

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Estudios Electroenergéticos



TRABAJO DE DIPLOMA

Efecto del dimensionamiento del área efectiva de sistemas de puesta a tierra

Autor: Harold Damián Rodríguez Fragoso

Tutores: Msc. Luis Alberto Hernández Lugones

Ing. César Gallardo Sánchez

Consultante: Dr. C. Ángel Valcárcel Rojas

Santa Clara

2017

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Estudios Electroenergéticos



TRABAJO DE DIPLOMA

Efecto del dimensionamiento del área efectiva de sistemas de puesta a tierra.

Autor: Harold Damián Rodríguez Fragoso

Email: hfragoso@uclv.cu

Tutores: Msc. Luis Alberto Hernández Lugones

Email: lugones@uclv.edu.cu

Ing. César Gallardo Sánchez

Email: cgallardo@uclv.cu

Santa Clara

2017



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

No cambié, solo aprendí y aprender no es cambiar, es crecer.

Dedicatoria

*A mi mamá, mi papá, mi abuela, mi familia,
mis amigos, mis profesores;
cada uno de ustedes me enseñó y me encaminó a ser quien soy.*

Gracias a ustedes hoy es posible este trabajo.

Agradecimientos

A todas las personas que me acompañaron e hicieron realidad este proyecto,
gracias por su tiempo y apoyo:

A mi mamá, mi papá, mi abuela, piezas claves en mi vida, siempre están ahí;

A mis tías que estuvieron pendientes de cada paso que di;

A mis tutores y consultante, sin ustedes no hubiera cumplido mi sueño;

A Yaniel Águila, técnico del laboratorio 104 de la FIE,
por su incansable preocupación y dedicación;

A mis amigos que están ahí para mí en todo momento.

Puede estar cada uno orgulloso de mi...

Tareas técnicas

1. Revisión bibliográfica sobre el área efectiva en los Sistemas de Puesta a Tierra (SPT).
2. Utilización de herramientas de simulación, confección y análisis de resultados mediante gráficas en el software PAST.
3. Comparación de la respuesta de los SPT de modelos de mallas teniendo en cuenta el dimensionamiento del área efectiva.
4. Confección del informe con el resultado obtenido como una solución eficiente para futuras instalaciones.

Resumen

El presente trabajo de diploma tiene como objetivo analizar la influencia que tiene el dimensionamiento del área efectiva de un Sistema de Puesta a Tierra (SPT) en su respuesta ante eventos transitorios. Para lograr el objetivo se realizó una búsqueda bibliográfica específica sobre el tema, se determinó el área efectiva de acorde al lugar del impacto del evento transitorio, se desarrollaron diferentes modelos de mallas de tierra con la influencia del área efectiva y del dimensionamiento del área efectiva utilizando el PAST. Luego de realizar las simulaciones, analizar sus resultados y realizar comparaciones, se llegó a la conclusión de que el dimensionamiento del área efectiva influye positivamente en la respuesta transitoria de los SPT, minimizando significativamente potencial que aparece en la malla.

Índice

Dedicatoria	ii
Agradecimientos	iii
Tareas técnicas	iv
Resumen	v
Introducción	1
Capítulo I: Revisión bibliográfica	4
1.1. Sistemas de puesta a tierra o SPT	4
1.1.1. Concepto	4
1.1.2. Clasificación	5
1.1.3. Importancia	7
1.2. Eventos transitorios en los SPT	8
1.3. Transitorios que afectan un SPT: las descargas atmosféricas	11
1.4. Respuesta de un SPT ante un evento transitorio	14
1.4.1. Longitud efectiva de un electrodo de tierra	15
1.4.2. Área efectiva en una malla de tierra	15
Conclusiones del capítulo	17
Capítulo II: Evaluación del dimensionamiento del número de conductores del área efectiva en la eficiencia de sistemas de puesta a tierra	18
2.1. Valores de área efectiva	18
2.2. Modelación de la mallas	19
2.3. Modelación de las mallas analizando el dimensionamiento del área efectiva en su respuesta	21
2.4. Resultados de las modelaciones	27
2.5. Aumentando la cantidad de conductores en el área efectiva en la malla de 20x20 m	32
2.6. Comparación entre los valores de potencial	39
Conclusiones del capítulo	40
Conclusiones	41
Recomendaciones	42
Referencias	43

Introducción

En la actualidad se observa un amplio desarrollo de la tecnología y las comunicaciones que, entre otros, depende en gran medida de la electricidad. Es de vital importancia para el ser humano que ha hecho de esta algo indispensable en su uso diario, tanto en la vivienda con fines domésticos como en centros donde se use para brindar servicios. La red de luminaria y las fuentes de alimentación por así mencionar son las más conocidas. Ante el riesgo de un accidente o para la prevención de los mismos por causas naturales o provocadas; el hombre se ve en la necesidad de tomar medidas y medios de protección para evitar daños materiales y de vidas.

Una forma de proteger a los equipos que se conecten a la red eléctrica son los sistemas de puesta a tierra. Estos sistemas tienen la función de llevar a tierra las variaciones de corriente con el fin de garantizar una referencia de potencial.

Actualmente se tiene plena conciencia de los efectos del paso de una corriente eléctrica por el cuerpo humano y la importancia de la puesta a tierra de los sistemas eléctricos para salvaguardar la vida, así como también los bienes materiales. Según el proyecto en el cual se debe diseñar el sistema de puesta a tierra se tienen diferentes consideraciones, las cuales varían, sobre todo, en las magnitudes de los requerimientos de la resistividad del terreno, las tensiones de contacto y de paso y la resistencia de puesta a tierra. En el diseño de malla de puesta a tierra para subestaciones eléctricas, una de las principales preocupaciones con que se encuentra el diseñador, es comprobar en el campo que el diseño presentado para su construcción cumpla realmente con las condiciones mínimas de protección y seguridad exigidas [1].

El objetivo principal de las mallas de tierra en subestaciones es el de garantizar protección de los trabajadores durante fallas eléctricas, aunque también sirven como medio de disipación de corrientes a tierra de tal forma que no excedan los límites operativos de los equipos. Existen variados parámetros que afectan las tensiones alrededor del área de la subestación, los cuales dependen del sitio de instalación, por lo cual es imposible diseñar una malla que pueda ser aceptada en cualquier lugar, dado que tanto la magnitud de la corriente a disipar, el material de la capa superficial,

la duración de la falla, la resistividad del terreno, así como el tamaño y forma de la malla tienen gran influencia sobre las tensiones que aparecen.

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. 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.

El área efectiva surge de forma espontánea en el momento en que ocurre un evento transitorio en una malla de tierra y depende directamente de la resistividad del terreno y del tiempo de frente de la corriente del rayo y por lo tanto varía con este último parámetro, que es distinto en cada rayo.

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 la respuesta del sistema sea más lenta. Junto al evento transitorio surge en la malla el área efectiva, en ella es donde ocurre la mayor disipación de corriente a tierra en la malla, por lo que se plantea la siguiente **Interrogante Científica**:

Ante el surgimiento del área efectiva en una malla de tierra, ¿Cómo influye el dimensionamiento del área efectiva del SPT en su respuesta transitoria?

La interrogante científica establece el siguiente **Objeto de estudio**: Los Sistemas de Puesta a Tierra (SPT).

El **Campo de acción**: Área efectiva de los SPT.

En correspondencia con la interrogante científica y el objeto de estudio se determinó como **Objetivo general de la investigación**:

Analizar la influencia del dimensionamiento del área efectiva de un SPT en su respuesta transitoria.

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

1. Realizar una búsqueda bibliográfica sobre el tema.
2. Modelar en el PAST los diferentes SPT a evaluar teniendo en cuenta el dimensionamiento del área efectiva.
3. Realizar una comparación de los resultados obtenidos a partir de las modelaciones.
4. Arribar a conclusiones sobre la influencia del dimensionamiento del área efectiva en un SPT.

Organización del informe.

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

- **Capítulo I.**

Contiene un análisis de la bibliografía que respalda el tema de investigación.

- **Capítulo II.**

Contiene la modelación de los diferentes SPT que se tomaron como guía en la siguiente investigación y una comparación de los diferentes modelos de los SPT, ya evaluando la influencia del dimensionamiento del área efectiva en su respuesta transitoria.

Capítulo I: Revisión bibliográfica

La electricidad es un recurso del cual el ser humano tiene una gran dependencia; todas las personas se ven involucradas de uno u otro modo con la electricidad; tanto en sus casas como en su vida laboral. Una eficiente conexión a tierra tiene mucha importancia por ser responsable de la protección de la vida humana, maquinarias, aparatos y líneas de transmisión o distribución. Se debe incitar y requerir una instalación a tierra eficaz y adecuada a su servicio para seguridad, buen trabajo y preservación.

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) [2].

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 [3].

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 [3]. 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 [3]. 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).

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 [4], 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. Eventos 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 [5].

- **Transitorios tipo oscilatorios**

Son un cambio súbito en la condición de estado estable de la tensión, la corriente o ambos, con polaridades positivas y negativas y de frecuencia diferente a la frecuencia de operación del sistema [6].

Este tipo de transitorio se describe por su contenido espectral, duración y magnitud. Por su frecuencia se clasifican en: transitorios de alta, media y baja frecuencia [6].

- Los transitorios oscilatorios con una frecuencia mayor de 500 kHz y una duración típica medida en microsegundos (o varios ciclos de la frecuencia fundamental) son considerados transitorios oscilatorios de alta frecuencia.

- Cuando la frecuencia se encuentra entre 5 y 500 kHz se considera un transitorio de frecuencia media.

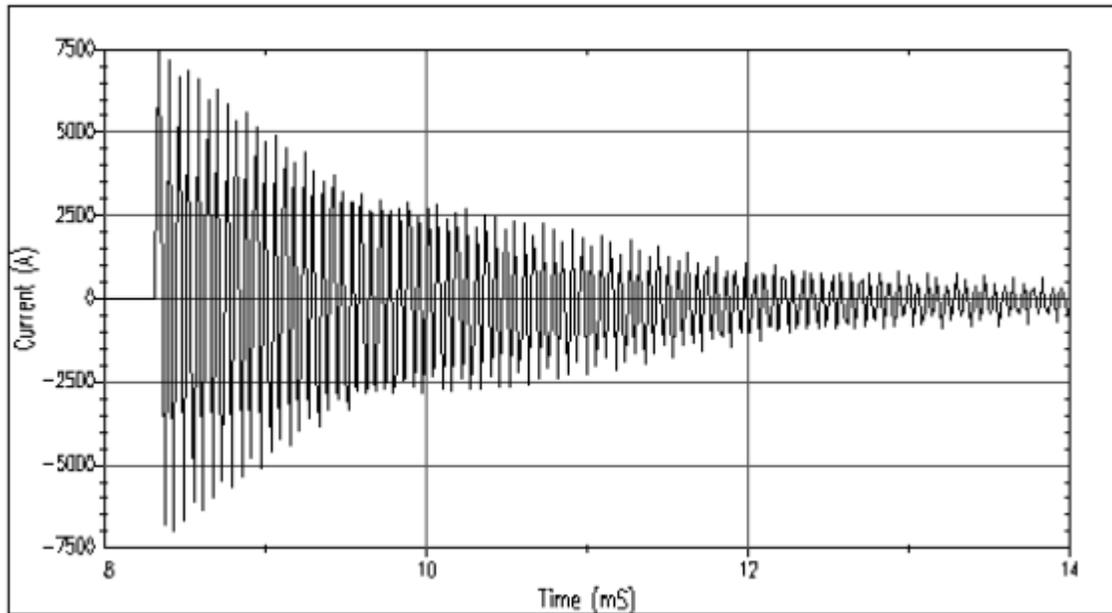


Figura 1.2.1. Transitorios de tipo oscilatorio [6].

- Un transitorio con una frecuencia inferior a 5 kHz, y una duración de 0,3 ms a 50 ms, se considera un transitorio de baja frecuencia.

Sucede en los niveles de subtransmisión y distribución y en los sistemas industriales y es causado por diversos tipos de eventos.

El más frecuente es la energización de bancos de capacitores que hacen oscilar la tensión con una frecuencia primaria entre 300 y 900 Hz. La magnitud pico observada normalmente es de 1,3 -1,5 p.u. con una duración entre 0,5 y 3 ciclos dependiendo del amortiguamiento del sistema [6].

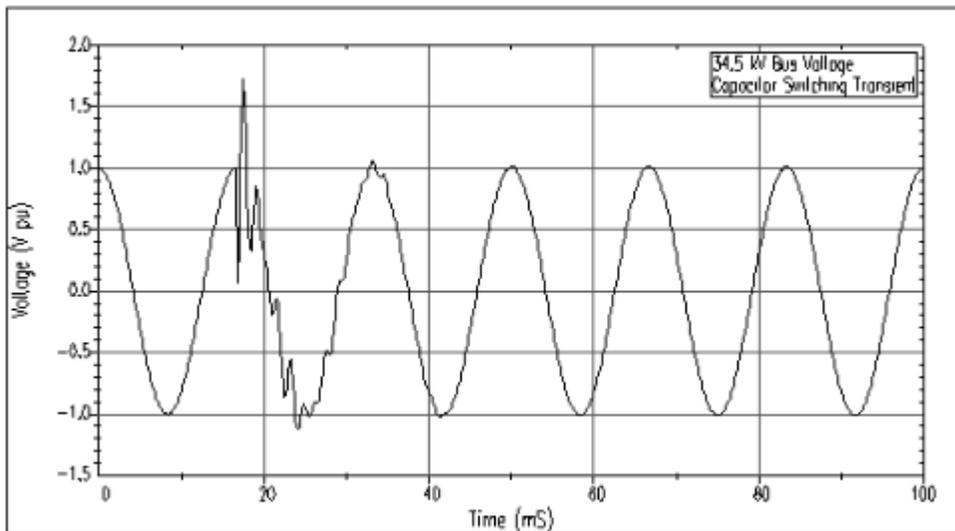


Figura 1.2.2. Transitorios de baja frecuencia [6].

- **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 períodos 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 [5].

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 [6].

Son de moderada y elevada magnitud, pero de corta duración medida en microsegundos. Normalmente están caracterizados por sus tiempos de ascenso (1 a 10 μ s) y descenso (20 a 150 μ s) y por su contenido espectral [6].

