UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas Carrera de Electricidad

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CURRICULAR

ESTUDIO DE LA INCIDENCIA DE ALTAS FRECUENCIAS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LOS ELECTRODOS DE PUESTA A TIERRA.

Trabajo de grado previo a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico

Línea de investigación: Producción Industrial y Tecnología Sostenible

Autor:

Johan Steven Vega Sabando

Director:

MSc. Isabel Marina Quinde Cuenca

Ibarra, febrero 2025

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	0803951102		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Vega Sabando Johan Steven		
DIRECCIÓN:	Ibarra		
EMAIL:	johanvegasa129@gmail.com		
TELÉFONO FIJO:	062713818	**TELÉFONO MÓVIL:**	0984553449

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	ESTUDIO DE LA INCIDENCIA DE ALTAS FRECUENCIAS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LOS ELECTRODOS DE PUESTA A TIERRA.
AUTOR (ES):	Vega Sabando Johan Steven
FECHA DE APROBACIÓN: DD/MM/AAAA	21/02/2025
PROGRAMA:	[X] PREGRADO [ ] POSGRADO
TITULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERO ELÉCTRICO
ASESOR /DIRECTOR:	MSc. Olger Gilberto Arellano Bastidas MSc. Isabel Marina Quinde Cuenca

2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 21 días del mes de febrero de 2025

EL AUTOR:

Johan Vega S.

Johan Steven Vega Sabando

CERTIFICADO DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Yo, Isabel Marina Quinde Cuenca en calidad de director del señor estudiante Vega Sabando Johan Steven certifico que ha culminado con las normas establecidas en la elaboración del Trabajo de Integración Curricular con el tema: "ESTUDIO DE LA INCIDENCIA DE ALTAS FRECUENCIAS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LOS ELECTRODOS DE PUESTA A TIERRA"

Para la obtención del título de Ingeniero Eléctrico, aprobado la defensa, impresión y empastado.

.....

MSc. Isabel Marina Quinde Cuenca

DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

DEDICATORIAS

A mis padres, por su amor incondicional, su apoyo inquebrantable y por ser mi mayor inspiración en cada paso de este camino.

A mi familia, por su paciencia, motivación y por brindarme siempre su confianza, recordándome que todo esfuerzo tiene su recompensa.

A mis docentes y mentores, cuya guía y conocimientos han sido fundamentales para el desarrollo de esta investigación.

Y, sobre todo, a Dios por darme la fortaleza y la perseverancia para alcanzar esta meta.

Este logro es también de ustedes.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que me han apoyado a lo largo de este proyecto de investigación, sin cuyo respaldo y orientación no habría sido posible llevar a cabo este estudio.

En primer lugar, agradezco a mi director de tesis, Isabel Marina Quinde Cuenca, por su valioso apoyo académico y profesional. Su orientación experta y su paciencia fueron fundamentales para la correcta realización de este trabajo.

Agradezco también a mis compañeros de investigación y a todos aquellos con quienes compartí conocimientos y experiencias en el ámbito de la ingeniería eléctrica. Sus aportes y sugerencias enriquecieron significativamente este estudio.

Mi gratitud se extiende a mi familia, especialmente a mis padres, por su amor incondicional, comprensión y apoyo constante durante todo el proceso. Su motivación y confianza en mis capacidades fueron una fuente de inspiración.

A mis amigos y colegas, quienes siempre estuvieron allí para ofrecer palabras de aliento y colaborar en momentos clave de la investigación, gracias por su apoyo y camaradería.

Finalmente, agradezco a todas las instituciones y personas que brindaron acceso a recursos, bibliografía y herramientas necesarias para llevar a cabo este estudio.

INDICE DE CONTENIDOS

CAPITULO I……...

INTRODUCCIÓN 1

1.1 Problema de investigación. 2

1.1.1 Problemática a investigar 2

1.1.2 Formulación de la pregunta de investigación 2

1.2 Objetivos 2

1.3 Alcance y delimitación 3

1.4 Justificación 4

CAPITULO II……..

MARCO TEÓRICO 5

2.1 Antecedentes 5

2.2 Descripción de las descargas atmosféricas 6

2.2.1 Origen y formación de las descargas atmosféricas 6

2.2.2 Tipos de las descargas atmosféricas 7

2.2.2.1 Nube-ionósfera 7

2.2.2.2 Intranubes 7

2.2.2.3 Internubes 8

2.2.2.4 Nube-tierra 8

2.2.3 Magnitudes de las descargas atmosféricas 9

2.2.4 Medidas de protección contra descargas atmosféricas 11

2.2.4.1 Sistemas de protección externa 11

2.2.4.2 Sistema de captación 11

2.2.4.3 Sistema de bajantes 11

2.2.4.4 Sistema de puesta a tierra 12

2.2.4.5 Sistemas de protección interna 12

2.3 Descripción del sistema de puesta a tierra (SPT) 12

2.3.1 Elementos del sistema de puesta a tierra 12

2.3.1.1 Conductor a tierra 13

2.3.1.2 Borne principal de tierra 13

2.3.1.3 Conductor de protección 13
2.3.1.4 Conexiones 13
2.3.1.5 Conductor equipotencial 13
2.3.1.6 Terreno 13
2.3.2 Tipos de electrodos de puesta a tierra 14
2.3.2.1 Electrodos de placa 14
2.3.2.2 Electrodos de barras 15
2.3.2.3 Electrodos de varilla 16
2.4 Modelos para el análisis de electrodos de puesta a tierra en altas frecuencias ... 18
2.4.1 Modelo de circuitos 18
2.4.2 Modelo electromagnético 19
2.4.3 Modelo de línea transmisión 20
2.4.4 Modelo híbrido 21
2.5 Normas aplicadas para el diseño del SPT 21
2.5.1 Norma IEEE Std 80-2013 22
2.5.2 Norma IEEE Std 142 22
CAPITULO III.....
MATERIALES Y MÉTODOS 23
3.1 Metodología 23
3.2 Procedimiento 24
3.3 Materiales 26
3.3.1 Software Matlab 26
3.3.2 Ecuaciones matemáticas del modelo híbrido 27
3.3.2.1 Transformada rápida de Fourier 27
3.3.2.2 Impedancia transversal y longitudinal 28
3.3.2.3 Matriz de impedancia Longitudinal 28
3.3.2.4 Matriz de impedancia transversal 28
3.3.2.5 Arreglo matricial 29
3.3.2.6 Impedancia 29
3.3.3 Ecuaciones matemáticas del modelo de circuitos 30
3.3.3.1 Resistencia 30
3.3.3.2 Capacitancia 30

3.3.3.3 Inductancia 31

3.3.3.4 Impedancia 32

3.3.4 Potencia disipada 32

CAPITULO IV .....

