



UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS
VERITATE SOLA NOBIS IMPONETUR VIRILIS TOGA. 1948

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Estudios Electroenergéticos



TRABAJO DE DIPLOMA

Modelación del Comportamiento Dinámico de
Sistemas de Puesta a Tierra en el ATPDraw

Autor: Yáinel Montecelo Pérez

Tutor: Dr. Angel Valcárcel Rojas

Santa Clara

Año del 50 Aniversario del Triunfo de la Revolución

Año 2009.



Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Estudios Electroenergéticos



TRABAJO DE DIPLOMA

Modelación del Comportamiento Dinámico de
Sistemas de Puesta a Tierra en el ATPDraw

Autor: Yáinel Montecelo Pérez

Email: ymontecelo@uclv.edu.cu

Tel: 0143433464

Tutor: Dr. Angel Valcárcel Rojas

Email: Valca@uclv.edu.cu

Santa Clara

Año del 50 Aniversario del Triunfo de la Revolución

Año 2009.



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

PENSAMIENTO

De amar las glorias pasadas se sacan fuerzas para adquirir las glorias nuevas.

José Martí

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres, hermano y mujer, quienes han enriquecido mi voluntad de esperanza y confianza con su amor y dedicación.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente quiero agradecer a mi tutor, el Dr. Angel Valcarcel Rojas, quien ha estado presente cada minuto, sin dar tregua ni descanso a los inconvenientes surgidos en el transcurso de la realización de este trabajo.

También agradezco a esos amigos que me acompañaron en el transcurso de esta travesía y a aquellos que levantaron mi espíritu en los momentos más difíciles.

A mis familiares, que tuvieron plena confianza en que este trabajo fuese posible, y en especial a mi madre, quien fue mi inspiración en el arduo recorrido por lograr la meta que hoy se hace posible.

TAREA TÉCNICA

Para el desarrollo del presente trabajo se propuso la siguiente tarea:

1. Búsqueda y análisis de la bibliográfica disponible sobre el tema.
2. Entrenamiento en el trabajo con el ATPDraw.
3. Modelación en ATPDraw de diferentes configuraciones de electrodos de puesta a tierra.
4. Análisis de los resultados obtenidos y comparación con los logrados por otros autores.

Firma del Autor

Firma del Tutor

RESUMEN

En este trabajo introducimos el tema de la modelación del comportamiento transitorio de las redes de puesta a tierra, tomando como punto de partida una breve reseña del análisis de los mismos realizado por autores como Sunde y Rudenberg entre otros. En el desenlace de la temática se plantean dos modelos de electrodos de puesta a tierra, (vertical y horizontal), el desarrollo matemático de los parámetros que conforman los circuitos de esos modelos así como algunos ejemplos donde estos circuitos se confeccionan en el ATP, programa que tiene entre sus aplicaciones la posibilidad de simular el comportamiento transitorio de mallas y redes de puesta a tierra, tomando como base un electrodo cuyas características varían de acorde a la problemática que se plantea, o al sistema que se quiere lograr. Mediante dicho programa veremos los efectos de una falla simulada por una fuente de corriente alterna en las redes y las variaciones de resistencia y tensión según el punto donde se coloca la fuente. Para finalizar se presentan los resultados obtenidos a partir de los modelos de los circuitos planteados, cada uno con sus características propias.

ÍNDICE

PENSAMIENTO	i
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
TAREA TÉCNICA	iv
RESUMEN.....	v
INTRODUCCIÓN.....	1
<i>CAPÍTULO 1. Sistemas de Puesta a Tierra. Variantes de Análisis del Comportamiento Transitorio.....</i>	<i>3</i>
1.1 <i>Introducción a los Sistemas de Puesta a Tierra.....</i>	<i>3</i>
1.2 <i>Consideraciones para el diseño de Sistemas de Puesta a Tierra.....</i>	<i>4</i>
1.3 <i>Análisis transitorio de las puestas a tierra. Sistemas lineales.....</i>	<i>5</i>
1.4 <i>Análisis transitorio de las puestas a tierra. Sistemas no lineales.....</i>	<i>9</i>
1.5 <i>Estudios de baja frecuencia en suelo homogéneo</i>	<i>11</i>
<i>CAPÍTULO 2. Justificación Teórica de los Modelos de Electrodo de Puesta a Tierra. Modelación en ATP.....</i>	<i>14</i>
2.1 <i>Importancia de la implementación de los sistemas de puesta a tierra....</i>	<i>14</i>
2.2 <i>Comportamiento Dinámico de los Sistemas de Puesta a Tierra.....</i>	<i>14</i>
2.2.1 <i>Principios. Electrodo Vertical.....</i>	<i>15</i>
2.2.2 <i>Dos o tres electrodos verticales</i>	<i>22</i>
2.3 <i>Modelación en ATP de Electrodo de Puesta a Tierra.</i>	<i>24</i>
2.3.1 <i>Descripción.....</i>	<i>24</i>

2.3.2	<i>Fundamentación Matemática de los Parámetros del Circuito.</i>	26
CAPÍTULO 3. Resultados y Comparaciones de Modelos de Redes de Puesta a Tierra		
		28
3.1	<i>Diferentes configuraciones de electrodos.</i>	28
3.1.1	<i>Electrodo horizontal.</i>	28
3.1.2	<i>Malla perimetral.</i>	30
3.1.3	<i>Malla de cuatro módulos.</i>	33
3.2	<i>Combinaciones de electrodos horizontales y verticales. Efectos del cambio del punto de inyección de corriente.</i>	36
3.3	<i>Comportamiento dinámico de una malla de tierra bajo condiciones e corto circuito.</i>	44
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		50
<i>Conclusiones.</i>		50
<i>Recomendaciones</i>		51
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		52

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presenta con la ayuda del ATPDraw una serie de modelos que permiten analizar el comportamiento transitorio de la redes de puesta a tierra en terrenos uniformes. 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 falta, sin deteriorar sus propiedades mecánicas ni 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 transporte. 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.

Organización del informe

El trabajo comienza con una introducción a los sistemas de puesta a tierra a modo general, su importancia y utilización, en el capítulo 1 se enuncian algunos autores que han dedicado su carrera científica a investigar el comportamiento dinámico de las redes de puesta a tierra, principalmente el estado transitorio proponiendo soluciones tanto matemáticas como analíticas. Continuamente en el capítulo 2 hacemos énfasis en dos modelos específicos de electrodos y su modelación en el ATP como base para la confección de mallas mucho más complejas. El capítulo 3 trata ejemplos de redes de puesta a tierra, su comportamiento en estado estable y principalmente transitorio, se muestran gráficas que manifiestan las variaciones de tensión, corriente y resistencia según el punto de inyección de corriente a la malla, el tipo de malla y los efectos producidos por una falla, también se representa la forma de onda del transiente provocado por la misma al afectar transformadores, la cual va a variar según la conexión de los mismos.

Capítulo 1: Sistemas de Puesta a Tierra. Variantes de Análisis del Comportamiento Transitorio.

Capítulo 2: Justificación Teórica de los Modelos de Electrodos de Puesta a Tierra. Modelación en ATP.

Capítulo 3: Resultados y Comparaciones de Modelos de Redes de Puesta a Tierra.

CAPÍTULO 1. Sistemas de Puesta a Tierra.

Variantes de Análisis del

Comportamiento Transitorio.

1.1 Introducción a los Sistemas de Puesta a Tierra

Los sistemas de protección contra descargas eléctricas atmosféricas están compuestos por las partes conductoras que interceptan la descarga y la conducen hacia el suelo y por la puesta a tierra que es la encargada de distribuir dichas corrientes transitorias en el terreno. La forma en la cual se distribuyen las corrientes en los electrodos de puesta a tierra y los potenciales transitorios que aparecen en el momento de la falla son objeto de estudio con el propósito de evaluar los riesgos a los que se exponen las personas que se encuentren en las inmediaciones del sistema afectado y los niveles de tensión a los que están sujetos los equipos. Otra parte importante de los sistemas de protección, son los dispositivos que disminuyen los potenciales transitorios a niveles admisibles para las instalaciones eléctricas, los cuales van ubicados en las acometidas de potencia, de comunicaciones, etc. Estos dispositivos que mitigan las sobretensiones poseen conexiones físicas a la puesta a tierra y también le inyectan corrientes transitorias en caso de presentarse una falla. La obtención de los potenciales en diferentes puntos de la puesta a tierra, permite realizar el análisis para asegurar que los diseños y dimensionamiento de los equipos de protección interna sean acordes con los requerimientos de las instalaciones y así evitar lesiones a personas o daños en los demás equipos y aparatos de las instalaciones. Esta es la justificación para llevar a cabo el estudio del

comportamiento transitorio de las puestas a tierra y realizar un análisis detallado de las mismas.

1.2 Consideraciones para el diseño de Sistemas de Puesta a Tierra

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 [1] y Sunde [2] entre otros, pero la complejidad de las soluciones y de los métodos matemáticos involucrados, unida a la carencia de ordenadores, 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. [3], [4], [5], [6], [7].

Las redes de puesta a tierra tienen como uno de sus principales objetivos la reducción de las diferencias de potencial en la superficie de las subestaciones, en sus entornos y en las cercanías de las líneas de transporte. Las normas y recomendaciones para el diseño y operación de redes de puesta a tierra [8], [9], [10], [11], [12] utilizan criterios que intentan garantizar la seguridad de las personas. Estos criterios se traducen en especificaciones concretas sobre las diferencias de potencial máximas que pueden aparecer entre dos puntos bien definidos.

Las recomendaciones utilizadas normalmente para su diseño consideran el tiempo de duración de la corriente de falta en la determinación de la tensión de paso y contacto máxima tolerable por el ser humano. Este tiempo depende del retardo en la operación de las protecciones del sistema.

Algunos autores [13] incluso han llegado a considerar la resistencia del cuerpo humano, la resistencia de contacto con el suelo y el tiempo de despeje de la falta como variables aleatorias en un modelo probabilístico, con la finalidad de permitir incrementar los límites tolerables de diferencia de potencial aplicados al ser

humano debido al riesgo calculado de que puedan ocurrir todos los factores más desfavorables simultáneamente.

Antes de los años sesenta [7], se atendía únicamente a que la resistencia de puesta a tierra fuese baja, como criterio de diseño, pero se comprobó que esto puede no ser suficiente para mantener controladas las diferencias de potencial en la subestación y en su entorno, que es el objetivo que se persigue. Para diseñar redes de puesta a tierra que permitan mantener las diferencias de potencial dentro de unos límites que garantice la seguridad de la red tanto para las personas como para los equipos, se han desarrollado diversos modelos computacionales, los cuales posibilitan el análisis del comportamiento de las mismas en estado transitorio, y con ello la configuración más acertada de la red dependiendo de las condiciones en las que se encuentra.

1.3 Análisis transitorio de las puestas a tierra. Sistemas lineales

El análisis transitorio de las puestas a tierra inició su desarrollo por autores como Bewley en 1934, Sunde en 1940, Rüdemberg en 1945 entre otros [14]. En estos trabajos se representa la red de puesta a tierra a través de parámetros distribuidos mediante el modelo de la línea de transmisión en un medio con pérdidas. El principal inconveniente de este método es que solamente se puede aplicar a sistemas de puesta a tierra elementales ya que no contempla los acoplamientos existentes entre electrodos cercanos de una red compleja de puesta a tierra. Bewley en 1934 derivó una expresión de la impedancia de un contrapeso como resultado de sus estudios de conductores enterrados. Muchos años después Verma y Mukhedkar en 1980 [15] encontraron una expresión para la impedancia al impulso de un conductor enterrado sujeto a una señal de corriente. Encontraron que los modelos de parámetros distribuidos de resistencia e inductancia, predicen el comportamiento transitorio de los sistemas con una buena aproximación al compararlos con los análisis de contrapesos de Bewley. Estos modelos son aplicables exclusivamente a configuraciones sencillas de puesta a tierra como contrapesos y varillas.

Gupta y Thapar en 1980 [16] encuentran una ecuación empírica para la impedancia al impulso de una malla de tierra de una subestación, definiéndola como una relación entre el valor pico de la tensión en el punto de inyección y el valor pico de la corriente, la cual permite evaluar el comportamiento de mallas rectangulares de puesta a tierra introduciendo el concepto de área efectiva o área de influencia. Ramamoorthy [22] utilizó un modelo en parámetros concentrados para analizar sistemas de puesta a tierra complejos. En este modelo se consideran los acoplamientos inductivos mutuos entre conductores paralelos adyacentes. El modelo no contempla ni las resistencias, ni las capacitancias mutuas entre electrodos, tampoco tiene en cuenta impedancias mutuas de elementos que no se encuentren en la propia malla rectangular. El análisis de este circuito equivalente mediante variables de estado, permite determinar intensidades y tensiones en los elementos del modelo, pero no permite calcular potenciales en un punto determinado del terreno ni obtener la distribución de corriente en el subsuelo. Este modelo representa a la red de tierra para frecuencias relativamente bajas.

En 1981 Kostaluk, Loboda y Mukhedkar recopilan información de impedancias transitorias de puesta a tierra a través de experimentos, lo cual también es desarrollado por Rogers en la puesta a tierra de la base de una torre de una línea de transmisión [14].

Meliopoulos y Moharam en 1983, publican un modelo general para el análisis transitorio de sistemas de puesta a tierra basado en un análisis de elementos finitos bajo los conceptos del modelo de línea de transmisión [14]. Este método permite analizar sistemas complejos de puesta a tierra compuestos por elementos rectilíneos. Cada uno de estos segmentos se modela mediante un segmento de línea de transmisión con pérdidas representada por parámetros distribuidos. Los parámetros de cada uno de los segmentos se obtienen a partir de la solución cuasi-estática de las ecuaciones de Maxwell. En su primera aproximación es despreciada la dependencia de la frecuencia de los parámetros de los elementos finitos con el fin de crear un modelo eficiente.

También en 1983 autores como Mazzetie, Meliopoulos, Velásquez, entre otros, propusieron soluciones en el dominio del tiempo del fenómeno transitorio basados en la teoría de líneas de transmisión [14], [18]. Esta metodología ha sido revaluada por algunos autores debido a que aseguran que es estrictamente válida para conductores horizontales y no es apropiada para el análisis de conductores verticales ni para configuraciones arbitrarias de conductores interconectados [19], pero posee la ventaja de poder llevar a cabo los análisis en programas de simulación tales como el EMTP/ATP o similares [20] y permite realizar estudios del comportamiento no lineal del sistema.

Más adelante Dawalibi en 1986 [21] analiza los sistemas de puesta a tierra utilizando la teoría de campos electromagnéticos desarrollando las ecuaciones en el dominio de la frecuencia. Dawalibi desarrolló programas de computador en los cuales implementó las expresiones analíticas derivadas de los estudios, las cuales contenían algunas aproximaciones con el fin de simplificar el modelo. En ese mismo año Grcev desarrolla su tesis de doctorado en la cual implementa una metodología para el análisis de conductores de puesta a tierra con orientación arbitraria en un rango amplio de frecuencias basado en técnicas computacionales [19], [24], en una forma similar a la desarrollada por Burke en 1970 y 1984 en el estudio del modelamiento de antenas.

Grcev [25], [26], [27] 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 [28], [29], la solución numérica de las integrales de Sommerfeld [30], [31], [32] y la aplicación de la transformada rápida de Fourier - FFT- [37,38]. 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. Una vez obtenida esta respuesta se determina la solución para cualquier otra excitación mediante la transformada inversa de Fourier. El método no incluye estratificación del terreno, asume que el subsuelo está constituido por un semiespacio

conductivo semi-infinito con un plano que lo separa del aire. Este método permite gran exactitud cuando el sistema se excita con frecuencias muy altas, sin embargo requiere gran cantidad de tiempo de procesamiento para evaluar las integrales de Sommerfeld

En 1987 Meliopoulos y Papalexopoulos [17] presentan un complemento al modelo presentado en 1983 por Meliopoulos y Moharam el cual incluye la variación de los parámetros antes mencionados con la frecuencia, encontrando variaciones apreciables de los parámetros cuando el fenómeno transitorio posee tiempos de frente muy cortos. En este método se resuelven las ecuaciones diferenciales para un medio infinito y uniforme, pero corrige el régimen permanente realizando un reescalamiento de la solución a partir del cálculo de los potenciales para un terreno biestratificado con excitación constante en el tiempo. El modelo desarrollado en estos trabajos es rápido y eficiente pero está limitado a frecuencias inferiores de 1.0 MHz debido a la aproximación cuasi-estática utilizada al resolver las ecuaciones de Maxwell. El modelo puede ser incorporado en algoritmos de cálculo de transitorios electromagnéticos tales como el **EMTP** “**Electro Magnetic Transient Program**” [16,23].

Grcev y Dawaliby en 1990 presentaron un modelo complejo para el análisis transitorio de puestas a tierra que incluía la obtención de la ecuación de campo eléctrico por medio de las ecuaciones de Sommerfeld con el propósito de poder evaluar los sistemas a frecuencias mucho mayores a 1 MHz [19], ya que, según sus autores, al emplear el método de imágenes [39] se pueden llegar a incurrir en errores significativos a frecuencias por encima de este valor. Como se había mencionado anteriormente, los modelos de análisis consideran que el terreno presenta un comportamiento constante en todo el espectro de frecuencias de la corriente. Algunas de las propuestas presentadas por Visacro (tesis de Doctorado 1992 [25]) y por Portela [26], [27], incluyen ecuaciones que describen el comportamiento de la resistividad y la permitividad del terreno con la frecuencia. Estas ecuaciones muestran un comportamiento decreciente de las constantes eléctricas con el incremento de la frecuencia, lo cual hace pensar que al trabajar

con los valores medidos en baja frecuencia a lo largo de todo el espectro de frecuencia, exista un sobredimensionamiento de los resultados.

Después del año 1990, los análisis que se han realizado han consistido en estudios de caso para geometrías complejas de puestas a tierra, grandes configuraciones y mallas de puesta a tierra de subestaciones cuando se ven afectados por descargas atmosféricas [33], [34], [28].

Recientemente Grcev ha presentado algunas contribuciones que permiten simplificar el problema, acelerando la solución, especialmente cuando se reduce la frecuencia máxima de la excitación [33], [34].

Liew[59], Loboda[60,61], Kosztaluk[62] y Kameyama [63] han desarrollado modelos que permiten analizar el comportamiento de los sistemas de puesta a tierra ante excitaciones transitorias que producen ionización del subsuelo. Estos trabajos permiten analizar electrodos sencillos. Velázquez [35] varía el radio de los electrodos para tener en cuenta el fenómeno de la ionización. Para que una inyección transitoria aplicada en el sistema de puesta a tierra produzca ionización del medio conductivo, se requieren grandes energías. No es común incorporar la ionización del medio en los cálculos de transitorios en redes complejas de puesta a tierra ya que este es un fenómeno poco frecuente y difícil de analizar porque no es lineal. Además, su efecto fundamental consiste en reducir los gradientes de potencial presentes en el medio [36], [41]

1.4 Análisis transitorio de las puestas a tierra. Sistemas no lineales

Respecto a las magnitudes de las señales de corriente inyectadas a la red de puesta a tierra, no existe un comportamiento lineal del sistema ya que se presenta un fenómeno llamado ionización del terreno que ocurre cuando los gradientes de campo eléctrico en el mismo son superados en la superficie de los conductores [40], lo que se ve reflejado en la disminución en magnitud de las señales de tensión y corriente. En relación al valor del gradiente máximo del terreno, en la literatura existen diferentes valores recomendados para el estudio de dicho fenómeno y existen básicamente dos modelos de interpretación del mismo.