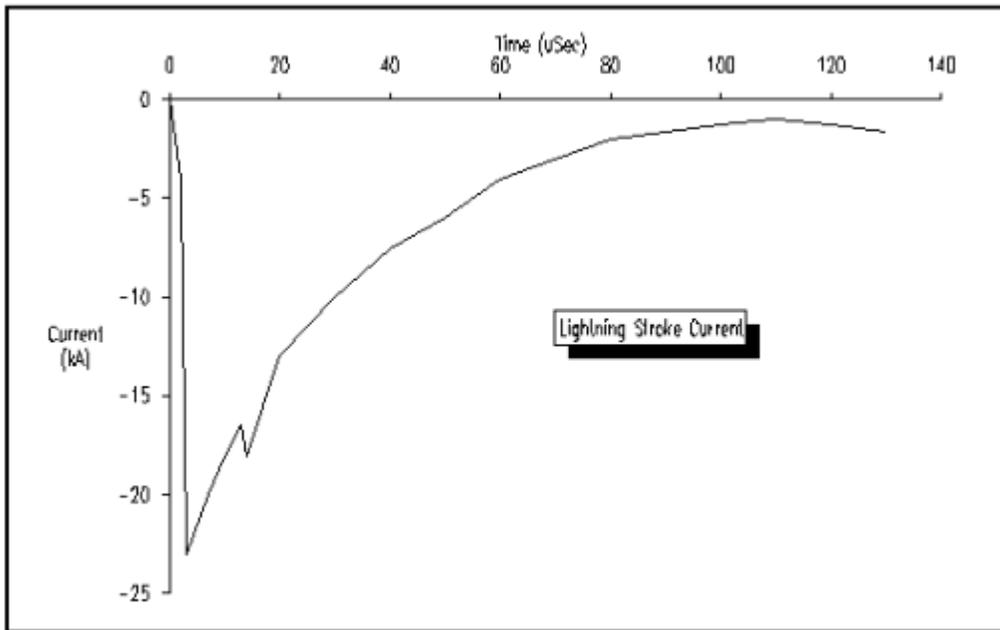


Figura 1.2.3. Transitorio de tipo impulsivo [6].

1.3. Transitorios que afectan un SPT: las descargas atmosféricas

La descarga atmosférica, conocida popularmente como “rayo”, es un fenómeno natural que posee características propias de un fenómeno climático. Depende del momento del año en el que puede ocurrir con mayor probabilidad, pero con mucha variabilidad en cuanto a tipo, cantidad o intensidad de sus descargas. Existen síntomas que preceden la ocurrencia de una descarga atmosférica, aunque no resulta posible predecir con certeza el momento, el lugar de impacto ni la intensidad de sus parámetros. Aunque todos se parezcan no existen dos rayos que sean iguales [7].

Los efectos de un rayo pueden ser ocasionados por un impacto directo o por causas indirectas. También pueden alcanzar las instalaciones interiores de fábricas, hogares, comercios industrias, etc., a través de las líneas de conexión del suministro de energía eléctrica, por las líneas de conexión de teléfonos, fax, módems, televisión por cable, y también a través de la estructura metálica de los edificios, por contacto directo o por inducción, por las raíces de los árboles. Por lo cual es necesario que los equipos estén protegidos frente a todas estas posibilidades. Un impacto directo puede tener

consecuencias catastróficas para las personas, edificaciones, y animales; los daños por causas indirectas suelen ser más numerosos, acompañados de cuantiosas pérdidas económicas. Se entiende como causas indirectas como la caída de rayos en las inmediaciones o sobre los tendidos aéreos o las inducciones electromagnéticas en estos conductores [7].

Una descarga eléctrica en el aire de la atmósfera puede ocurrir dentro de una misma nube, o de una nube a otra. Si la descarga tiene lugar entre la nube y el suelo toma el nombre de “rayo”. Existe la posibilidad que la descarga ocurra en un sentido o en el otro y que la carga migrante pueda ser positiva o negativa. Sin embargo, entre las descargas nube a suelo, hay prevalencia de las que transportan carga negativa. Se considera que sólo 10 % de los rayos son del tipo positivo, es decir transportan carga [7].

En la figura 1.3.1. se observa la forma de onda de un rayo medida directamente.

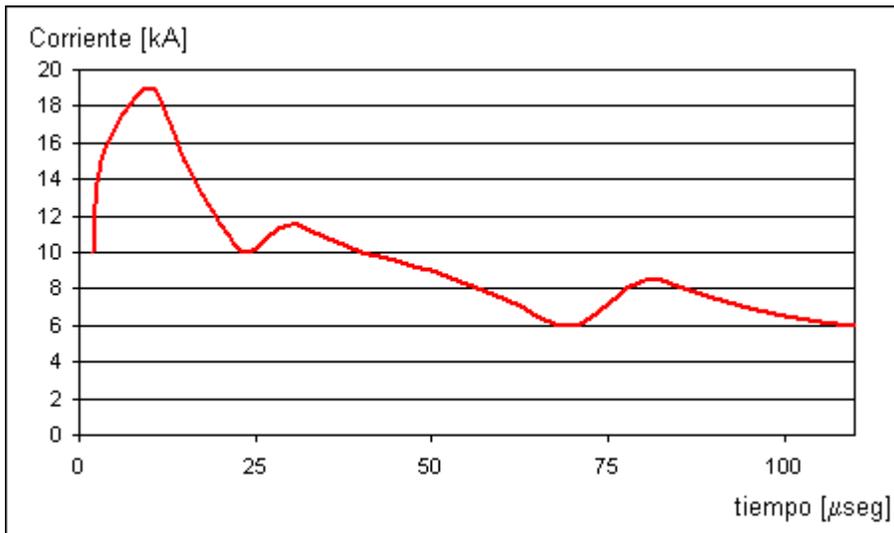


Figura 1.3.1. Primer impulso de una descarga atmosférica (rayo) [7].

En ingeniería para el análisis del comportamiento de fenómenos naturales se trata de establecer un modelo, siempre de validez restringida y resulta muy agradable finalmente poder explicitar el comportamiento de ese modelo mediante una expresión matemática. El modelo servirá finalmente de simulador para sacar conclusiones y

adoptar medidas que permitan aprovechar las buenas consecuencias del fenómeno y evitar o atenuar las malas consecuencias [7].

En el caso de la corriente impulsiva en una descarga atmosférica, la expresión matemática propuesta para graficar sus valores en función del tiempo es:

$$I = (I_{max}/\eta)(t/T)^{10}/[1 + (t/T)^{10}] e^{-t/\tau} [A] \quad 1.1$$

donde:

I_{max} : valor máximo de la corriente en [A].

η : constante adimensional.

T: constante de tiempo del frente en [s].

τ : constante de tiempo de la cola en [s].

Esta expresión sirve para graficar tanto el impulso positivo como el negativo y los impulsos subsiguientes.

En la figura 1.3.2. se observa cómo queda la forma de onda del rayo de forma teórica.

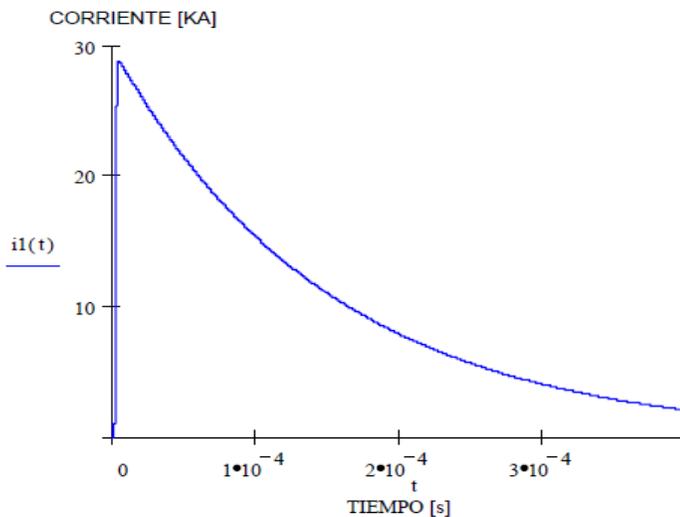


Figura 1.3.2. Forma de onda de la corriente (Teórico) [7].

Desafortunadamente, todas las descargas de un rayo, o descargas en diferentes rayos, no tienen igual severidad. Sus amplitudes y formas de onda varían estadísticamente. La forma de onda de la corriente de retorno depende fuertemente

de la polaridad del rayo. En rayos de polaridad negativa, la segunda descarga tiene una forma de onda diferente de la primera, presentando generalmente un frente más rápido y una duración menor. Los impulsos positivos tienen un frente de onda más lento y una duración más prolongada que los negativos [7].

1.4. Respuesta de un SPT ante un evento transitorio

Las disposiciones simples de electrodos de tierra verticales y horizontales se utilizan a menudo para la protección contra la caída de un rayo. Su función básica es dispersar la corriente del rayo a tierra sin causar ninguna diferencia de potencial o voltajes inducidos que puedan poner en peligro al personal o dañar las instalaciones.

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) [8], 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 [8], 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.

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

1.4.1. Longitud efectiva de un electrodo de tierra

La impedancia de impulso de electrodos de tierra 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 [9]. Las disposiciones múltiples de electrodo de tierra mejoran la respuesta transitoria del SPT.

1.4.2. Área efectiva en una malla 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, esto se puede observar en la figura 1.4.1. 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 [8].

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. 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.

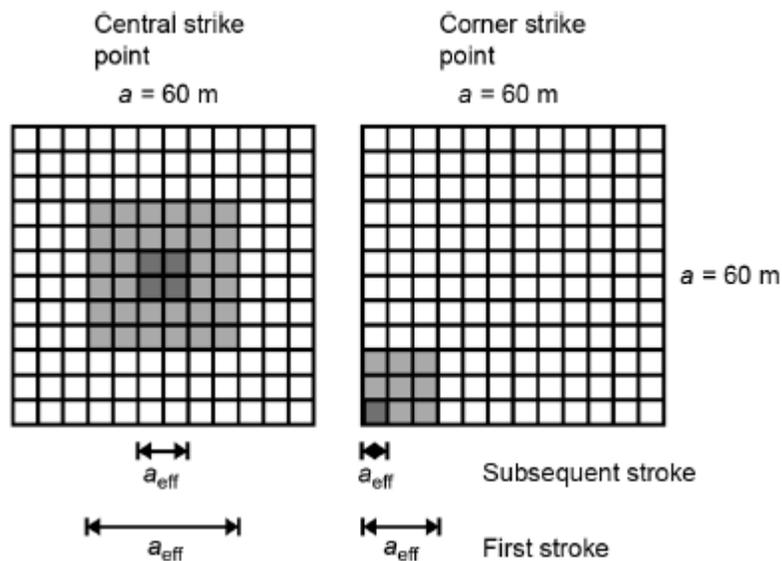


Figura 1.4.1. Área efectiva de una malla de tierra para impactos en el centro y en la esquina inferior izquierda [8].

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

$$a_{ef} = K * \exp(0.84 * (\rho_s * T1)^{0.22}) \quad 1.4$$

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, que es distinto en cada corriente de rayo.

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.

Conclusiones del capítulo

Para realizar un sistema de puesta a tierra hay que efectuar un estudio de los parámetros que influyen en el mismo: las propiedades del suelo, las dimensiones de la malla y del área efectiva.

Capítulo II: Evaluación del dimensionamiento del número de conductores del área efectiva en la eficiencia de sistemas de puesta a tierra

En el capítulo se modelará las mallas teniendo en cuenta el dimensionamiento del área efectiva para ver como incide el mismo ante eventos transitorios. Se tendrá en cuenta el impacto en el centro, en la esquina y en los laterales de las mallas para obtener la configuración más óptima. Luego se pasa al análisis de los resultados de las modelaciones. Este capítulo se encarga de explicar cómo se comporta el dimensionamiento del área efectiva en varios puntos de la malla.

2.1. Valores de área efectiva

Los valores de área efectiva varían según la resistividad. A continuación, se procede a obtener diferentes valores de área para diferentes resistividades con la ayuda de una gráfica implementando los resultados obtenidos del cálculo.

Para obtener los valores de área efectiva se recurre a la ecuación 1.4 del epígrafe 1.5 teniendo en cuenta:

$$10 \Omega.m < \rho_s < 1000 \Omega.m$$

$$0.1 \mu s < T < 2 \mu s$$

K: 1 para impacto en el centro de la malla

K: 0.5 para impacto en la esquina.

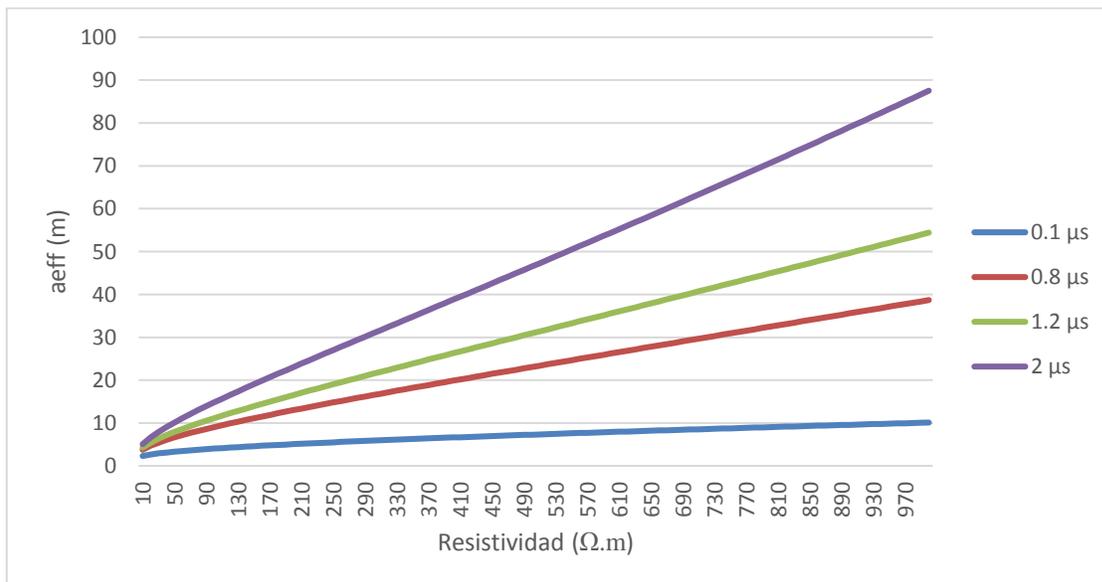


Figura 2.1.1. Valores de área efectiva para el impacto del rayo en el centro de la malla para tiempos de frente entre 0.1 y 0.2 μs.