RESULTADOS Y ANÁLISIS 34

4.1 Aplicación de los modelos matemáticos para análisis de electrodos de puesta a tierra 34

4.2 Aplicación del modelo de circuitos en Simulink 34

4.2.1 Simulación del modelo de circuitos 37

4.3 Aplicación del modelo híbrido en Matlab 39

4.3.1 Aplicación del modelo híbrido e interfaz en Matlab 40

4.3.1.1 Desarrollo de la interfaz 40

4.3.1.2 Aplicación del modelo híbrido en Matlab 43

4.3.1.3 Simulación del modelo híbrido 44

4.4 Simulación y análisis de las gráficas del modelo híbrido 46

4.4.1 Determinación del rango de frecuencia 46

4.4.2 Determinación de los valores a simular 47

4.4.3 Simulación del modelo híbrido de puesta a tierra existente 54

4.4.4 Análisis térmico del electrodo 62

CONCLUSIONES 68

RECOMENDACIONES 69

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 70

Anexos 73

INDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Tipos de descargas atmosféricas. 8
Fig. 2. Electrodo de placa. 15
Fig. 3. Electrodos de barra. 16
Fig. 4. Electrodo de puesta a tierra tipo varilla. 17
Fig. 5. Modelo de circuitos. 18
Fig. 6. Modelo de elementos finitos. 20
Fig. 7. Modelo de línea de transmisión. 20
Fig. 8. Diagrama de flujo del procedimiento realizado. 25
Fig. 9. Configuración del modelo de circuitos en Simulink. 36
Fig. 10. Gráfica frecuencia e impedancia del modelo de circuitos 38
Fig. 11. Procesos del modelo Híbrido 39
Fig. 12. Interfaz gráfica del modelo híbrido 42
Fig. 13. Gráfica frecuencia e impedancia del modelo híbrido 45
Fig. 14. Ubicación del edificio de la Carrera de Electricidad 48
Fig. 15. Ubicación de la puesta a tierra 50
Fig. 16. Medición de la resistencia de puesta a tierra 51
Fig. 17. Método de Wenner 52
Fig. 18. Medición de la resistividad por medio del método de Wenner 53
Fig. 19. Valores de impulsos para la descarga atmosférica 54
Fig. 20. Valores de entrada ingresados en la interfaz 55
Fig. 21. Visualización de la ubicación del electrodo 56
Fig. 22. Gráfica frecuencia e impedancia 56
Fig. 23. Gráfica frecuencia e impedancia para resistividad de 33.2Ωm 59
Fig. 24. Gráfica frecuencia e impedancia para resistividad de 23.2Ωm 59
Fig. 25. Gráfica frecuencia e impedancia para resistividad de 38.2Ωm 60
Fig. 26. Gráfica frecuencia e impedancia para resistividad de 18.2Ωm 61
Fig. 27. Electrodo modelado en COMSOL 62
Fig. 28. Temperatura en el electrodo a una frecuencia de 60Hz 64
Fig. 29. Temperatura en el electrodo a una frecuencia de 1MHz 65

Fig. 30. Temperatura en el electrodo a una frecuencia de 2MHz..... 65

INDICE DE TABLAS

TABLA I.Variación de pasos de frecuencia…….47

TABLA II. Medición de la resistividad……53

TABLA III. Magnitudes de la frecuencia, impedancia y corriente……...57

TABLA IV. Valores de frecuencia y potencia disipada……63

TABLA V. Valores de frecuencia y temperatura…….66

RESUMEN

El presente estudio se centra en analizar el comportamiento de los electrodos de puesta a tierra sometidos a altas frecuencias, tales como las generadas por descargas atmosféricas. Si bien la mayoría de los estudios previos se enfocan en frecuencias bajas, las condiciones de alta frecuencia, que superan el rango convencional de operación, pueden modificar significativamente las propiedades eléctricas de los electrodos, especialmente su impedancia. Para este estudio, se desarrolló un modelo híbrido que combina el modelo de circuitos y el modelo Electromagnético, permitiendo simular con mayor precisión el comportamiento del electrodo a diferentes frecuencias. Se realizaron simulaciones utilizando un electrodo de varilla vertical de Cooperweld, que es comúnmente utilizado en instalaciones de puesta a tierra en Ecuador. Los parámetros del suelo, como la resistividad, la permeabilidad y la permitividad relativas, fueron determinados de una puesta a tierra existente. Los resultados obtenidos revelan que la impedancia del electrodo aumenta considerablemente a medida que se incrementa la frecuencia, lo cual podría afectar al correcto funcionamiento del sistema de puesta a tierra frente a descargas atmosféricas. Este estudio proporciona información valiosa para el diseño y optimización de sistemas de puesta a tierra, especialmente en zonas con alta incidencia de descargas atmosféricas.

Palabras clave:

Frecuencia, cooperweld, híbrido, resistividad, permeabilidad, permitividad

ABSTRACT

This study focuses on analyzing the behavior of grounding electrodes subjected to high frequencies, such as those generated by atmospheric discharges. While most previous studies have focused on low frequencies, high-frequency conditions, which exceed the conventional operating range, can significantly alter the electrical properties of the electrodes, particularly their impedance. To address this, a hybrid model combining the circuit model and the electromagnetic model was developed, allowing for a more accurate simulation of the electrode's behavior across different frequencies. Simulations were conducted using a vertical Copperweld rod electrode, a commonly used grounding installation in Ecuador. The soil parameters, including resistivity, permeability, and relative permittivity, were determined from an existing grounding system. The results indicate that the electrode's impedance increases significantly with frequency, which may impact the proper functioning of the grounding system under atmospheric discharges. This study provides valuable insights for the design and optimization of grounding systems, particularly in areas with a high incidence of lightning strikes.

Keywords:

Frequency, copperweld, hybrid, resistivity, permeability, permittivity

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

La implementación adecuada de un sistema de puesta a tierra es fundamental para garantizar la seguridad y el correcto funcionamiento de los sistemas eléctricos. Sin embargo, las altas frecuencias por descargas atmosféricas no reciben la atención que merece en el momento de la instalación.

Diversos estudios han observado que, a partir de ciertas frecuencias, la impedancia de los sistemas de puesta a tierra experimenta un aumento significativo. Este fenómeno tiene un impacto directo en los electrodos de puesta a tierra, dificultando su capacidad para cumplir eficazmente su función. El incremento en la impedancia conlleva a que las corrientes elevadas generadas por las descargas atmosféricas no sean disipadas rápidamente, lo cual resulta en la formación de tensiones de paso considerablemente altas.

El estudio aborda la pregunta central de ¿cómo afectan las altas frecuencias por descargas atmosféricas al comportamiento del electrodo de puesta a tierra? Para responder a esta interrogante, se ha planteado como objetivo general estudiar la incidencia de las altas frecuencias por descargas atmosféricas en el electrodo de puesta a tierra.

Al abordar este tema desde una perspectiva real y empírica, en un entorno expuesto a descargas eléctricas, el presente estudio busca llenar un vacío en la literatura existente y proporcionar información valiosa para optimizar el diseño e instalación de sistemas de puesta a tierra en zonas de alto riesgo de rayos. Esto contribuirá a garantizar la seguridad y el adecuado funcionamiento de los sistemas eléctricos en dichas áreas.

1.1 Problema de investigación.

1.1.1 Problemática a investigar

En Ecuador la densidad de descargas atmosféricas es de 20 tormentas con descargas anuales, estas descargas se presentan mayormente en ciertas provincias como son: Pastaza, Pichincha, Guayas, Loja y al norte de Esmeraldas [1].

Ecuador cuenta con lugares estratégicos ubicados en estas provincias, las provincias de la región andina cuentan con estaciones de monitoreo de volcanes que envían información en tiempo real sobre su estado, en la región amazónica se encuentran pozos petroleros que generan el combustible del país y en la ciudad de Esmeraldas de la región costa se encuentra la refinería más grande del país con la capacidad de refinar 110000 barriles diarios de petróleo; en caso de producirse una descarga atmosférica en alguno de estos sitios estratégicos se pueden producir pérdidas humanas y pérdidas económicas irreversibles.

