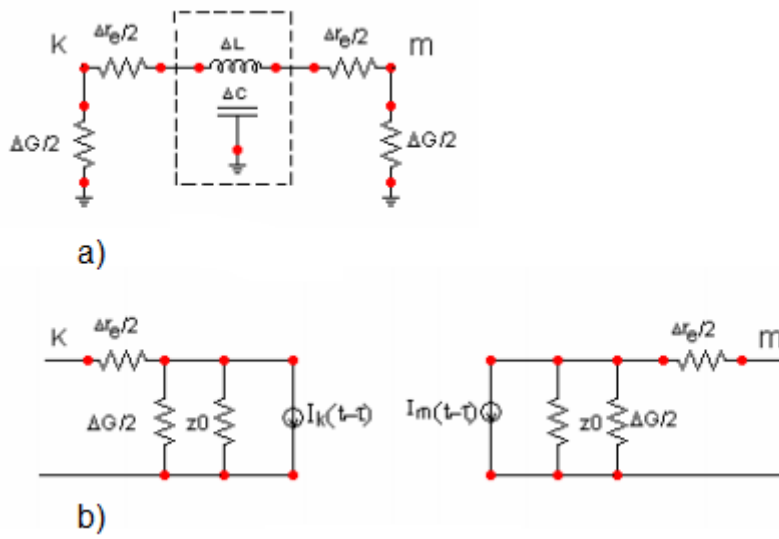


Figura.1.2. a) Circuito equivalente de Meliopoulos; b) Circuito aproximado. [11]

La ecuación nodal de dicho circuito equivalente es la mostrada a continuación:

$$[Y][V(t)] = [I_s(t)] + [b(t - \Delta t, \dots)] \quad 1.8$$

En la ecuación (1.8), Y es la matriz nodal de admitancia del circuito equivalente, V (t) es el voltaje vectorial en el tiempo para los nodos, $I_s(t)$ es el vector de corriente inyectado en los nodos del circuito, $b(t - \Delta t, \dots)$ es el vector de corriente.

Luego, como extensión de su trabajo, Meliopoulos calculó la respuesta de cada segmento ante cualquier excitación basándose en las ecuaciones de Maxwells, con el fin de que los parámetros de cada segmento fueran dependientes de frecuencia. [11]

En 1989, Ramamoorthy desarrolló una teoría de circuitos simplificada para una malla de tierra. En su estudio, después de dividir todo el sistema en n segmentos, cada segmento fue representado por un circuito independiente con inductancias mutuas (ΔL) y con conductancia de fuga (ΔG) que lo conectan a tierra como se muestra en Fig. 1.3. [11]. Por lo tanto, la ecuación nodal del circuito equivalente se muestra a continuación:

$$\frac{d[V]}{dt} = [G]^{-1} \left\{ \frac{d[I_s]}{dt} - [L]^{-1}[V] \right\} \quad 1.9$$

En la ecuación (1.9), V es el vector nodal de voltaje, I_s es el vector nodal de la corriente inyectada, G es la matriz nodal de conductancia, L es la matriz nodal de inductancia. Este modelo negó el acoplamiento capacitivo.

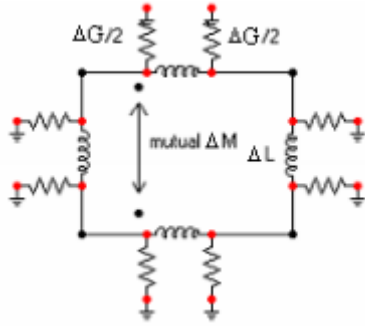


Figura 1.3. Circuito equivalente de un segmento de la malla. [11]

En 1999, dos modificaciones de la teoría circuitos basado en las obras de Meliopoulos fueron publicadas por Geri y Otero, respectivamente, y los dos incluyeron los fenómenos de ionización del suelo en sus modelos. En lugar de una línea de transmisión sin pérdidas combinada con una conductancia de fuga a tierra, forma usada por Meliopoulos, Geri usó un circuito equivalente diferente para representar cada segmento de la malla de tierra. Como se muestra en Fig. 1.4, Geri usó una conductancia equivalente en paralelo con una fuente de corriente ideal controlada por voltaje para representar cada rama del circuito. [11]. Basado en lo dicho anteriormente, la ecuación nodal (1.7) puede ser solucionada fácilmente.

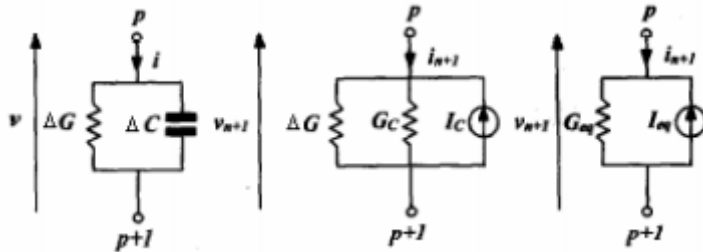


Figura 1.4. Circuitos equivalentes del modelo de Geri. [11]

El circuito equivalente usado por Otero se muestra en la Fig. 1.5. La ecuación (1.10) es la ecuación nodal del circuito equivalente. La ecuación fue solucionada en el dominio de frecuencia, siendo probablemente el primer intento para el análisis transitorio de sistemas de puesta a tierra en el dominio de la frecuencia. [11]

$$[I_s] = [K]^t [G] [K] [V] + [Y] [V] \quad 1.10$$

$$\text{donde } [V_{ave}] = [K] [V]$$

En la ecuación (1.10), I_s es el vector de corriente de la fuente externa, $[K]$ es una matriz constante que relaciona al vector de voltajes de rama $[V_{ave}]$ con vector de voltajes de nodo $[V]$, $[G]$ es la matriz que incluye efectos conductivos y capacitivos y $[Y]$ es la matriz admitancia del circuito incluyendo los efectos resistivos e inductivos.

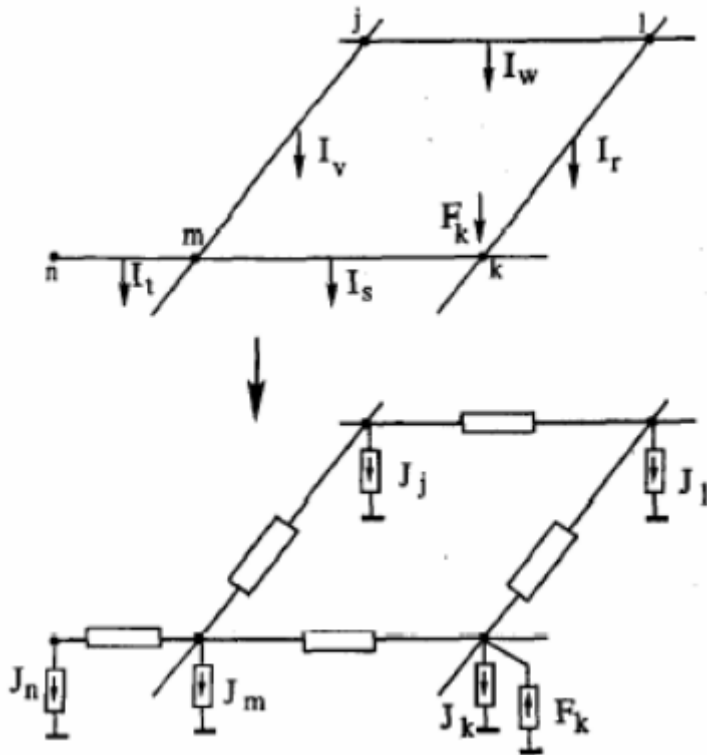


Figura.1.5. Circuito equivalente del modelo de Otero. [11]

La teoría de circuitos es fácil de entender en el sentido de que el comportamiento transitorio de un complejo sistema de puesta a tierra es transformado para su análisis en circuitos equivalentes simples, esta transformación hace el problema más fácil de analizar. La teoría de circuitos fácilmente puede incorporar los fenómenos de la ionización del suelo en su forma no lineal. Adicionalmente, esta teoría puede incluir todo el acoplamiento mutuo entre los cables de aterramiento. El inconveniente principal de esta teoría es que no predice el retardo de propagación del pulso de corriente.

1.6.2. Teoría del campo electromagnético

La teoría del campo electromagnético es el método más riguroso para modelar el comportamiento transitorio de sistemas de puesta a tierra, ya que soluciona completamente las ecuaciones de Maxwell con mínimas aproximaciones. Esta

teoría puede ser aplicada tanto por el Método de los momentos (MoM, por sus siglas en inglés) o por el Método de los elementos finitos (FEM, por sus siglas en inglés). [11]

Leonid Grcev fue el primero en desarrollar un modelo para el comportamiento transitorio de sistemas de puesta a tierra basado en el MoM. Este método empieza por la ecuación integral de campo eléctrico de Maxwell (1.11).

$$E^s = \frac{1}{4\pi j\omega\epsilon} (\nabla\nabla - \gamma^2) \int_l t' I_l(r') G_n(r, r') dl \quad 1.11.a$$

$$G_n(r, r') = G_1(r, r') + G_i(r, r') + G_s(r, r') \quad 1.11.b$$

En la ecuación (1.11), E^s es el campo eléctrico total disperso a lo largo de la superficie de la conductora y $t'I_l(r')$ es la corriente que fluye a lo largo del conductor, $\epsilon = \epsilon + \frac{\sigma}{j\omega}$ es la permitividad media compleja y $\gamma^2 = j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)$ es la constante de propagación de la onda en el medio con σ , ϵ y μ como la conductividad, permitividad y permeabilidad respectivamente, $G_n(r, r')$ es la función completa de Green, $G_1(r, r')$ y $G_i(r, r')$ son las funciones diádicas de Green para el campo eléctrico en r debido al elemento y su imagen, $G_s(r, r')$ es un término de corrección (expresado en términos de las integrales de Sommerfeld) debido a la interfaz suelo-aire, necesario para la solución completa del campo eléctrico. [11]

La condición de frontera es que el campo eléctrico longitudinal total sobre la superficie del conductor de tierra debe satisfacer la ecuación (1.12).

$$t(E^i + E^s) = IZ_s \Delta l \quad 1.12$$

En la ecuación (1.12), E^i es el campo eléctrico incidente y Z_s es la impedancia interna del conductor por unidad de longitud, incluyendo el efecto superficial.