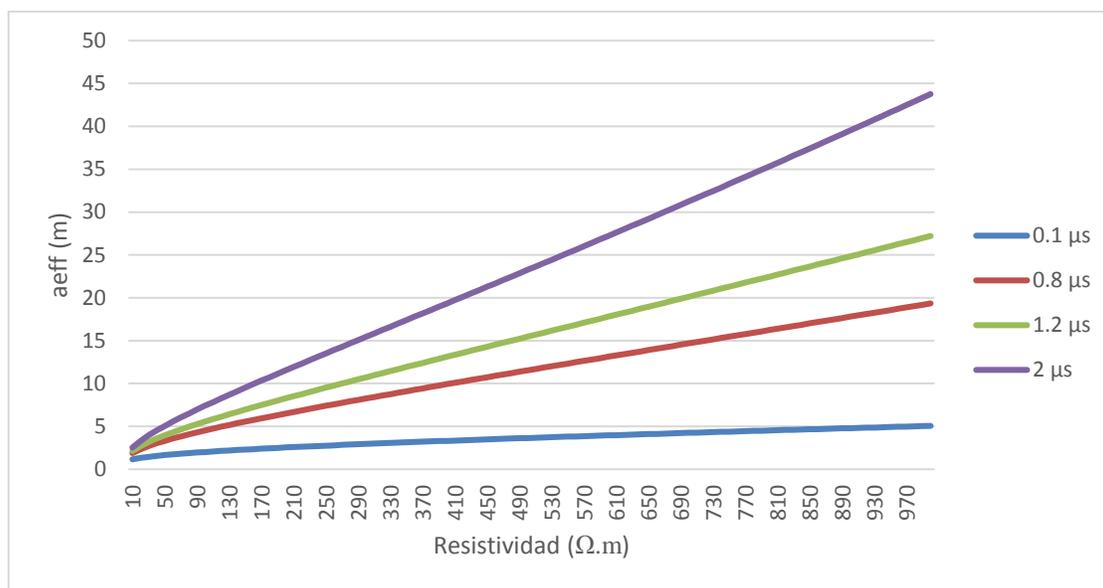


Figura 2.1.2. Valores de área efectiva para el impacto del rayo en la esquina de la malla para tiempos de frente entre 0.1 y 0.2 μs.

En las figuras 2.1.1 y 2.1.2 se puede observar los valores de área efectiva vs resistividad. Estos valores son de utilidad según la resistividad para determinar las dimensiones del área efectiva a construir en la malla, que dependiendo de sus dimensiones puede ser mayor o menor.

2.2. Modelación de la mallas

Las siguientes modelaciones fueron hechas en el PAST (Proyecto y Análisis de Sistemas de Tierra) teniendo en cuenta el número de conductores verticales y horizontales, el diámetro de los mismos, la corriente máxima inyectada en el terreno, el tiempo de duración de la corriente, la resistividad de la capa superficial, el espesor de la capa superficial, el peso de la persona.

Teniendo en cuenta las especificaciones se realizan las tres mallas con sus respectivos datos obteniendo como resultado las siguientes modelaciones:

En la figura 2.2.1 se observa cómo queda la configuración de electrodos para una malla de 20 por 20 metros.

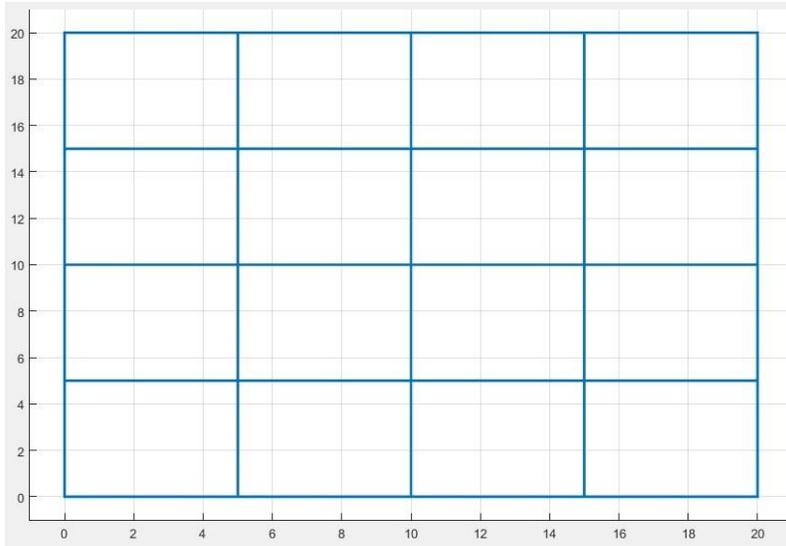


Figura 2.2.1 Malla de 20 x 20 metros

En la figura 2.2.2 se observa cómo queda la configuración de electrodos para una malla de 20 por 30 metros.

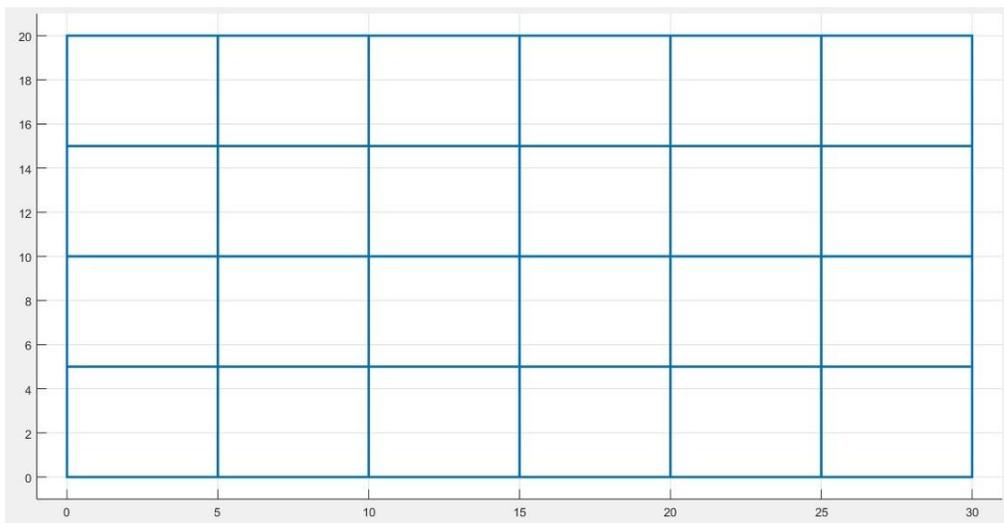


Figura 2.2.2. Malla de 20 x 30 metros

En la figura 2.2.3 se observa cómo queda la configuración de electrodos para una malla de 50 por 30 metros.

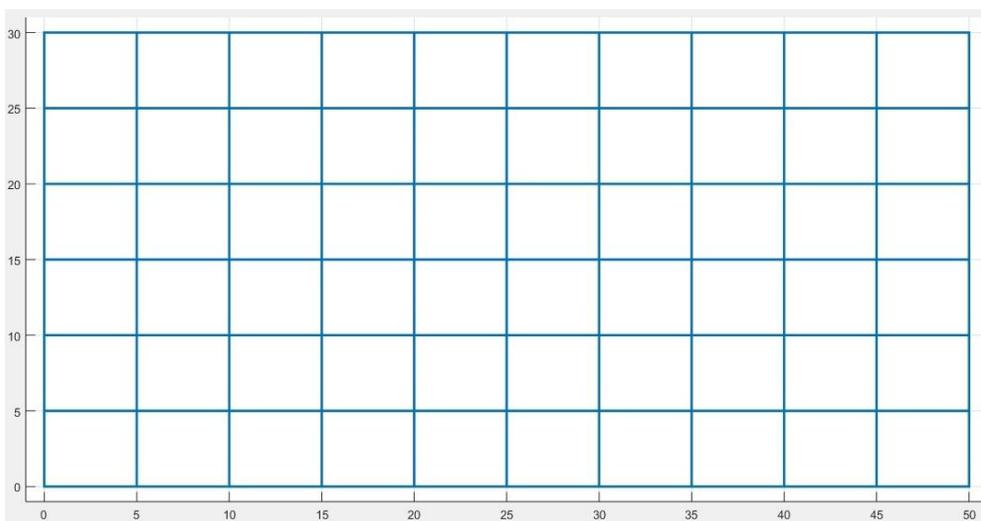


Figura 2.2.3. Malla de 50 x 30 metros.

2.3. Modelación de las mallas analizando el dimensionamiento del área efectiva en su respuesta

Para modelar las mallas teniendo en cuenta el área efectiva se analiza en la esquina y en el centro de la malla. Se calcula el área efectiva como se vio en el epígrafe 2.1 y se toma el valor del mismo para realizar cada una de las mallas.

Para realizar la malla con impacto en la esquina se obtiene un área efectiva de 5.56 metros de lado para un tiempo de 0.8 μ s, se aproxima a 5 metros para facilitar el trabajo en el PAST. Para realizar la malla con impacto en el centro el área efectiva es de 11.11 metros de lado y se aproxima a 10 metros.

Para realizar la malla con impacto en los laterales se utiliza un área efectiva de 5 metros de lado, realizándose en ambos laterales por ser mallas rectangulares.

En la figura 2.3.1 se observa cómo queda la configuración de electrodos para una malla de 20 por 20 metros con un área efectiva de 5 metros de lado en la esquina de la malla.

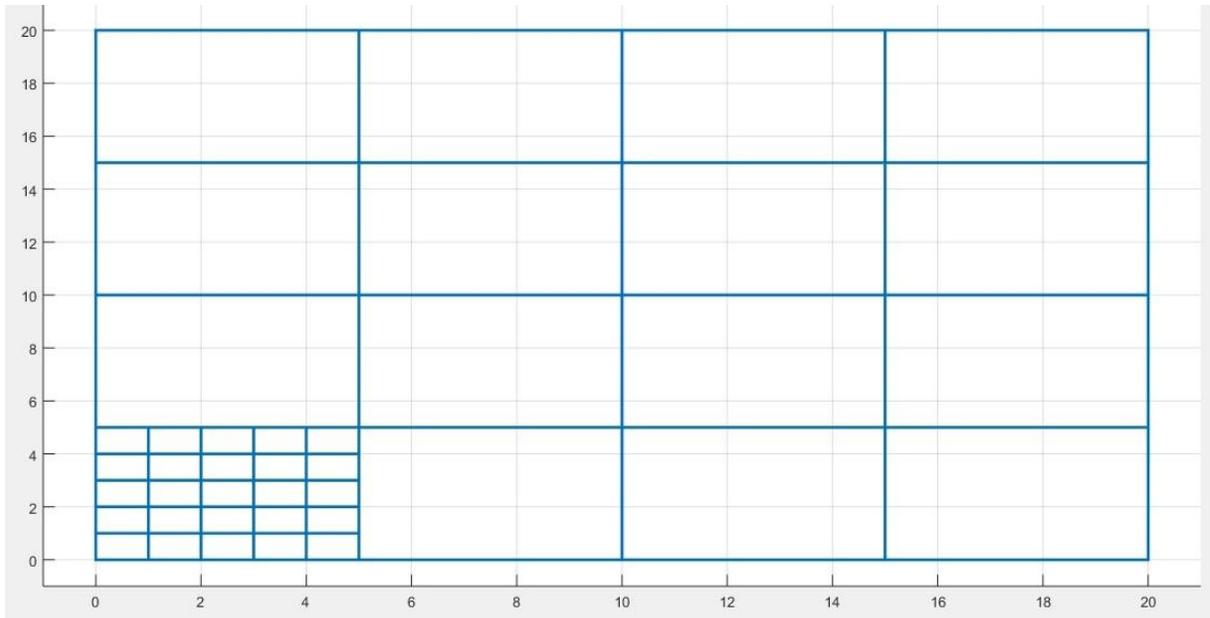


Figura 2.3.1. Malla de 20 x 20 metros con área efectiva de 5 metros de lado para impacto en la esquina.

En la figura 2.3.2 se observa cómo queda la configuración de electrodos para una malla de 20 por 20 metros con un área efectiva de 10 metros de lado para impacto en el centro de la malla.

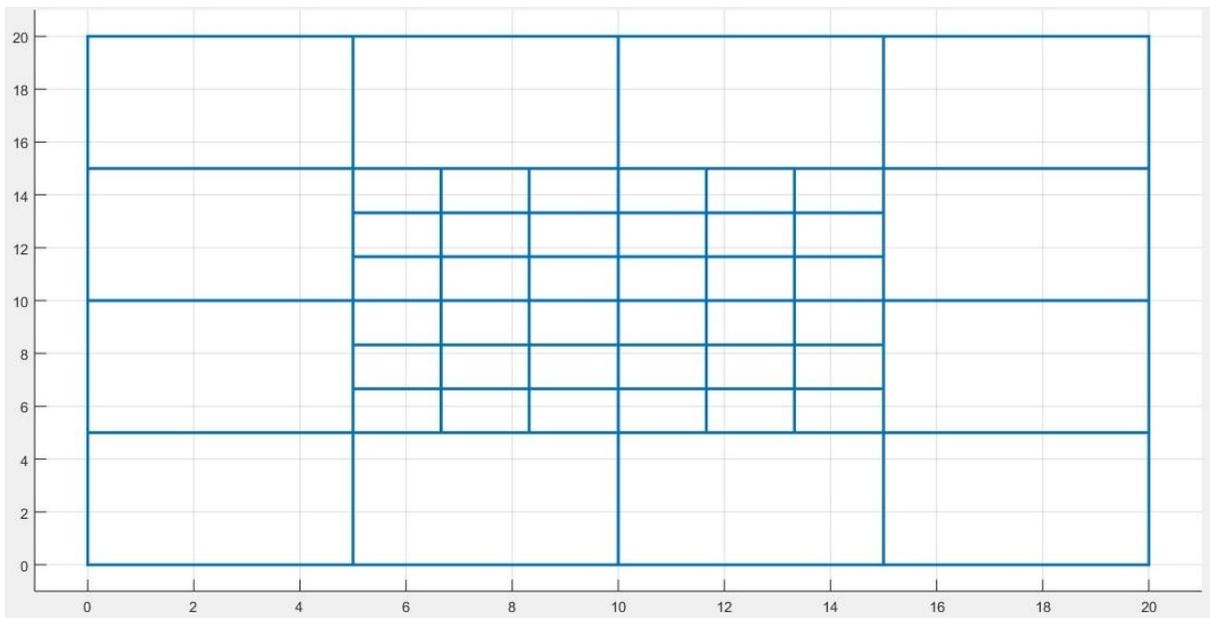


Figura 2.3.2. Malla de 20 x 20 metros con área efectiva de 10 metros de lado para impacto en el centro.

En la figura 2.3.3 se observa cómo queda la configuración de electrodos para una malla de 20 por 20 metros con un área efectiva de 5 metros de lado para impacto en el lateral inferior de la malla.