Los valores iniciales de gradiente máximo en el terreno recomendados por Oettle fueron 1000 kV/m, mientras que el valor recomendado por CIGRE es 400 kV/m [40]. Sin embargo autores como Mousa han estudiado el fenómeno en diferentes tipos de suelo y respecto a estos valores recomendados sugiere que el valor que se debe usar es 300 kV/m, debido a que el valor sugerido por primera vez por Oettle es muy alto y no debe ser empleado debido a que sobreestima el gradiente máximo. El valor sugerido por Mousa es muy cercano al sugerido por CIGRE, pero éste asegura que 400 kV/m puede ser empleado teniendo en cuenta algunas consideraciones al modelo empleado [40]. Principalmente, existen dos modelos para la interpretación de la ionización del terreno alrededor de los conductores [41]. El primero considera que cuando se sobrepasa el umbral de ionización, se producen unas ramificaciones de carga eléctrica que pueden ser interpretadas como un aumento del radio del conductor, lo cual incrementa el área de contacto con el terreno no ionizado. Este modelo tiene la suposición de que existe un campo eléctrico igual a cero en el área ionizada, lo cual ha sido reevaluado por algunos autores [41], [42]. El segundo modelo tiene en cuenta que dichas ramificaciones de carga alrededor del conductor, hacen que un determinado volumen de suelo alrededor del conductor cambie su valor de resistividad a un valor menor y por lo tanto modifique el comportamiento del sistema.

Algunos autores como Liew y Darveniza proponen un decaimiento exponencial del valor de resistividad del terreno en el área ionizada; las constantes de decaimiento son calculadas a partir de pruebas experimentales. Investigadores como Almeida y Correia de Barros, propusieron una modificación al último modelo de interpretación [41]. La modificación consiste en suponer que el campo eléctrico en la zona ionizada nunca supera el gradiente máximo de ionización, ya que en el modelo de Darveniza, el campo eléctrico al interior de la zona ionizada puede superar este valor debido a que el modelo se comporta de acuerdo a su dinámica sin tener en cuenta el campo eléctrico local.

De esta forma en el modelo de Almeida el gradiente máximo no es superado, por lo tanto el área alrededor del electrodo es una región de campo eléctrico constante cuando se alcanza el valor del gradiente máximo. Recientemente, Liu en su tesis de doctorado [42], propone un modelo mejorado que considera una resistividad residual del suelo ionizado. Los valores fueron calculados en pruebas de laboratorio empleando impulsos de corriente. Como se ve, es necesario tener en cuenta este comportamiento no lineal del terreno cuando se presentan altos valores de corriente ya que hacen que se superen los gradientes máximos de soportabilidad del terreno en la superficie de los conductores. Es necesario hacer claridad en el hecho de que al tener en cuenta estos comportamientos no lineales del sistema, algunas técnicas como la transformada y la transformada inversa de Fourier no pueden ser empleadas para el análisis. Por lo tanto es necesario encontrar una nueva forma de solucionar el problema si se quiere trabajar con las ecuaciones basadas en la teoría electromagnética en el dominio de la frecuencia.

1.5 Estudios de baja frecuencia en suelo homogéneo

Los primeros estudios que se desarrollaron en el tema, corresponden a los análisis en baja frecuencia de geometrías básicas enterradas en el suelo. Tagg en 1964 [43], presentó ecuaciones analíticas de la resistencia de puesta a tierra en modelos de suelo homogéneo para algunas geometrías sencillas. Los estudios se extendieron al cálculo de la diferencia de potencial que presentaban estos electrodos respecto a un punto remoto cuando eran atravesados por una corriente eléctrica. Debido a que existían ecuaciones para geometrías conocidas, se realizaron algunas equivalencias entre cualquier tipo de electrodo y estas geometrías conocidas, con el fin de conocer los valores de resistencia de puesta a tierra. Los análisis que se habían realizado, únicamente tenían en cuenta la geometría de los electrodos y las equivalencias eléctricas.

Posteriormente se desarrolló el análisis de las puestas a tierra en baja frecuencia con base en la teoría electromagnética [44], [45], con lo que se inician los estudios con parámetros distribuidos y se empiezan a hacer diferentes aproximaciones e interpretaciones al modelo, tales como [46]:

1. Se consideraban los electrodos como conductores lineales enterrados cerca de la superficie del terreno.
2. El terreno se representaba como un medio homogéneo, caracterizado por su resistividad.
3. Se despreciaba el tiempo de propagación de ondas. La obtención de las diferentes ecuaciones empezaba con el análisis del campo eléctrico y derivado de este el potencial en un punto del espacio por la influencia de un punto fuente de corriente.

Posteriormente y dada la aproximación de conductores rectos, se analiza un conductor como una sucesión infinita de fuentes puntuales y se calcula el potencial en un punto en el espacio [47], [48], [49]. La frontera aire-tierra era modelada a partir de la teoría de imágenes [47], [50], por lo cual en el aire existía una sucesión infinita de fuentes puntuales imagen a una distancia del terreno igual a la profundidad del conductor.

El método para obtener el valor de la resistencia de puesta a tierra a partir de esta metodología, consiste en determinar el valor del potencial sobre la superficie del conductor (se asume constante a lo largo de los electrodos [51]), debido a las fuentes de corriente puntuales ubicadas sobre todos los electrodos, inclusive sobre el conductor de cálculo del potencial, para obtener la distribución real de corrientes en los electrodos [49], [52]. A partir del valor del potencial calculado y de la corriente inyectada, se obtiene el valor de la resistencia a tierra como el cociente de ellos dos. Debido a que computacionalmente no es posible calcular el valor de infinitas fuentes de corriente, los conductores son divididos en segmentos

y se asume que sobre cada segmento la densidad de corriente es constante pero varia de un segmento a otro [47], [49], [53], [54], [55].

Este método tiene muchas ventajas sobre las ecuaciones analíticas obtenidas anteriormente, debido a que permite analizar cualquier configuración de electrodos enterrados, es posible implementarlo en programas de computador que agilicen el cálculo y se pueden tener diferentes alternativas de solución para un diseño. Adicionalmente se pueden calcular los potenciales en cualquier punto sobre la superficie del terreno y calcular las tensiones de paso y de contacto que soportaría una persona [56]. Entonces ahora el problema era dar una mejor interpretación al modelo del terreno.

Si bien en la actualidad el diseño de la red de puesta a tierra se fundamenta en criterios de protección a personas y animales [57], y estos criterios consideran únicamente el comportamiento de la red de puesta a tierra en régimen permanente, cada día se hace más notoria la necesidad de evaluar la respuesta de estos sistemas ante perturbaciones transitorias de alta frecuencia. Aun cuando las energías involucradas en los períodos transitorios no afectasen a los seres humanos o a los animales que se encuentran en las cercanías de una red de puesta a tierra, su consideración es importante, ya que los efectos de estas excitaciones pueden repercutir desfavorablemente en la protección de los equipos de la subestación y en los sistemas de comunicaciones, protección y control [58].

CAPÍTULO 2. Justificación Teórica de los Modelos de Electrodo de Puesta a Tierra.

Modelación en ATP

2.1 Importancia de la implementación de los sistemas de puesta a tierra

Los sistemas de aterramiento tienen múltiples propósitos. No solamente aseguran un punto de referencia de potencial para los equipos tanto eléctricos como electrónicos, sino que también 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. Si un circuito equivalente aproximado es adoptado estos procedimientos pueden ser implementados en un modelo de simulación. En este capítulo se hará referencia a la modelación de las redes de puesta a tierra en el ATP

2.2 Comportamiento Dinámico de los Sistemas de Puesta a Tierra

El comportamiento de sistemas de aterramiento simples o complejos afectados por descargas eléctricas difiere considerablemente del mismo a baja frecuencia y a corrientes pequeñas, el comportamiento inductivo puede convertirse mucho más importante con respecto al resistivo, además, estas corrientes pueden generar una ionización del suelo (lo cual hace la respuesta de impulso no lineal).

El estado estable de los sistemas de aterramiento es bien conocido [64], [65] sin embargo, la respuesta transitoria es un problema más complejo debido a los múltiples factores que influyen en el comportamiento de los mismos. La simulación del comportamiento transitorio de los sistemas aterrados puede ser llevada a cabo por modelos basados principalmente en la teoría de circuitos.

Los parámetros eléctricos del terreno en el cual se desea obtener el comportamiento transitorio de una puesta a tierra son valores necesarios y decisivos en el momento de realizar los análisis. Los parámetros eléctricos que se tienen en cuenta en las ecuaciones son la resistividad ρ , la permitividad ϵ y la permeabilidad μ del terreno. En la literatura se encuentran algunos estudios en los que se ha realizado pruebas de laboratorio con el propósito de obtener los valores de estos parámetros. [66], [67]. En algunos de estos estudios se menciona que el valor de permeabilidad μ del terreno es muy cercano al valor de permeabilidad del espacio vacío μ_0 y se presentan valores para las otras dos variables. En algunos trabajos el terreno se clasifica como terreno húmedo y terreno seco, los cuales presentan valores constantes de resistividad y permitividad. Estudios más profundos en esta temática han demostrado que estos dos parámetros varían con la frecuencia de la señal de excitación [68].

En algunos casos dichas variaciones son aproximadas a ecuaciones que dependen del valor de resistividad medida a baja frecuencia (100Hz), tanto para el valor de resistividad como para el valor de permitividad. Un factor que es común en los estudios que consideran los parámetros constantes o variantes con la frecuencia, es que el terreno presenta las mismas condiciones en cualquier punto del espacio, es decir presentan homogeneidad.

2.2.1 Principios. Electrodo Vertical

Las corrientes de impulso son generalmente modeladas matemáticamente por una función exponencial doble (figura 2.2.1.1).

$$i(t) = I_0 \cdot (e^{-at} - e^{-bt}) \quad (1)$$

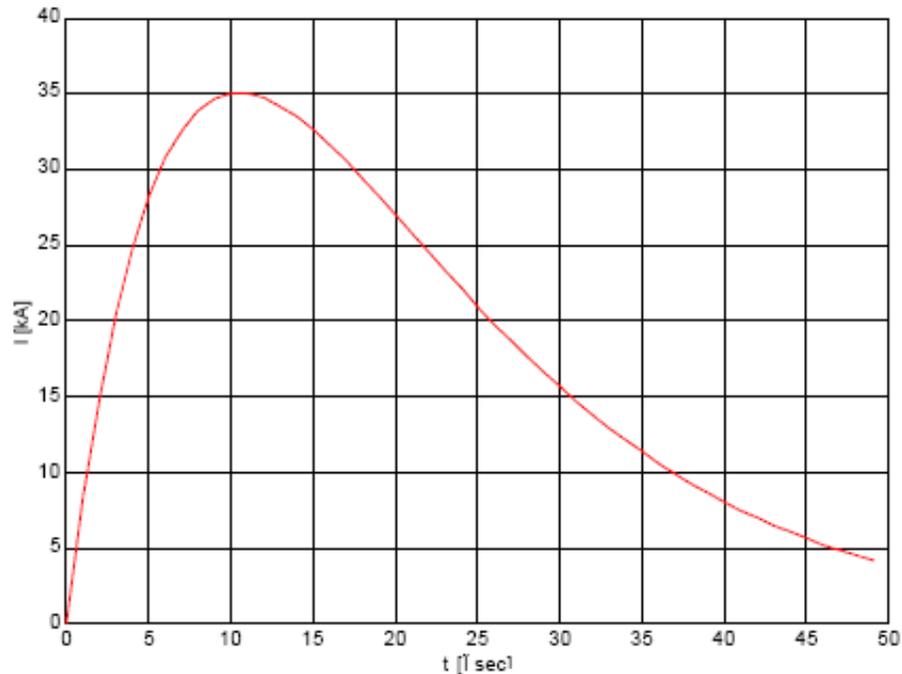


Fig. 2.2.1.1. Forma de onda típica de la corriente matemáticamente simulada por una función exponencial doble.

En el ATP esta corriente se obtiene a través de una fuente que genera una onda de impulso como se muestra a continuación en la figura 2.2.1.2.

La figura 2.2.1.3 muestra los datos a ingresar en la fuente tales como la amplitud máxima de corriente, y los tiempos de frente (T_f) y de cola (τ) de la onda de corriente mencionada anteriormente.

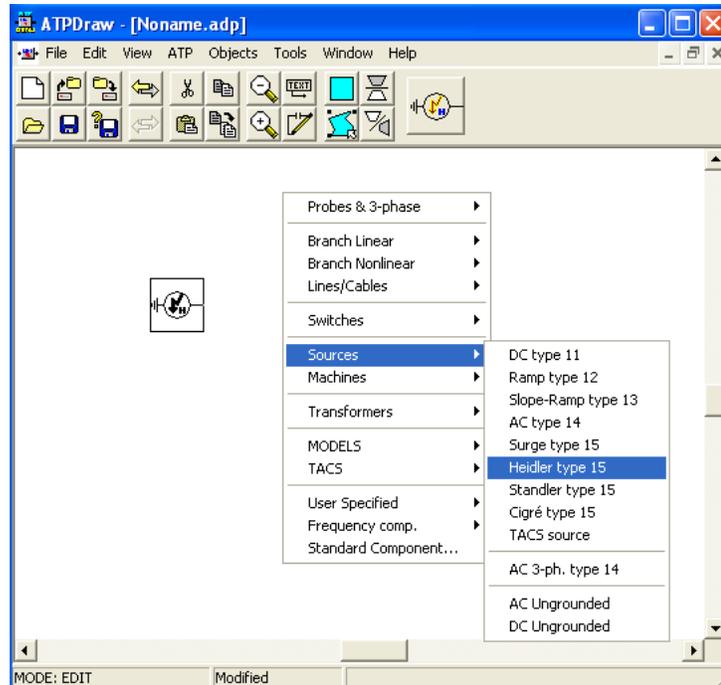


Fig. 2.2.1.2. Modelación de una fuente generadora de una corriente de impulso equivalente a una función exponencial doble.

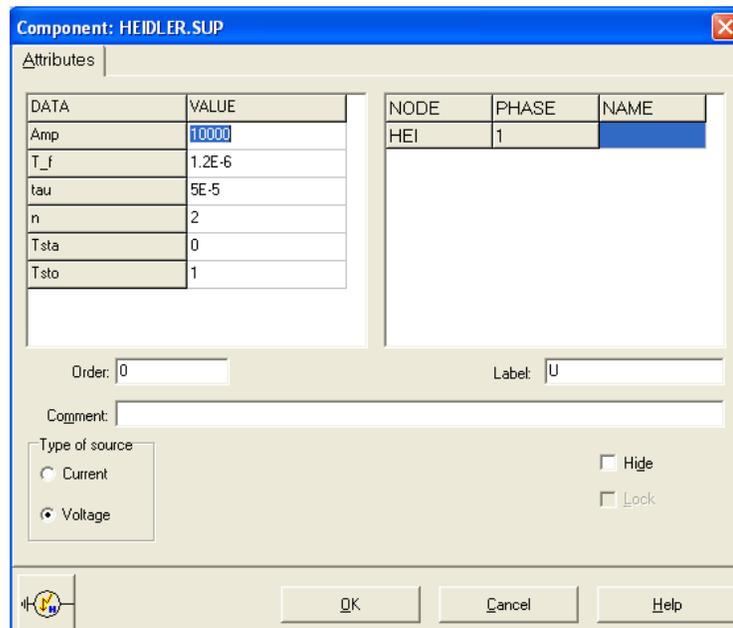


Fig. 2.2.1.3. Fuente generadora de una corriente de impulso

Un sistema simple de puesta a tierra formado por un sólo electrodo vertical se grafica en las Fig. 2.2.1.4 y 2.2.1.5.

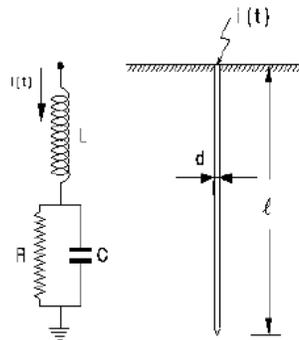


Fig. 2.2.1.4. Circuito equivalente de un electrodo vertical

En esta figura un modelo con solo el componente resistivo se muestra en (a) y en (b); y un modelo con las tres componentes (resistiva, inductiva, y capacitiva); esta mostrará una mejor respuesta a altas frecuencias.

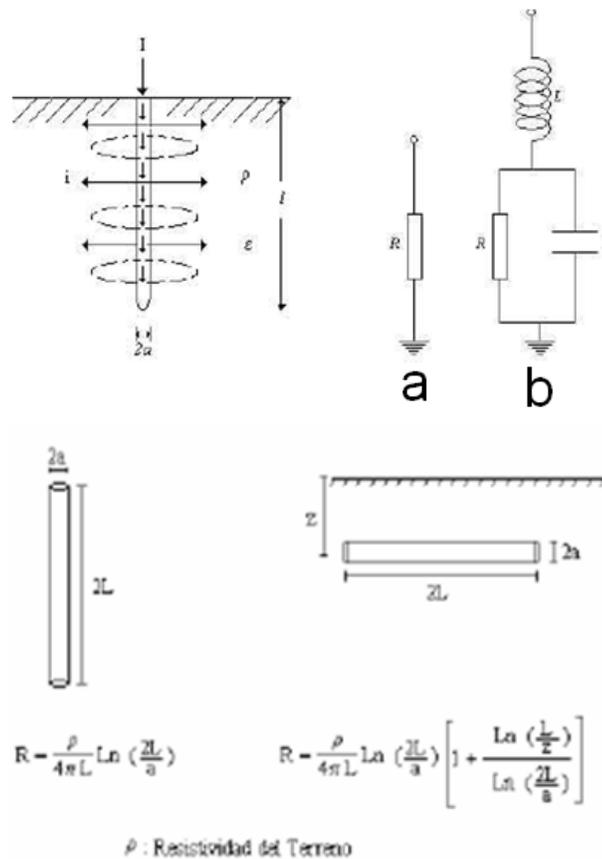


Fig. 2.2.1.5. Modelo de electrodos verticales de puesta a tierra

Circuitalmente en el ATP el electrodo vertical se modela tal y como lo vemos en la figura 2.2.1.6, en las figuras 2.2.1.7 y 2.2.1.8 se muestra la variación de la tensión en el tiempo para este electrodo.