Si las fuentes de corriente de cada segmento del conductor de tierra son conocidas, el campo eléctrico alrededor del sistema de aterramiento y la corriente de fuga a tierra pueden calcularse fácilmente usando ecuaciones fundamentales. El potencial en puntos diferentes de la superficie del conductor de tierra podría calcularse por la integración del campo eléctrico normal en el punto para una tierra remota. [11]

Al tratamiento numérico mencionado en la ecuación 1.12 se le denomina el Método de los Momentos (MoM), el cual transforma la ecuación integral asociada a un sistema de ecuaciones lineales algebraicas con N variables, donde estas variables a menudo representan los coeficientes de la corriente basados en algunas expresiones apropiadas. Si la distribución de la corriente a lo largo del conductor es aproximada como una onda sinusoidal, la correspondiente ecuación integral para el campo eléctrico 1.11 es llamada Ecuación de Reacción Integral (RIE de sus siglas en inglés). Si la distribución de corriente a lo largo del conductor es aproximada como una onda constante la ecuación integral correspondiente para el campo eléctrico 1.11 se conoce como Ecuación Mixta Integral de Potencia (MPIE de sus siglas en inglés). [11]

Si las fuentes de corriente para cada segmento de conductor de tierra son conocidas, el campo eléctrico alrededor del sistema de tierra y la corriente de fuga desde el segmento del conductor de tierra hacia el suelo puede ser fácilmente calculado utilizando las ecuaciones fundamentales para la fuente relacionada y el medio. El potencial en diferentes puntos en la superficie del conductor de tierra puede calcularse mediante la integración del campo eléctrico normal desde el punto sobre la superficie del conductor hasta la tierra remota. La componente longitudinal del campo eléctrico no se incluye ya que depende del camino y su contribución es insignificante comparado con la del campo eléctrico normal para estudios de los efectos de las descargas atmosféricas. Finalmente, para obtener respuestas en el dominio del tiempo se podría utilizar la Transformada Inversa Rápida de Fourier (IFFT de sus siglas en inglés). [11]

Dado que el enfoque del campo electromagnético basado en el método de los momentos resuelve las ecuaciones de Maxwell en el dominio de la frecuencia, este tiene suposiciones mínimas. Consecuentemente, se cree que son muy exactas, a más alta la frecuencia de las fuentes de entrada, mayor es la exactitud del enfoque del campo electromagnético. Sin embargo, este modelo es muy complejo para llevarlo a cabo, además cuando las estructuras de tierra son grandes, el tiempo de cálculo es muy grande, otra desventaja de la teoría del campo electromagnético es que debido al procedimiento de solución mediante el dominio de la frecuencia no es fácil modificarlo para incluir la no linealidad del

suelo debido a la ionización y combinar otros recursos no lineales que tienen modelos en el dominio del tiempo. [11]

La teoría del campo electromagnético basada en el Método de los momentos soluciona por completo las ecuaciones de Maxwell en el dominio de la frecuencia, teniendo suposiciones mínimas; consecuentemente, es un método preciso. Mientras más alta es la frecuencia de las fuentes de entrada, mayor es su exactitud. Sin embargo, este modelo es demasiado complicado para ser implementado. Otra desventaja de la teoría del campo electromagnético es que, por su método de solución en el dominio de frecuencia, no puede modificarse fácilmente para incluir la no linealidad debida a la ionización del suelo.

Otra teoría del campo electromagnético para el análisis transitorio de sistemas de tierra fue desarrollada por Nekhoul. El modelo comienza desde las ecuaciones de las energías magnéticas o eléctricas las cuales involucran ecuaciones diferenciales parciales de Maxwell con respecto al vector de potencial $\vec{A}$ y el potencial escalar (V) en diferentes dominios/volúmenes del sistema, esto ha sido implementado usando el Método de los Elementos Finitos (FEM de sus siglas en inglés) para las soluciones basadas en el principio físico de minimizar la energía en el sistema. Las ecuaciones finales de A - V son mostradas en 1.13 (1.13 a y b para el campo en el suelo, 1.13 c para el campo en el aire), la cual involucra la función de peso W y $\vec{W}$ para el vector potencial y potencial escalar respectivamente. [11]

$$\int \left[\frac{1}{\mu_0} (\nabla_x W)(\nabla_x A) + \frac{1}{\mu_0} (\nabla \cdot \vec{W})(\nabla \cdot A) + (\sigma_{suelo} + j\omega\epsilon_{suelo})(j\omega \vec{W} \cdot A + W \cdot \nabla V) d\Omega \right] = 0 \quad 1.13.a$$

$$\int (\sigma_{suelo} + j\omega\epsilon_{suelo}) \nabla W \cdot (j\omega \vec{W} \vec{A} + \nabla V) d\Omega = 0 \quad 1.13.b$$

$$\int \left[\frac{1}{\mu_0} (\nabla_x W)(\nabla_x \vec{A}) + \frac{1}{\mu_0} (\nabla \cdot \vec{W})(\nabla \cdot \vec{A}) d\Omega \right] = 0 \quad 1.13.c$$

Con el objetivo de resolver el problema numéricamente, las ecuaciones mencionadas anteriormente se transforman en ecuaciones lineales al dividir todo

el sistema en pequeños volúmenes de N elementos, lo difícil de esta teoría es transformar las fronteras abiertas de ambos medios (aire y tierra) en un problema de fronteras cerradas usando transformación espacial, lo cual reducirá el tamaño del problema. La principal ventaja de este enfoque del campo electromagnético basado en el método de los elementos finitos es la eliminación de la criticidad de la influencia del dominio (geométrico o del medio) del problema que puede ahora ser descompuesto en pedazos de terreno o elementos no uniformes que permiten describir fácilmente figuras complejas. Esta es la razón por la cual la ionización del suelo puede ser fácilmente incluida en el modelo mencionado anteriormente, sin embargo, este modelo es mucho más complicado para comprender que el basado en el método de los momentos, debido a que no se resuelve por las ecuaciones de Maxwell directamente. [11]

1.6.3. Teoría híbrida

La teoría híbrida para el análisis transitorio de sistemas de aterramiento fue desarrollada primero por Dawalibi en 1986, y más tarde modificada por Andolfato en 2000. Aquí, la palabra "híbrido" quiere decir que este planteamiento es una combinación de la teoría de circuitos y la del campo electromagnético. La metodología de este modelo es la siguiente: Todo el sistema de aterramiento es dividido en n segmentos pequeños. El campo eléctrico en cualquier punto es dado por la ecuación (1.14), derivada de las ecuaciones de Maxwell. [11]

$$E = -gradV - j\omega\vec{A} \quad 1.14$$

En la ecuación (1.14), $\vec{A}$ es el vector de potencial y V es el escalar de potencial. A lo largo de cada segmento k , la ecuación (1.12) puede ser transformada en la ecuación (1.14).

$$Z_{sk}I_k + \sum_{i=1}^n (V_{ave_k} - V_{ave_i}) + j\omega \sum_{i=1}^n \int_{l_k} \vec{A}_{ik} dl = 0 \quad 1.15$$

En la ecuación (1.15), Z_{sk} es la impedancia interna del segmento del conductor, k , que incluye el efecto superficial, V_{ave_k} y V_{ave_i} son el potencial de segmento, k e i . Andolfato explica que en la ecuación (2.10), $V_{ik} = V_{ave_k} - V_{ave_i}$ es debido al

acoplamiento conductivo-capacitivo y $j\omega \int_{l_k} \overrightarrow{A_{ik}} dl$ debido al acoplamiento inductivo, reescribiendo la ecuación de la siguiente forma. [11]

$$Z_{sk}I_k + \sum_{i=1}^n (C - G)_{ik} I_{\perp ik} + j\omega \sum_{i=1}^n L_{ik}I_i = 0 \quad 1.16$$

La ecuación (1.16) está en la forma de una ecuación de circuito, sin embargo, sus componentes debidos al acoplamiento, tanto inductivo como conductivo-capacitivo, están avalados por un análisis riguroso del campo electromagnético. [11]

$$j\omega L_{ik} = \frac{j\omega}{L_i} \int_{l_k} \overrightarrow{A_{ik}} dl \quad 1.17.a$$

$$(C - G)_{ik} = \frac{V_{ik}}{I_{\perp ik}} = \frac{1}{4\pi\sigma_{soil}} \int_{l_i} \frac{e^{-\gamma r}}{r} dl + \zeta \frac{1}{4\pi\sigma_{soil}} \int_{l'_i} \frac{e^{-\gamma r'}}{r'} dl' \quad 1.17.b$$

Donde $\overrightarrow{A_{ik}}$ es el vector de potencial en el segmento k debido a la fuente de corriente en el segmento i, l_k y l'_k son la longitud del segmento k y de su imagen k', I_i es la corriente que pasa por el segmento i, $I_{\perp ik}$ es la corriente de disipación del segmento i hacia al k a través del suelo, r y r' son la distancia de la fuente de corriente y su imagen al punto donde el campo es calculado, $\sigma_{soil} = \sigma_{soil} + j\omega\epsilon_{soil}$ es la conductividad del suelo, $\gamma = \sqrt{j\omega\mu_0(\sigma_{soil} + j\omega\epsilon_{soil})}$ es la constante de propagación y ζ es el coeficiente de reflexión.

El principal mérito de la teoría híbrida es que la influencia de la frecuencia en las impedancias internas, en los componentes inductivos y capacitivos son incluidos, lo que hace la teoría más precisa que la teoría convencional de circuitos, especialmente cuando la frecuencia de la corriente inyectada es alta.

2.2.4. Teoría de la línea de transmisión

Como se habló en el epígrafe 1.5, la teoría de la línea de transmisión fue el primer enfoque que sirvió para simular el comportamiento transitorio de los sistemas de puesta a tierra. Sin embargo, su desarrollo no fue tan rápido como el de la teoría de circuitos y del campo electromagnético.

Verma, Mazzetti y Velázquez aplicaron conceptos de la línea de transmisión con pérdidas en un conductor horizontal de tierra, que estaban descritos por las ecuaciones de telegrafista.

$$\frac{\partial V}{\partial x} + L \frac{\partial I}{\partial t} + r_e I = 0 \quad 1.18. a$$

$$\frac{\partial I}{\partial x} + C \frac{\partial V}{\partial t} + G V = 0 \quad 1.18. b$$

La ecuación (1.18) da como solución la distribución de la corriente y el voltaje en el dominio de “s” a lo largo del cable de tierra y luego puede ser llevada al dominio del tiempo usando la transforma inversa de Laplace. Lorentzou partiendo de las propias ecuaciones del telegrafista (1.18.a y b) derivó la ecuación de la distribución de la corriente y el voltaje directamente en el dominio del tiempo. [11]

Menter y Grcev para el análisis transitorio de sistemas de puesta a tierra aplicando la teoría de la línea de transmisión utilizaron la ecuación (2.3) de la línea de transmisión dependiente de frecuencia dada por Sunde, donde la impedancia longitudinal $Z(\Gamma)$ y la admitancia transversal $Y(\Gamma)$ por unidad de longitud cambian con la frecuencia como se muestra en la ecuación (1.7). [11]

Esta teoría fue inicialmente usada para la simulación del comportamiento transitorio del conductor de tierra, este tiene un comportamiento transitorio el cual es muy similar al de las líneas de transmisión aéreas, la única diferencia es que el anterior se entierra en el suelo y esta última se deja en el aire, siendo esta la razón por la cual la teoría de la línea de transmisión es la primera teoría para modelar el comportamiento transitorio de los sistemas de tierra. La teoría de la línea de transmisión para modelar el comportamiento de los sistemas de aterramiento puede aplicarse tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia, además es fácil de incluir la ionización del suelo en el dominio del tiempo. Similar a la teoría de circuitos, también puede incluir el acoplamiento mutuo entre las diferentes partes del sistema de puesta a tierra. Esta teoría puede introducir retardo en la propagación del pulso de corriente inyectado en el sistema, esto cobra gran importancia cuando el sistema de aterramiento tiene un tamaño considerable. Adicionalmente, el tiempo de computo requerido para

modelar un sistema de aterramiento utilizando la teoría de la línea de transmisión es mucho más corto que el de la teoría del campo electromagnético.