En lugares propensos a recibir descargas atmosféricas muchas veces no se toma en cuenta las altas frecuencias producidas por este fenómeno, descartando el hecho de que puedan suceder cerca de ese lugar, donde la puesta a tierra al no estar dimensionada adecuadamente para soportar altas frecuencias puede sufrir consecuencias como daños en su instalación.

1.1.2 Formulación de la pregunta de investigación

¿Cómo inciden las altas frecuencias por descargas atmosféricas en el comportamiento de los electrodos de puesta a tierra

1.2 Objetivos

Objetivo general

Estudiar la incidencia de altas frecuencias por descargas atmosféricas en los electrodos de puesta a tierra, mediante la simulación de sus efectos en el software MATLAB Simulink.

Objetivos específicos

- Describir las características y parámetros de las descargas atmosféricas y puestas a tierra.
- Realizar el modelamiento de los electrodos de puesta a tierra en MATLAB Simulink.
- Analizar el comportamiento de los electrodos de puesta a tierra ante la incidencia de descargas atmosféricas de altas frecuencias utilizando MATLAB Simulink.

1.3 Alcance y delimitación

Se realizará una revisión bibliográfica de la puesta a tierra y de las descargas atmosféricas que permita identificar los parámetros que debe cumplir la puesta a tierra para ser instalada, tomando en cuenta las altas frecuencias producidas por las descargas atmosféricas.

Se procederá a realizar el modelamiento de los electrodos de puesta a tierra en el software de Matlab, este modelo de los electrodos de puesta a tierra será simulado con diferentes valores de frecuencia, corriente, geometría del electrodo, permeabilidad y permitividad que servirán para determinar el comportamiento del electrodo.

Se realizará un análisis de los resultados que se obtuvieron en las simulaciones, donde se identificará el comportamiento de los electrodos con diferentes valores de frecuencia, asemejando las altas frecuencias que ocasionan las descargas atmosféricas. Se identificará los resultados más eficientes de la simulación, que servirá para que en los lugares propensos a recibir descargas atmosféricas se tomen en cuenta a la hora de realizar el diseño de la puesta a tierra.

1.4 Justificación

Hoy en día se conoce que las instalaciones eléctricas sean domiciliarias, industriales, entre otras, cuentan con un sistema de puesta a tierra que se encarga de proteger su instalación eléctrica, al estar ubicados en una zona propensa a recibir descargas atmosféricas y no tener una puesta a tierra que garantice la seguridad de las personas y de su instalación, se verán en la obligación de realizar mejoras en el diseño de puesta a tierra que les garantice una máxima seguridad.

En los lugares estratégicos que se encuentran es zonas propensas a recibir descargas atmosféricas como las estaciones de monitoreo de volcanes, pozos de petróleo, refinerías y muchos más, tienen la obligación de tener un sistema de puesta a tierra que le garantiza la seguridad de sus equipos, maquinas, y seres vivos, muchos de estos lugares son el sustento de la economía del país; por ello, gracias al estudio se logrará observar las incidencias de las descargas atmosféricas en los electrodos, que deben ser tomados en cuenta para sus sistema de puesta a tierra.

El estudio es viable ya que se realizará en el software de Matlab donde la Universidad Técnica del Norte cuenta con una licencia que brinda un acceso gratuito a este software.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

Durante décadas, el estudio de los sistemas de puesta a tierra ha despertado el interés de los profesionales de la energía, y se ha vuelto muy importante por la seguridad personal de los usuarios y la seguridad de los equipos conectados al sistema eléctrico, algunos sistemas como apantallamiento, subestaciones, telecomunicaciones hacen que cada vez más se relacione el funcionamiento normal de los sistemas de puesta a tierra [2].

Los sistemas de puestas a tierra para los eventos atmosféricos protegen principalmente de los rayos que pueden generarse por tormentas eléctricas. Al momento que estas caen directamente sobre edificios o viviendas, la corriente que posee los rayos pude circular a través de los circuitos o elementos que estén dentro de los mismos. Por este motivo se diseña una malla de puesta a tierra. Se pueden construir con varillas y conductor trenzado de varios hilos [3].

Los sistemas de puesta a tierra normalizados por empresas distribuidoras dados en términos de resistencia equivalente se tienen que para redes de media tensión es de 10Ω para puntos de descarga con DPS y para neutros multiaterrizados es de 20 a 25Ω como valores máximos, por muchas razones se utiliza otros tipos de arreglos y la resistencia del suelo que es una variable critica en el sistema de puesta a tierra no siempre es analizado, lo cual genera incertidumbre en la seguridad que puede ofrecer el SPT [4].

En el estudio realizado por [5] concluye que “mientras más extensas sean las dimensiones de una malla a tierra tanto los valores de resistencia, voltaje de paso y toque serán mucho más pequeños garantizando de esta manera una mejor protección, pero a su vez esto genera un incremento en el costo de la construcción e implementación de la malla”.

Los terrenos en los cuales se desea realizar una instalación de una puesta a tierra muchas veces no es el adecuado debido a la resistencia que esta genera, por ello [6] Concluye que “El máximo ahorro de insumos para la malla de puesta tierra, se puede

pudo obtener al colocar 6 varillas distribuidas a 4 metros de separación de forma rectangular dando un valor de resistencia menor a los 5 Ω programados, pero realizando preparación del terreno con aditamentos externos".

A partir de frecuencias de 1 MHz la impedancia de los sistemas de puesta a tierra aumentaba considerablemente, influyendo directamente en el propósito u objetivo de este.

Dicho incremento en la impedancia genera que las corrientes elevadas provenientes de las descargas atmosféricas no sean drenadas con rapidez, formando grandes tensiones de paso, ionización del suelo cercano y picos de corrientes altos que ponen en riesgo principalmente a las personas y animales que se encuentran circundantes al foco de la descarga [7].

2.2 Descripción de las descargas atmosféricas

Las descargas atmosféricas ocurren con mucha frecuencia en nuestro planeta, donde muchas de estas ocasionan pérdidas humanas y materiales, por ello se la considera uno de los fenómenos más peligrosos, cuentan con algunos tipos de descargas, donde la más peligrosa es la nube-tierra, que es la que llega a nuestro entorno ocasionando daños, muchas veces irreparables.

2.2.1 Origen y formación de las descargas atmosféricas

Las nubes de tormenta, específicamente las del tipo Cumulonimbus, son nubes cargadas eléctricamente que se caracterizan por la presencia de truenos y relámpagos. Dentro de estas nubes ocurren procesos de generación y separación de cargas eléctricas que dan origen a diferentes tipos de relámpagos [8].

Las descargas atmosféricas ocurren cuando la acumulación de cargas eléctricas dentro de la nube Cumulonimbus genera un campo eléctrico que supera la capacidad dieléctrica del aire en su base. Estas descargas suelen ir acompañadas de truenos, que son ondas sonoras causadas por la expansión del aire calentado en el canal recorrido por la corriente del relámpago. A nivel mundial, se estima que se producen entre 50 y 100

relámpagos por segundo que se dirigen desde la nube hacia el suelo, lo que equivale a unos 2 a 4 mil millones de relámpagos al año [8].