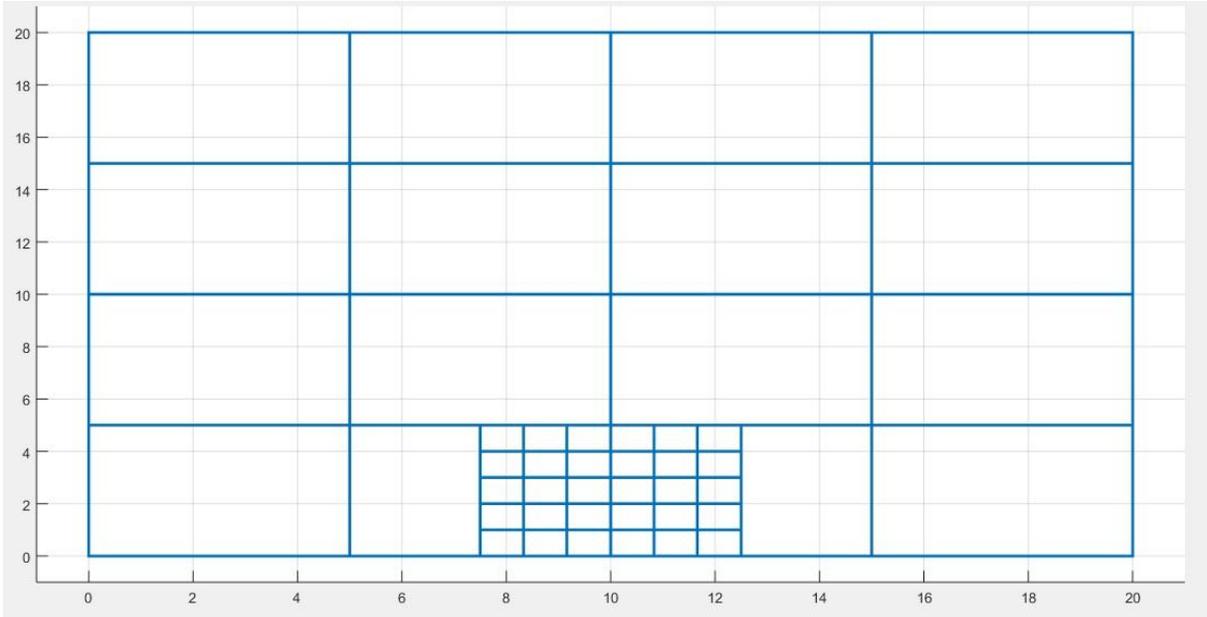


Figura 2.3.3. Malla de 20 x 20 metros con área efectiva de 5 metros de lado para impacto en el lateral inferior.

En la figura 2.3.4. se observa cómo queda la configuración de electrodos para una malla de 20 por 30 metros con un área efectiva de 5 metros de lado para impacto en la esquina de la malla.

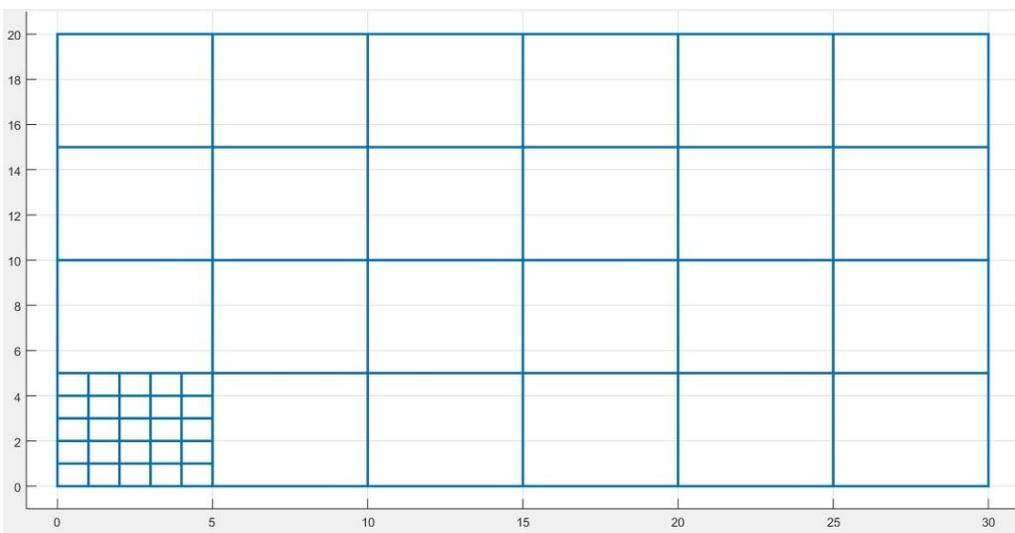


Figura 2.3.4. Malla de 20 x 30 metros con área efectiva de 5 metros de lado para impacto en la esquina.

En la figura 2.3.5. se observa cómo queda la configuración de electrodos para una malla de 20 por 30 metros con un área efectiva de 10 metros de lado para impacto en el centro de la malla.

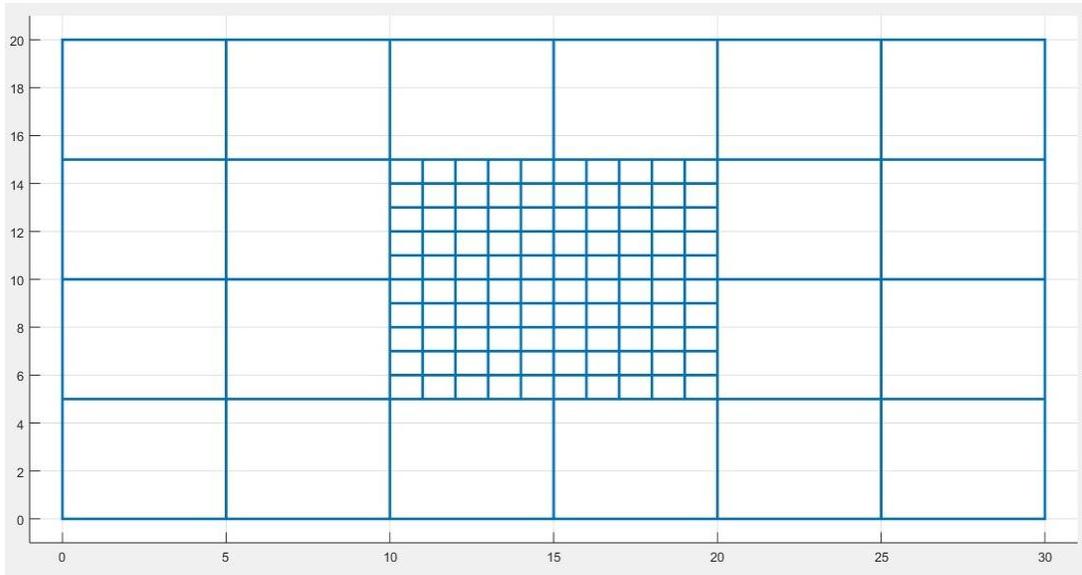


Figura 2.3.5. Malla de 20 x 30 metros con área efectiva de 10 metros de lado para impacto en el centro.

En la figura 2.3.6 se observa cómo queda la configuración de electrodos para una malla de 20 por 30 metros con un área efectiva de 5 metros de lado para impacto en el lateral de la malla.

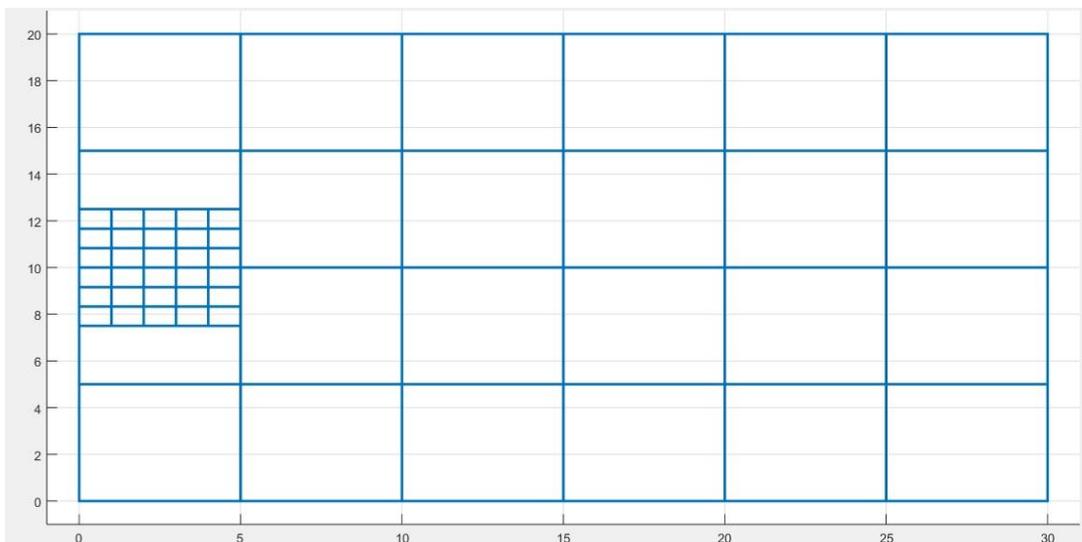


Figura 2.3.6. Malla de 20 x 30 metros con área efectiva de 5 metros de lado para impacto en el lateral.

En la figura 2.3.7. se observa cómo queda la configuración de electrodos para una malla de 20 por 30 metros con un área efectiva de 5 metros de lado para impacto en el lateral inferior de la malla.

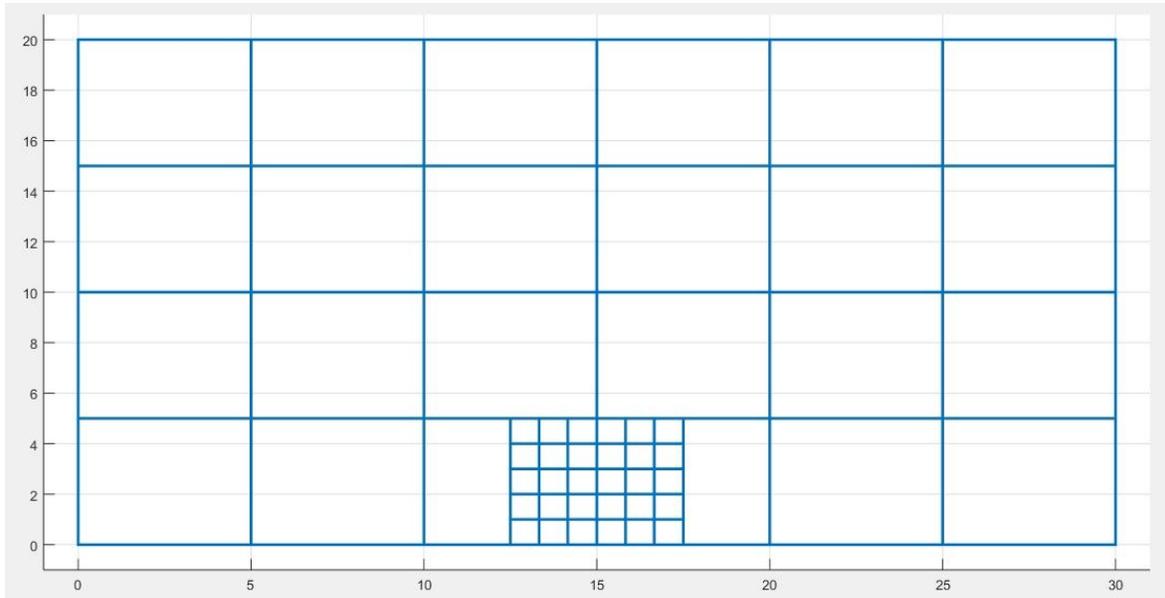


Figura 2.3.7. Malla de 20 x 30 metros con área efectiva de 5 metros de lado para impacto en el lateral inferior.

En la figura 2.3.8. se observa cómo queda la configuración de electrodos para una malla de 50 por 30 metros con un área efectiva de 5 metros de lado para impacto en la esquina de la malla.

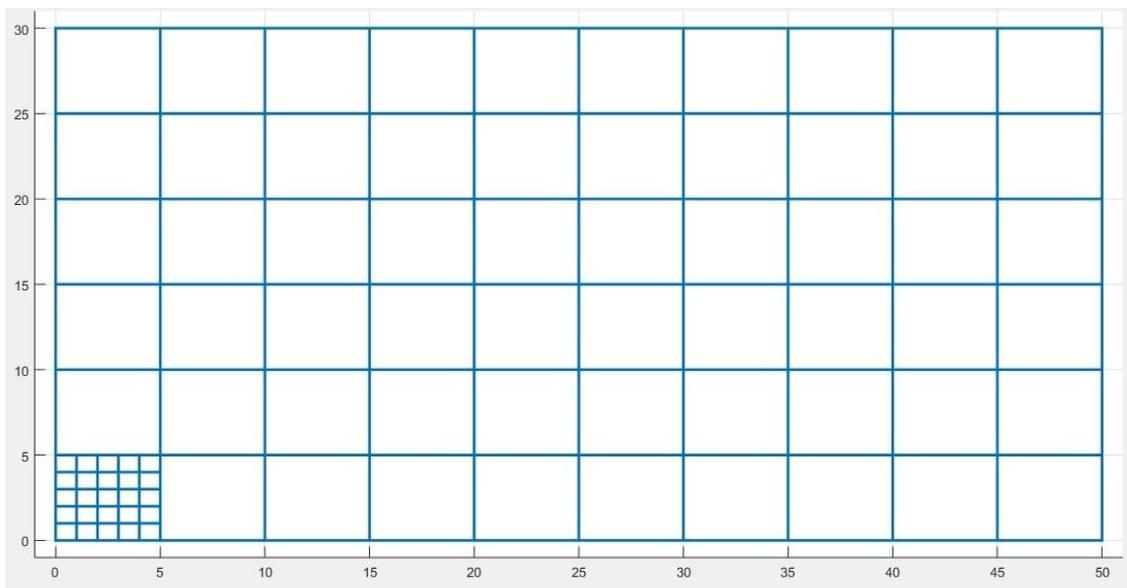


Figura 2.3.8. Malla de 50 x 30 metros con área efectiva de 5 metros de lado para impacto en la esquina.

En la figura 2.3.9. se observa cómo queda la configuración de electrodos para una malla de 50 por 30 metros con un área efectiva de 10 metros de lado para impacto en el centro de la malla.