Desde una perspectiva ingenieril, un modelo para el estudio del análisis transitorio de los sistemas de tierra debe ser una aplicación rápida, y al mismo tiempo, debe predecir todos los rasgos importantes del comportamiento transitorio de los sistemas de tierra. Por lo cual el enfoque de la línea de transmisión es el más apropiado para el presente estudio. Desafortunadamente, el desarrollo de este enfoque no fue tan rápido como el de la teoría de los circuitos y el enfoque del campo electromagnético. Este enfoque se limitaba solo a un único conductor de tierra o electrodo simple, lo que hace necesario se perfeccionamiento para el análisis transitorio de sistemas de tierra complejos.

Conclusiones del capítulo

A la hora de diseñar un sistema de tierra eficiente hay que trabajar en busca de los parámetros idóneos de la malla en cuanto a dimensiones, tipo de electrodos y propiedades del suelo. El modelo matemático que se utiliza en este trabajo es el de la línea de transmisión.

Capítulo II: Evaluación del efecto de diferentes parámetros en la eficiencia de sistemas de puesta a tierra

Luego de haber realizado la modelación de cada malla de tierra se pasa al análisis de los resultados obtenidos en cada una de las simulaciones. Este capítulo se encarga de explicar cada resultado, basándose en cuan eficiente podrá ser el sistema de tierra para una descarga determinada, variando diferentes variables del sistema hasta llegar a la conclusión de cuáles son los factores que más inciden en su eficiencia.

2.1. Modelación de la malla

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 2.1, 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 .

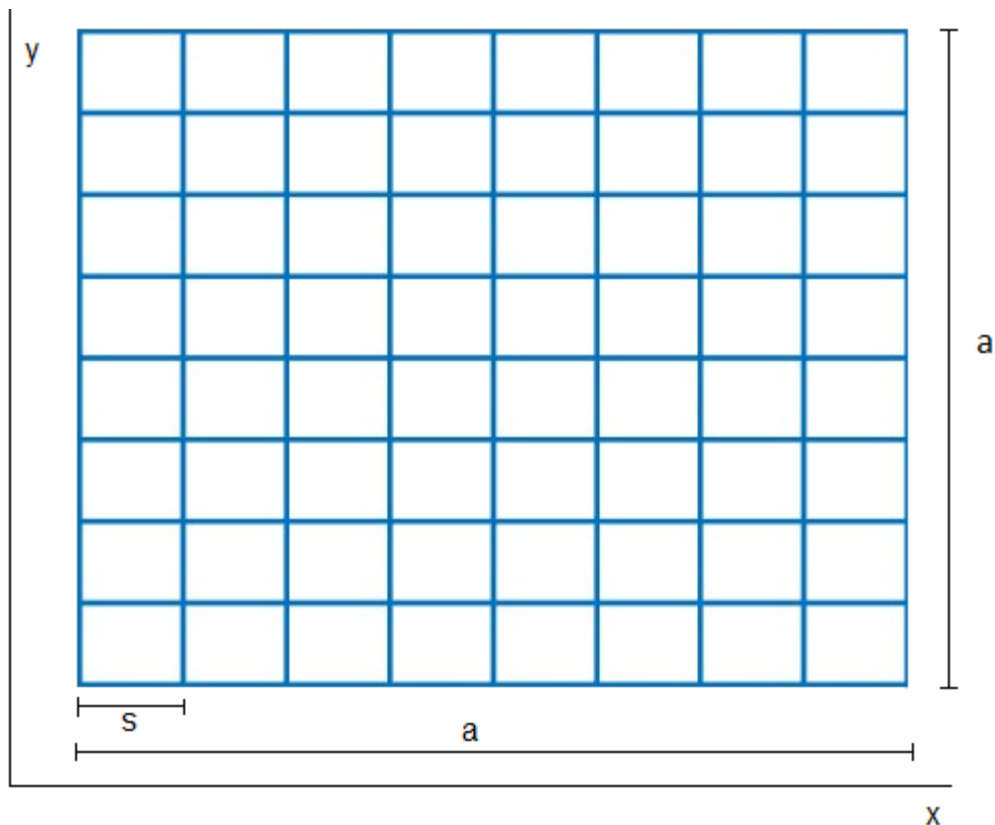


Figura 2.1. Ejemplo de una malla de tierra.

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 1.2. Al obtener la resistencia de estado estable se procede a calcular el coeficiente de impulso por la ecuación 1.3. Con este coeficiente se puede llegar a conclusiones de cuan eficiente será la malla de tierra.

2.2. Resultados de las modelaciones

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.

2.2.1. Variando resistividad y tamaño de la malla

Se elaboran mallas de tierra cuadradas de 20 m, 40 m, 60 m, 80 m y 100 m de lado (a) y se varia la resistividad desde 10 Ω .m hasta 1000 Ω .m manteniendo la profundidad de enterramiento de 0.5 m, un conductor 2/0 y la separación entre conductores de 5 m. Además, se cambia el punto de impacto del rayo, se trabaja con un impacto en la esquina inferior derecha (0,0) y otro en el centro (30,30), estas coordenadas son para una malla cuadrada de 60 m.

Se trabaja de la siguiente forma, se mantiene una resistividad constante y se comienza a variar el tamaño de la malla, obteniendo en cada corrida el voltaje (V) y la resistencia de estado estable (r) y con estos se calcula la impedancia de impulso (Z) y el coeficiente de impulso (A). En la tabla 2.1 se ve un ejemplo de cómo se toman los datos de las modelaciones, esta es para 10 Ω .m, de igual forma se procede para las demás resistividades.

Tabla 2.1. Resultados de las modelaciones.

En la esquina inferior izquierda				
$\rho=10\Omega.m$				
a	r	V	Z	A
20,00	0,24	32340,00	1,08	4,54
40,00	0,12	32340,00	1,08	9,35
60,00	0,08	32340,00	1,08	14,21
80,00	0,06	32340,00	1,08	19,15
100,00	0,04	32340,00	1,08	24,02

En la figura 2.2 (a y b) se aprecia la variación del coeficiente de impulso con la resistividad y la longitud de la malla. El coeficiente disminuye con el aumento de la resistividad para una misma longitud, son inversamente proporcionales y aumenta con la longitud para una misma resistividad, directamente proporcionales; esto se puede observar mejor en las figuras 2.3 y 2.4, respectivamente. Además, para impactos en el centro de la malla el coeficiente es menor, más próximo a la unidad, lo que hace que el potencial en el lugar de

impacto del rayo sea menor, ya que hay más área para drenar la corriente que es inyectada por el rayo que en la esquina, aquí solo tiene un camino, hacia el centro de la malla.

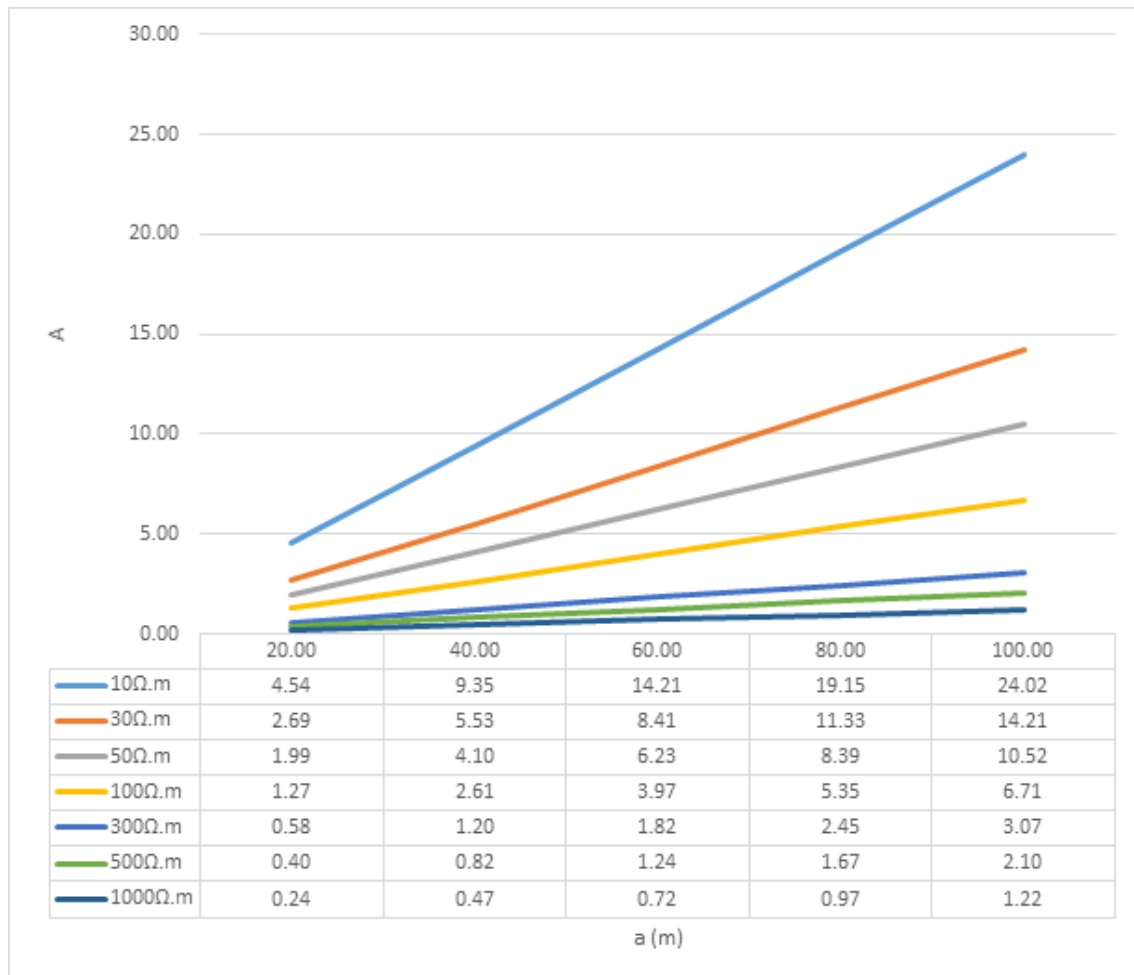


Figura 2.2. A vs. a, para varias resistividades. a) Impacto en la esquina inferior izquierda.