La descarga líder es el primer paso en el proceso de una descarga atmosférica, y su papel es crucial para establecer el camino por el cual se produce la corriente eléctrica entre la nube y la tierra.

La descarga del líder inicia con una corriente de baja intensidad, que oscila entre 100 y 1000 amperios. Esta se propaga de manera aleatoria en saltos de 50 a 100 metros, a una velocidad que es aproximadamente el 0,05% de la velocidad de la luz. Durante este proceso, la descarga puede ramificarse. Entre cada salto, se producen pausas de alrededor de 50 microsegundos [9].

2.2.2 Tipos de las descargas atmosféricas

Las descargas atmosféricas son fenómenos eléctricos que ocurren en la atmósfera durante las tormentas. Existen diferentes tipos de descargas que se producen en condiciones específicas. Estos tipos incluyen:

2.2.2.1 Nube-ionósfera

Ocurren cuando una nube cargada eléctricamente con polaridad negativa atrae a las partículas cargadas positivamente presentes en la ionósfera, se producen entre los 70 y 100 kilómetros de altura por ello no es tan visible desde la superficie terrestre [10].

2.2.2.2 Intranubes

Son descargas que ocurren entre dos grandes centros de carga en una misma nube sin tocar el suelo, se originan con descargas desde el centro de carga negativo hacia el centro de carga positivo, este tipo de descargas forman un canal que alcanza algunos pocos kilómetros y puede llegar a tener una velocidad de propagación de aproximadamente 150km/s [11].

2.2.2.3 Internubes

Las descargas internubes, también conocidas como descargas entre nubes, se generan debido a las diferencias de carga entre diferentes nubes. Esto ocurre cuando las nubes con polaridades opuestas se atraen entre sí. Estas descargas son visibles a largas distancias y tienen la capacidad de generar altos niveles de resonancia [10].

2.2.2.4 Nube-tierra

Las descargas eléctricas nube-tierra comienzan en el centro de carga negativo inferior de una nube. Durante este proceso, se produce un fenómeno conocido como enlace, que ocurre cuando el líder de la descarga está cerca de la tierra. En este momento, el campo eléctrico alrededor de objetos puntiagudos o irregularidades en la superficie terrestre supera la tensión límite del aire y provoca una o varias descargas eléctricas que se elevan desde estos objetos hacia el líder descendente [12].

Estos tipos de descargas pueden presentarse con polaridad negativa y positiva dependiendo del tipo de descarga, como se muestra en la **Fig. 1**.

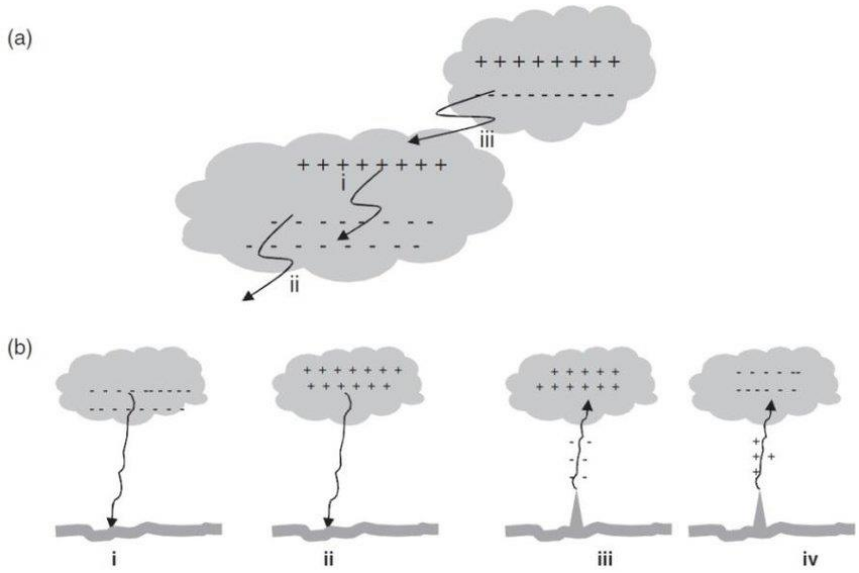


Fig. 1. Tipos de descargas atmosféricas. [13]

En la **Fig. 1** se presenta los tipos de descargas atmosféricas, en la parte (a) se presentan las descargas en las nubes que posee diferentes tipos como son: (i) descargas

intranubes, (ii) descargas en el aire y (iii) descargas nube-nube, a su vez en la parte (b) se encuentran las descargas de nube a tierra con algunos tipos como: (i) descargas descendentes con polaridad negativa, (ii) descargas descendentes con polaridad positiva, (iii) descargas ascendentes con polaridad negativa y (iiii) descargas ascendentes con polaridad positiva.

2.2.3 Magnitudes de las descargas atmosféricas

La duración promedio de una descarga de rayo es típicamente de unos 30 microsegundos (μs), aunque puede variar considerablemente entre los diferentes tipos de rayos y sus fases. Una descarga completa consta de varias fases: una descarga preliminar que puede durar unos pocos microsegundos, un retorno de corriente principal que dura entre 10 y 100 μs, y posibles descargas sucesivas que pueden seguir en milisegundos posteriores. La rápida liberación de energía en tan corto tiempo hace que los rayos sean fenómenos altamente energéticos y destructivos [9].

La potencia promedio liberada por un rayo se estima en alrededor de 10^13 W. Esta cifra es el resultado de la multiplicación entre la corriente generada, el voltaje y la breve duración de la descarga. En términos energéticos, un solo rayo puede liberar entre 10^9 y 10^10 Joules en una fracción de segundo, lo que es suficiente para encender grandes cantidades de combustible o destruir infraestructura [11].

El campo eléctrico debajo de una nube de tormenta varía ampliamente entre 10000 y 30000 V/m. Este campo eléctrico es el resultado de la separación de cargas dentro de la nube de tormenta, donde las partículas de hielo y agua juegan un papel crucial en el movimiento de electrones. Los campos eléctricos en la base de la nube son los responsables de inducir las descargas atmosféricas que se propagan hacia el suelo o hacia otras nubes [11].

Una nube de tormenta puede contener grandes cantidades de energía, aunque estimar este valor con precisión es complejo. Se ha estimado que una nube de tormenta promedio puede almacenar hasta 200 MWh de energía electrostática en forma de separación de cargas. Es importante mencionar que no toda esta energía se convierte en

una descarga de rayo, ya que el proceso de descarga es solo una liberación parcial de la energía acumulada.

Los voltajes asociados con las tormentas eléctricas suelen estar en el rango de megavoltios (MV). Las diferencias de potencial entre la nube y el suelo o entre distintas regiones de una nube pueden alcanzar hasta 100 MV, lo que es suficiente para superar la resistencia del aire y permitir que ocurra una descarga. Es importante señalar que, a medida que el rayo se propaga, puede ionizar el aire circundante, disminuyendo la resistencia del aire y facilitando el flujo de corriente [9].

Las intensidades de corriente generadas en una descarga pueden alcanzar valores extremos. La corriente promedio de un rayo típico es de alrededor de 30 kA, pero en casos excepcionales se han registrado intensidades de hasta 200 kA e incluso 500 kA en algunos estudios. La corriente varía dependiendo de varios factores, como el tipo de rayo (descarga nube-tierra o intra-nube) y las condiciones atmosféricas. Los rayos más intensos suelen estar asociados con tormentas más severas [9].