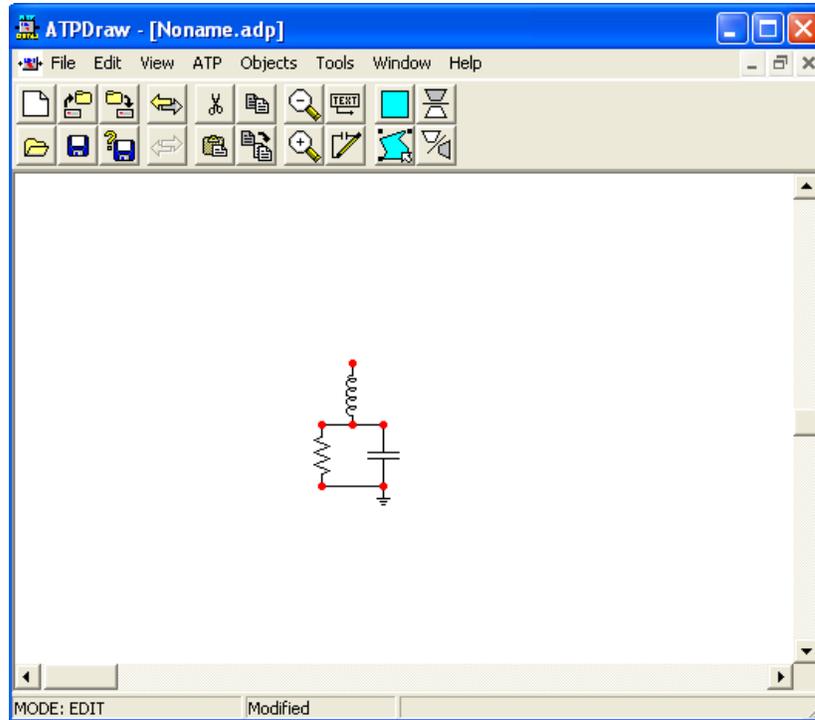


Fig. 2.2.1.6. Electrodo vertical en el ATP

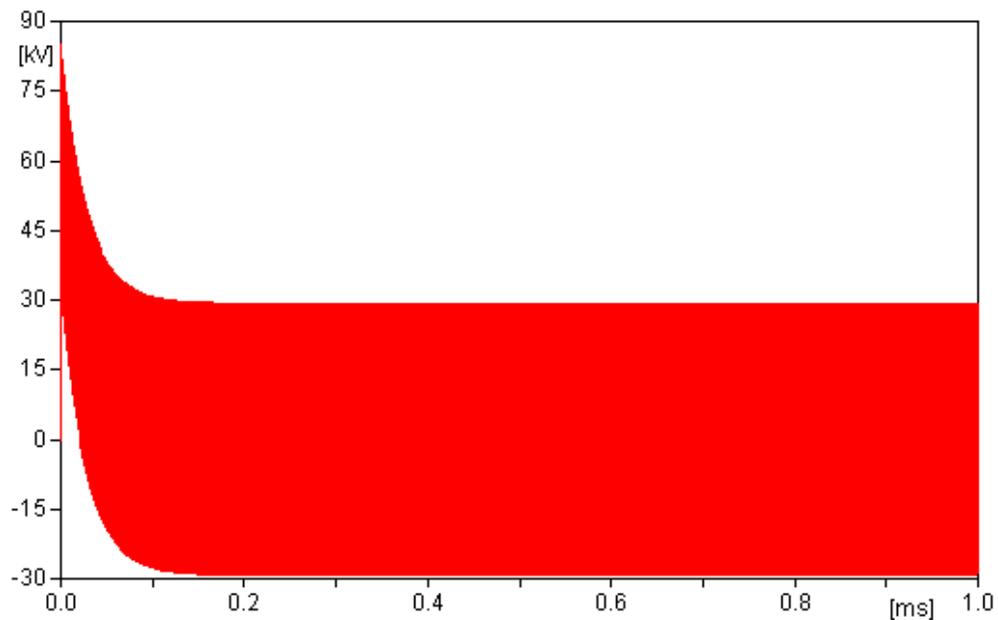


Fig. 2.2.1.7 Tensión en el tiempo para un electrodo vertical simple

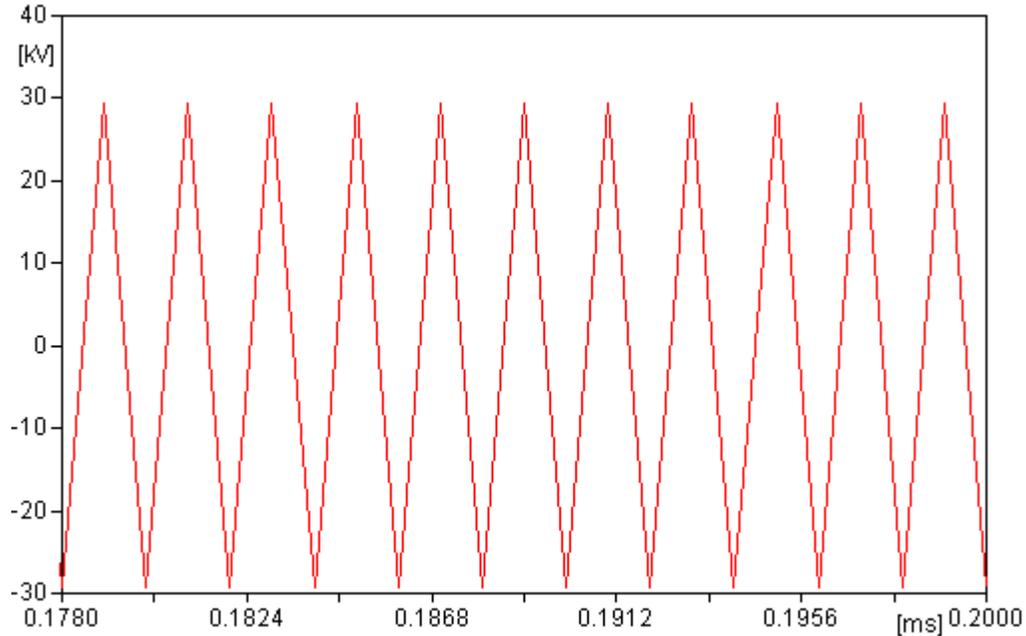


Fig. 2.2.1.8 Tensión en el tiempo para un electrodo vertical simple

Cada uno de los elementos que conforman el electrodo vertical presenta sus valores propios determinados por las ecuaciones (8), (9) y (10).

Cuando una señal de corriente de un alto valor (di/dt) es aplicada a un electrodo aterrado, en primera instancia el valor de la impedancia del electrodo tiene el mismo valor que su impedancia de impulso. Dependiendo de los valores de los parámetros de inductancia (L) y capacitancia (C), este valor puede ser elevado. Por esta razón es importante tener en cuenta la respuesta transitoria del sistema de puesta a tierra, porque el aumento de la tensión en los primeros momentos de la transición puede provocar una falla y la interrupción del servicio con sus costos derivados.

Cuando este sistema es impactado por una corriente de impulso parece tener una baja resistencia a tierra con su valor decreciendo exponencialmente hasta alcanzar el estado estable. La ecuación diferencial que describe la diferencia de potencial entre el punto de impacto y la tierra de referencia es:

$$u(t) = R \cdot i_R + L \cdot \frac{di}{dt} \quad (2)$$

Por tanto la diferencia de potencial expresada en el dominio de la frecuencia es:

$$u(s) = \left[\frac{1}{C \cdot (s+a) \cdot (s+\tau)} \right] - \left[\frac{1}{C \cdot (s+b) \cdot (s+\tau)} + \left(\frac{L \cdot s}{s+a} - \frac{L \cdot s}{s+b} \right) \right] \quad (3)$$

Donde

$$\tau = \frac{1}{R \cdot C} \quad (4)$$

Aplicando la transformada inversa de Laplace obtenemos la expresión en el dominio del tiempo:

$$u(t) = I_0 \cdot R \cdot \left[\tau \cdot \frac{e^{-\tau t} \cdot (b-a)}{(\tau-a) \cdot (\tau-b)} \right] + I_0 \cdot R \cdot \left[\tau \cdot \frac{e^{-a t} \cdot (\tau-b) - e^{-b t} \cdot (\tau-a)}{(\tau-a) \cdot (\tau-b)} \right] + I_0 \cdot L \cdot (b \cdot e^{-b t} - a \cdot e^{-a t}) \quad (5)$$

La impedancia de impulso está definida como la relación de la tensión de impulso (Eq.7) entre la corriente de impulso (Eq.1):

$$z(t) = \frac{u(t)}{i(t)} \quad (6)$$

La ecuación matemática que describe el comportamiento de un sistema específico se deriva del análisis del circuito considerando los elementos como compuestos y es el siguiente:

$$z(t) = R \cdot \left[\tau \cdot \frac{(\tau-b) \cdot e^{-a t} - (\tau-a) \cdot e^{-b t}}{(\tau-a) \cdot (\tau-b) \cdot (e^{-a t} - e^{-b t})} \right] + R \cdot \left[\frac{(b-a)}{(\tau-a) \cdot (\tau-b)} \cdot \frac{e^{-t \cdot \tau}}{e^{-a t} - e^{-b t}} \right] + L \cdot \left[\frac{b \cdot e^{-b t} - a \cdot e^{-a t}}{e^{-a t} - e^{-b t}} \right] \quad (7)$$

La resistencia fija de un electrodo está dada por la siguiente fórmula, asumiendo una corriente uniforme a lo largo de su longitud: [69]

$$R = \frac{\rho}{4 \cdot \pi \cdot \ell} \left[\ln \left(\frac{2 \cdot \ell}{d} \right) - 1 \right] \quad (8)$$

La capacitancia de un electrodo está dada por la fórmula [70]:

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \ell}{\ln\left(\frac{4 \cdot \ell}{d}\right)} \quad (9)$$

La inductancia de un electrodo está dada por [70]:

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

Donde:

ρ es la resistividad del terreno

ℓ es la longitud del electrodo

d es el diámetro del electrodo

ε_0 Constante dieléctrica del vacío

ε_r Constante dieléctrica relativa del suelo la cual varía entre 4 y 70 (4 para suelo seco, 9 para suelo húmedo ordinario y 70 para agua destilada)

2.2.2 Dos o tres electrodos verticales

Otro sistema de aterramiento simple de uso común, está conformado por tres varillas verticales como se muestra en la Fig. 2.2.2.1

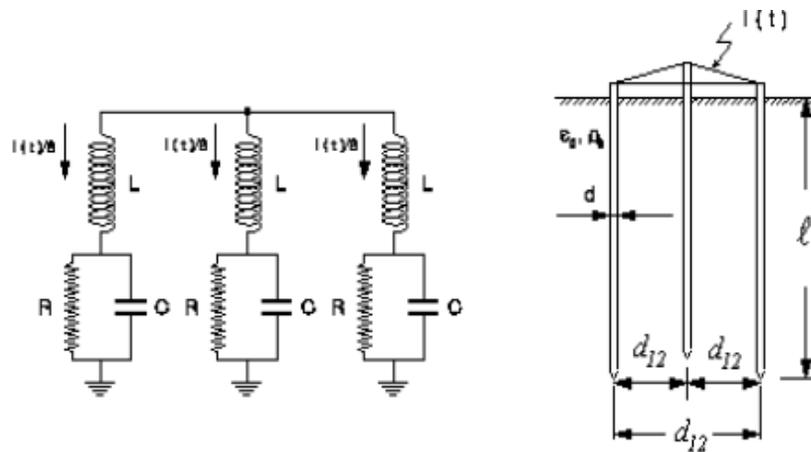


Fig. 2.2.2.1. Circuito equivalente de tres electrodos verticales constituido por elementos compuestos

Cuando el sistema mencionado anteriormente es impactado por una corriente de impulso parece tener una baja resistencia de puesta a tierra con un valor que decrece exponencialmente hasta alcanzar el estado estable. La ecuación matemática que describe el comportamiento de un sistema constituido por 3 electrodos verticales paralelos sale del análisis del circuito considerando los elementos como compuestos en el orden exacto que se muestra en la figura.2.2.2.1. Dados a continuación:

$$z(t) = \frac{R}{3} \cdot \left[\tau \cdot \frac{(\tau - b) \cdot e^{-a\tau} - (\tau - a) \cdot e^{-b\tau}}{(\tau - a) \cdot (\tau - b) \cdot (e^{-a\tau} - e^{-b\tau})} \right] + \frac{R}{3} \cdot \left[\frac{(b - a)}{(\tau - a) \cdot (\tau - b)} \cdot \frac{e^{-\tau}}{e^{-a\tau} - e^{-b\tau}} \right] + \frac{L}{3} \cdot \left[\frac{b \cdot e^{-b\tau} - a \cdot e^{-a\tau}}{e^{-a\tau} - e^{-b\tau}} \right] \quad (11)$$

La resistencia estacionaria de cada electrodo está dada por la fórmula [69]:

$$R = \frac{\rho}{4 \cdot \pi \cdot \ell} \cdot \left[\ln \left(\frac{32 \cdot \ell^2}{d \cdot d_{12}} \right) - 2 + \frac{d_{12}}{2 \cdot \ell} - \frac{d_{12}^2}{16 \cdot \ell^2} \right] \quad (12)$$

La capacitancia de cada electrodo con las tres varillas a la misma distancia entre ellas, está dada por [70]:

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \ell}{\ln \left(\frac{d_{12}}{d} \right)} \quad (13)$$

La inductancia de cada varilla, incluyendo la inductancia mutua, está dada por la siguiente fórmula [70]:

$$L = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot \ell \cdot \left[\ln \left(\frac{1}{r} \right) + \ln(d_{12}) \right] \quad (14)$$

Donde:

r es el radio del electrodo,

d_{12} es la distancia entre cada uno de los dos electrodos y $r' = 0.7788 \cdot r$ es el radio equivalente.

En la fórmula 14 el radio equivalente r' es usado para tener en cuenta la ionización del suelo.

2.3 Modelación en ATP de Electrodo de Puesta a Tierra.

El desarrollo de los modelos de los sistemas de puesta a tierra está enfocado a obtener mayor precisión con modelos más simples. Pero la exactitud de los modelos depende del rango de frecuencia que se estudie. La mayor precisión de los modelos se obtiene con la solución de las ecuaciones electromagnéticas para las diferentes configuraciones de los electrodos [27]. En este caso el problema se manifiesta a través del potencial retardado.

Esta solución es la más exacta porque cubre todo el rango de frecuencia, pero requiere un gran esfuerzo para el cálculo. Otra tendencia está dirigida a modelar los electrodos a tierra usando el modelo de transmisión de líneas [27], [35]. En este caso el régimen de puesta a tierra es modelado a través de circuitos Pi o utilizando la teoría de la trayectoria de onda desarrollada por Bergeron usando el elemento finito, método que ofrece una buena exactitud al resolver las ecuaciones de Maxwell. El modelo obtenido se utiliza para observar su respuesta transitoria y cómo ésta es afectada por las características del terreno y la geometría del régimen de puesta a tierra.

2.3.1 Descripción

Para darle solución al problema, se asume el electrodo de aterramiento como una línea de transmisión con pérdidas y los parámetros del circuito Pi se van a obtener resolviendo las ecuaciones de Maxwell asumiendo lo siguiente:

- El terreno se considera uniforme
- Las características del terreno como la resistividad ρ_s , Permitividad dieléctrica ϵ_s y la permeabilidad magnética μ_s son consideradas constantes.

Los parámetros necesarios para modelar el circuito (figura 2.3.1.1) son:

- r , resistencia por unidad de longitud (Ω/m).
- L , inductancia por unidad de longitud (H/m).
- g , conductancia por unidad de longitud (S/m).
- C , capacitancia por unidad de longitud (F/m).

Los parámetros inductancia (L), capacitancia (C), y conductancia (g) dependen de la geometría del electrodo y de las características del terreno.

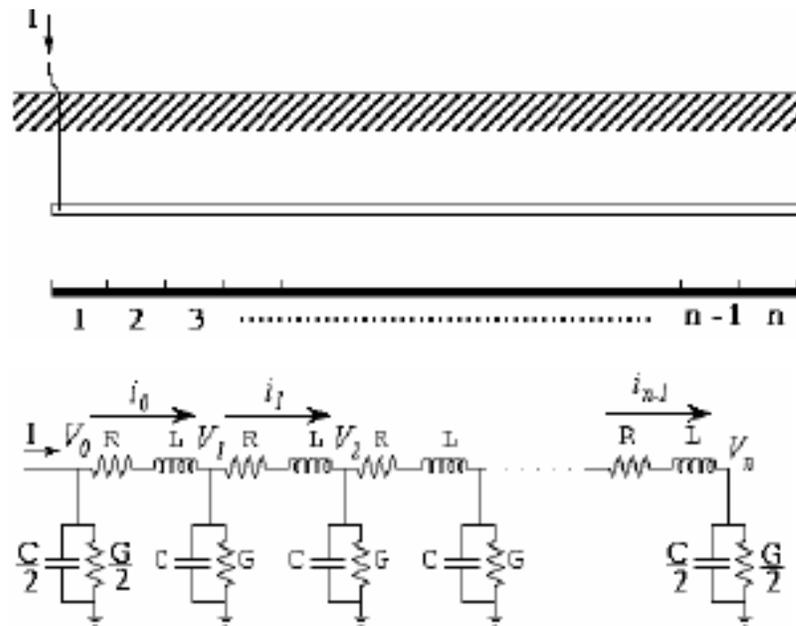


Fig. 2.3.1.1. Modelo del circuito usado para simular un electrodo horizontal.

En la figura 2.3.1.1 se establece una similitud entre el modelo de un electrodo en el ATP y un electrodo como un conductor recto cuya longitud está determinada por segmentos. La respuesta transitoria de los modelos se obtuvo implementando el circuito en el ATP.

En el ATP el modelo circuital de un electrodo horizontal es el siguiente:

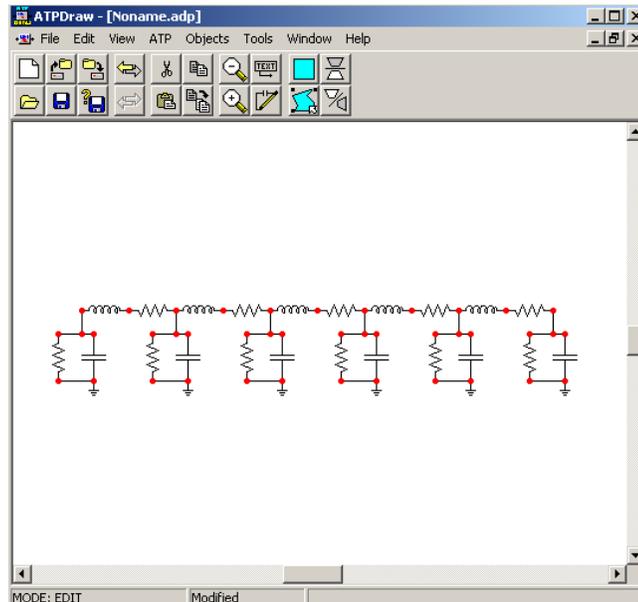


Fig.2.3.1.2 Modelo conformado por circuitos Pi representa un conductor horizontal de 10m de longitud con un radio $r=7\text{mm}$.