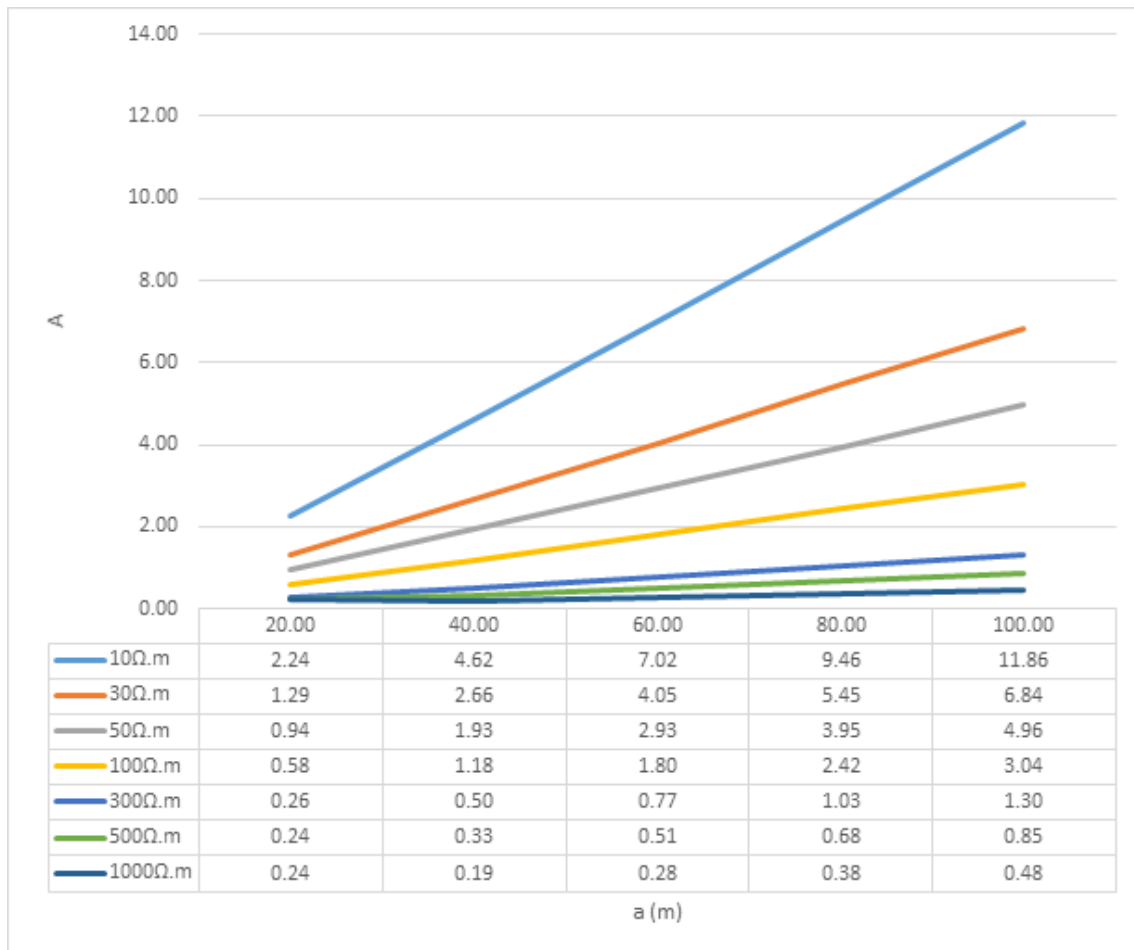


Figura 2.2. A vs. a, para varias resistividades. b) Impacto en el centro.

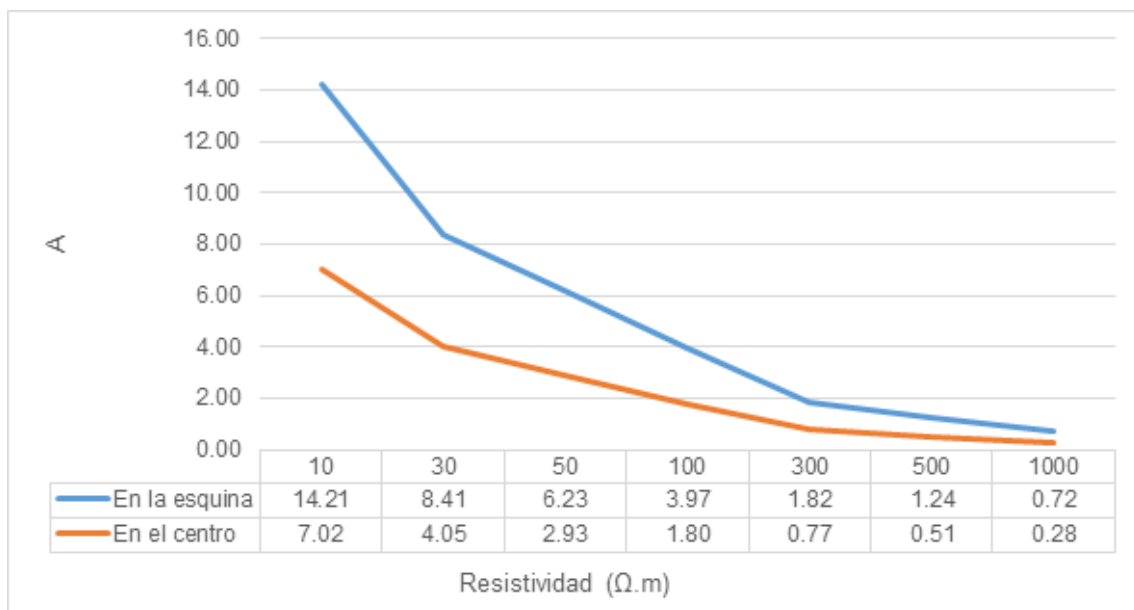


Figura 2.3. Variando la resistividad para 60 m de lado.

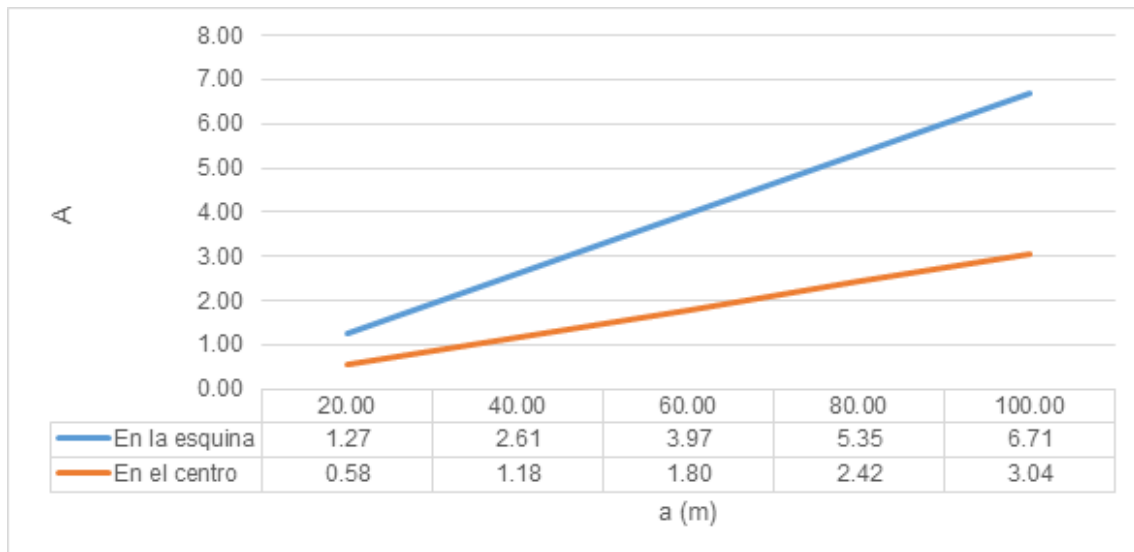


Figura 1.4. Variando el lado de la malla para 100 $\Omega \cdot m$ de resistividad.

2.2.2. Variando calibre del conductor

El calibre del conductor se varía desde un 2/0 hasta 500 MCM, para esto se toma la malla cuadrada de 60 m y se mantienen todos los parámetros constantes.

En la figura 2.5 (a y b) se observa como varia el coeficiente de impulso con el calibre del conductor, este disminuye a medida que aumenta el calibre del conductor, esto se debe a que el potencial y la resistencia de estado estable disminuyen con el aumento del conductor.

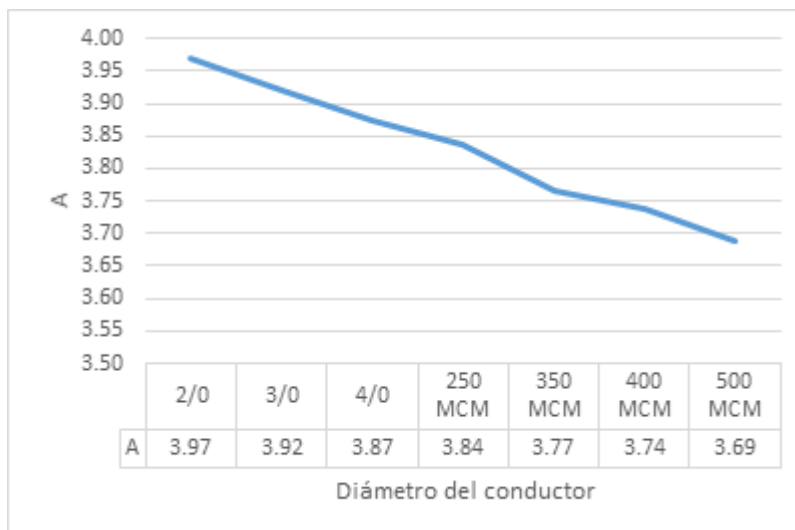


Figura 2.5. A vs. calibre del conductor. a) Impacto en la esquina inferior izquierda.

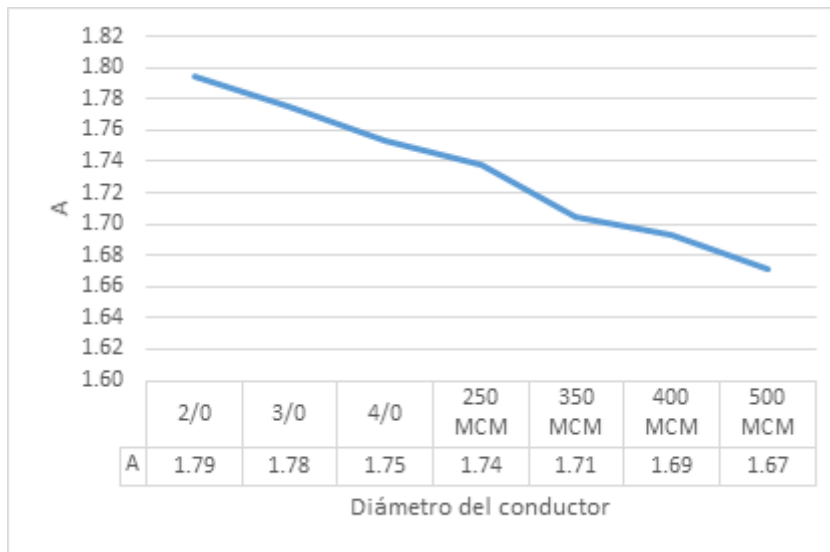


Figura 2.5. A vs. calibre del conductor. b) Impacto en el centro.

2.2.3. Variando profundidad de enterramiento

Al variar la profundidad de enterramiento no hay un cambio apreciable en el coeficiente de impulso, los cambios son de solo unas décimas y luego que pasa el metro de profundidad tiende a saturarse. Esto se aprecia en la figura 2.6 (a y b), en esta modelación se toma la malla cuadrada de 60 m con una resistividad de $100 \Omega \cdot m$ a una profundidad de enterramiento de 0.5 m y conductores 2/0 con separación de 5 m.