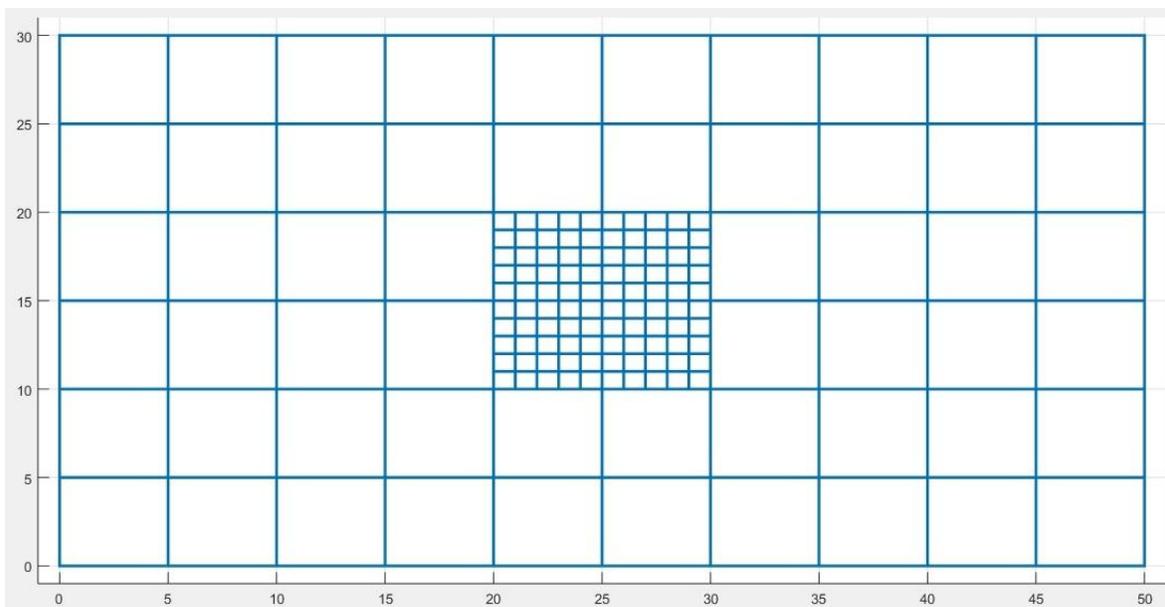


Figura 2.3.9. Malla de 50 x 30 metros con área efectiva de 10 metros de lado para impacto en el centro.

En la figura 2.3.10. se observa cómo queda la configuración de electrodos para una malla de 50 por 30 metros con un área efectiva de 5 metros de lado para impacto en el lateral de la malla.

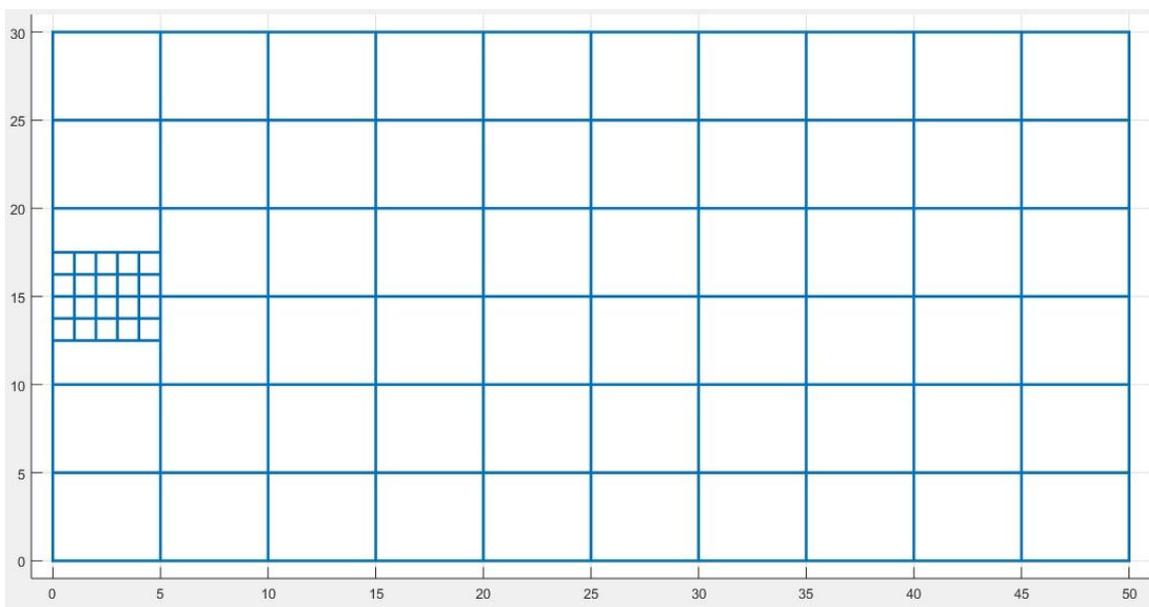


Figura 2.3.10. Malla de 50 x 30 metros con área efectiva de 5 metros de lado para impacto en el lateral.

En la figura 2.3.11. se observa cómo queda la configuración de electrodos para una malla de 50 por 30 metros con un área efectiva de 5 metros de lado para impacto en el lateral inferior de la malla.

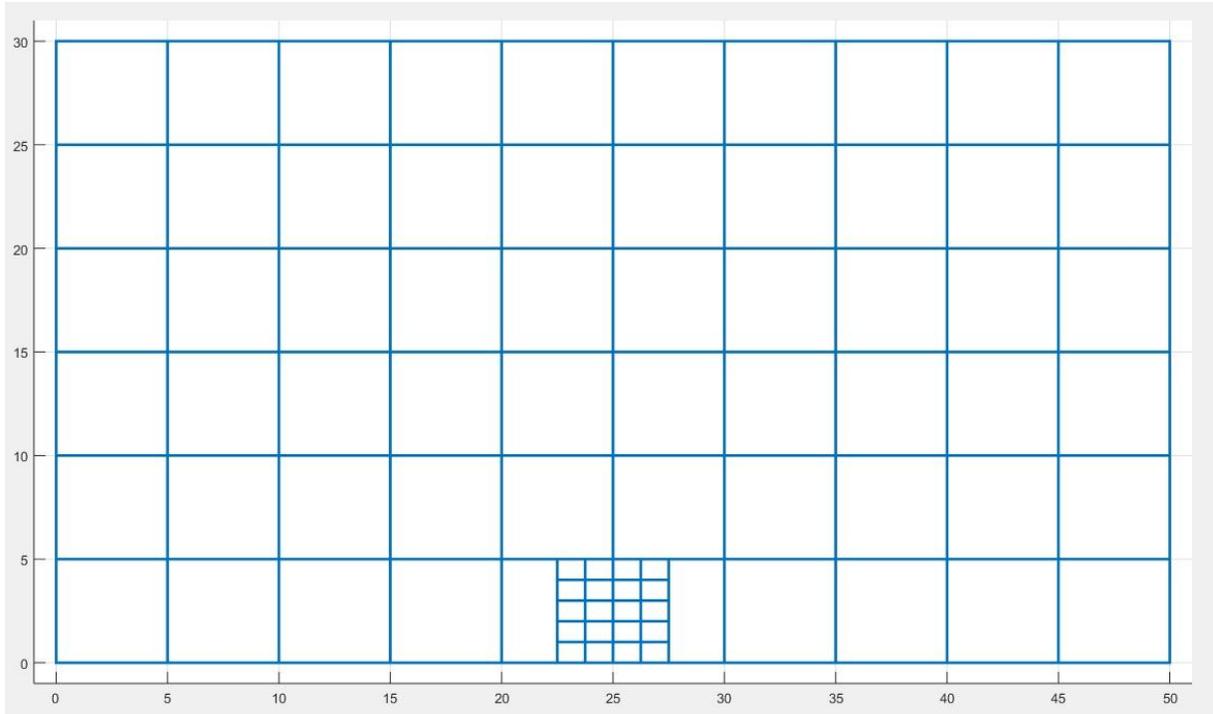


Figura 2.3.11. Malla de 50 x 30 metros con área efectiva de 5 metros de lado para impacto en el lateral inferior.

Estas gráficas permiten conocer como quedan las configuraciones de los electrodos para cada malla teniendo en cuenta el dimensionamiento del área efectiva.

2.4. Resultados de las modelaciones

Se evalúa el comportamiento transitorio que no es más que el análisis del transitorio ante el impacto de un rayo, teniendo en cuenta el valor máximo de la onda de corriente, el tiempo de frente de onda, el tiempo de cola de la onda y las coordenadas del impacto en metros. Una vez realizado se obtiene las gráficas de variación de la tensión por impacto del rayo.

En la gráfica 2.4.1. se observa la como varia la tensión en la malla de 20 por 20 metros teniendo en cuenta la ubicación del impacto del rayo en la esquina sin área efectiva y con área efectiva.

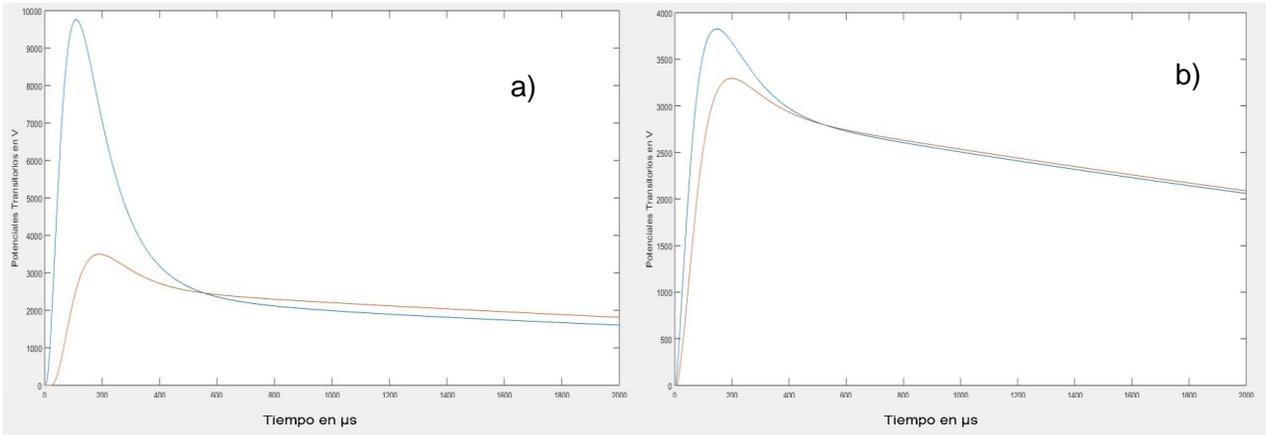


Figura 2.4.1. Variación de la tensión malla 20 x 20 metros. a) impacto en la esquina b) impacto en la esquina con área efectiva de 5 metros de lado.

En la gráfica 2.4.2. se observa la como varia la tensión en la malla de 20 por 20 metros teniendo en cuenta la ubicación del impacto del rayo en el centro sin área efectiva y con área efectiva.

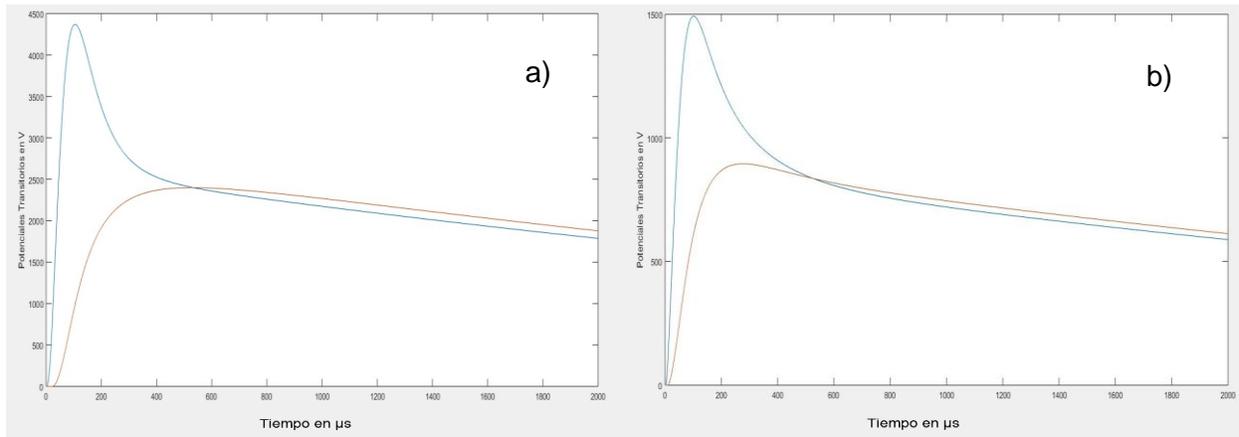


Figura 2.4.2. Variación de la tensión malla 20 x 20 metros. a) impacto en el centro. b) impacto en el centro con área efectiva de 10 metros de lado.

En la gráfica 2.4.3. se observa la como varia la tensión en la malla de 20 por 20 metros teniendo en cuenta la ubicación del impacto del rayo en el lateral sin área efectiva y con área efectiva.

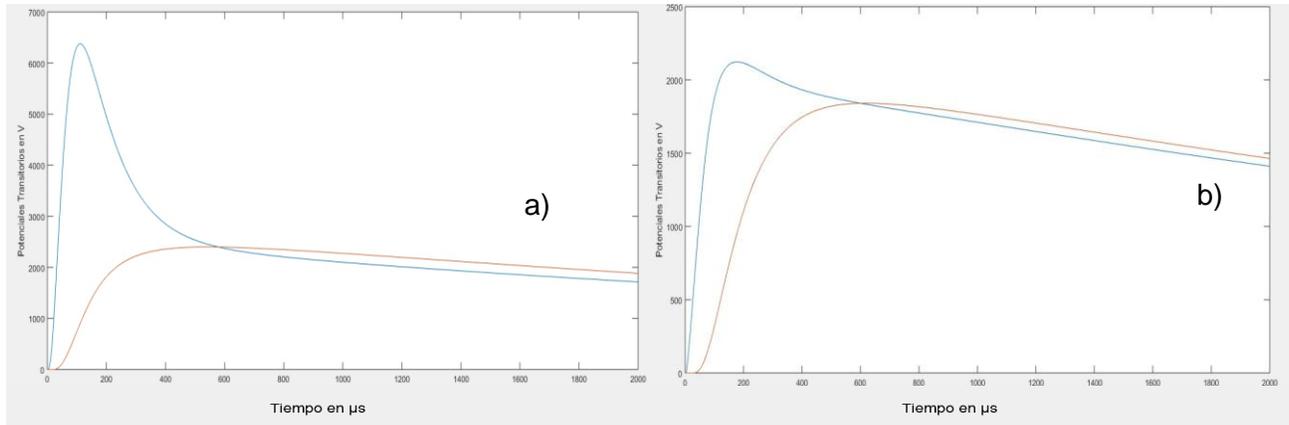


Figura 2.4.3. Variación de la tensión malla 20 x 20 metros. a) impacto en el lateral. b) impacto en el lateral con área efectiva de 5 metros de lado.