2.3.2 Fundamentación Matemática de los Parámetros del Circuito.

Las ecuaciones de Maxwell se utilizan para calcular campos eléctricos o magnéticos. Pero cuando la interacción entre campos y el medio es compleja, como en el terreno, es muy difícil obtener una solución analítica de las ecuaciones de Maxwell. Generalmente son usados métodos alternativos [8].

- Resistencia serie por unidad de longitud del conductor R .

La resistencia serie se calculó usando la siguiente ecuación:

$$R = \frac{\rho_l}{\pi \cdot r^2} \quad [15]$$

Donde:

R =resistencia serie del conductor por unidad de longitud.

ρ_l =resistividad del conductor.

r =radio del conductor

- Capacitancia del conductor (C), Conductancia (G) e Inductancia (L) por unidad del longitud.

Tradicionalmente [12, 13], los parámetros del circuito mostrado en la figura 2.3.1.1 son calculados usando métodos matemáticos que relacionan la conductancia y la capacitancia de un conductor cilíndrico y largo. Dando solución a las ecuaciones de Maxwell para un campo electromagnético estático, es posible calcular la capacitancia del régimen de puesta a tierra y para relacionar estos parámetros con otras tantas de interés usando las expresiones siguientes:

$$C = \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot W^{-1} \quad [16]$$

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} \cdot W^{-1} \quad [17]$$

$$G = \frac{\pi}{\rho_d} \quad [18]$$

$$W^{-1} = \ln\left(\frac{2 \cdot l}{\sqrt{2 \cdot r \cdot d}}\right) - 1 \quad [19]$$

Donde ρ_d es la resistividad del suelo, r es el radio del conductor, d es la profundidad de enterramiento, l es la longitud del electrodo, μ_0 es la permeabilidad de vacío y ε_0 es la permitividad de vacío.

Utilizando estas ecuaciones determinamos los parámetros de cada uno de los circuitos. Teniendo en cuenta las condiciones del terreno, datos de los conductores y características de la onda de corriente se conformaron los electrodos horizontales y verticales en el ATP, y haciendo grupos de estos las mallas de puesta a tierra. Midiendo tensión y corriente en los puntos de inyección de corriente a las redes y a través de una Ley de Ohm se pudieron determinar las resistencias de estado transitorio.

CAPÍTULO 3. Resultados y Comparaciones de Modelos de Redes de Puesta a Tierra

Las investigaciones y el cálculo de la respuesta transitoria de los sistemas aterrados constituyen una parte muy importante del problema de la incompatibilidad electromagnética en los sistemas de potencia. Muchos autores de todo el mundo han desarrollado los diferentes modelos de sistemas de puesta a tierra y aplicado métodos analíticos y numéricos para modelar y determinar la tensión en estado transitorio de los mismos.

En este capítulo usamos el ATP para modelar y calcular la tensión en estado transitorio de diferentes configuraciones de electrodos de puesta a tierra.

3.1 Diferentes configuraciones de electrodos.

3.1.1 Electrodo horizontal.

Los resultados mostrados en la figura. 3.1.1.1 representan un conductor horizontal de 100m de longitud, (fig. 3.1.1.2) con un radio de 1.5mm, resistividad del conductor $\rho_l = 0.25 \times 10^{-6} \Omega m$, profundidad de enterramiento $d = 0.6m$, resistividad del suelo $\rho_d = 20 \Omega m$, permitividad del suelo $\epsilon_r = 80$ con una corriente de impulso $i_s(t) = 1.55227(e^{-3640t} - e^{-652210t})$ (A), con un valor de permitividad y permeabilidad de vacío $\epsilon_0 = 8.854e-12$ y $\mu_0 = 4 * \pi * 10^{-7}$ respectivamente, donde se comprueba el potencial en puntos correspondientes a los 0, 2 y 10m de distancia del punto inicial.

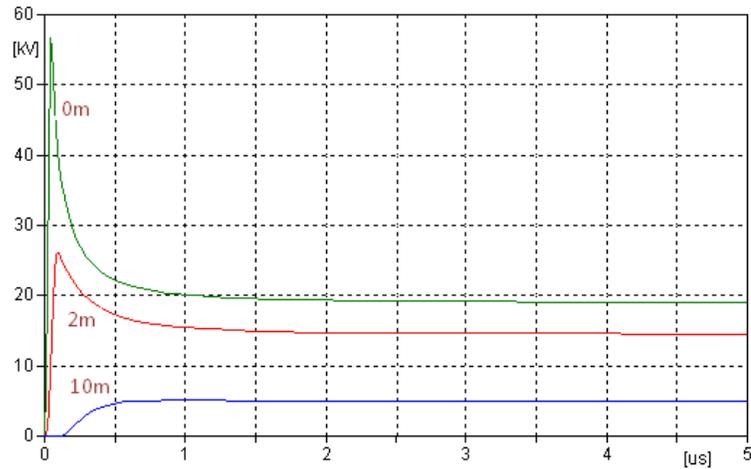


Fig.3.1.1.1 Forma de onda de la tensión en un conductor horizontal de 100m

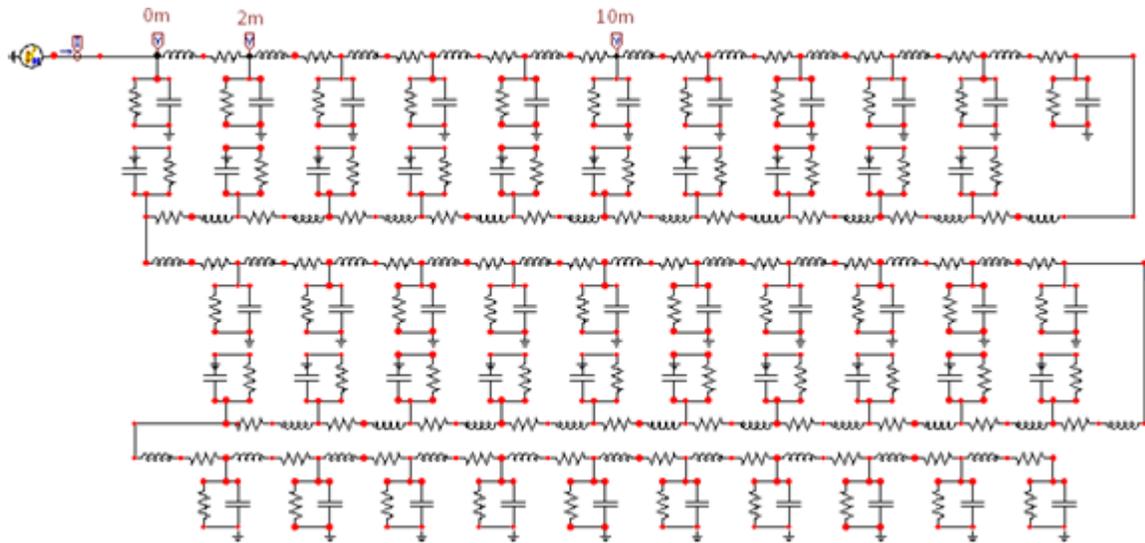


Fig. 3.1.1.2. Modelación en el ATP de un electrodo horizontal de 100m de longitud.

En el primer punto, al inicio del electrodo horizontal, la tensión alcanza un valor pico de más de 50kV y después se estabiliza, a medida que nos desplazamos a lo largo del electrodo el valor máximo de tensión va disminuyendo hasta que desaparece, para distancias de más de 10m se observa un aumento hasta alcanzar el valor de estabilidad. De este análisis se puede concluir que en la medida en que la onda de impulso avanza por el electrodo de tierra se va atenuando, hasta que llega al final del electrodo. Esto se debe a que la corriente

se va disipando en el terreno, además de verse afectada por la resistencia propia del electrodo y los efectos Corona y Pelicular.

En la figura 3.1.1.3 se muestra la variación de la impedancia a impulso de este electrodo en el tiempo, la cual crece inicialmente y luego se estabiliza como una función de la corriente inyectada al terreno.

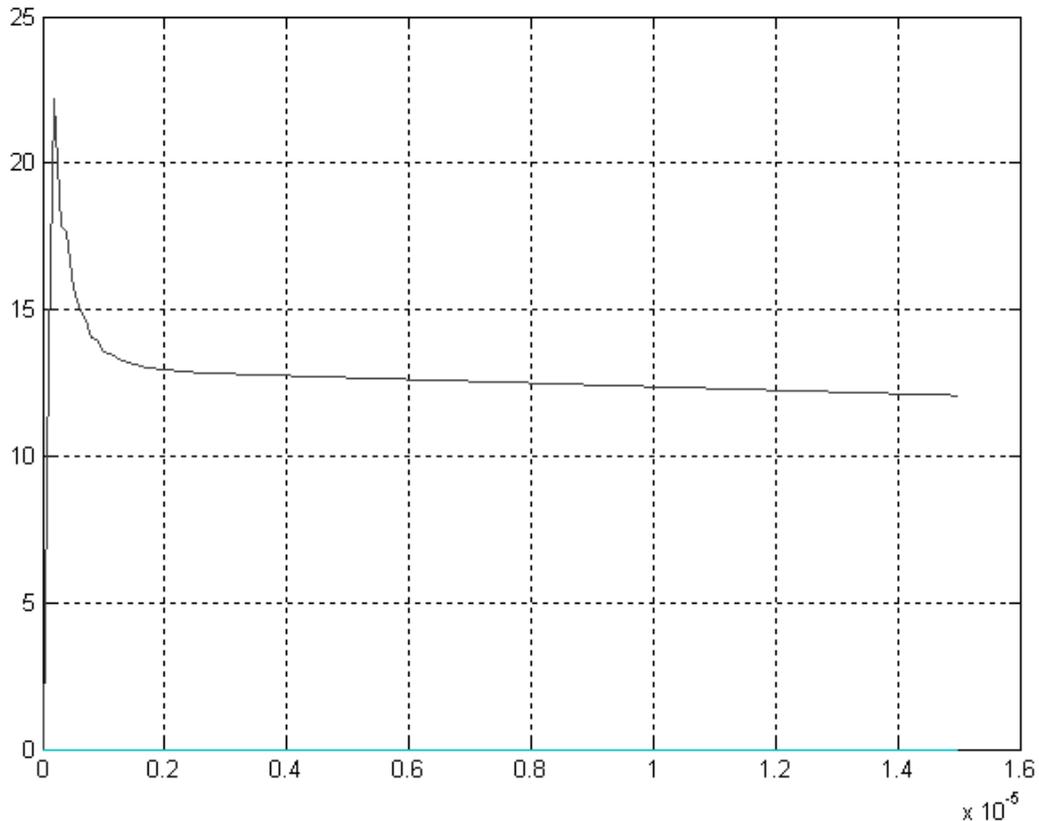


Figura 3.1.1.3 Variación de la impedancia a impulso de un electrodo horizontal.

3.1.2 Malla perimetral

Las figuras 3.1.2.1 y 3.1.2.2 que se muestran a continuación representan una malla perimetral $10 \times 10 \text{ m}^2$ compuesta por 4 electrodos horizontales con un radio $r=7\text{mm}$ y un valor de resistividad del conductor de $\rho_t = 0.25 \cdot 10^{-6}$, los parámetros del circuito fueron calculados para una resistividad del suelo $\rho d = 100$; con una permitividad $\epsilon_r = 36$ y para una profundidad de enterramiento de 0.6m. La corriente de impulso $i_s(t) = 10 \cdot (\exp(-14.3e3 \cdot t) - \exp(-54e5 \cdot t))$

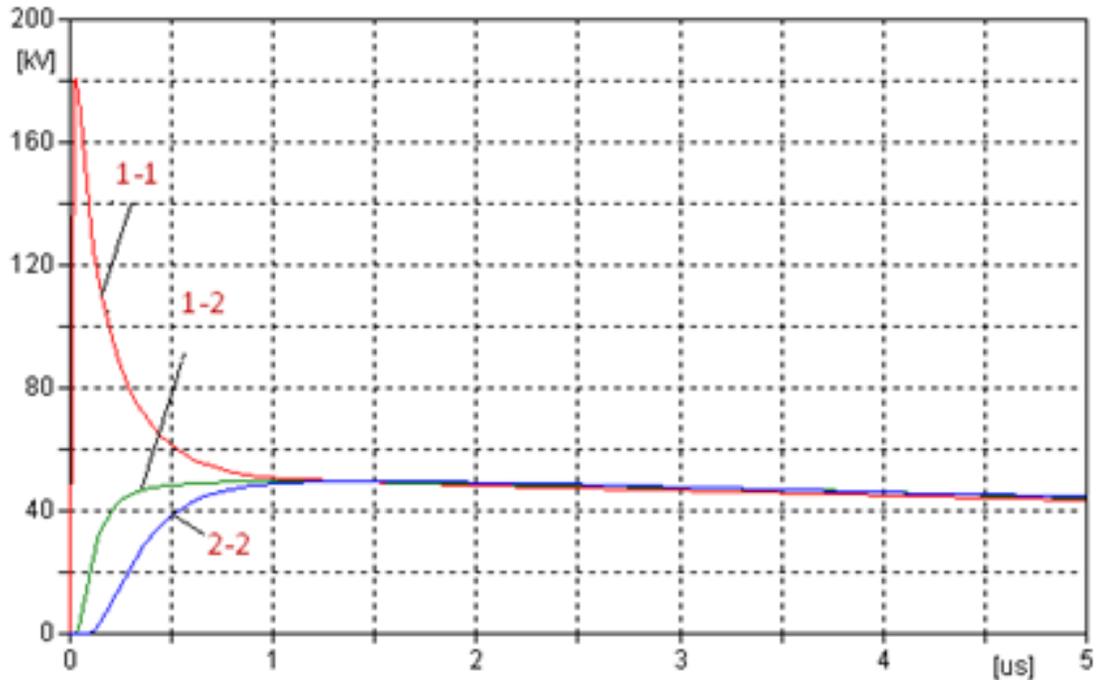


Fig. 3.1.2.1. Valores de tensión para una malla $10 \times 10 \text{m}^2$ sin electrodos verticales en los nodos 1-1, 1-2, 2-2.

Similar a lo que ocurre en el ejemplo anterior la primera onda de impulso se atenúa en la media que penetra en el sistema de puesta a tierra, por el contrario en los demás puntos la tensión aumenta hasta alcanzar un valor estable.

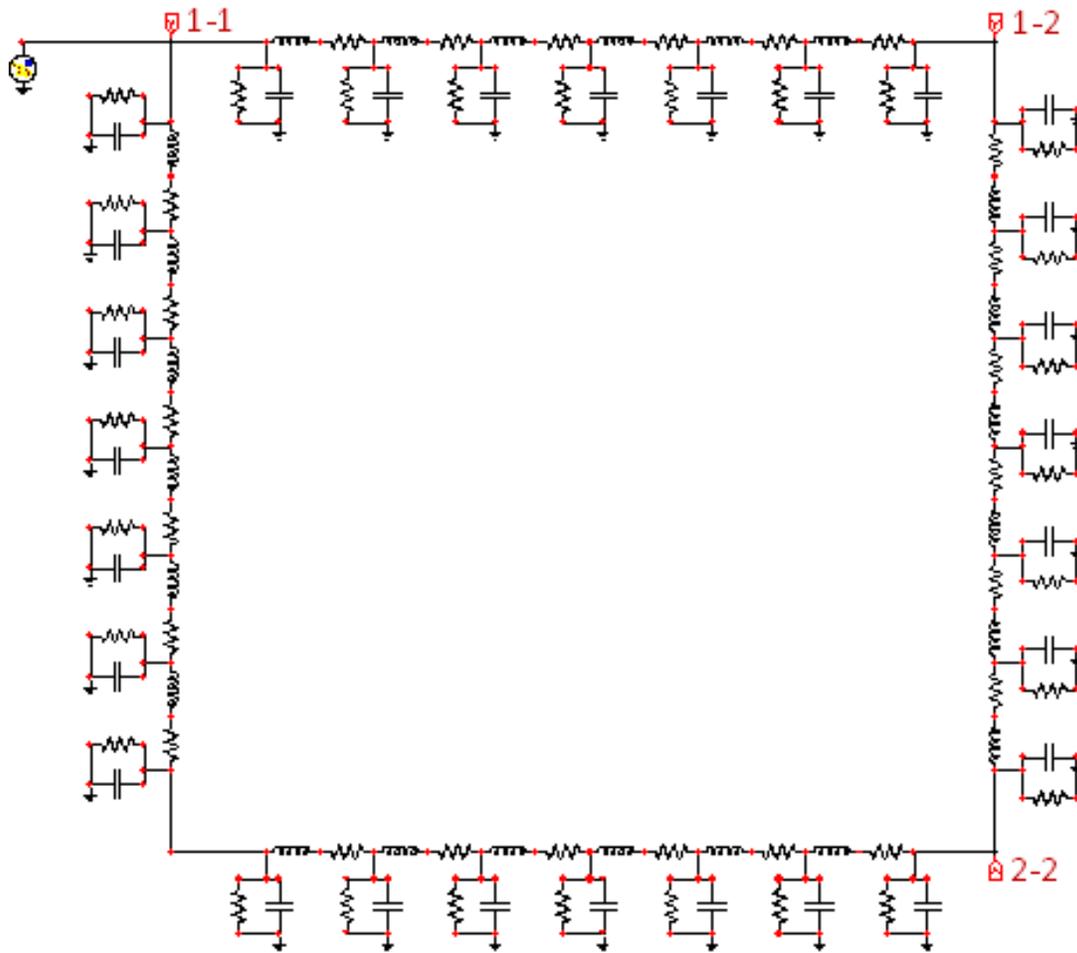


Fig. 3.1.2.2. Modelación de una malla de 10x10m² sin electrodos verticales.

La variación de la impedancia a impulso para esta configuración de electrodos en el tiempo se muestra en la figura 3.1.2.3, la cual de manera similar a la anterior crece inicialmente y luego se estabiliza como una función de la corriente inyectada al terreno.