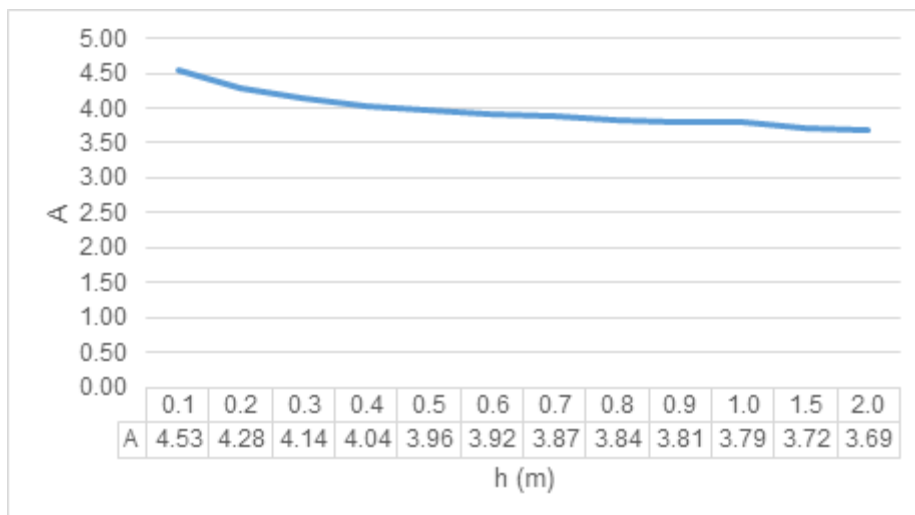


Figura 2.6. A vs. h. a) Impacto en la esquina izquierda.

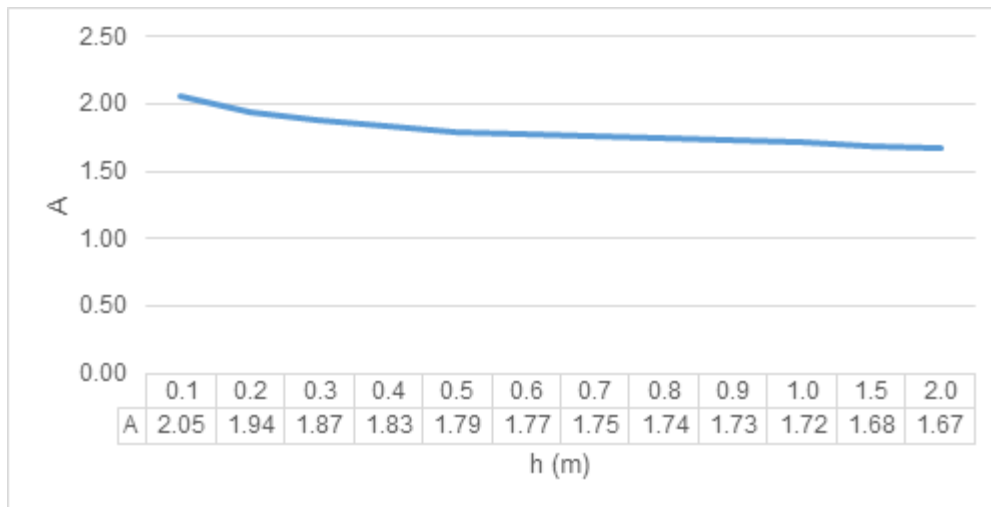


Figura 2.6. A vs. h. b) Impacto en el centro.

2.2.4. Variando separación entre conductores

Como se puede observar en la figura 2.7 a medida que se aumenta el número de módulos, o sea, se disminuye la separación entre conductores; primeramente, el coeficiente de impulso comienza a aumentar hasta un punto donde empieza a disminuir. Esto nos indica que si se sigue disminuyendo la separación entre conductores el coeficiente de impulso se debe acercar más a uno, haciendo la maya más eficiente.

Para esta modelación se utilizó una maya cuadrada de 60 m con una resistividad del terreno de $100 \Omega \cdot m$ a una profundidad de 0.5 m con conductores 2/0.

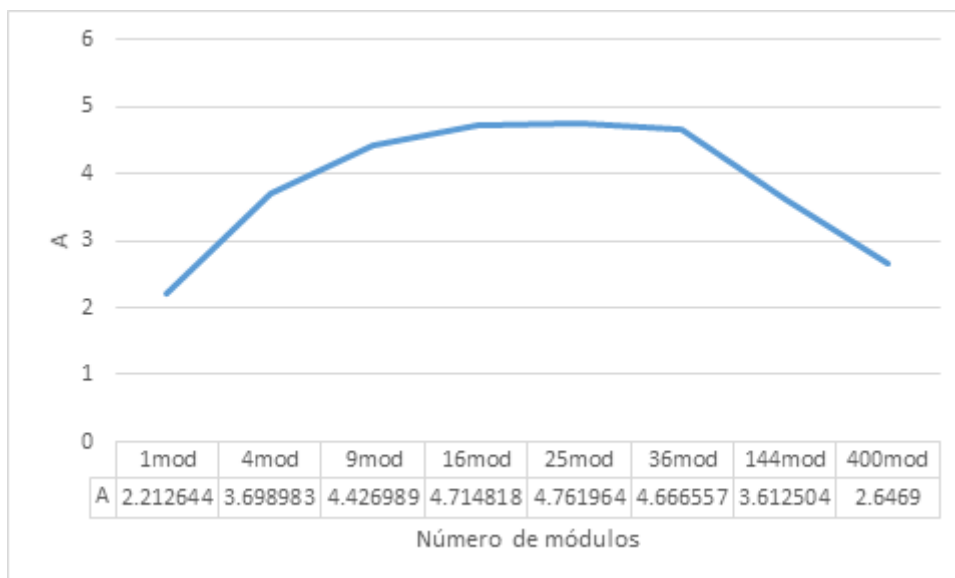


Figura 2.7. A vs. número de módulos.

2.2.5. Variando punto de impacto

El punto de impacto es una de las variables más significativas a la hora de calcular el coeficiente de impulso, se puede apreciar un cambio significativo cuando el lugar de impacto va del perímetro de la malla al centro, a medida que se acerca al centro el impacto del rayo, el comportamiento de la malla es mejor. Los potenciales que aparecen en la malla de tierra debido a la corriente inyectada por el rayo se reducen significativamente. De acuerdo a esto se realizó un análisis cambiando el punto de impacto desde la esquina hasta el centro de la malla, en diagonal y por el centro de esta, en la figura 2.8 se ilustra cómo se realizó. En los puntos señalados es donde se simula el impacto del rayo, comenzando desde el perímetro hacia el centro. Se utilizó la malla cuadrada de 60 m con una resistividad de 100 $\Omega \cdot m$ a una profundidad de enterramiento de 0.5 m y conductores 2/0 con separación de 5 m.

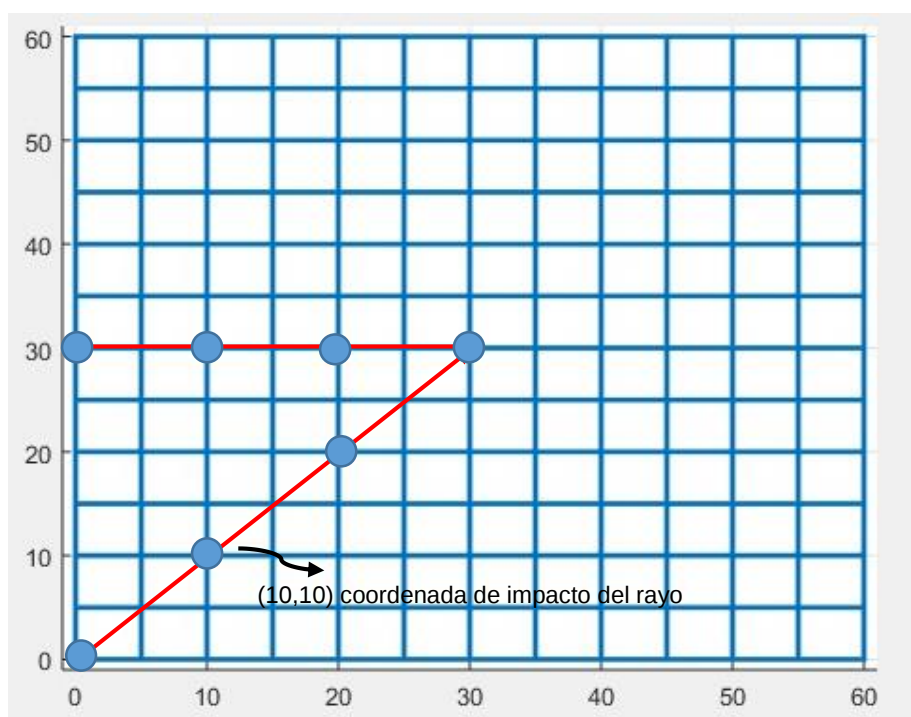


Figura 2.8. Malla de tierra que se utilizó para cambiar el punto de impacto.

En la figura 2.9 (a y b) se puede apreciar el potencial en cada uno de los puntos donde se simuló la caída del rayo. En esta gráfica se observa cómo el potencial inducido en la malla por la descarga disminuye a medida que el punto de impacto del rayo se separa de la zona perimétrica de la malla. En la figura 2.10 (a y b) se

observa de forma más clara lo rápido que disminuye el potencial, llegando a un punto donde este se hace. Esto provoca que el coeficiente de impulso se comporte de la igual forma, esto se observa en la figura 2.11 (a y b).

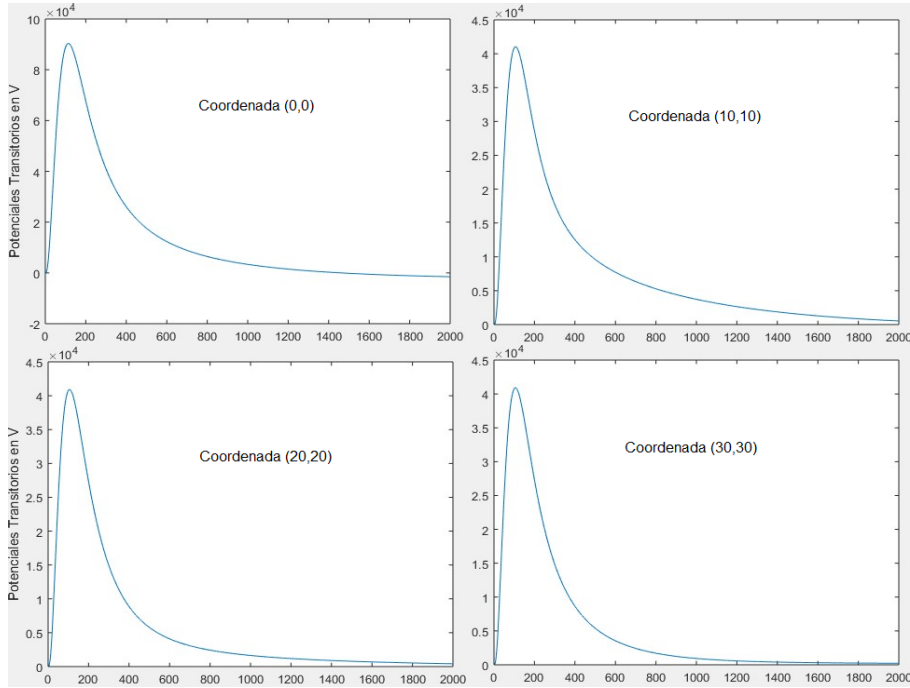


Figura 2.9. Potencial en cada punto de impacto del rayo. a) En diagonal.