La energía disipada en el canal de descarga varía en función de la longitud del canal y la resistencia del aire. El valor típico de energía disipada es de alrededor de 10^5 Joules por metro de canal. Esta energía es responsable de la generación de calor, luz y ondas de choque, que pueden causar daños significativos a infraestructuras y vegetación. El canal de descarga suele tener un diámetro de unos pocos centímetros, pero la temperatura dentro de este puede superar los 29727 °C, lo que es suficiente para vaporizar los materiales circundantes [11].

La frecuencia de las corrientes eléctricas generadas por los rayos cubre un amplio espectro, desde kilohertzios (kHz) hasta megahertzios (MHz). Los componentes de baja frecuencia se asocian con las fases iniciales y finales de la descarga, mientras que los componentes de alta frecuencia se producen durante el retorno de la corriente principal, cuando la velocidad de propagación de las corrientes es mayor. Este comportamiento de las frecuencias es crucial para el diseño de sistemas de protección contra rayos, ya que los sistemas de puesta a tierra deben ser capaces de disipar corrientes a diferentes frecuencias para evitar daños.

2.2.4 Medidas de protección contra descargas atmosféricas

Debido a la peligrosidad que representa una descarga atmosférica en el sistema eléctrico, se han tomado medidas de protección para poder minimizar los riegos que las descargas ocasionan. La principal función de las protecciones contra descargas atmosféricas es drenar la sobre corriente hacia tierra, a continuación, se presentarán algunas medidas de protección contra estas descargas.

2.2.4.1 Sistemas de protección externa

El propósito principal es recibir de manera segura y controlada el impacto de un rayo en una estructura o área abierta que requiere protección. Esto se logra mediante la utilización de dispositivos captadores que permiten desviar la corriente generada por el rayo a través de un conductor de bajada, llevándola hacia la instalación de puesta correspondiente [14].

Los sistemas de protección externa se desglosan en tres componentes esenciales, que son fundamentales para cumplir con su propósito. A continuación, se describen los tres sistemas principales.

2.2.4.2 Sistema de captación

Parten de un SPCR externo, están compuestos por elementos metálicos como varillas, mallas o pararrayos. Su objetivo es atraer y capturar las descargas atmosféricas, y se instalan estratégicamente en puntos elevados como techos, torres o postes. Estas ubicaciones se convierten en el lugar preferido para que las descargas atmosféricas impacten [15].

2.2.4.3 Sistema de bajantes

El sistema de bajantes tiene como objetivo principal conducir la corriente generada por un rayo de manera segura y controlada hacia la tierra, mediante la instalación de una unidad generadora. Para lograr esto, se emplean conductores metálicos como cables, barras de cobre o aluminio [16].

2.2.4.4 Sistema de puesta a tierra

Los dispositivos de captación por sí solos no ofrecen protección contra los rayos. Es necesario que el conductor de bajada se conecte a un terminal de tierra o electrodo de tierra, cuya función es distribuir de manera uniforme la corriente a través del suelo. Es importante cumplir con las normas específicas para la puesta a tierra con el fin de asegurar su correcto funcionamiento [17].

2.2.4.5 Sistemas de protección interna

Estos dispositivos se encargan de disminuir los impactos eléctricos y magnéticos producidos por una descarga atmosférica dentro de un área a proteger. También previenen la formación de un arco eléctrico peligroso que puede generarse por la corriente del rayo en el sistema de protección externo [14].

2.3 Descripción del sistema de puesta a tierra (SPT)

El propósito principal de la puesta a tierra es proporcionar una vía segura para la disipación de corrientes no deseadas, como las corrientes de falla, descargas atmosféricas o corrientes inducidas por interferencias electromagnéticas. Al conectar los componentes metálicos al sistema de tierra, se crea un camino de menor resistencia para que estas corrientes fluyan directamente hacia la tierra, evitando así daños a los equipos, protegiendo a las personas contra descargas eléctricas y previniendo incendios causados por fallas eléctricas.

2.3.1 Elementos del sistema de puesta a tierra

El sistema de puesta a tierra se conforma por una serie de elementos, los cuales muchas veces dependen del lugar donde se los va a aplicar, puede ser para edificios, subestaciones, o torres de transmisión. A continuación, se presentan algunos de los elementos de la puesta a tierra [18].

2.3.1.1 Conductor a tierra

Consiste en un cable que conecta las masas metálicas o el conductor de protección con los electrodos del sistema de puesta a tierra-

2.3.1.2 Borne principal de tierra

Se utiliza para unir el conductor de protección o masa metálica, al conductor a tierra.

2.3.1.3 Conductor de protección

Generalmente se emplea para el sistema de puesta a tierra en los edificios. Se utiliza para unir la masa metálica con el equipo, también se utiliza para proteger contra contactos indirectos.

2.3.1.4 Conexiones

Consiste en las soldaduras o dispositivos mecánicos que se utilizan para realizar las uniones entre los electrodos del sistema de puesta a tierra.

2.3.1.5 Conductor equipotencial

Cosiste en una barra rectangular o un conductor cilíndrico del cual se derivan algunas conexiones para los equipos eléctricos que se dispongan.

2.3.1.6 Terreno

Hace referencia a las propiedades del suelo las cuales son de gran importancia a la hora de realizar un diseño de puesta a tierra, consta de diferentes propiedades que se indicaran a continuación [18].

- Resistencia del suelo: determina la capacidad del suelo para evitar el paso de la corriente por él, esta resistividad depende de la composición propia del suelo.

- Permeabilidad: Determina la capacidad del medio para permitir que atraviese un flujo magnético
- Permitividad: Determina como afecta el material al estar expuesto a un campo eléctrico.

2.3.2 Tipos de electrodos de puesta a tierra

Los electrodos de puesta a tierra se caracterizan por ser metálicos, ya sean horizontales o verticales, tienen la función de dispersar la corriente eléctrica en el suelo. Es importante asegurarse de que la resistencia de conexión a tierra no supere los 10 ohmios en instalaciones generales [19].

Existen varios tipos de electrodos de puesta a tierra que se utilizan en función de diversos factores. A continuación, se describen los diferentes tipos de electrodos disponibles.

2.3.2.1 Electrodos de placa

Estos electrodos deben tener una superficie de contacto directo con el suelo de al menos 20 centímetros cuadrados. En el caso de las placas de acero o hierro, se requiere un espesor mínimo de 6.4 mm, son especialmente útiles en áreas con alta resistividad del terreno, ya que ofrecen una mayor superficie de contacto, en la **Fig. 2** se presenta la forma de un electrodo de placa [20].

Fig. 2. Electrodo de placa. [21]

La **Fig. 2** muestra un electrodo de placa de cobre, donde se observa que tiene 4 placas en forma rectangular unidas entre sí, para dar una conexión a tierra confiable.

2.3.2.2 Electrodos de barras

Estos electrodos están diseñados con materiales de hierro o acero inoxidable. La longitud mínima requerida para estos electrodos es de 2.40 metros. Además, el diámetro varía según el material utilizado, siendo de 15.87 mm para el acero inoxidable y de 12.7 mm para otros materiales, su eficacia depende de la resistividad del terreno y pueden requerir múltiples varillas para lograr una buena conexión, en **la Fig. 3** se muestra los electrodos de barras [22].