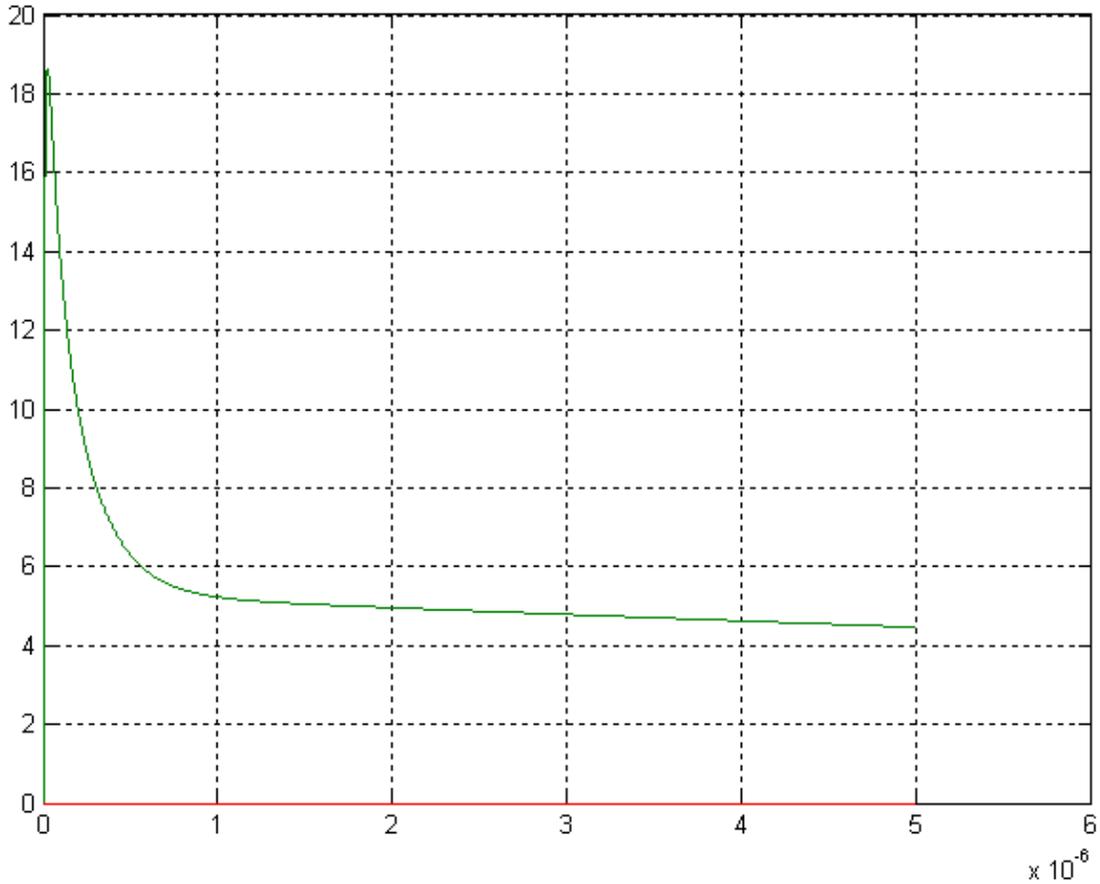


Figura 3.1.2.3 Variación de la impedancia a impulso de una malla perimétrica.

3.1.3. Malla de cuatro módulos.

Otro ejemplo de un sistema de puesta a tierra lo conforma la malla correspondiente a la figura 3.1.3.1 constituida por electrodos con un radio $r=7\text{mm}$, valor de resistividad del conductor de $\rho_t = 0.25 \cdot 10^{-6}$, resistividad del suelo $\rho_d = 100$; permitividad $\epsilon_r = 36$, una profundidad de enterramiento de 0.6m y una corriente de impulso $i_s(t) = 10 \cdot (\exp(-14.3e3 \cdot t) - \exp(-54e5 \cdot t))$. En este caso el valor máximo del potencial en el punto 1-1 (figura 3.1.3.1) coincide con el ejemplo anterior, pero tiende a estabilizarse a un menor valor de tensión.

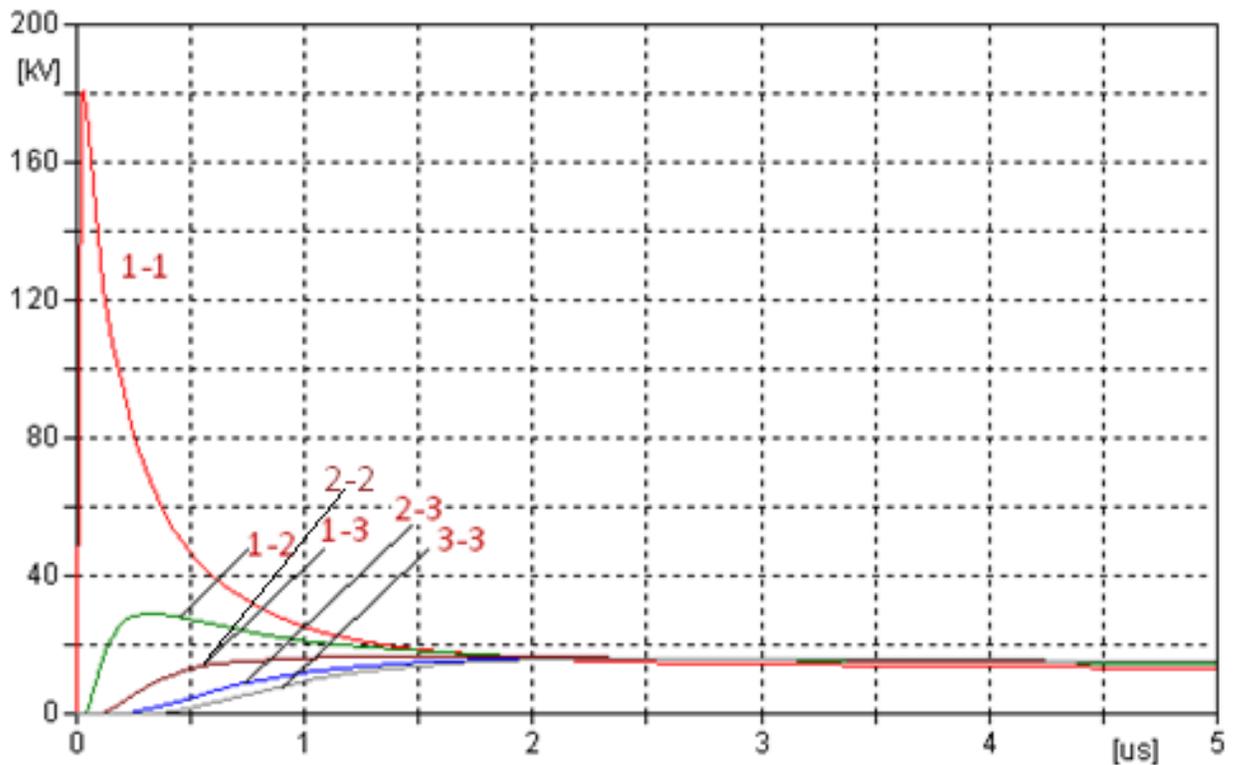


Fig. 3.1.3.1. Forma de onda que representa la variación de la tensión en el tiempo para una malla de cuatro módulos al inyectarle una corriente de impulso.

La tensión en 2-2 y 1-3 es la misma debido a que la corriente recorre la misma distancia pero en direcciones diferentes.

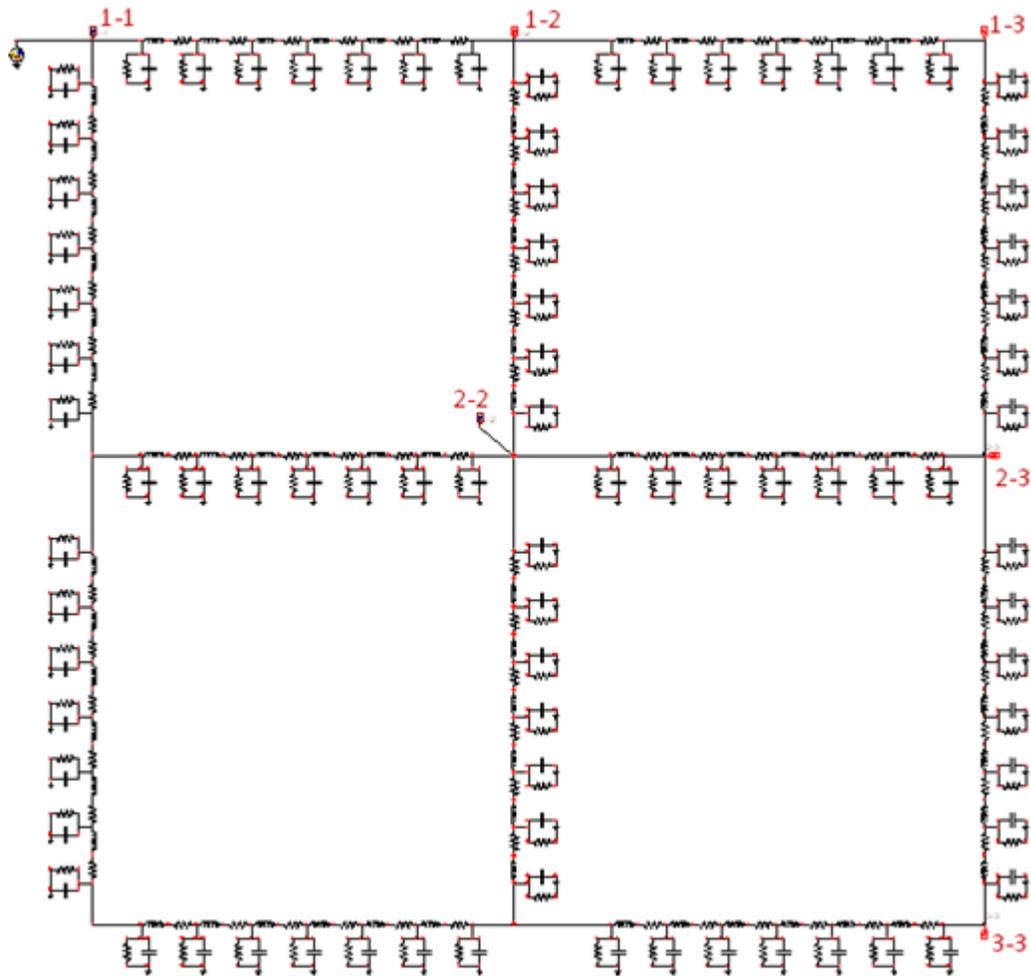


Fig.3.1.3.2. Malla de cuatro módulos (20x20m²) sin electrodos verticales.

En la figura 3.1.3.3 se muestra la variación de la impedancia de impulso para esta configuración de electrodos en el tiempo.

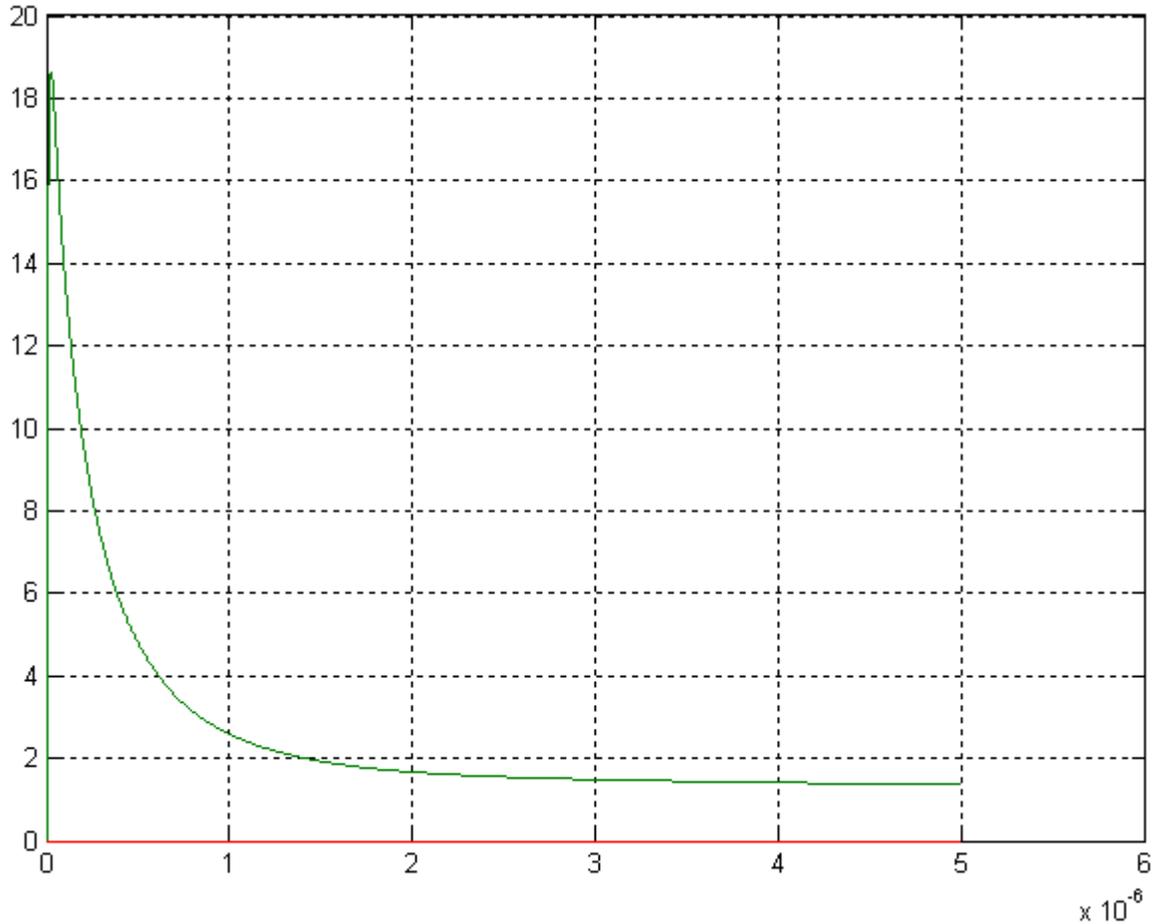


Figura 3.1.3.3 Variación de la impedancia a impulso. Malla de cuatro módulos.

3.2 Combinaciones de electrodos horizontales y verticales. Efectos del cambio del punto de inyección de corriente.

Cuando se añaden electrodos verticales en los extremos de la malla la tensión en los puntos indicados disminuye, de modo que la resistencia a impulso de la puesta a tierra se reduce haciendo más efectiva la malla. Los electrodos verticales utilizados tienen una longitud de 3m, con un diámetro de 20mm.

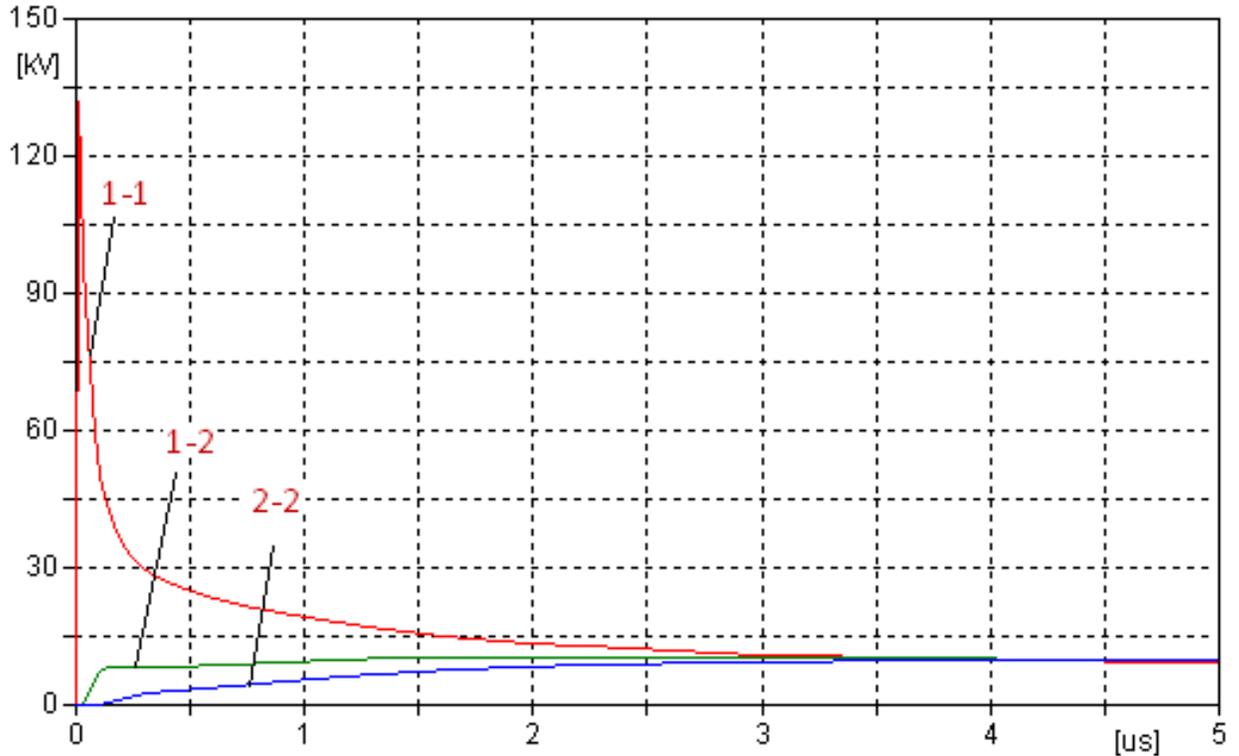


Fig.3.2.1 Variación de la tensión en una malla perimétrica de $10 \times 10 \text{m}^2$ con electrodos verticales en los extremos.

La figura 3.2.1 muestra las variaciones de tensión en los puntos 1-1, 1-2 y 2-2 de la figura 3.2.2, para la malla perimétrica de $10 \times 10 \text{m}^2$ con electrodos verticales colocados en sus extremos, durante un tiempo de 5 microsegundos. Al igual que en el epígrafe 3.1.2 la onda de tensión se atenúa en la medida en que penetra en la malla, pero de una manera más acentuada por el efecto de los electrodos verticales.

Para una malla de cuatro módulos también con electrodos verticales (figura 3.2.3 y 3.2.4) la tensión máxima es igual que en la figura 3.2.1 ubicado en el punto de inyección de corriente a la malla, sin embargo la tensión en los demás nodos disminuye considerablemente en comparación con estos mismos nodos de la malla perimétrica.