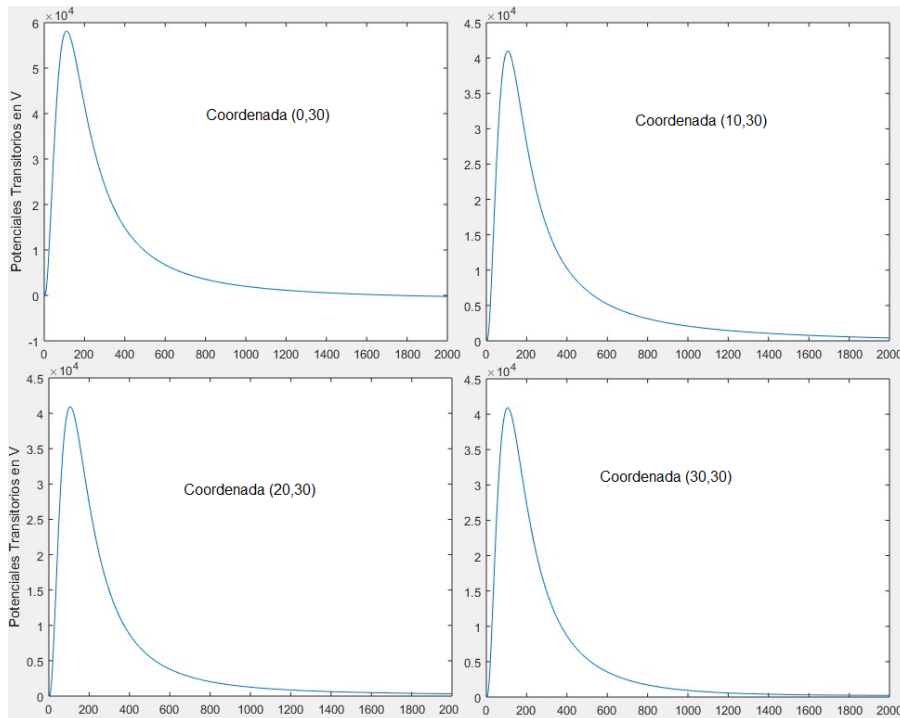


Figura 2.9. Potencial en cada punto de impacto del rayo. b) Por el centro.

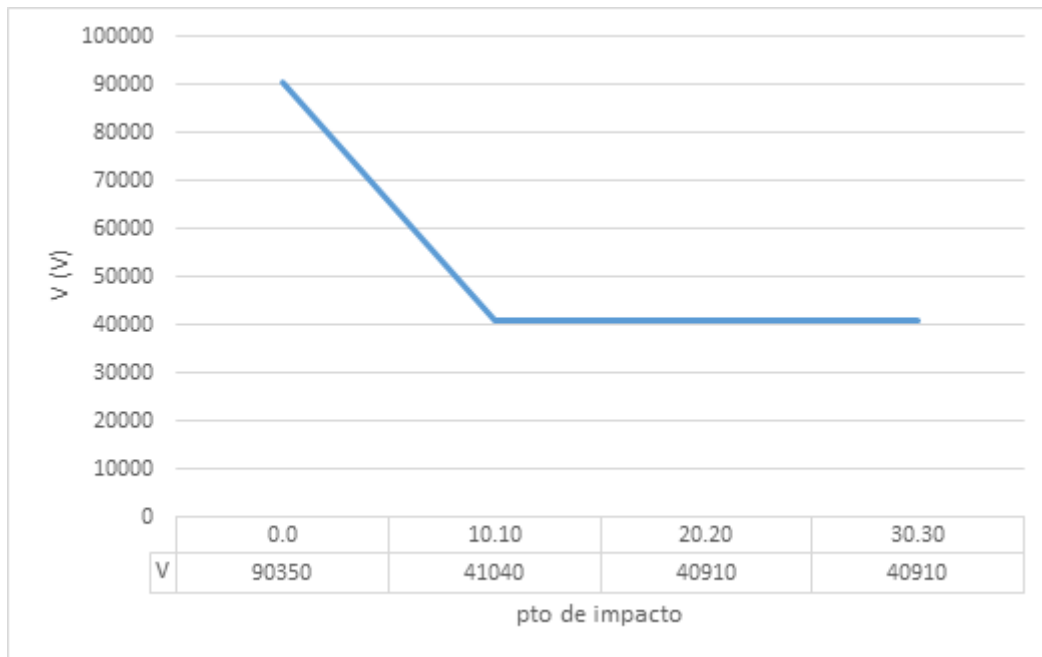


Figura 2.10. V vs. punto de impacto. a) En diagonal.

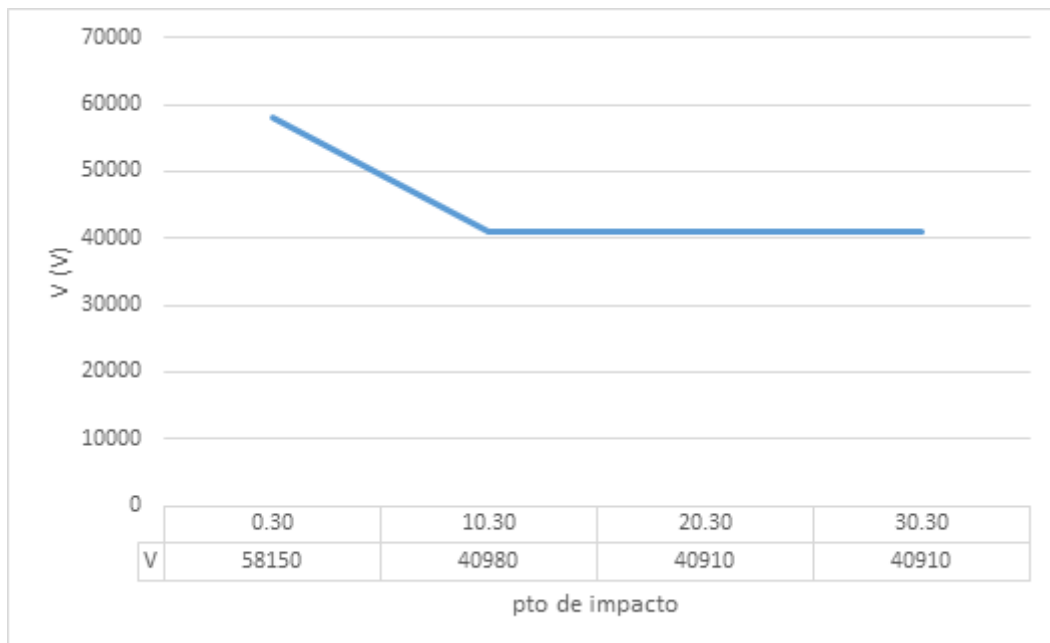


Figura 2.10. V vs. punto de impacto. b) Por el centro.

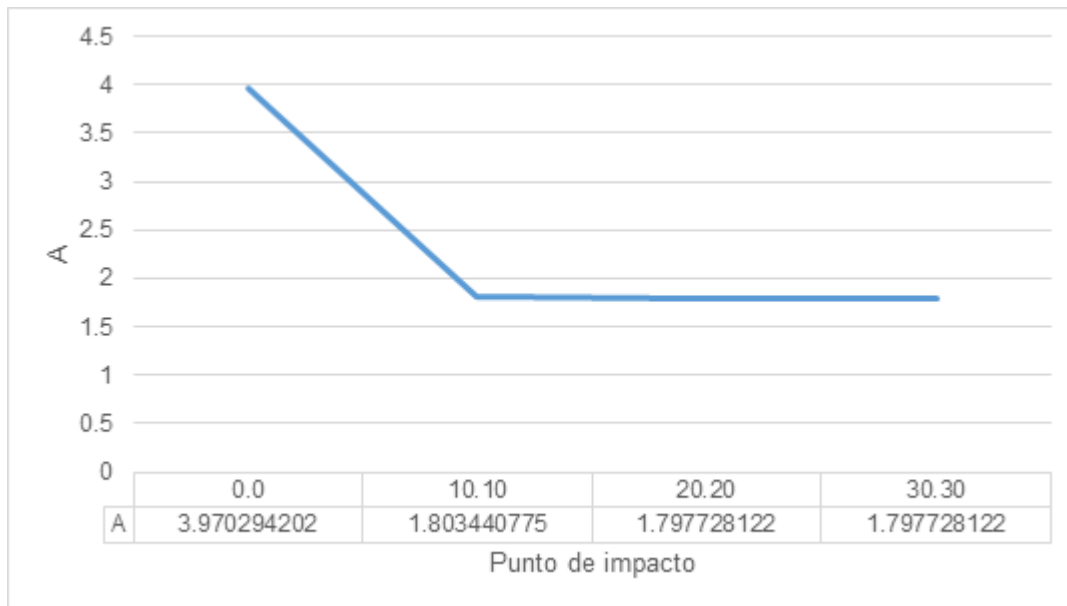


Figura 2.11. A vs. punto de impacto. a) En diagonal.

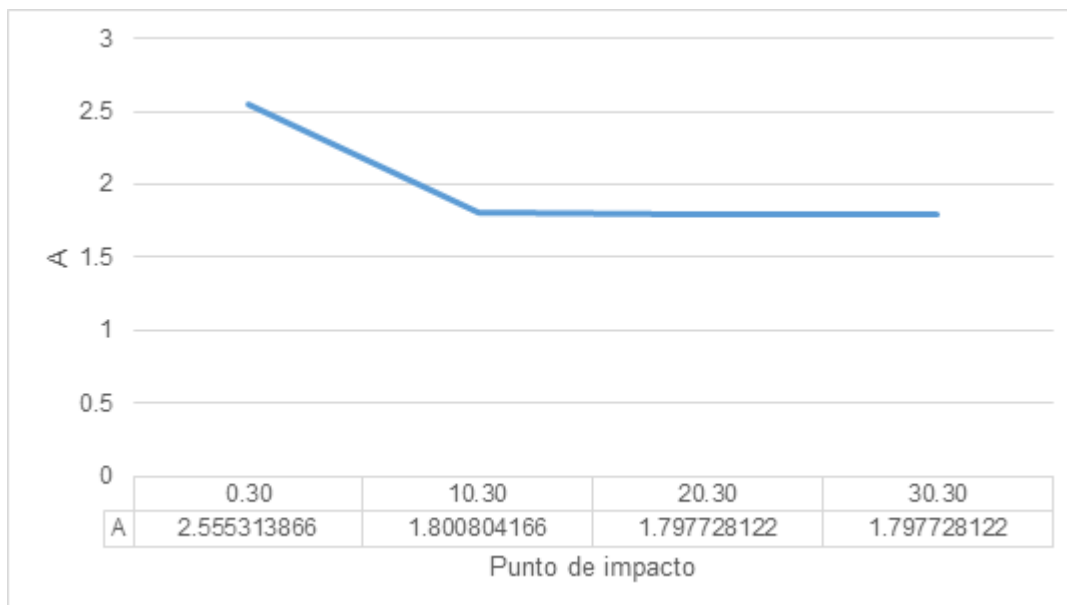


Figura 2.11. A vs. punto de impacto. a) Por el centro.