Fig. 3. Electrodos de barra. [21]

2.3.2.3 Electrodos de varilla

Material: Generalmente fabricado de acero recubierto de cobre, lo que garantiza una buena conductividad eléctrica y resistencia a la corrosión. Esta combinación asegura la durabilidad y eficiencia del electrodo en diversas condiciones ambientales [23].

Longitud: Las varillas suelen tener una longitud estándar de 2.4 a 3 metros. Esta longitud permite que el electrodo alcance capas más profundas del suelo, mejorando su capacidad para dispersar corrientes eléctricas no deseadas [23].

Radio: El radio de las varillas varía entre 6.38 mm y 12.7 mm, un mayor radio puede ofrecer menor resistencia y mejorar la capacidad de conexión a tierra, mientras que un radio más pequeño puede ser más fácil de instalar en suelos duros [23].

Profundidad de Enterramiento: La profundidad mínima recomendada es de 2.4 metros, aunque puede extenderse hasta 3 metros dependiendo de la longitud, por lo general es la misma distancia.

Resistencia de Conexión a Tierra: La resistencia del electrodo debe ser lo suficientemente baja para garantizar que las corrientes de falla se dispersen de manera efectiva. Idealmente, esta resistencia debe estar por debajo de 10 ohmios para aplicaciones generales.

Durabilidad: La vida útil del electrodo de varilla puede variar dependiendo de factores como la corrosión, el tipo de suelo y las condiciones ambientales. Los electrodos recubiertos de cobre tienden a tener una vida útil más larga en comparación con los de solo acero. La implementación de recubrimientos protectores o el uso de materiales resistentes a la corrosión puede prolongar la vida del sistema.

Capacidad de Manejo de Corriente: La capacidad de un electrodo de varilla para manejar corrientes de corto circuito puede ser de 10 kA hasta 100 kA o más, dependiendo de su diseño y la calidad de los materiales. Esto es crucial para garantizar la protección efectiva en caso de fallas eléctricas o descargas atmosféricas [23].

Frecuencia de Operación: Los electrodos tipo varilla deben ser diseñados para manejar frecuencias variables. En aplicaciones de alta frecuencia, como las generadas por rayos, la impedancia puede aumentar. Un diseño adecuado minimiza este efecto y asegura que el electrodo permanezca efectivo en un rango de frecuencias de kHz a MHz.

Fig. 4. Electrodo de puesta a tierra tipo varilla. [21]

2.4 Modelos para el análisis de electrodos de puesta a tierra en altas frecuencias

La representación convencional de la puesta a tierra se basa en una resistencia de valor bajo, pero esta descripción solo es válida para frecuencias bajas. Sin embargo, cuando se trabaja con altas frecuencias, como en el caso de una descarga atmosférica, surgen efectos capacitivos e inductivos que alteran el comportamiento de la puesta a tierra [18].

Para realizar el análisis del comportamiento de los electrodos de puesta a tierra en altas frecuencias se tiene algunos modelos presentados a continuación.

2.4.1 Modelo de circuitos

El modelo de circuitos fue uno de los primeros en ser utilizado para estudiar los sistemas de puesta a tierra ante altas frecuencias. Este modelo se considera simple porque describe los electrodos de puesta a tierra como un circuito compuesto por una resistencia, un capacitor y un inductor como se muestra en la **Figura 5.** [18]

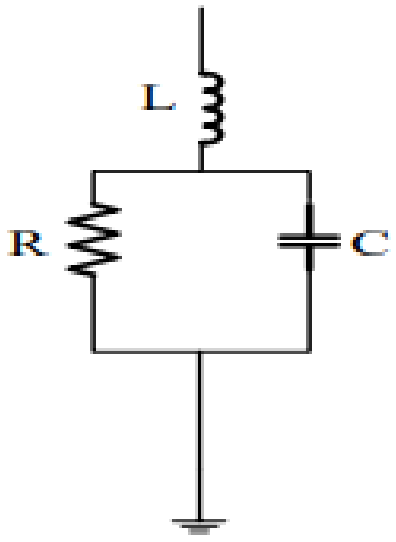


Fig. 5. Modelo de circuitos. [24]

La **fig. 5** muestra los 3 componentes, la resistencia puede ser un valor fijo o variable dependiendo del sistema y las condiciones de la puesta a tierra, la inductancia

que se presenta cuando la corriente circula a tierra y la capacitancia distribuida en los componentes del sistema, estas pueden interactuar entre sí y afectar a la impedancia total del sistema a diferentes frecuencias.

Aunque este modelo simplificado no captura todos los detalles y complejidades de los sistemas de puesta a tierra, puede proporcionar una aproximación útil en situaciones donde los efectos inductivos y capacitivos son significativos. Además, su simplicidad permite realizar cálculos más sencillos y rápidos en comparación con modelos más complejos.

2.4.2 Modelo electromagnético

La teoría del campo electromagnético es el método más riguroso para modelar el comportamiento transitorio de sistemas de puesta a tierra. Esto se debe a que esta teoría resuelve completamente las ecuaciones de Maxwell, que son las ecuaciones fundamentales que describen el comportamiento de los campos electromagnéticos [25].

Al utilizar la teoría del campo electromagnético, se pueden obtener soluciones más precisas y detalladas del comportamiento de los sistemas de puesta a tierra, especialmente en situaciones transitorias, a diferencia de otros modelos que hacen suposiciones y aproximaciones.

Existen dos métodos específicos para aplicar la teoría del campo electromagnético en el modelado de sistemas de puesta a tierra: el Método de los Momentos y el Método de los Elementos Finitos [25]. El método de elementos finitos que es el más utilizado se muestra en la **Fig. 6**.

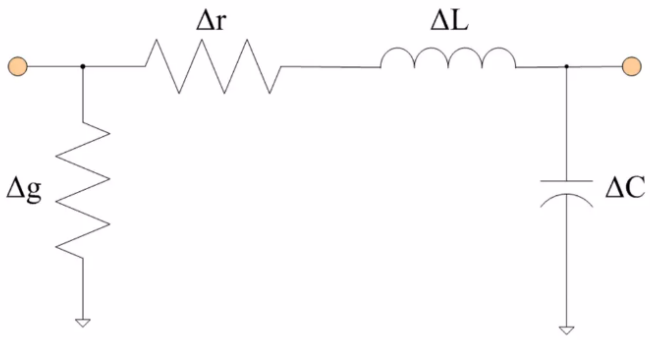


Fig. 6. Modelo de elementos finitos. [26]

En la **fig. 6** muestra al modelo de elementos finitos en función de resistencia, inductor y capacitor, donde se asignan propiedades electromagnéticas específicas, la resistividad eléctrica para la resistencia y la permeabilidad magnética para el inductor y el capacitor, que servirán para analizar la respuesta electromagnética del sistema.

2.4.3 Modelo de línea transmisión

El modelo de línea de transmisión es utilizado para representar los electrodos cilíndricos, y considera la distribución de los parámetros eléctricos (resistencia, inductancia, capacitancia y conductancia) a lo largo de su longitud como se muestra en la **Fig.7**. Esto permite una aproximación más precisa del comportamiento eléctrico de los electrodos en diferentes condiciones [27].