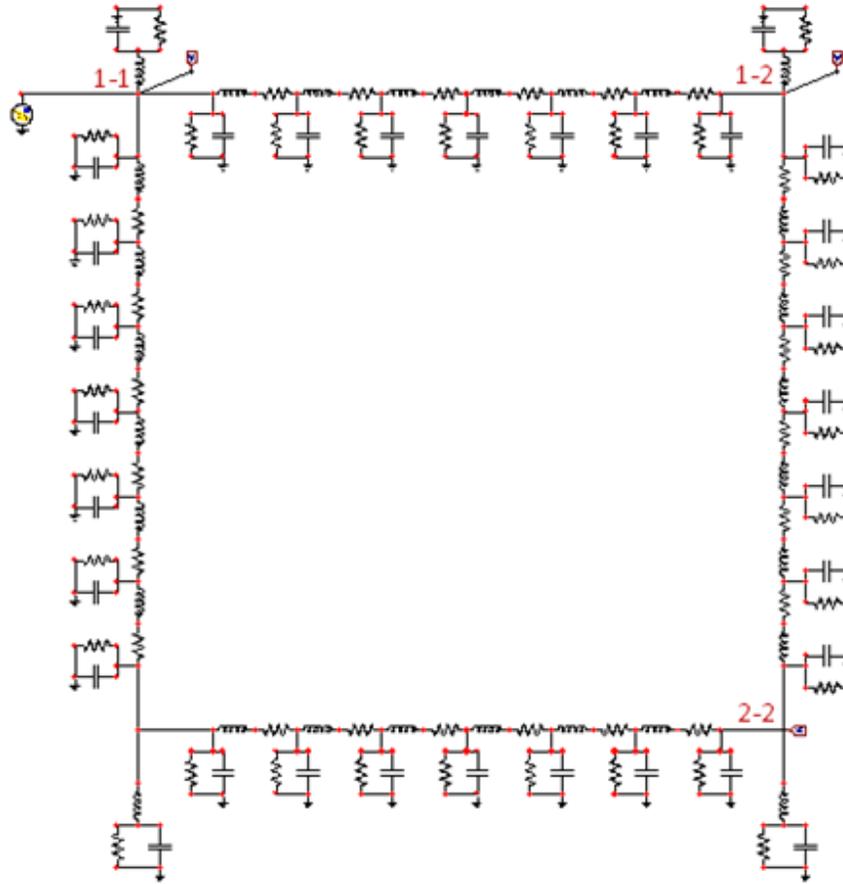


Fig.3.2.2. Malla 10x10m² con electrodos verticales.

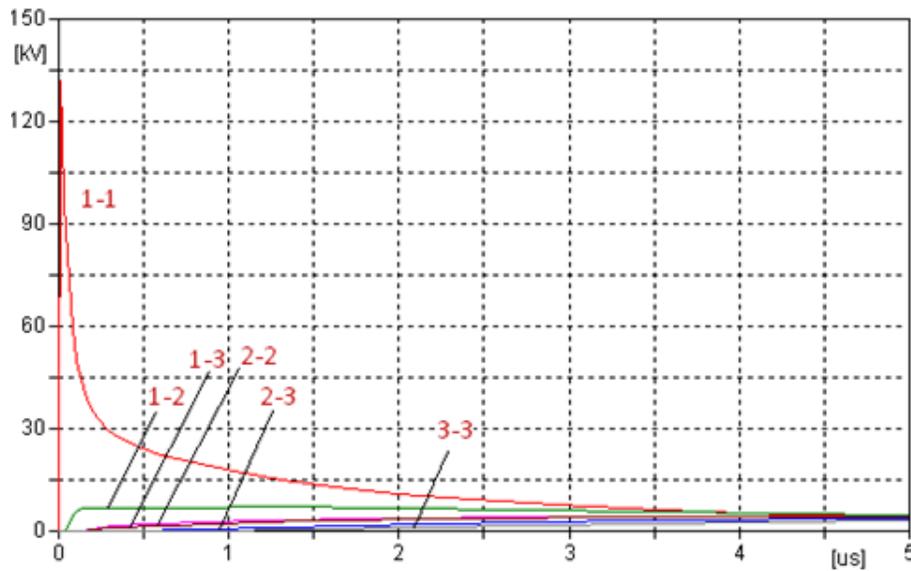


Fig.3.2.3. Variaciones de tensión en el tiempo para una malla de cuatro módulos con electrodos verticales.

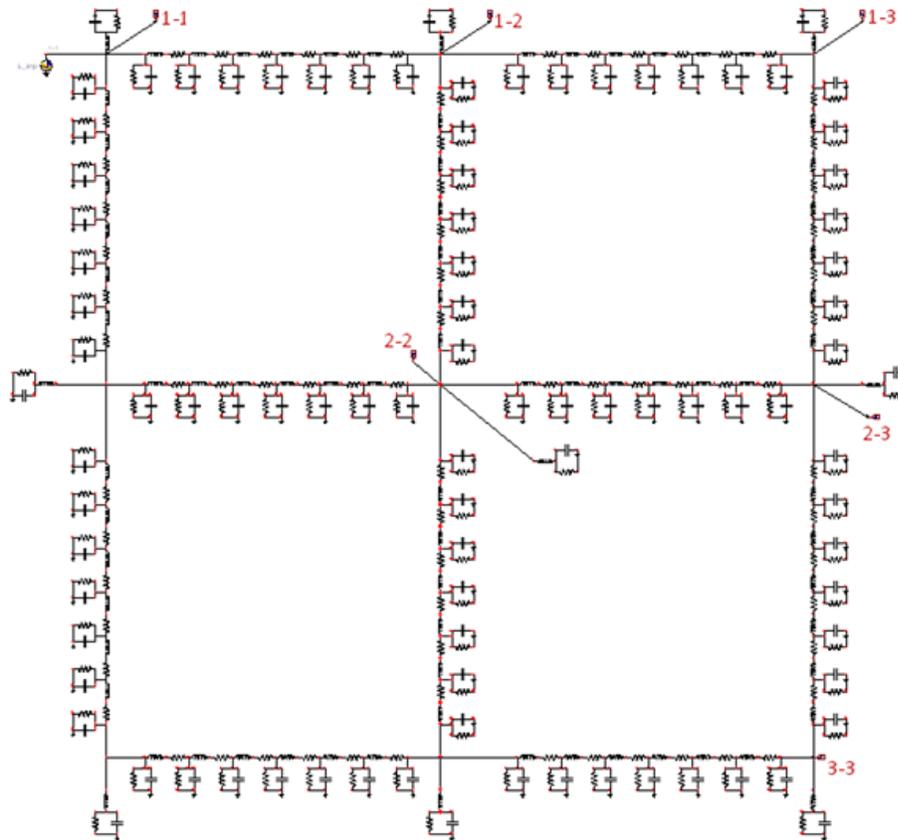


Fig.3.2.4. Malla de cuatro módulos de 20 x 20m² con electrodos verticales en los nodos de interconexión.

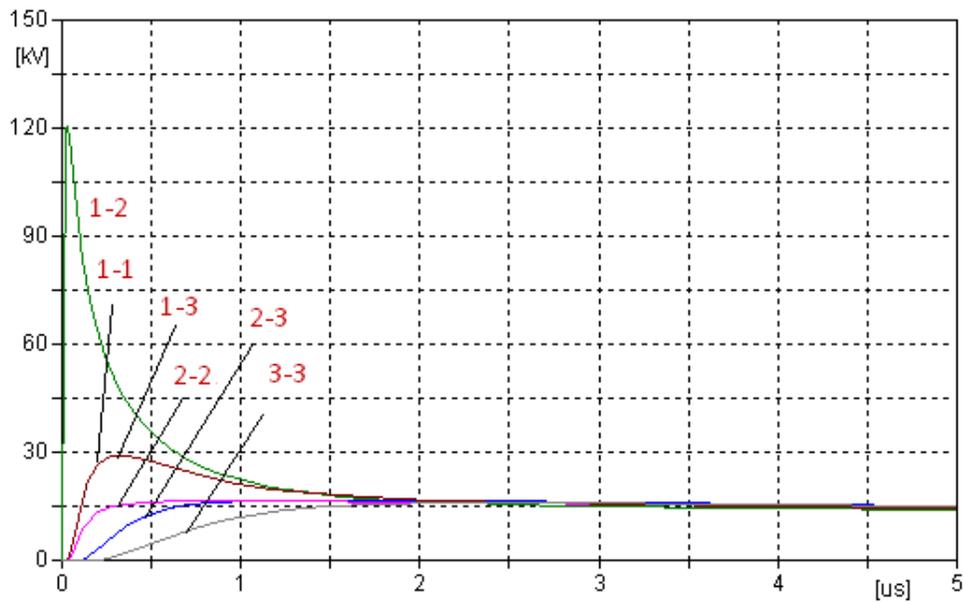


Fig.3.2.5 Variación de tensión en el tiempo para una malla de cuatro módulos de 20x20m² al cambiar el punto de inyección de corriente al nodo 1-2.

Si se cambia la posición del punto de inyección de corriente de la posición 1-1 a la posición 1-2 (figura 3.2.6), se produce una reducción en la magnitud de la tensión máxima (Figura 3.2.5) en comparación con la de la figura 3.1.3.1 de 180kV a 120kV. Esto se debe a que la onda de corriente inyectada se divide entre tres ramas de electodos, lo que implica que la onda de corriente vea una menor impedancia a impulso.

Si el punto de inyección se cambia a la posición 1-3, el comportamiento es el mismo que se produce en el nodo 1-1, ver figuras 3.2.7 y 3.2.8. Al cambiarlo al nodo 2-3, el comportamiento es el mismo que se produce en el nodo 1-2, ver figuras 3.2.9 y 3.2.10.

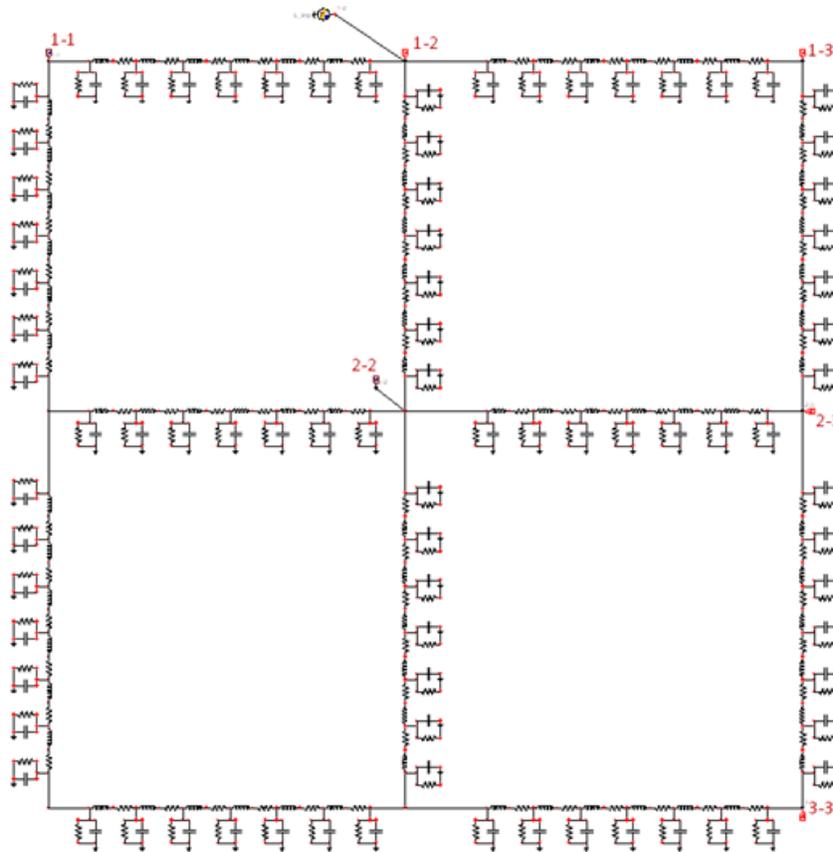


Fig.3.2.6. Malla 20x20m², punto de inyección de corriente en la malla localizado en el nodo 1-2

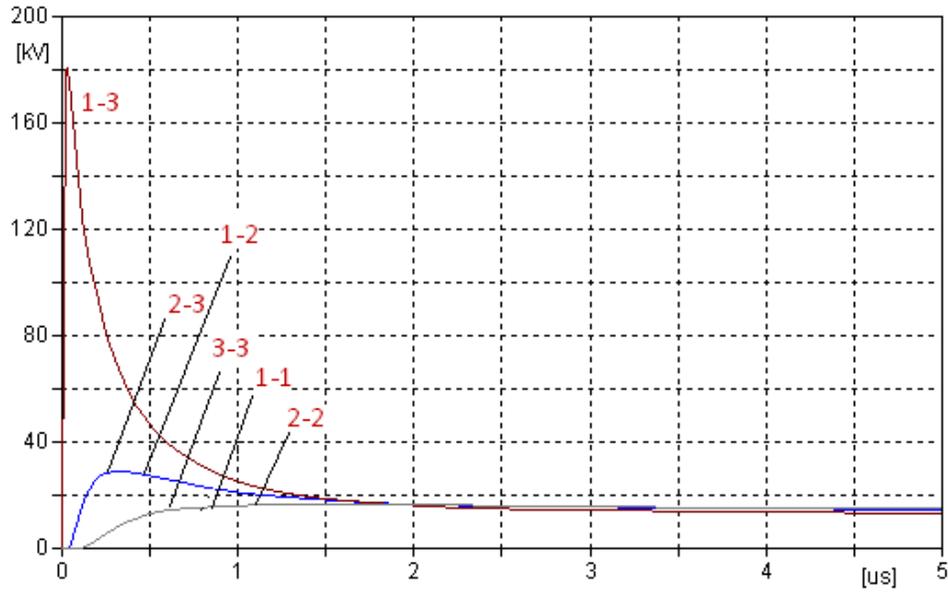


Fig.3.2.7 Variación de tensión en los nodos de la malla correspondiente a la figura 3.2.8

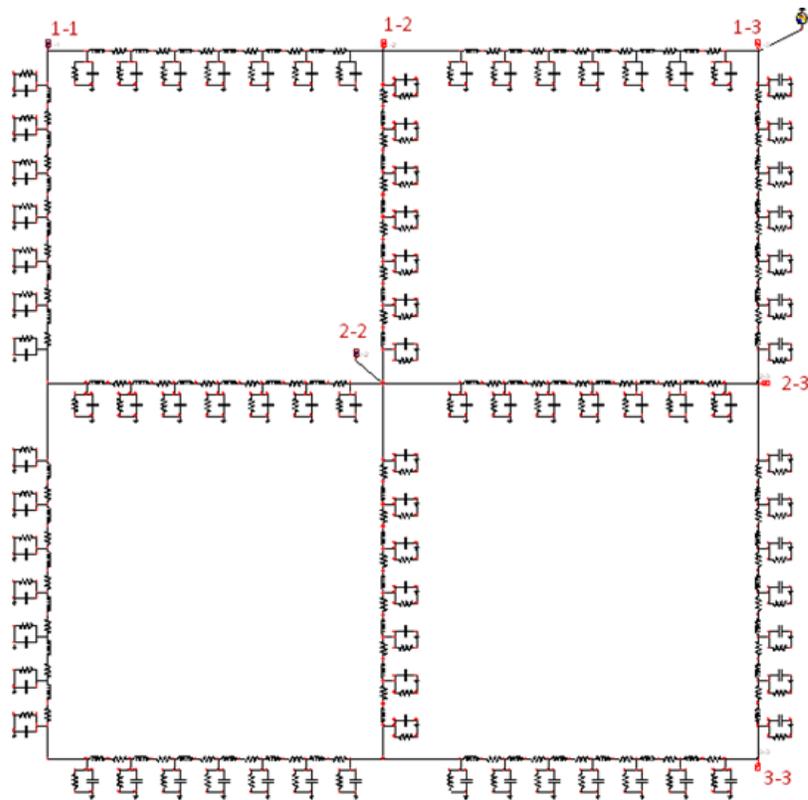


Fig.3.2.8 Malla de cuatro módulos de 20x20m². Moviendo el punto de inyección de corriente hacia el nodo 1-3.

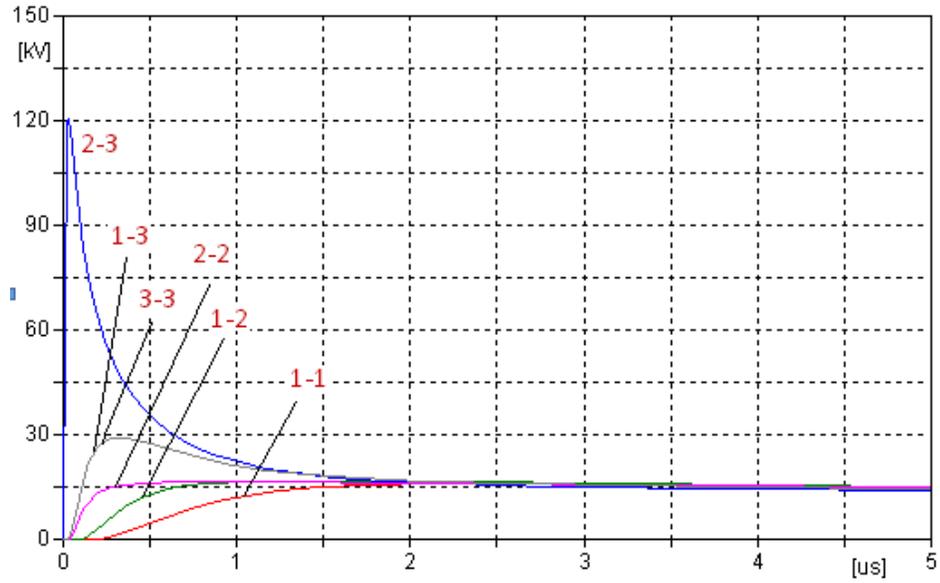


Fig.3.2.9 Valores de tensión para una malla 20x20m². Punto de inyección de corriente en el nodo 2-3.

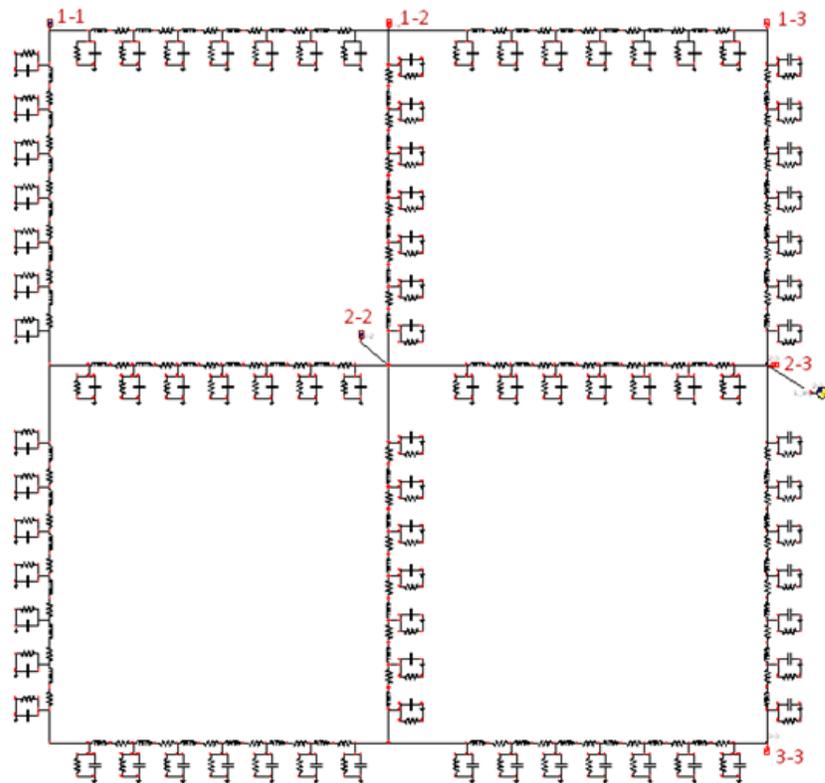


Fig.3.2.10 Malla 20x20m². Punto de inyección de corriente en el nodo 2-3.