En la gráfica 2.4.4. se observa la como varia la tensión en la malla de 20 por 30 metros teniendo en cuenta la ubicación del impacto del rayo en la esquina sin área efectiva y con área efectiva.

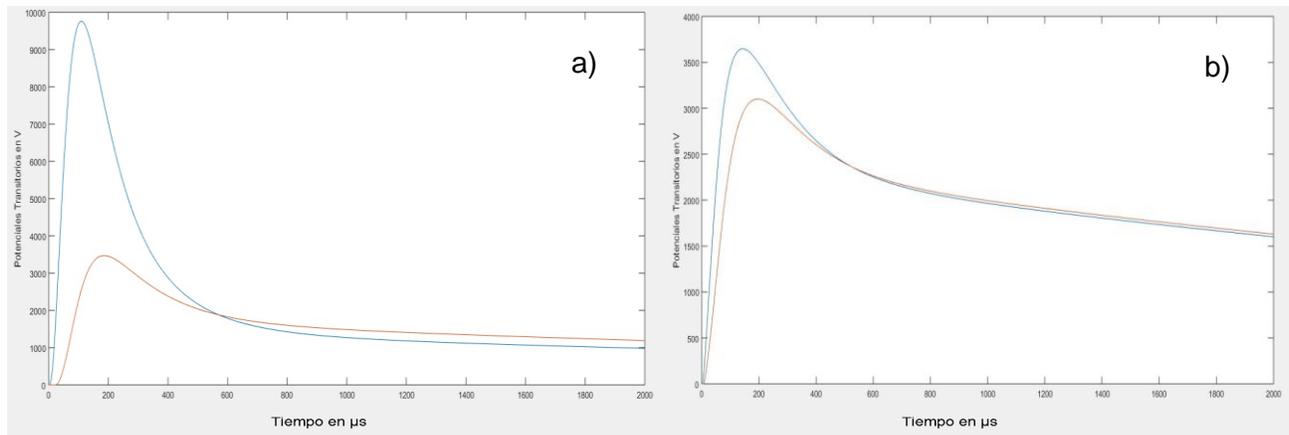


Figura 2.4.4. Variación de la tensión malla 20 x 30 metros. a) impacto en la esquina b) impacto en la esquina con área efectiva de 5 metros de lado.

En la gráfica 2.4.5. se observa la como varia la tensión en la malla de 20 por 30 metros teniendo en cuenta la ubicación del impacto del rayo en el centro sin área efectiva y con área efectiva.

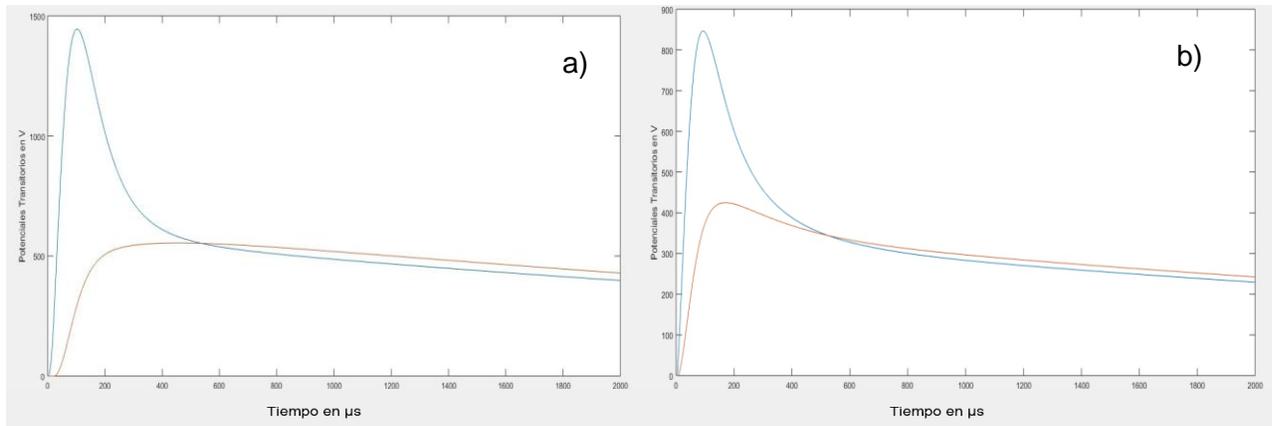


Figura 2.4.5. Variación de la tensión malla 20 x 30 metros. a) impacto en el centro b) impacto en el centro con área efectiva de 10 metros de lado.

En la gráfica 2.4.6. se observa la como varia la tensión en la malla de 20 por 30 metros teniendo en cuenta la ubicación del impacto del rayo en los laterales sin área efectiva y con área efectiva.

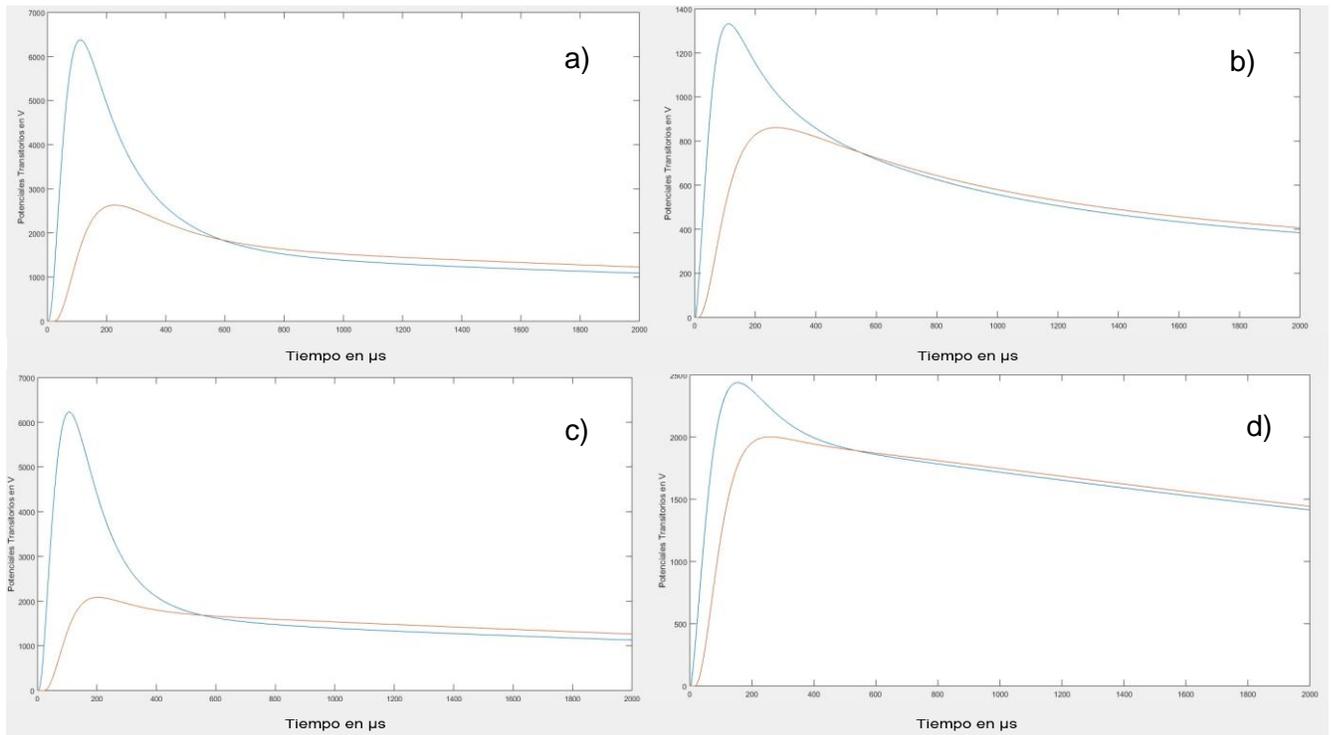


Figura 2.4.6. Variación de la tensión malla 20 x 30 metros. a) impacto en el lateral izq. b) impacto en el lateral izq. con área efectiva de 5 metros de lado. c) impacto en el lateral inferior. d) impacto en el lateral inferior con área efectiva de 5 metros de lado.

En la gráfica 2.4.7. se observa la como varia la tensión en la malla de 50 por 30 metros teniendo en cuenta la ubicación del impacto del rayo en la esquina sin área efectiva y con área efectiva.

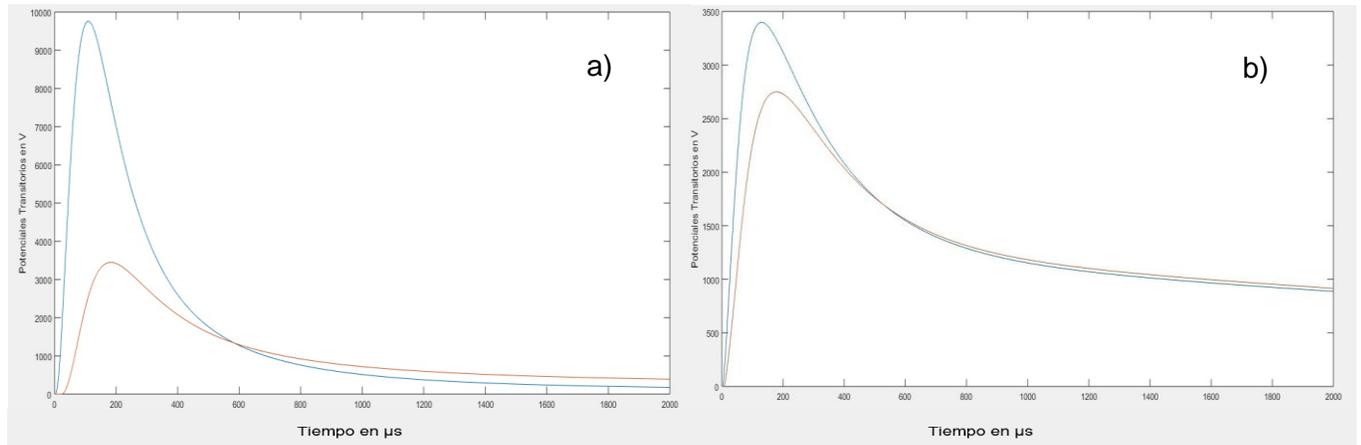


Figura 2.4.7. Variación de la tensión malla 50 x 30 metros. a) impacto en la esquina. b) impacto en la esquina con área efectiva de 5 metros de lado.

En la gráfica 2.4.8. se observa la como varia la tensión en la malla de 20 por 30 metros teniendo en cuenta la ubicación del impacto del rayo en el centro sin área efectiva y con área efectiva.

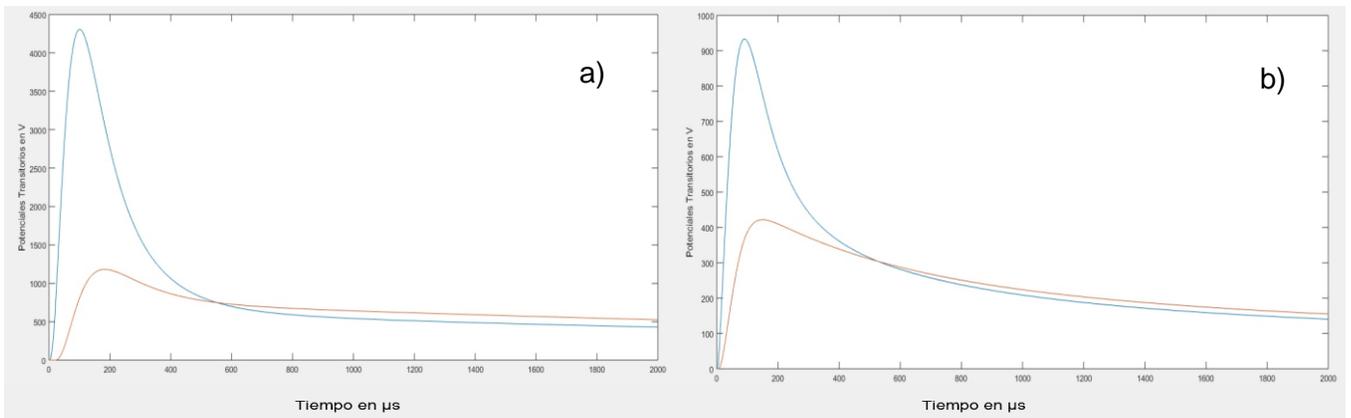


Figura 2.4.8. Variación de la tensión malla 20 x 30 metros. a) impacto en el centro. b) impacto en el centro con área efectiva de 10 metros de lado.