2.3. 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. [9]

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 2.12 muestra como estos autores entienden esa área efectiva.

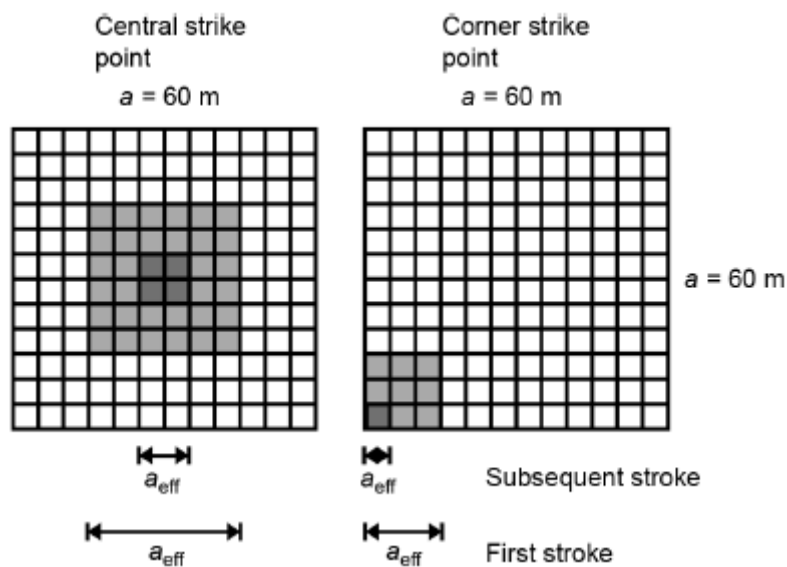


Figura 2.12. Área efectiva de una malla de tierra para impactos en el centro y en la esquina inferior izquierda. [9]

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

$$a_{ef} = K * \exp(0.84 * (\rho_s * T1)^{0.22}) \quad 2.1$$

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.

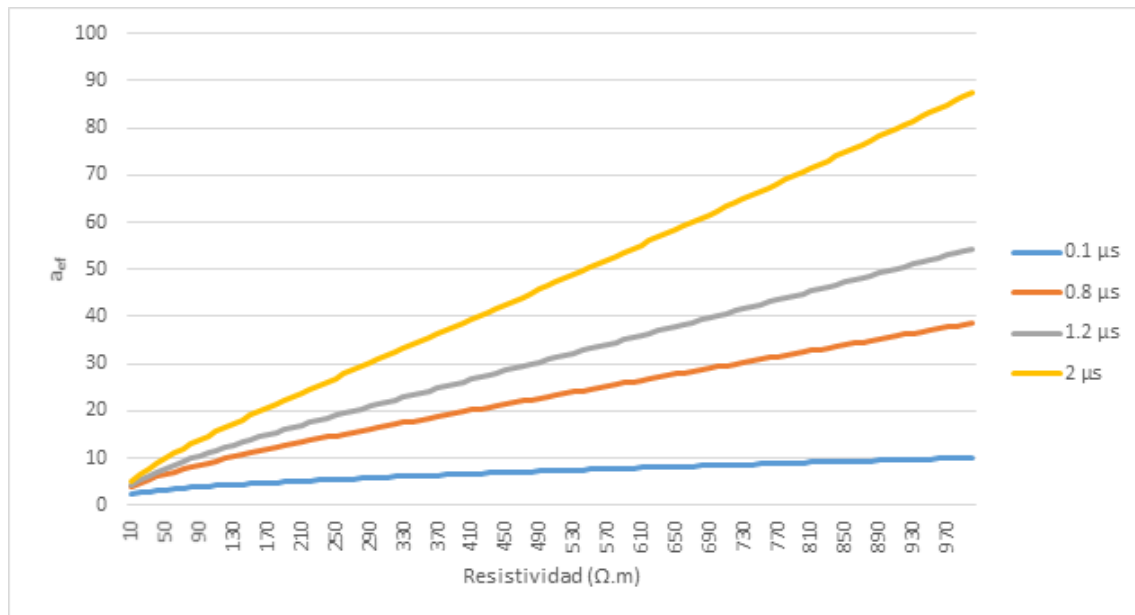


Figura 2.13. a_{ef} vs. resistividad del terreno para tiempos de frente entre 0.1 y 2 μs .

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 2.14 y 2.15, 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 2.14 se aprecia el potencial máximo adquirido por la malla por la corriente del rayo y ya en la 2.15 se observa como este potencial disminuye al tomar el área efectiva y aumentar el número de conductores en ella.

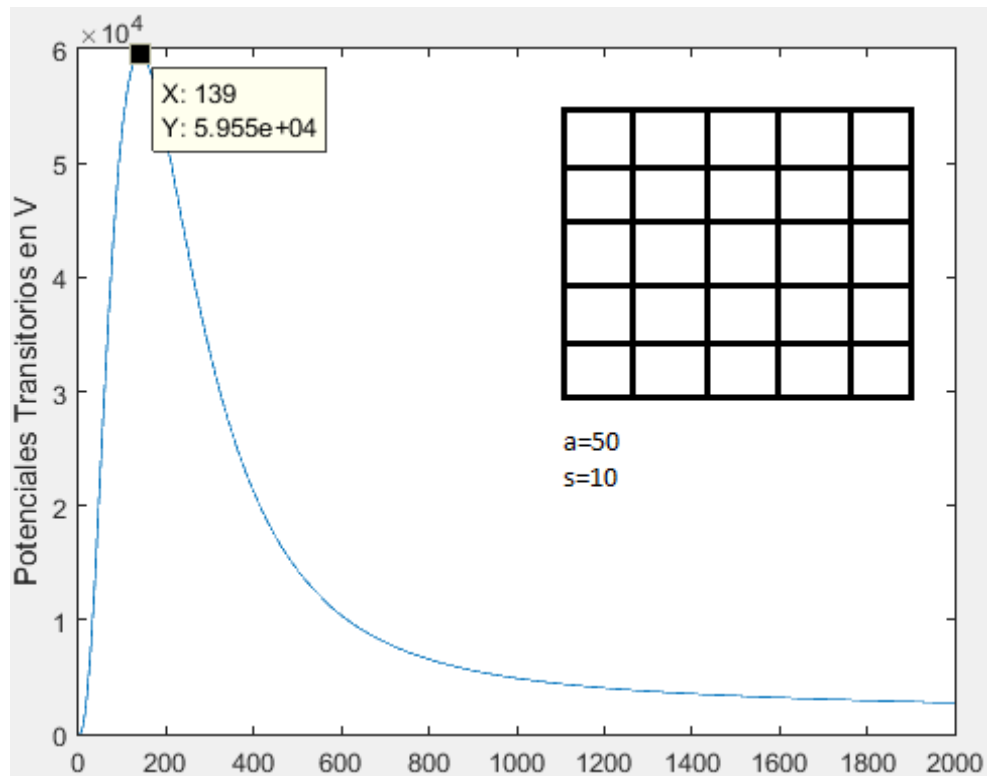


Figura 2.14. Potencial inducido en una malla de 50 m de lado.

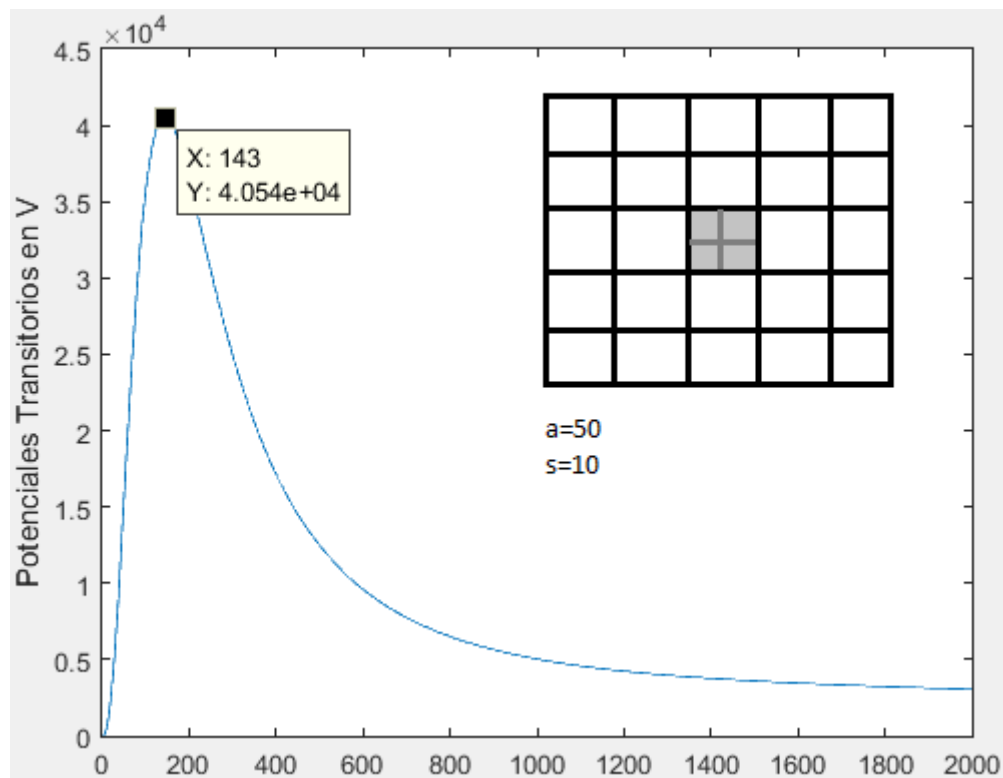


Figura 2.15. Potencial inducido en una malla de 50 m de lado cuando se aumenta el número de electrodos del área efectiva.

Conclusiones del capítulo

Uno de los parámetros que más inciden en la eficiencia de los sistemas de puesta a tierra es el punto de impacto del rayo, siendo este un factor decisivo para el diseño de los mismos.

Capítulo III: Comprobación de los resultados obtenidos

Con el objetivo de comprobar la importancia de los resultados obtenidos en este capítulo se hace una comparación entre dos mallas que se han declarado como estándar por sus características constructivas y sus homologas modificadas según los resultados obtenidos en el capítulo anterior.