Al ubicar el punto de inyección de corriente en el centro de la malla como se muestra en la figura 3.2.12, la tensión máxima se reduce aún mas que en los nodos 1-2 y 2-3, ya que en este caso la corriente inyectada se divide entre las cuatro ramas de electrodos y por lo tanto la impedancia a impulso que ve la onda de corriente es menor, ver la figura 3.2.11.

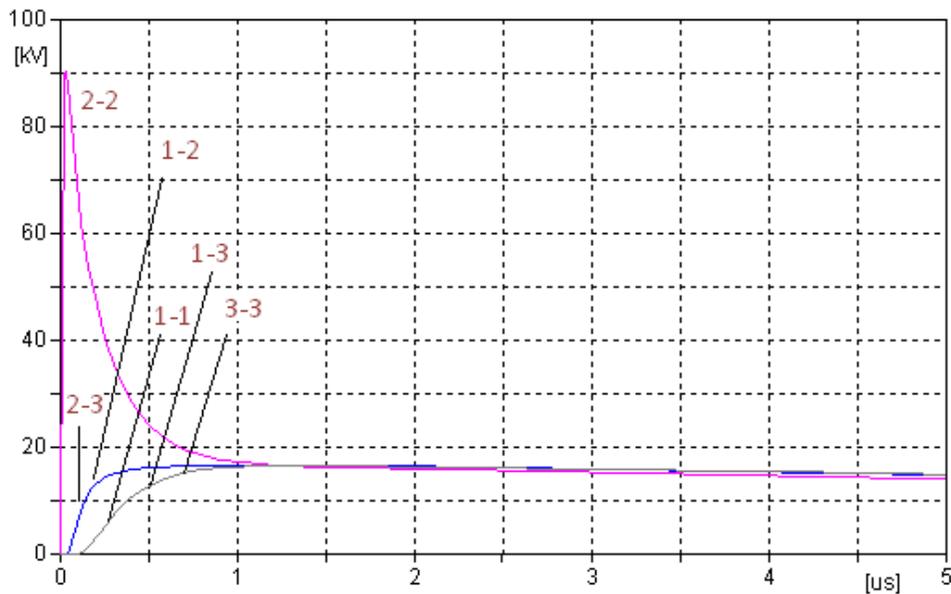


Fig.3.2.11 Tensión correspondiente a una malla $20 \times 20 \text{m}^2$ afectada por una onda de impulso. Punto de inyección de corriente en el nodo central.

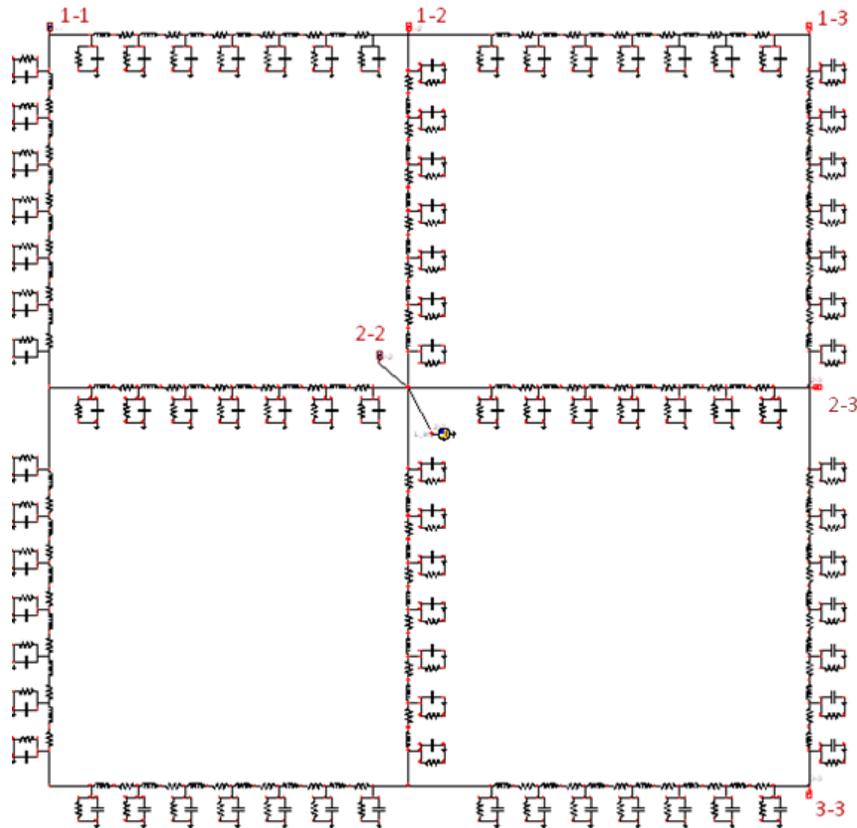


Fig.3.2.12 Malla de cuatro módulos de 20x20m². Punto de inyección de corriente al centro de la malla.

3.3 Comportamiento dinámico de una malla de tierra bajo condiciones de cortocircuito.

En este caso se considera la malla de una subestación de 4x3 módulos, 40x30 m², a la cual se conecta un transformador trifásico Y-Y, 110/34.5 KV, se modela un cortocircuito entre fase y tierra por secundario, tal como se muestra en la figura 3.3.1.

La malla está formada por conductores horizontales de radio $r=7\text{mm}$, resistividad del conductor $\rho_t=0.25 \cdot 10^{-6}$, resistividad del suelo $\rho_d= 100$; permitividad $\epsilon_r= 36$, profundidad de enterramiento de 0.6m. La corriente de impulso $i_s(t) = 10 \cdot (\exp(-14.3e3 \cdot t) - \exp(-54e5 \cdot t))$.

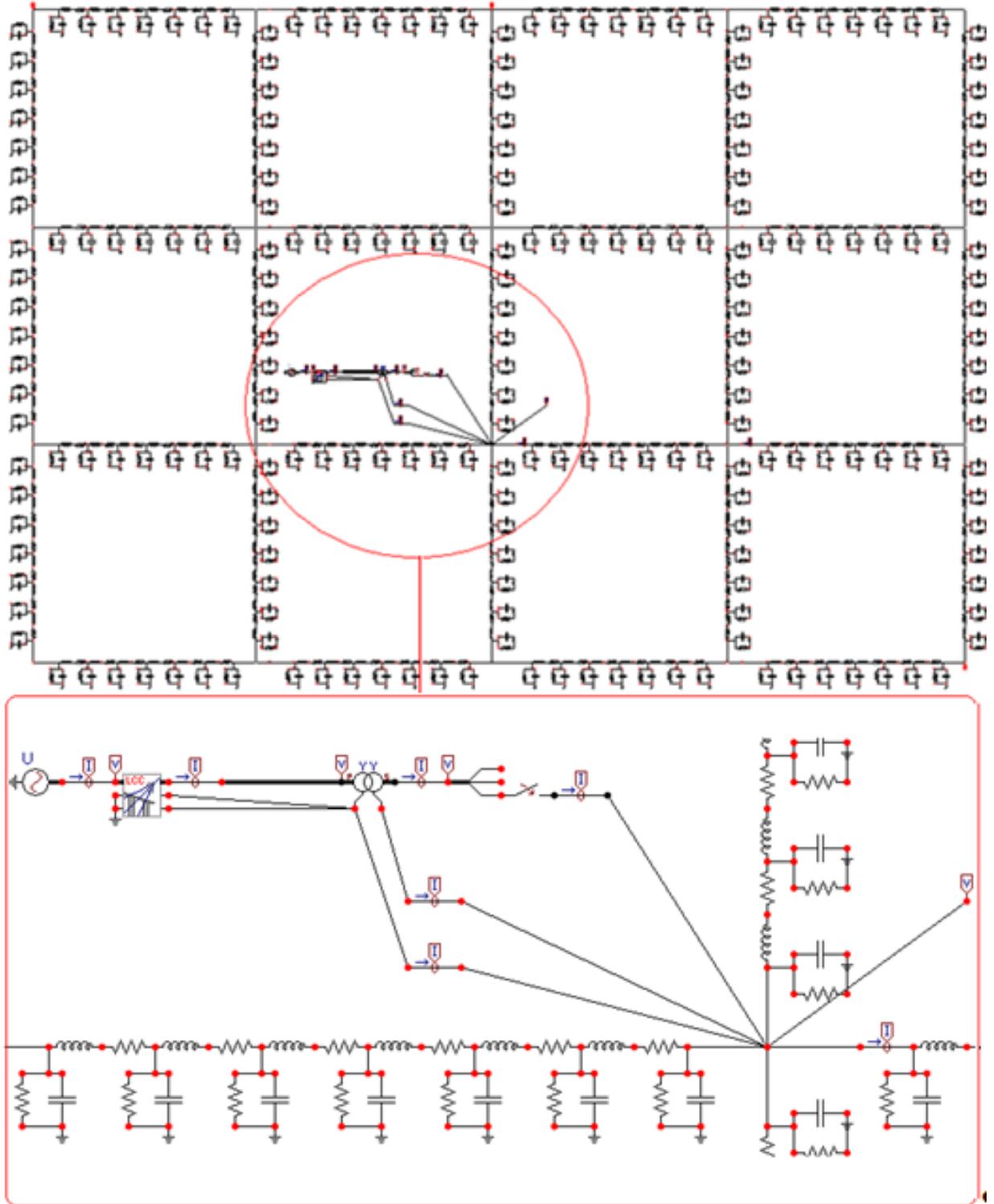


Fig.3.3.1. Cortocircuito monofásico en un transformador estrella-estrella.

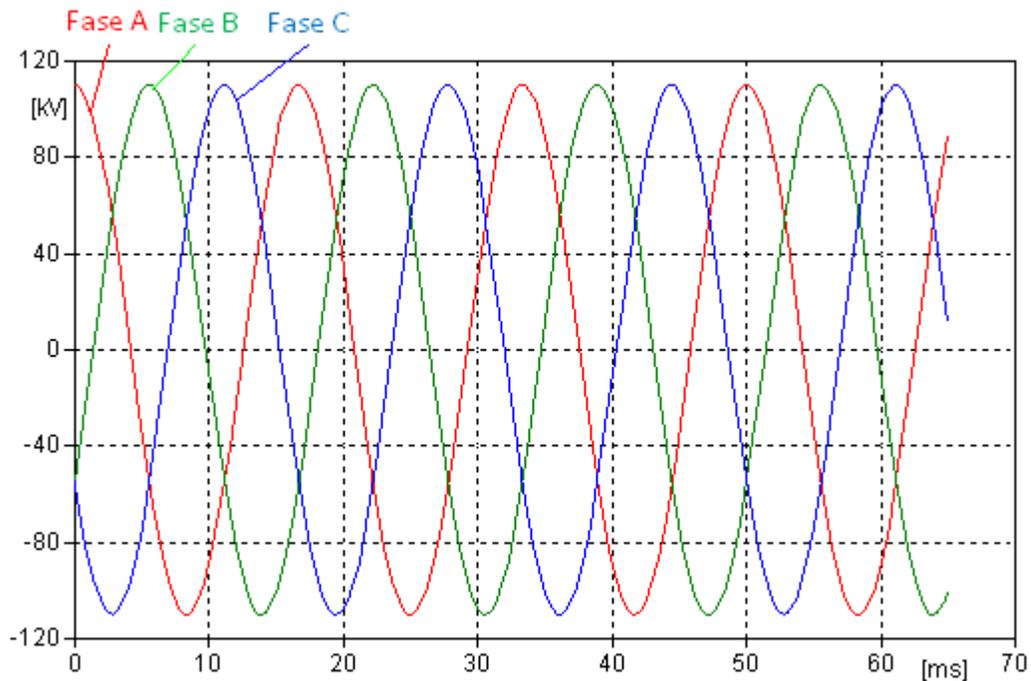


Fig.3.3.2 Valores de tensión del sistema en cada una de las fases.

En la figura 3.3.2 se muestran los valores de tensión en cada una de las fases del sistema por primario del transformador. En este caso el sistema se identifica en la figura 3.3.1 como un bus infinito modelado por una fuente de corriente alterna a 110kV.

A los 20 milisegundos se cierra el interruptor y se produce el cortocircuito, como se puede observar en la figura 3.3.3, la tensión en las fases no falladas por primario aumenta por encima de la nominal hasta casi 150 kV de valor pico, por el contrario en la fase fallada disminuye considerablemente, aunque mantiene valores de potencial en el orden de los 20 kV. En este caso por secundario (figura 3.3.4) se produce también un aumento de tensión en las fases no falladas y una reducción a casi 0V, en la fase fallada. En la figura 3.3.5 se muestra la corriente de cortocircuito inyectada en la malla de tierra y la tensión que adquiere esta. La figura 3.3.6 muestra las tensiones por primario y secundario del transformador de la fase C (fase fallada) antes, durante y después de la falla.

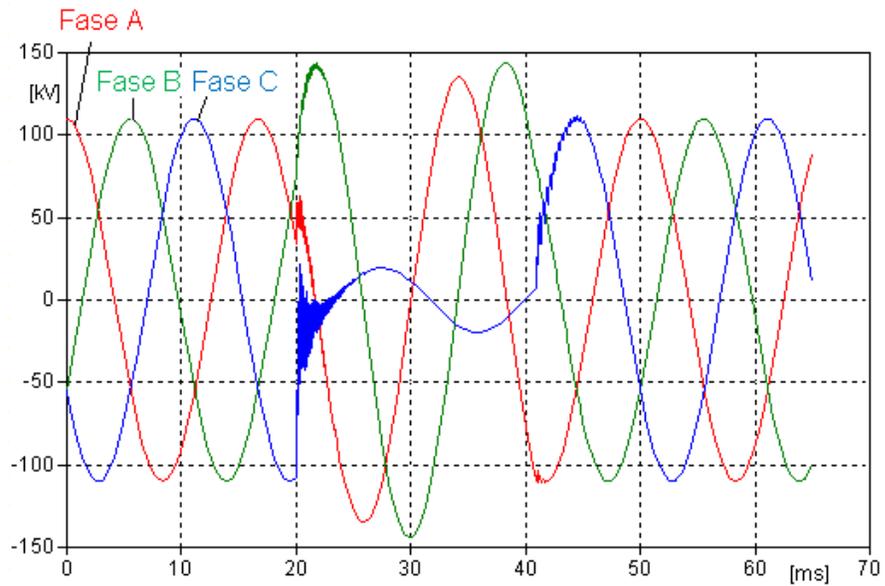


Fig.3.3.3 Tensión por primario del transformador y-y (Fase C = fase fallada)

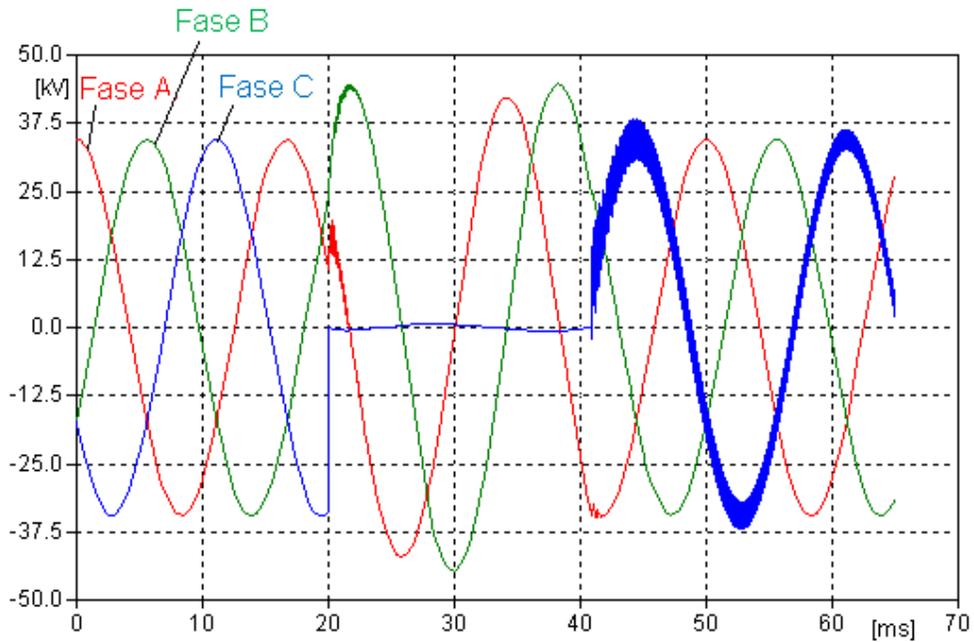


Fig.3.3.4 Tensión por secundario del transformador y-y. Fase C = fase fallada.

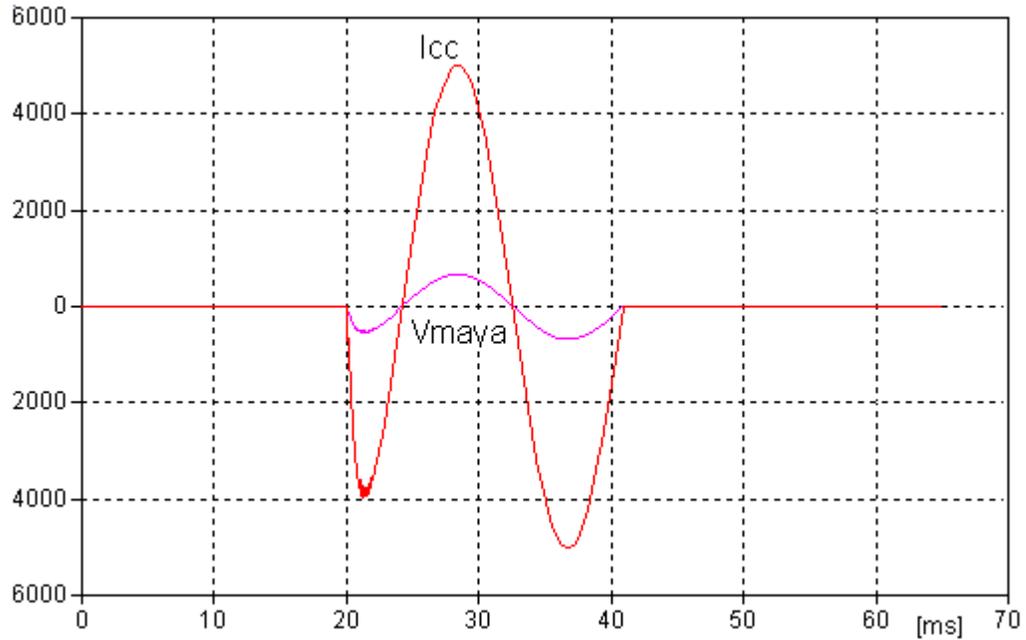


Fig.3.3.5 Corriente de cortocircuito y tensión en el punto de contacto con tierra.