En la gráfica 2.4.9. se observa la como varia la tensión en la malla de 50 por 30 metros teniendo en cuenta la ubicación del impacto del rayo en los laterales sin área efectiva y con área efectiva

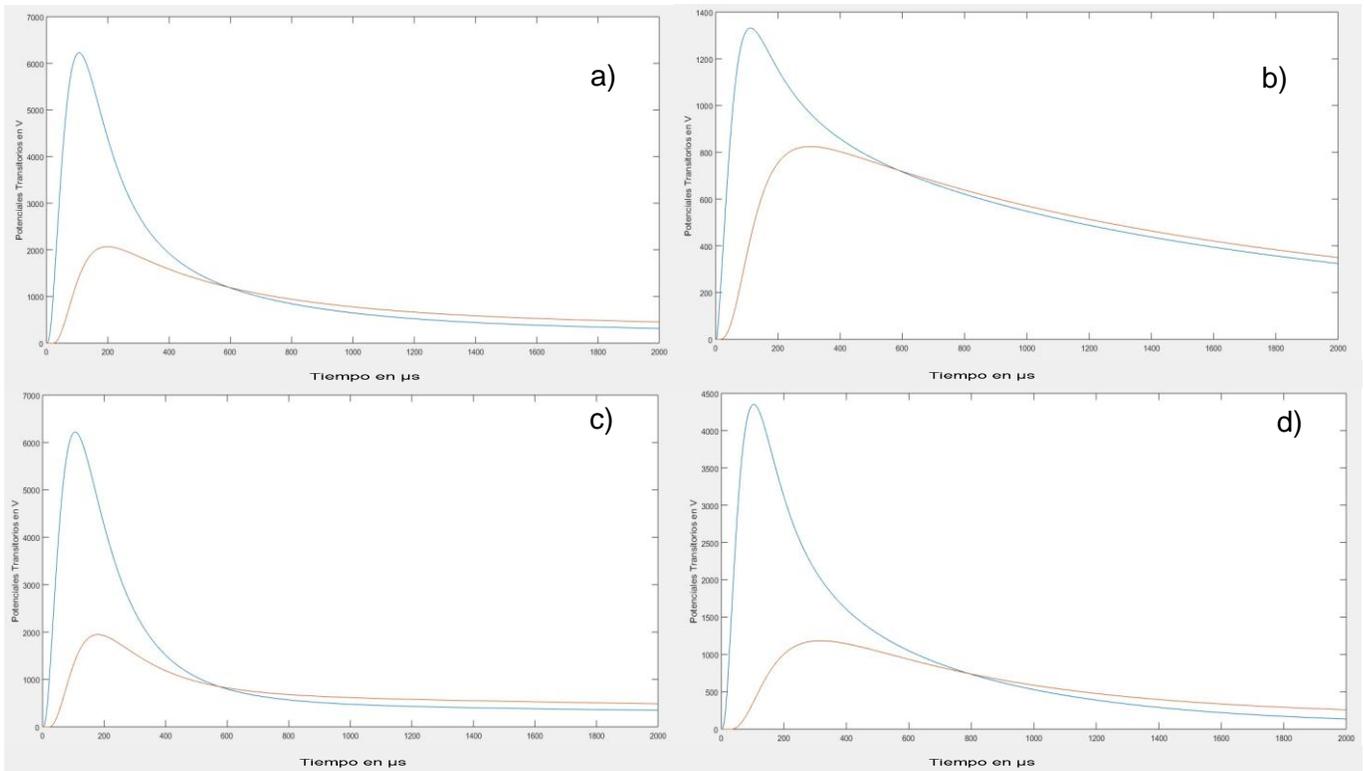


Figura 2.4.9. Variación de la tensión malla 50 x 30 metros. a) impacto en el lateral. b) impacto en el lateral con área efectiva de 5 metros de lado. c) impacto en el lateral inferior. d) impacto en el lateral inferior con área efectiva de 5 metros de lado.

Se puede apreciar una disminución de potencial con área efectiva en cuanto a valor y a tiempo. Para los análisis en la esquina se comprueba que un área efectiva puede disminuir desde el doble hasta el triple su valor pico en un tiempo de respuesta más rápido. Para el centro se comprueba que un área efectiva puede disminuir en el orden de los dos mil aproximadamente o menos en un tiempo más rápido. Para los laterales un área efectiva puede disminuir desde dos mil hasta cuatro mil aproximadamente su valor pico en un tiempo más rápido.

2.5. Aumentando la cantidad de conductores en el área efectiva en la malla de 20x20 m

En la figura 2.5.1. se observa cómo queda la configuración de electrodos para una malla de 20 por 20 metros con un área efectiva de 10 metros de lado para impacto en el centro de la malla aumentando la cantidad de conductores en el área efectiva.

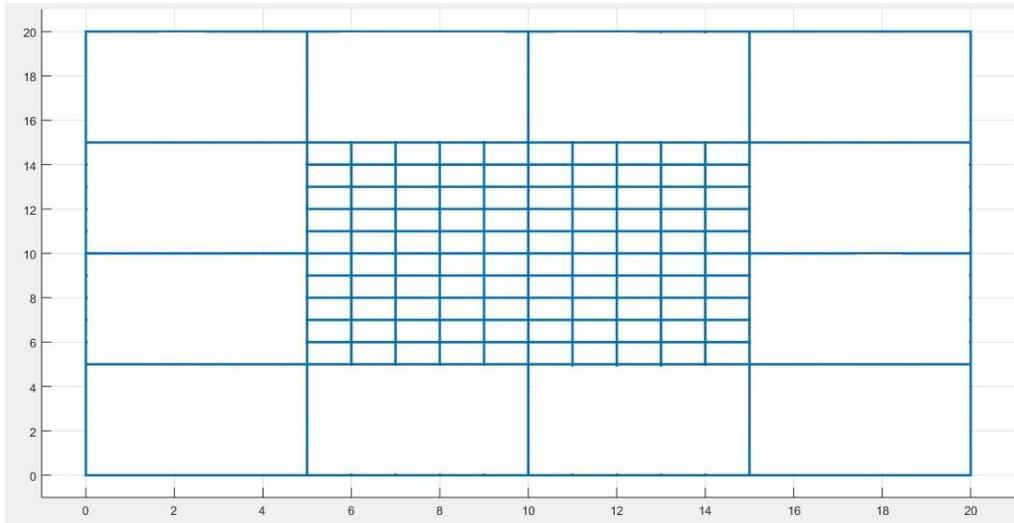


Figura 2.5.1. Malla de 20 x 20 metros con área efectiva de 10 metros de lado para impacto en el centro aumentando la cantidad de conductores.

En la figura 2.5.2. se observa cómo queda la variación de la tensión para una malla de 20 por 20 metros sin área efectiva en el centro, con área efectiva de 10 metros en el centro y aumentando la cantidad de conductores en el área efectiva.

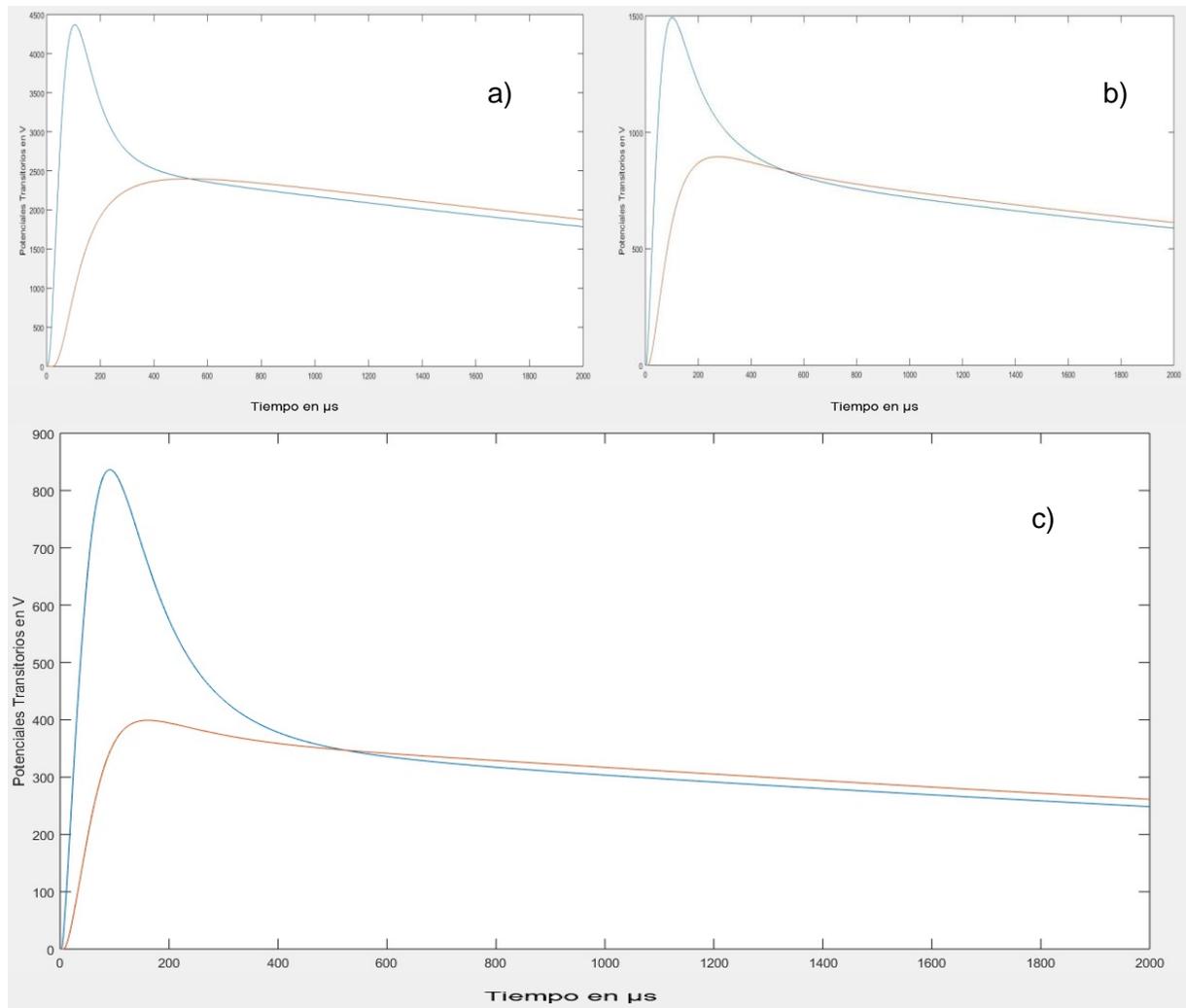


Figura 2.5.2. Variación de la tensión malla 20 x 20 metros a) impacto en el centro. b) impacto en el centro con área efectiva de 10 metros de lado. c) impacto en el centro con área efectiva de 10 metros de lado aumentando la cantidad de conductores.

En la figura 2.5.3. se observa cómo queda la configuración de electrodos para una malla de 20 por 20 metros con un área efectiva de 5 metros de lado para impacto en la esquina de la malla aumentando la cantidad de conductores en el área efectiva.

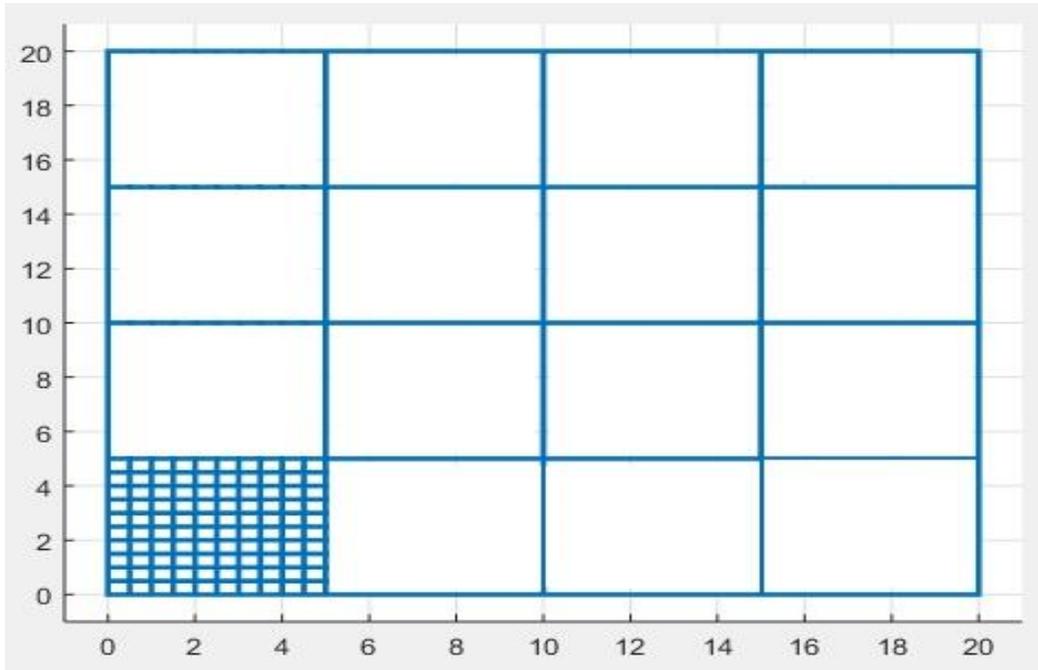


Figura 2.5.3. Malla de 20 x 20 metros con área efectiva de 5 metros de lado para impacto en la esquina aumentando la cantidad de conductores.

En la figura 2.5.4. se observa cómo queda la variación de la tensión para una malla de 20 por 20 metros sin área efectiva en la esquina, con área efectiva de 10 metros de lado para impacto en la esquina y aumentando la cantidad de conductores en el área efectiva.

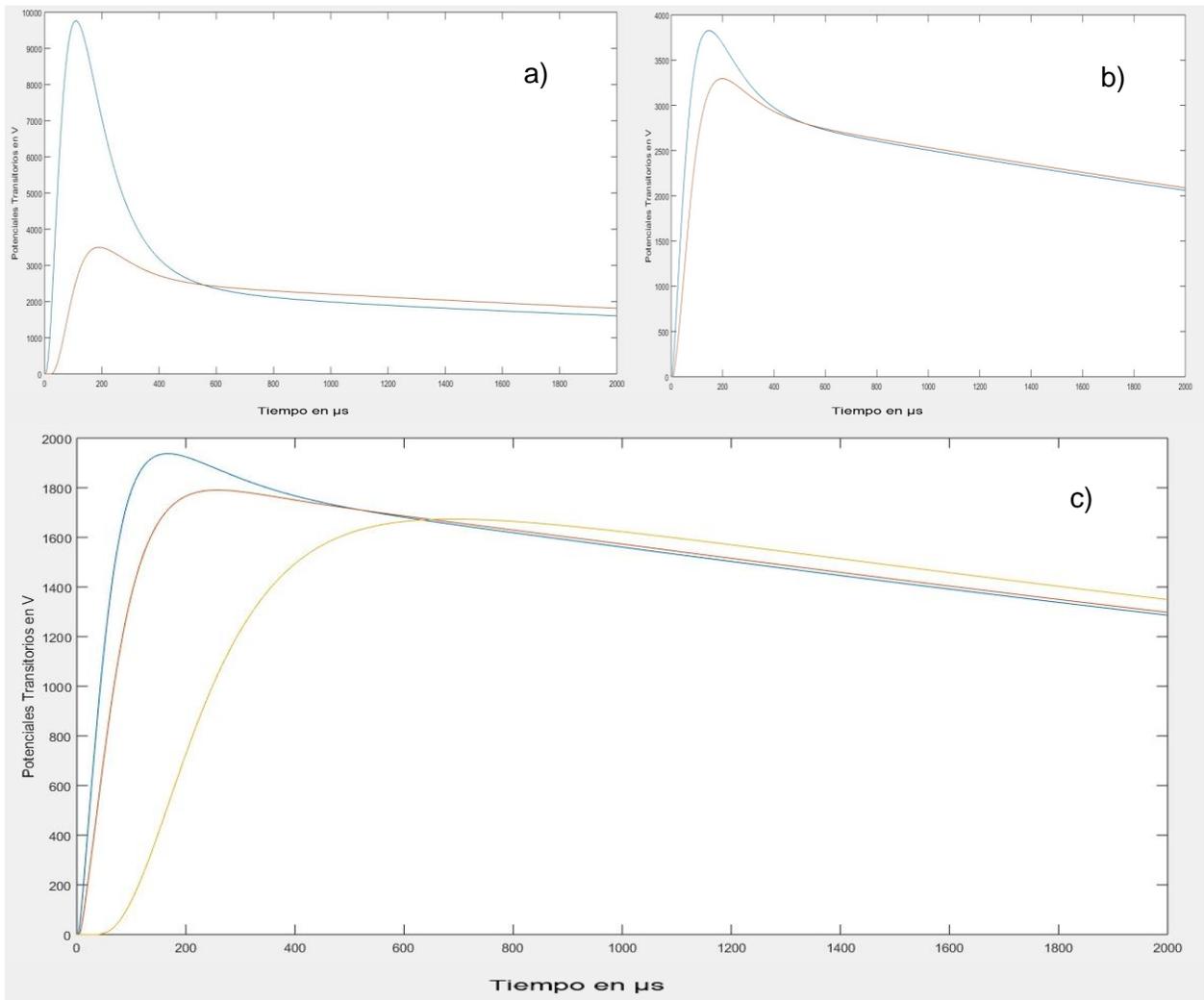


Figura 2.5.4. Variación de la tensión malla 20 x 20 metros a) impacto en la esquina. b) impacto en la esquina con área efectiva de 5 metros de lado. c) impacto en la esquina con área efectiva de 5 metros de lado aumentando la cantidad de conductores.