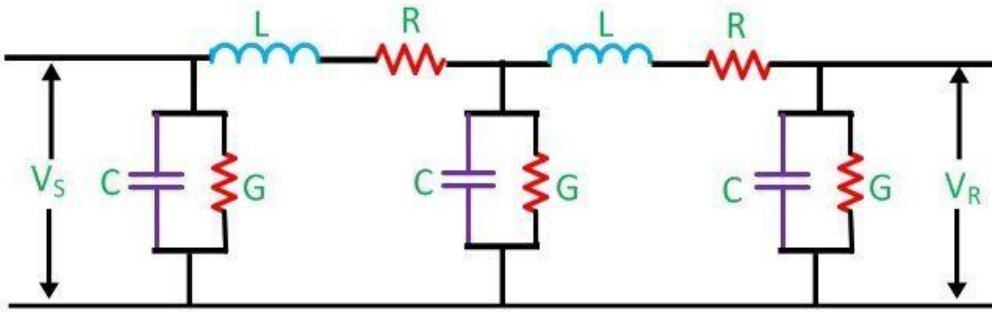


Fig. 7. Modelo de línea de transmisión. [28]

La **Fig. 7** muestra un modelo simplificado de una línea de transmisión que se utiliza para analizar los efectos de los electrodos de puesta a tierra ante altas frecuencias. El modelo incluye una resistencia que representa la conexión a tierra del electrodo, inductor que representa los cables de conexión y otros elementos inductivos y un capacitor que representan las capacitancias parasitas que pueden existir en el sistema.

Al considerar la distribución de estos parámetros eléctricos a lo largo del conductor en el modelo de línea de transmisión, permite realizar cálculos y análisis más detallados en relación con la respuesta del electrodo ante señales de alta frecuencia o transitorias.

2.4.4 Modelo híbrido

El modelo híbrido combina la utilización de las ecuaciones de Maxwell del modelo electromagnético, la teoría de circuitos y el análisis de propagación de ondas para comprender y describir el comportamiento transitorio de los electrodos producidos por descargas atmosféricas y la distribución de corrientes en los conductores de puesta a tierra. Además, se analiza el acople entre los diferentes componentes del sistema para comprender cómo se propagan las perturbaciones electromagnéticas en el medio [29].

Para el análisis del modelo híbrido en las ecuaciones de Maxwell se toma en cuenta los fenómenos como la inducción electromagnética, la propagación de ondas electromagnéticas y otros efectos electromagnéticos asociados a las descargas atmosférica, a su vez gracias al análisis de propagación de ondas, comprender cómo las ondas se comportan y se acoplan entre los electrodos y el entorno.

2.5 Normas aplicadas para el diseño del SPT

Las normas establecen directrices y requisitos técnicos que deben seguirse durante el diseño del SPT. Estas normas son desarrolladas por organizaciones y comités técnicos reconocidos a nivel nacional e internacional, con el objetivo de garantizar la protección de las personas, los equipos y las instalaciones eléctricas, a continuación, se detallan

algunas de las normas que se deben aplicar a la hora de realizar una instalación de puesta a tierra.

2.5.1 Norma IEEE Std 80-2013

La Norma IEEE Std 80-2013, titulada "Guía para la Evaluación de Sistemas de Puesta a Tierra de Corriente Alterna", es una norma ampliamente reconocida y utilizada en la industria eléctrica. Esta norma, desarrollada por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE), proporciona directrices y recomendaciones para la evaluación y el diseño de sistemas de puesta a tierra de corriente alterna.

En resumen, esta norma toma algunas consideraciones como la resistividad del suelo que establece valores y consideraciones para su medición, también brinda el dimensionamiento de los electrodos de puesta a tierra donde ofrece pautas y fórmulas para calcular el dimensionamiento del electrodo, a su vez brinda el análisis de potencia de cortocircuito donde proporciona métodos para su análisis.

2.5.2 Norma IEEE Std 142

La IEEE Std 142, establece los lineamientos para el diseño, instalación y mantenimiento de sistemas de puesta a tierra en instalaciones industriales y comerciales. Esta norma proporciona recomendaciones para garantizar la seguridad, la protección contra fallos eléctricos y la correcta operación de los equipos eléctricos. En particular, establece que la impedancia de la puesta a tierra debe ser lo más baja posible, generalmente menor a 5 ohmios en entornos industriales y comerciales, para asegurar la adecuada disipación de corrientes de falla y la protección de personas y equipos.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación, se presentan los métodos de investigación que se utilizaron para el desarrollo del proyecto. Además, se presenta una descripción del procedimiento realizado y los materiales utilizados como el software, ecuaciones matemáticas.

3.1 Metodología

Para el desarrollo del proyecto se utilizaron algunos métodos de investigación los cuales se muestran a continuación.

El método de investigación documental se empleó para recopilar información sobre las descargas atmosféricas y la puesta a tierra, utilizando como fuentes tesis de grado, tesis de maestría, libros y artículos científicos. En cuanto a las descargas atmosféricas, se investigó cómo se presentan en el ambiente, los tipos de descargas que existen y las magnitudes que alcanzan. En relación con la puesta a tierra, se estudió su funcionamiento, los tipos de electrodos más utilizados, las diferentes conexiones, los elementos utilizados y las diversas normas que deben cumplirse. Este método también se utilizó para conocer el comportamiento de los electrodos de puesta a tierra ante altas frecuencias, donde se revisó varias tesis, en las cuales se mostraron el comportamiento del electrodo a altas frecuencias, a través de simulaciones, proporcionando así una idea más clara de los resultados que se esperan obtener.

También se utilizó el método documental para revisar los diferentes modelos matemáticos que se utilizan para el análisis de electrodos de puesta a tierra ante altas frecuencias, estos modelos cumplen ciertas características y formas de diseño, sus diferencias son su exactitud y dificultad, hay modelos fáciles de realizar, pero a su vez su exactitud no es la mejor y modelos con una dificultad mayor, pero que su exactitud es alta.

Se utilizó el método científico para la aplicación del modelo de circuitos y modelo híbrido en Matlab, esto a través de las ecuaciones que ofrece cada modelo para la obtención de resultados.

Se empleó el método experimental para determinar los valores que se va a utilizar en la simulación, para lo cual se inspecciona el lugar donde se encuentre una puesta a tierra existente y se realiza mediciones para la simulación.

Para la simulación del modelo híbrido con los valores determinados se usó el método experimental basándose en tecnologías computacionales como Matlab, para el análisis de las simulaciones se empleó el método analítico, el cual consistió en analizar los resultados del comportamiento del electrodo para los valores determinados.

Por último, para realizar el estudio térmico del electrodo se utilizó el método experimental, el cual permitió observar las diferentes temperaturas que tiene el electrodo al variar la frecuencia.

3.2 Procedimiento

La elaboración del proyecto sigue un procedimiento meticuloso en el cual se detalla cada paso realizado. A continuación, se presenta el diagrama de bloques que ilustra el procedimiento llevado a cabo.