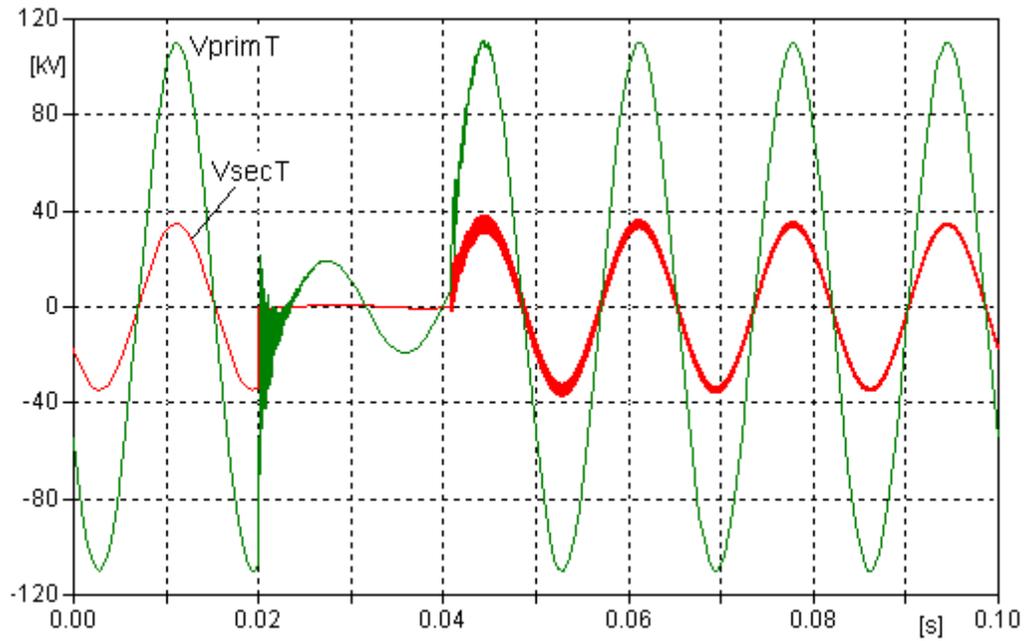


Fig.3.3.6 Tensión por primario y secundario del transformador de la fase C antes, durante y después de la falla.

Si el transformador de la subestación tiene una conexión Δ -Y como se muestra en la figura 3.3.7, los potenciales por secundario del transformador, tienen el comportamiento que se observa en la figura 3.3.8, en la cual la tensión en las fases no falladas disminuye por debajo del valor nominal.

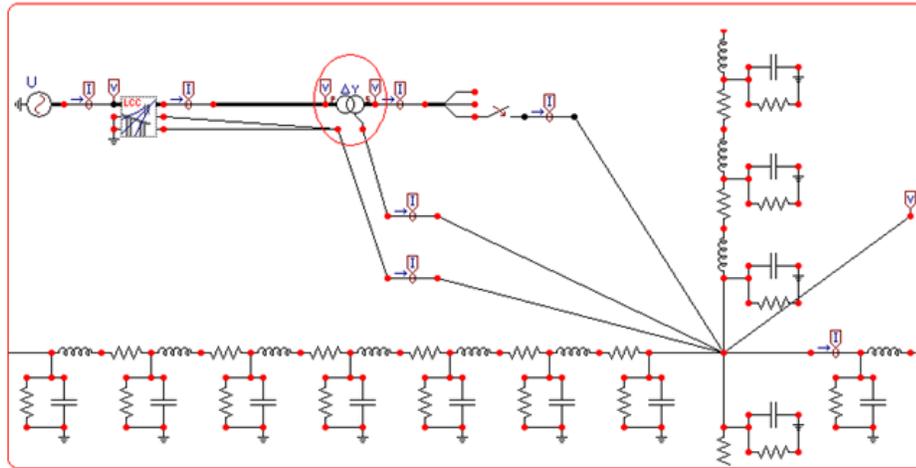


Fig.3.3.7 Transformador delta – estrella sólidamente aterrado a una malla de 40x30m (figura 3.3.1). Relación de transformación 110/34.5kV

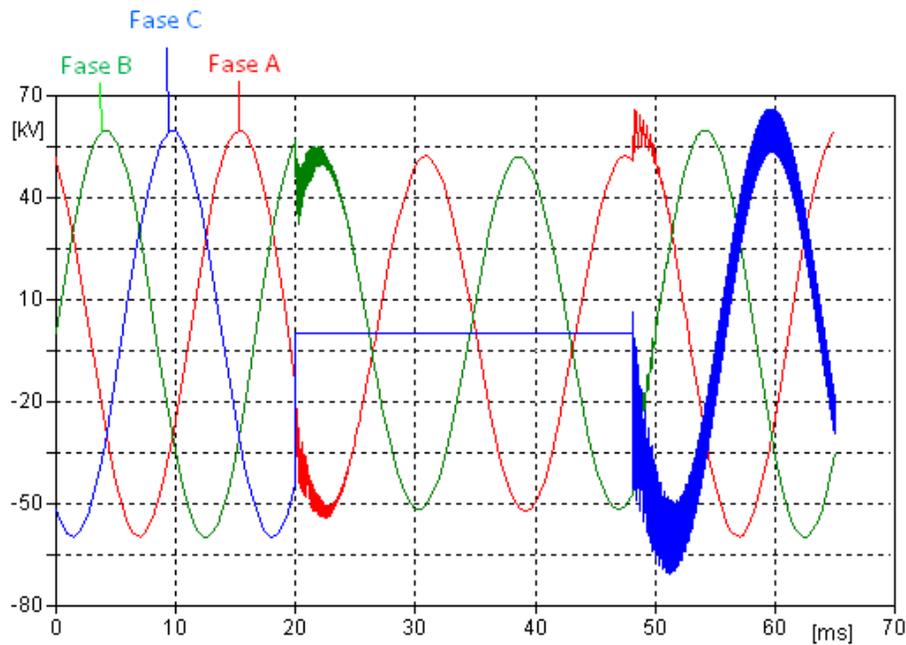


Fig.3.3.8 Tensión por secundario del transformador delta – estrella antes, durante y después de la falla.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Luego de concluido el trabajo se arriban a las siguientes conclusiones:

1. La modelación de los electrodos de tierra como una línea de transmisión con pérdidas a través de un circuito Pi, para el análisis del comportamiento transitorio de las puestas a tierra permite obtener resultados que se acercan a la realidad y por lo tanto se pueden considerar como validos, coincidiendo con otros autores.
2. Cuando las instalaciones de puesta a tierra se enfrentan a una onda de impulso como la provocada por un rayo, su comportamiento es el de una impedancia a impulso, cuya magnitud es una función de la corriente inyectada al terreno.
3. Cuando lo que penetra a la instalación de puesta a tierra es una onda de impulso, esta onda se atenúa progresivamente en la medida en que viaja dentro de la instalación lo que provoca que el potencial en los diferentes puntos de la instalación no sean iguales, a diferencia de lo que sucede cuando se enfrenta a una inyección de corriente alterna a frecuencia de potencia, con la que todos los puntos de la instalación adquieren el mismo potencial.
4. La magnitud de la impedancia a impulso y por lo tanto de la tensión que adquiere la instalación de puesta a tierra en el punto de inyección, depende del lugar donde se produzca esta. Mientras mayor es el número de ramas de electrodos en los que se divide la corriente inyectada menor es la impedancia a impulso y por tanto también la tensión en el punto.

Recomendaciones

Se recomienda la continuación en los estudios del comportamiento dinámico de las redes de puesta a tierra, a fin de conocer en los efectos que producen las fallas en el sistema eléctrico; por otra parte la obtención de una modelación matemática de lo realizado en este trabajo, permitiría obtener resultados de mayor validez y de un mayor acercamiento a la realidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] RÜDEMBERG R. (1945). "Grounding Principles and Practice, Part I: Fundamental Considerations on Ground Circuits". Electrical Engineering. Vol. 64, No. 1, pp. 1-13.
- [2] SUNDE, E.D. (1968). "Earth Conduction Effects in Transmission Systems". Dover Publications, Inc., New York.
- [3] THAPAR B., GOYAL S.L. (1987). "Scale Model of Station Grounding Grids In Non-Uniform Soils". IEEE, Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-2, No. 4, pp.1060-1066.
- [4] THAPAR B., GROSS E. (1963). "Grounding Grids for High Voltage Station-IV". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-68, pp. 782-788.
- [5] THAPAR B., PURI K. (1967). "Mesh Potential in High-Voltage Grounding Grids" IEEE, Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-86, pp.249-254.
- [6] KINYON A., (1961). "Earth Resistivity Measurements for Grounding Grids" AIEE. Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-57, pp. 795-800.
- [7] ARMSTRONG H., SIMPKIN L. (1960) "Grounding Electrode Potential Gradients from Model Test". AIEE, Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-50, pp. 618-623.
- [8] ANSI/IEEE Std. 80-1986. (1986). "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding" Wiley Interscience.
- [9] DAWALIBI F., BOUCHARD M., MUKHEDKAR D. (1980). "Survey on Power System Grounding Design Practices". IEEE, Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. 4, pp. 1396-1405.

- [10] "Reglamento sobre Condiciones Técnicas y Garantías de Seguridad en Centrales Eléctricas, Subestaciones y Centros de Transformación e Instrucciones Técnicas Complementarias" Ministerio de Industria y Energía. España 1985.
- [11] SVERAK J., BENSON R., DICK W., DODDS T., et al. (1982). "Safe Substation Grounding - Part II". IEEE, Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 10, pp. 4281-4290.
- [12] SVERAK J., DICK W., DODDS T., HEPPE R. (1981). "Safe Substation Grounding -Part I". IEEE, Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 9, pp. 4281-4290.
- [13] WANG W., VELAZQUEZ R., MUKHEDKAR D., GERVAIS Y. (1984). "A Practical Probabilistic Method to Evaluate Tolerable Step and Touch Voltages". IEEE, Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 12, pp. 3522-3530.
- [14] DEL ALAMO, J.L. (1993). "A Comparison among Eight Different Techniques to achieve an Optimum Parameters in Two-Layered Earth." IEEE Winter Meeting, 93 WM 079 - 4 PWRD. Columbus.
- [15] DEVGAN S., WHITEHEAD E. (1973). "Analytical Models for Distributed Grounding Systems". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-92, No. 5, pp.1763-1770.
- [16] DOMMEL H. (1969). "Digital Computer Solution of Electromagnetic Transient in Single and Multiphase Networks". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-88, No. 4, pp.388-399.
- [17] DVORAC, S. (1992). "Application of the Fast Fourier Transform to the Computation of the Sommerfeld Integral for a Vertical Electric Dipole above a Half-Space" IEEE Transactions on Antenas and Propagation. pp 798-805. Vol. 40, N° 7.
- [18] DWIGHT H. (1949). "Tables of Integrals and other Mathematical Data" The Macmillan Company. New York.

[19] EWY K., SMOLLECK H. (1984). "A Grafical Explanation of the Resistance and Surface-Potential Calculation for Grounding Systems in Two-Layer Earth". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 3, pp.631-639.

[20] FLETCHER R. (1989). "Practical Methods of Optimization" John Wiley & Sons. Second Edition 1987. Reprinted.

[21] GEAR, C.W., (1971). "Numerical Initial Value Problems in Ordinary Differential Equations". Prentice-Hall, Englewood Cliffs. New Jersey.

[22] RAMAMORTY M., NARAYANAN M., PARAMESWARAN S., MUKHEDKAR D. (1989)

"Transient Performance of Grounding Grids" IEEE - Winter Meeting, No.89 WM 068-8 PWRD. New York, Feb. 1989.

[23] SCOTT W., DOMMEL H. (1974). "Numerical Modelling of Frequency-Dependent Transmission Parameters in an Electromagnetic Transient Program". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-93, pp.1401-1409.

[24] GIAO T., SARMA M. (1972). "Effect of a Two-Layer Earth on the Electric Field Near HVDC Ground Electrodes". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-91, No. 6, pp.2356-2365.

[25] GRCEV L. (1986). "Calculation of the Transient Impedance of Grounding Systsams" D. Sc., thesis (Serbo-Croata), University of Zagreb. Yugoslavia.

[26] GRCEV L., HAZNADAR Z., (ICLP, 1988). "A Novel Technique of Numerical Modelling of Impulse Current Distribution in Grounding Systems". 19th International Conference on Lightning Protection, Graz, Austria.

[27] GRCEV L., DAWALIBI F. (1990). "An Electromacnetic Model for Transients in Grounding Systems ", No. 90 WM 130-5 PWRD.

[28] HARRINGTON R. (1967). "Matrix Methods for Field Problems". IEEE Proceedings, Vol. 55, N° 2, pp.136-149.

[29] HARRINGTON, L.F. (1968). "Field Computation by Moment Methods" Krieger Publishing Company. Malabar, Florida.

- [30] NILES G., et al. (1986). "Background and Methodology for Analyzing Step and Touch Potentials near Transmission Structures. Part I Background". IEEE, Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-1 , No. 2, pp.150-157.
- [31] NILES G., et al. (1986). "Background and Methodology for Analyzing Step and Touch Potentials near Transmission Structures. Part II Engineering Evaluation". IEEE, Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-1 , No. 2, pp.158-162.
- [32] VERMA R., MUKHEDKAR D. (1980). "Impulse Impedance of Buried Ground Wires". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. 5, pp.2003-2007.
- [33] GRCEV L., (ICLP, 1992). "Numerical Analysis of the Transient Voltage Near Grounding Systems". 21st International Conference on Lightning Protection), pp.105-110. Graz, Austria.
- [34] GRCEV L., (ICLP, 1992). "Computation of the Lightning Current Distribution Along Tubes in Frequency Domain". 21st International Conference on Lightning Protection pp.207-211. Graz, Austria.
- [35] VELAZQUEZ R., MUKHEADKAR D. (1984). "Analytical Modelling of Grounding Electrodes Transient Behavior ". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 6, pp.1314-1322.
- [36] GUPTA B., THAPAR B. (1980). "Impulse Impedance of Grounding Grids".IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. 6, pp.2357-2362.
- [37] BRIGHAM E. (1989). "The Fast Fourier Transform and its Applications". Prentice-Hall International, Inc., New York
- [38] COCHRAN W., et al. (1967). "What is the Fast Fourier Transform?" Proceedings of the IEEE, Vol. 55, No. 10,
- [39] GUPTA B., THAPAR B. (1980). "Impulse Impedance of Grounding Grids".IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. 6, pp.2357-2362.

- [40] M. Mousa. (1994). "The soil ionization gradient associated with discharge of high currents into concentrated electrodes". IEEE Transaction on Power Delivery, 9(3).
- [41] T. Correia de Barros E. Almeida. (1996). "Accurate modeling of rod driven tower footing. IEEE Transaction on Power Delivery", 11(3).
- [42] Y. Liu. (2005). "Transient Response of Grounding Systems caused by Lightning: Modeling and Experiments". Ph.d. thesis, Uppsala University, Uppsala (Sweden).
- [43] G.F. Tagg. (1964). "Earth Resistance".
- [44] J. DeJean D. Mukhedkar, Y. Gervais. (1973). "Modeling of a grounding electrode". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-92(1):295–297.
- [45] J. DeJean D. Mukhedkar, Y. Gervais. (1973). "Modeling of potential distribution around a grounding electrode". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-92(5):1455–145.
- [46] C. Pardo V. Pachón. (1994). "Características de sistemas de puesta a tierra". Proyecto de grado (ingeniero electricista), Universidad Nacional de Colombia.
- [47] D. Mukhedkar F. Dawalibi. (1975). "Optimum design of substation grounding in two-layer earth structure - part i, analytical study". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-94(2):252–261.
- [48] H.A. Smolleck K.A. Ewy. (1984). "A graphical explanation of the resistance and surface-potential calculations for grounding systems in two-layer earth". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-103(3):631–637.
- [49] R.J. Heppe. (1979). "Computation of potential at surface above an energized grid or other electrode, allowing for non-uniform current distribution". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-98(6):1978–1989.
- [50] M.E. Calzadilla V.S. Menshikov. (1990). "Exploración Eléctrica". Tomo II, volume II

- [51] A. Tovar L. Gallego, J. Montaña. (1999). "Desarrollo de un programa de computador para el análisis de mallas de puesta a tierra para tensiones ac y dc". Proyecto de grado (ingeniero electricista), Universidad Nacional de Colombia.
- [52] R.J. Heppe. (1979). "Step potentials and body currents near grounds in two-layer earth". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-98(1):45–59.
- [53] D. Mukhedkar F. Dawalibi.(1976). "Multi-step analysis of interconnected grounding electrodes". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-95(1):113–119.
- [54] D. Mukhedkar F. Dawalibi. (1975). "Optimum design of substation grounding in two-layer earth structure - part ii, comparison between theoretical and experimental results". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-94(2):262–266.
- [55] D. Bensted F. Dawalibi, D. Mukhedkar. (1981). "Measured and computed current densities in buried ground conductors". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-100(8):4083–4092.
- [56] V. Gerez B. Thapar. (1991). "Simplified equations for mesh and step voltages in an ac substation". IEEE Transaction on Power Delivery, 6(2):601–607.
- [57] ANSI/IEEE Std. 80-1986 (1986). "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding" Wiley Interscience.
- [58] MAGGIOLI V. (1987). "Grounding and Computer Technology". IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-23, No. 3, pp.412-416.
- [59] LIEW A., DARVENIZA M. (1974). "Dynamic Model of Impulse Characteristics of Concentrated Earths" Proc. IEE, Vol. 121, No. 2.
- [60] LOBODA M., KOSZTALUK R. (1981). "Model Tests of Surge Properties of Grounding Systems in Lightning Protection". 16th. International Conference on Lightning Protection. Szeged. R-5.03

- [61] LOBODA M., POCHANKE Z. "Experimental Study of Electric Properties of Soil with Impulse Current Injections" 18th International Conference on Lightning Protection. Munich 1981. 3.9
- [62] KOSZTALUK R., LOBODA M., MUKHEDKAR D. (1981). "Experimental Study of Transient Ground Impedances" IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 11.
- [63] KAMEYAMA F., ALTAFIM, R. (1989). "Earthing Electrodes Modelling for Impulse Current". Sixth International Symposium on High Voltage Engineering, Mississippi State University, New Orleans, LA, USA, Aug. 28.
- [64] ANSI/IEEE Std. 80-2000 "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding".
- [65] Bellashi P.L., (1941) "Impulse and 60-Cycle Characteristics of Driven Grounds. Part I". AIEE Transaction., Vol. 60, pp. 123-128.
- [66] D. Cunningham J. H. Scott, D. Carrol. [1967] "Dielectric constant and electric conductivity measurements of moist rock: A new laboratory method". Journal of Geophysical Research, 72(20):5101–5115.
- [67] C. M. Portela. "Measurement and modeling of soil electromagnetic behavior".
- [68] D. Hristov L. Grcev. "More accurate modeling of earthing systems transient behavior". Compatibilite Electromagnetique, (S.25.B).
- [69] Kalifa, M. [1990] "High Voltage Engineering, Theory and Practice", Dekker, USA, pp. 331-356.
- [70] Stevenson, W. [1975] "Elements of Power System Analysis", Mc Graw-Hill Co., USA.