En la figura 2.5.5. se observa cómo queda la configuración de electrodos para una malla de 20 por 20 metros con un área efectiva de 5 metros de lado para impacto en el lateral de la malla aumentando la cantidad de conductores en el área efectiva.

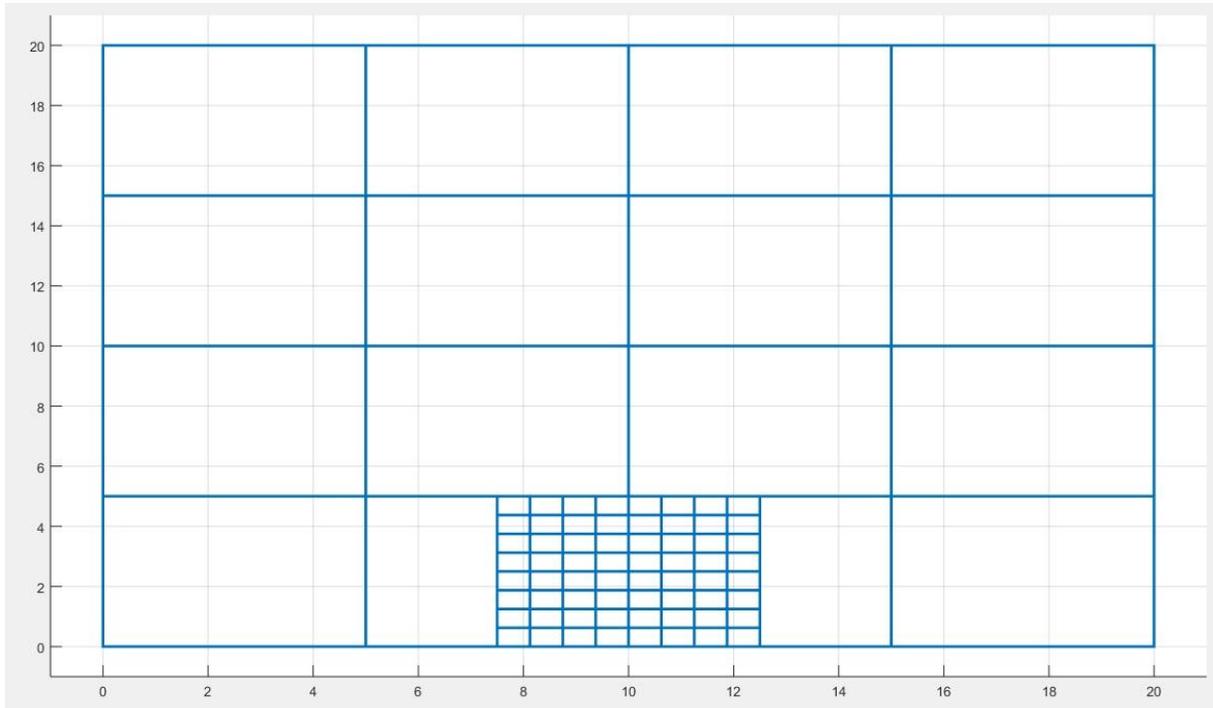


Figura 2.5.5. Malla de 20 x 20 metros con área efectiva de 5 metros de lado para impacto en el lateral aumentando la cantidad de conductores.

En la figura 2.5.6. se observa cómo queda la variación de la tensión para una malla de 20 por 20 metros sin área efectiva en el lateral, con área efectiva de 10 metros de lado para impacto en el lateral y aumentando la cantidad de conductores en el área efectiva.

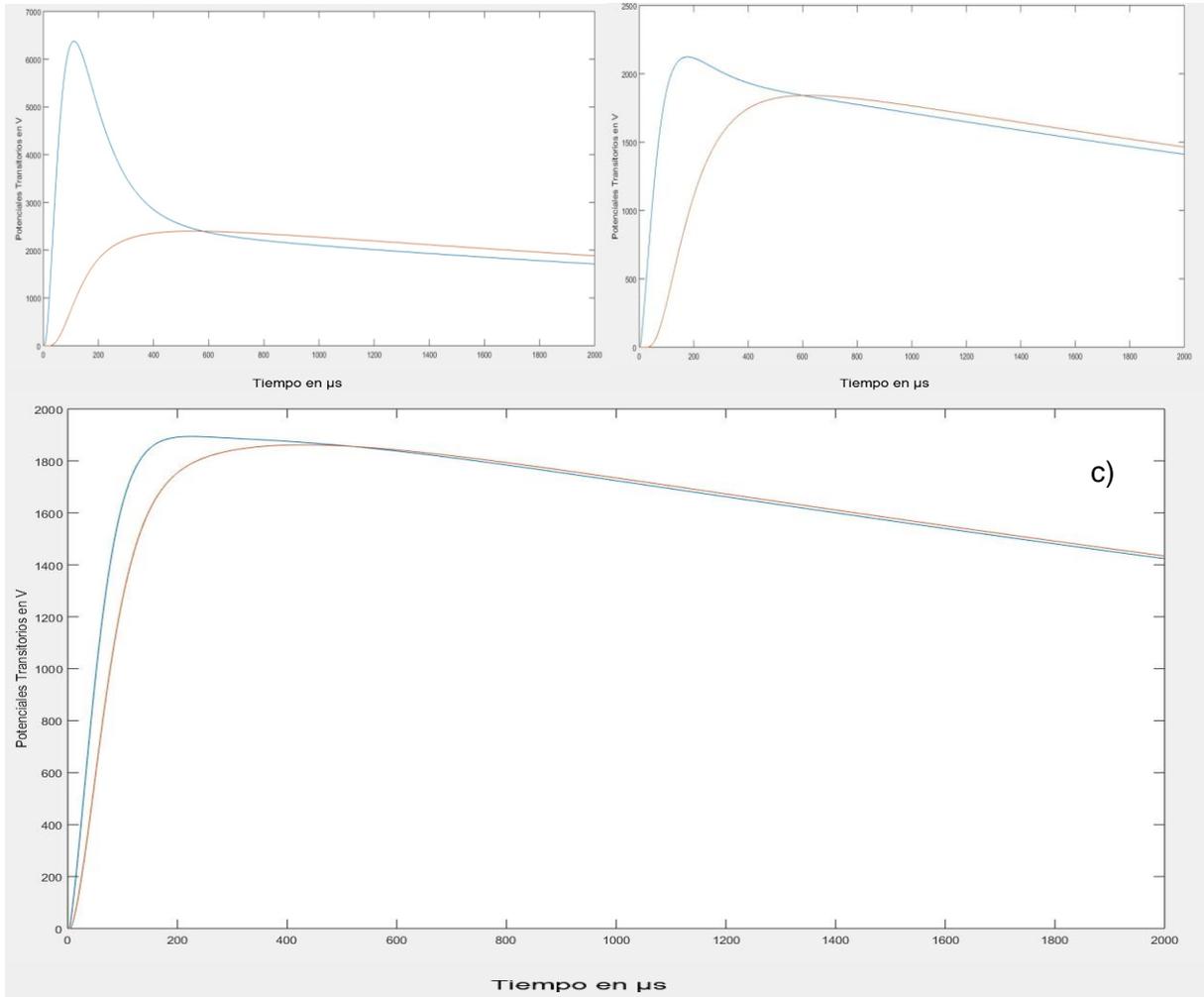


Figura 2.5.6. Variación de la tensión malla 20 x 20 metros a) impacto en el lateral. b) impacto en el lateral con área efectiva de 5 metros de lado. c) impacto en el lateral con área efectiva de 5 metros de lado aumentando la cantidad de conductores.

Para una malla en que se añaden más conductores en el área efectiva se puede comprobar cómo se vuelve más eficiente la misma logrando disminuir el potencial considerablemente hasta un valor pequeño en un tiempo menor, siendo proporcional ambos. El número de conductores es inversamente proporcional al potencial transitorio que aparece en la malla, al aumentar estos al doble, el potencial disminuye a la mitad.

2.6. Comparación entre los valores de potencial

Para realizar la comparación entre los valores de potencial se tiene en cuenta el tanto por ciento que representa cada área efectiva con la malla, sin área efectiva y que tanto se reduce el potencial.

En la figura 2.6.1. se observa una tabla con la comparación entre los valores de potencial con área efectiva y sin área efectiva en la malla de 20 por 20 metros y el por ciento que se reduce el valor del potencial de área efectiva.

Malla 20x20	Potencial (V)		% que se reduce
	Normal	A _{ef}	
Esquina	9900	3700	62.63
Centro	4450	1495	66.40
Lateral	6450	2250	65.12

Figura 2.6.1 Comparación entre los valores de potencial de la malla de 20x20 metros (con y sin área efectiva).

Se puede analizar que un área efectiva disminuye más de un cincuenta por ciento el valor del potencial en esta malla para cada lugar que se ubique; dando como resultado que el lugar que más reduce el potencial es en el centro de la malla, luego en el lateral y por último en la esquina.

En la figura 2.6.2. se observa una tabla con la comparación entre los valores de potencial con área efectiva y sin área efectiva en la malla de 20 por 30 metros y el por ciento que se reduce el valor del potencial de área efectiva.

Malla 20x30	Potencial (V)		% que se reduce
	Normal	A _{ef}	
Esquina	9800	3600	63.27
Centro	1400	850	39.29
Lateral izq.	6500	1300	80
Centro inferior	6300	2450	61.12

Figura 2.6.2. Comparación entre los valores de potencial de la malla de 20x30 metros (con y sin área efectiva).

Se puede analizar que un área efectiva disminuye desde un cuarenta por ciento al ochenta por ciento el valor del potencial en esta malla, dependiendo el lugar en que se ubique; dando como resultado que el lugar que más reduce el potencial es en el lateral izquierdo de la malla, luego en la esquina seguido del centro inferior y por último en el centro.

En la figura 2.6.3. se observa una tabla con la comparación entre los valores de potencial con área efectiva y sin área efectiva en la malla de 50 por 30 metros y el por ciento que se reduce el valor del potencial de área efectiva.

Malla 50x30	Potencial (V)		% que se reduce
	Normal	A _{ef}	
Esquina	9900	3400	65.66
Centro	4450	925	79.22
Lateral izq.	6200	1320	78.70
Centro inferior	6300	4400	30.15

Figura 2.6.3. Comparación entre los valores de potencial de la malla de 50x30 metros (con y sin área efectiva).

Se puede analizar que un área efectiva disminuye desde un treinta por ciento al ochenta por ciento el valor del potencial en esta malla, dependiendo el lugar en que se ubique; dando como resultado que el lugar que más reduce el potencial es en el centro de la malla, luego en el lateral izquierdo seguido de la esquina y por último en el centro inferior.

Conclusiones del capítulo

Luego de analizar las modelaciones en el PAST se concluye que el dimensionamiento del área efectiva permite reducir significativamente el potencial que aparece en la malla debido al evento transitorio, teniendo en cuenta que, mientras más conductores se añadan más se reduce el potencial.

Conclusiones

Luego de analizarse los resultados del trabajo se llegan a las siguientes conclusiones:

- La bibliografía consultada proporciona un análisis profundo en el tema de los sistemas de puesta a tierra y el área efectiva.
- El PAST como herramienta adjunta al Matlab permite realizar los modelos de las diferentes mallas con exactitud para determinar los potenciales de los eventos transitorios.
- El dimensionamiento del área efectiva influye en la respuesta de los eventos transitorios notablemente llegando a minimizar su potencial. A medida que se aumenta la cantidad de conductores en el área efectiva se logra que el potencial se reduzca significativamente.

Recomendaciones

El presente trabajo permitió determinar que el dimensionamiento del área efectiva minimiza el potencial del evento transitorio. Sin embargo, se debe ampliar y profundizar el estudio sobre este tema, por lo que se proponen las siguientes recomendaciones:

- Tener en cuenta el lugar del bajante del pararrayo para futuros sistemas de puesta a tierra en subestaciones y otras instalaciones. Ubicar el mismo lo más al centro o al lateral de la malla garantizando un área efectiva que reduzca el potencial del transitorio al máximo posible.
- En la investigación realizada, aun cuando se ha conseguido evaluar en las mallas el uso y resultado del dimensionamiento del área efectiva, se exhorta a continuar con análisis más profundos en cuanto a investigaciones y proyectos con el fin de obtener una teoría más completa sobre el tema.

Referencias

- [1] J. A. Blandon, "Estado del arte en el diseño de mallas a tierra de subestaciones.," 2015.
- [2] C. G. C. Domínguez, "Puesta a tierra y perturbaciones electromagnéticas en equipos de carga sensible," 1997.
- [3] F. M. González-Longatt, "Sistemas de Puesta a Tierra: Una introducción a la Seguridad," 2005.
- [4] J. H. S. Alzate, "Consideraciones iniciales para el diseño de puestas a tierra," 2011.
- [5] 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.
- [6] D. J. C. Campos, M. E. Lora, and M. L. Meriño, "Calidad de la Energía Eléctrica," Grupo de Gestion Eficinete de la Energía, UPME.
- [7] R. Pando. (2005). *Aspectos Básicos de las Descargas Atmosféricas* Available: https://sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2014-07-13_11-17-37106920.pdf
- [8] L. Grcev, "Lightning Surge Efficiency of Grounding Grids," vol. IEEE, 2011.
- [9] L. Grcev, "Impulse efficiency of ground electrodes," *IEEE*, 2009/2010.