3.1. Comparación de las mallas cuadrada de 60x60 m y 100x100 m con sus homólogas modificadas

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 3.1 y 3.2 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 3.1. 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 3.2. 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 3.3 y 3.4 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 3.3. 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 3.4. 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 3.5 y 3.6 se muestran los potenciales máximos adquiridos por la malla y su eficiencia al aumentar el número de conductores del área efectiva, sin variar

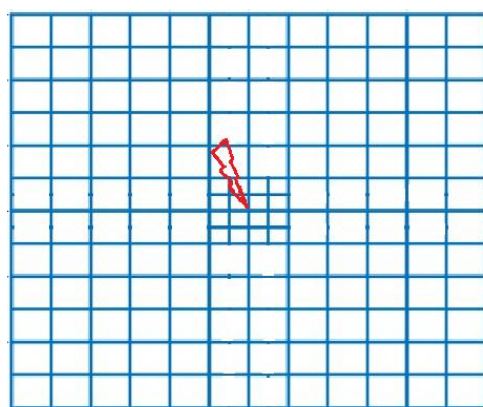
ningún otro parámetro. En la figura 3.1 se muestra cómo quedaría la malla ya con un mayor número de conductores en el área efectiva, este reticulado se realizó con una separación entre conductores de 2.5 m.

Tabla 3.5. Valor del potencial máximo y la eficiencia en la malla cuadrada de 60x60 m al aumentar el número de conductores en el área efectiva.

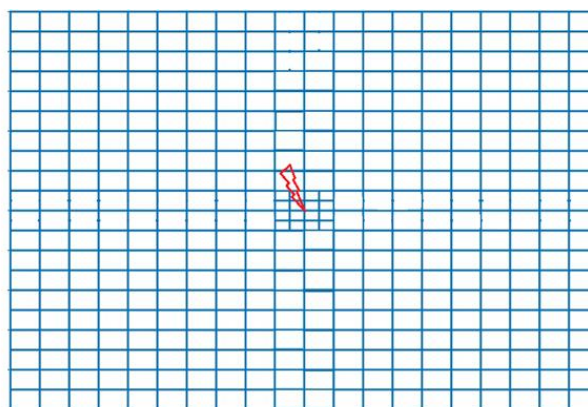
	Sin aumentar el número de conductores en el área efectiva	Al aumentar el número de conductores en el área efectiva
Potencial (V)	40910	21650
Eficiencia (%)	55.9	101.1

Tabla 3.6. 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



60 m de lado



100 m de lado

Figura 3.1. Malla con mayor número de conductores en el área efectiva.

En la tabla 3.7 y 3.8 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 3.7. 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 a_{ef} más densa	19670	112.1

Tabla 3.8. 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 a_{ef} más densa	19670	65.2

En la figura 3.2 y 3.3 se muestran los potenciales máximos adquiridos por ambas mallas, con y sin variar el número de conductores del área efectiva.

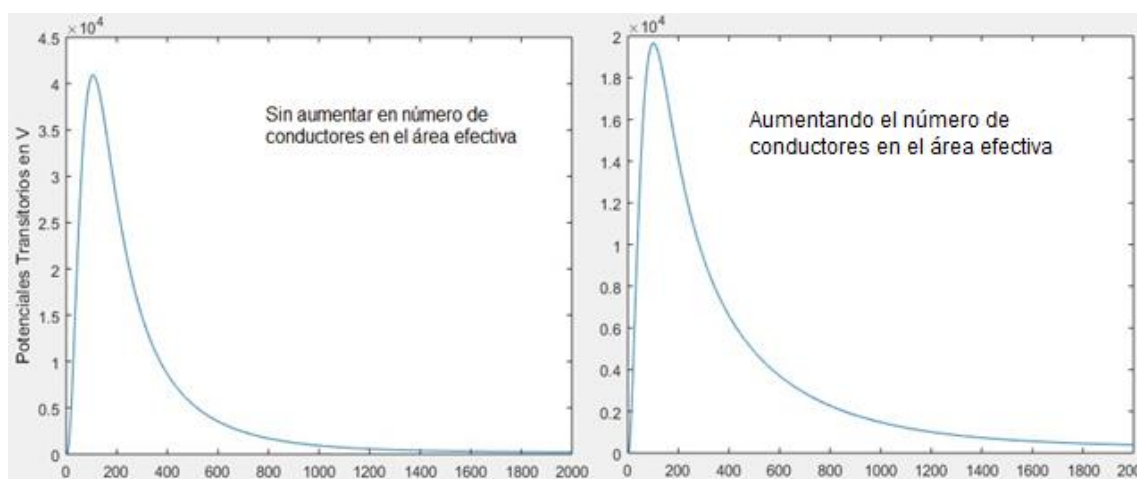


Figura 3.2. Potencial en la malla cuadrada de 60x60 m y su homóloga modificada.

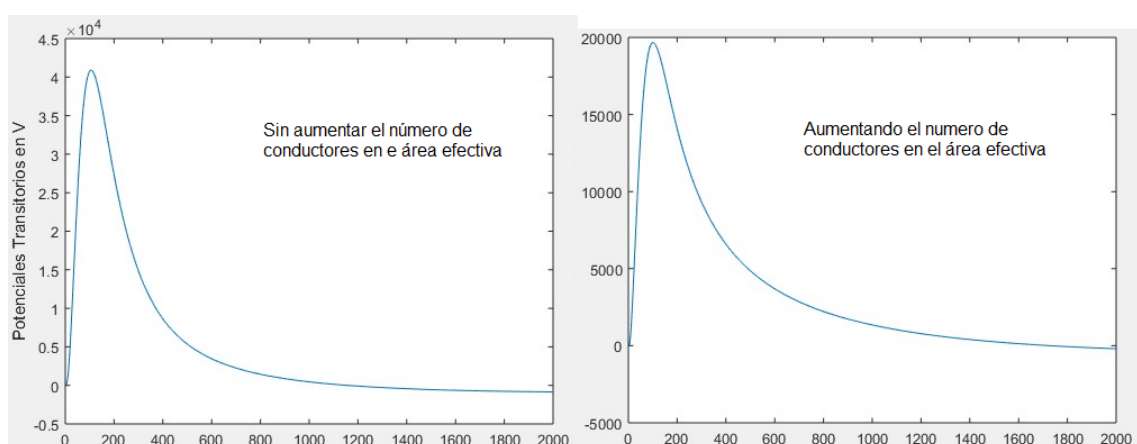


Figura 3.3. Potencial en la malla cuadrada 100x100 m y su homóloga modificada.

3.2. Análisis económico de la comparación

Usando como referencia los precios en el mercado nacional e internacional se establece en la tabla 3.9 el precio de los conductores, los empalmes y de la mano de obra por movimiento de tierra que se utilizaron para el análisis económico.

Tabla 3.9. Precio de los productos.

Producto	Unidad de medida	Precio USD
Cable 2/0	m	4.24
Cable 4/0	m	6.65
Movimiento de tierra	m ³	5.00
Empalme	u	2.00

Para el análisis económico de la comparación se usan 5 variantes:

- Malla estándar: malla cuadrada de 60x60 m a una profundidad de enterramiento de 0.5 m, con conductores 2/0 separados a 5 m.
- Malla 1: malla estándar pero con una profundidad de enterramiento de un metro.
- Malla 2: malla estándar pero con conductores 4/0.
- Malla 3: malla estándar con mayor número de conductores en el área efectiva.
- Malla 4: malla estándar con un metro de profundidad, conductores 4/0 y con mayor número de conductores en el área efectiva.

Tabla 3.10. Análisis comparativo costo-eficiencia de la malla cuadrada de 60x60 m.

Producto	Costo USD	Eficiencia %
Malla estándar	8902.4	55.9
Malla 1	10852.4	57.8
Malla 2	12662	57.1
Malla 3	9122	101.1
Malla 4	14978	112.1

Como resultado del análisis económico de la comparación la malla 3 es la variante idónea a aplicar teniendo en cuenta la relación costo-eficiencia, ya que con una pequeña inversión de 219.6 USD con respecto al costo de la malla estándar se logra aumentar la eficiencia de un 55.9% a un 101.1%.

La malla 4, como bien se muestra en la tabla 3.10, es la que mayor eficiencia presenta, sin embargo, es muy alto el costo ya que hay que hacer una inversión adicional de 6075.6 USD con respecto a la malla estándar y solo es un 11% más eficiente que la malla 3.

Tabla 3.11. Análisis comparativo costo-eficiencia de la malla cuadrada de 100x100 m.

Producto	Costo USD	Eficiencia %
Malla estándar	23940	33.1
Malla 1	29190	33.6
Malla 2	34062	34
Malla 3	24159.6	60.9
Malla 4	39678	65.2

Como resultado del análisis económico de la comparación la malla 3 es también la variante idónea a aplicar teniendo en cuenta la relación costo-eficiencia, ya que con una pequeña inversión de 219.6 USD con respecto al costo de la malla estándar se logra aumentar la eficiencia de un 33.1% a un 60.9%.

De igual forma la malla 4, como bien se muestra en la tabla 3.11, es la que mayor eficiencia presenta, sin embargo, es muy alto el costo ya que hay que hacer una inversión adicional de 15738 USD con respecto a la malla estándar y solo es un 4.3% más eficiente que la malla 3.

Conclusiones del capítulo

Como resultado de los análisis expuestos en el capítulo se concluye que con solo aumentar el número de conductores en el área efectiva se logra duplicar la eficiencia del sistema.

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.

Recomendaciones

Este trabajo permitió 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. Sin embargo, aún debe complementarse y ampliar su área de influencia para lo que se proponen las siguientes recomendaciones:

- Tener en cuenta a la hora de diseñar sistemas de protección contra descargas atmosféricas de subestaciones y otras instalaciones que los mástiles de protección deben ubicarse lo más al centro posible de la instalación, garantizando con esto que los potenciales máximos adquiridos sean lo menor posible.
- La investigación desarrollada, aun cuando ha permitido evaluar sistemas de tierra complejos y arribar a conclusiones importantes no se encuentra en su versión definitiva; pudiéndose continuar con investigaciones más profundas en determinados aspectos.

Referencias

- [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] C. G. C. Domínguez, "Puesta a tierra y perturbaciones electromagneticas en equipos de carga sensible.," 1997.
- [4] F. M. González-Longatt, "Sistemas de Puesta a Tierra: Una introducción a la Seguridad," 2005.
- [5] J. H. S. Alzate, "Consideraciones iniciales para el diseño de puestas a tierra."
- [6] I. V. Barrantes, "Elaboración de una guía práctica para la evaluación de la calidad de energía dentro de C.N.F.L. (Primera parte: Sistemas de aterrizamiento en Edificios)," 2007.
- [7] " Descripción física del rayo. Parámetros.."
- [8] L. Grcev, "Impulse efficiency of ground electrodes," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 24, pp. 441-451, 2009/1.
- [9] L. Grcev, "Lightning Surge Efficiency of Grounding Grids," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 26, pp. 1692-1699, 2011.
- [10] W. H. S. F. Hanaffi, I. Timoshkin, Hailiang LU, Yu Wang, Lei Lan, Xishan Wen, "Evaluation of Grounding Grid's Effective Area," 2014.
- [11] Y. Liu, "Transient Response of Grounding Systems Caused by Lightning: Modelling and Experiments," 2004.