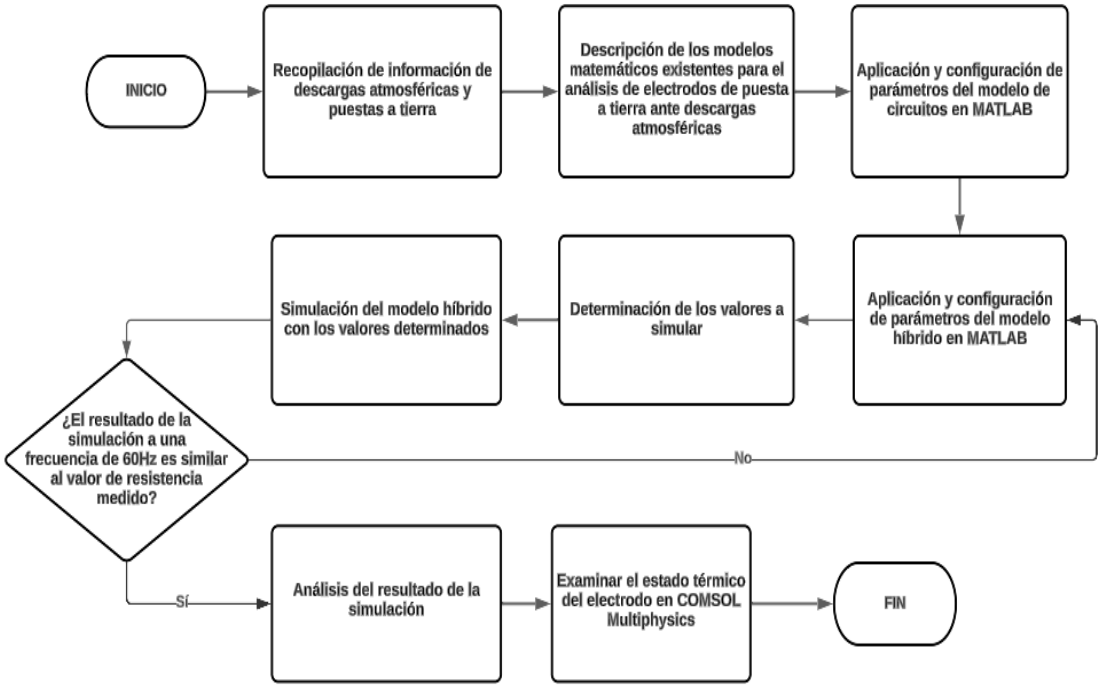


Fig. 8. Diagrama de flujo del procedimiento realizado.

A partir de la recopilación de información realizada se pudo conocer el origen de las descargas atmosféricas las cuales se generan en una nube; además, se identificó el tipo de descarga atmosférica que afecta a los electrodos de puesta a tierra y las magnitudes de estas descargas. La información recopilada sobre la puesta a tierra permitió conocer los tipos de electrodos que se utiliza para la implementación de una puesta a tierra como placa, barra y varilla.

Posteriormente, se investigaron los modelos existentes para el análisis del comportamiento de los electrodos de puesta a tierra ante altas frecuencias, entre los cuales se encontraban el modelo de circuitos, electromagnético, línea de transmisión e híbrido.

Para la aplicación del modelo de circuitos y el modelo híbrido se utilizó el software Matlab en el cual se configuraron los parámetros de entrada que necesita cada modelo como geometría y profundidad del electrodo, resistividad del suelo, permitividad y permeabilidad relativas del suelo, rango de frecuencia y el caso del modelo híbrido el

tipo de onda de la descarga. Con estos parámetros de entrada se ingresaron las ecuaciones correspondientes para modelar al electrodo.

Una vez aplicado los modelos, se escogió una puesta a tierra existente en la Carrera de Electricidad, donde se realizaron mediciones para obtener la geometría del electrodo y la resistividad del suelo. En cuanto a la permeabilidad y permitividad del suelo, se estableció un valor estimado, ya que la medición directa de estos parámetros podría comprometer la integridad de la puesta a tierra.

Con los valores determinados, se ejecutó la simulación, obteniendo como resultado la gráfica de frecuencia e impedancia, en esta parte se verifico que la impedancia en baja frecuencia sea similar al valor medido de la resistencia de puesta a tierra existente, para así corroborar que el modelo tiene cierta precisión, en el caso de que el valor no sea similar se deben realizar cambios en la aplicación y configuración de sus parámetros.

Posteriormente se realizó un análisis del resultado de la simulación, en el cual se varió el parámetro de la resistividad del suelo para observar que comportamiento tiene el electrodo.

Finalmente, a partir de los datos obtenidos en la simulación, como la impedancia y la corriente, se analizó el comportamiento térmico del electrodo. Para ello, se calculó la potencia disipada y, mediante un software especializado, se visualizaron los niveles de temperatura del electrodo a diferentes frecuencias.

3.3 Materiales

En el desarrollo del proyecto se utilizaron diversos materiales que fueron útiles para la realización y validación del proyecto, a continuación, se presentan los materiales utilizados.

3.3.1 Software Matlab

Se utilizó el software MATLAB para desarrollar el código necesario para la configuración del modelo híbrido. Además, se implementó una interfaz que permite ingresar datos de entrada, como la resistencia del suelo, la permeabilidad y el diámetro

del electrodo. Esto facilita la generación de gráficos que permiten analizar su comportamiento cuando está sometido a altas frecuencias.

3.3.2 Ecuaciones matemáticas del modelo híbrido

Las ecuaciones matemáticas del modelo híbrido son determinadas por el comportamiento que puede tener el electrodo de puesta a tierra, estas permitieron realizar el código en Matlab y poder obtener los resultados de las gráficas. Las ecuaciones que se utilizaron se mencionan a continuación.

3.3.2.1 Transformada rápida de Fourier

Para esta etapa se deben escoger las frecuencias más importantes que caracterizan a la señal de la fuente inyectada al sistema de puesta a tierra, por ello se utilizó ecuación de la transformada rápida de Fourier para pasar la señal al dominio de la frecuencia, a continuación, se presenta en la ecuación (1).

$$X[K] = \sum_{n-0}^{N-1} x[n] * e^{-j*\frac{2*\pi}{N}*k*n} \quad (1)$$

Donde:

$X[k]$: Es el valor de la señal en el dominio de la frecuencia.

x[n]: Es el valor de la señal en el dominio del tiempo.

N: Es el número total de muestras

n: Es el número de muestra que se está trabajando en el dominio del tiempo.

k: Es el número de muestra que se está trabajando en el dominio de la frecuencia.

3.3.2.2 Impedancia transversal y longitudinal

Las ecuaciones de impedancia transversal y longitudinal son las sumas de los efectos inductivos y capacitivos producidos por un segmento original. A continuación, se muestran las ecuaciones de impedancia transversal y longitudinal.

$$Z_{L_{ij}} = -j\frac{w\mu}{4\pi}\left[\int_{Li}\int_{Lj}\frac{e^{-yr}}{r}\overrightarrow{dl_j}\cdot\overrightarrow{dl_\iota} + \int_{Li}\int_{L'j}\frac{e^{-yr'}}{r'}\overrightarrow{dl'_j}\cdot\overrightarrow{dl_\iota}\right] (2)$$

$$Z_{T_{ij}} = \frac{1}{4\pi(\sigma+jw\varepsilon)L_iL_j}\left[\int_{Li}\int_{Lj}\frac{e^{-yr}}{r}\overrightarrow{dl_j}\cdot\overrightarrow{dl_\iota} + \int_{Li}\int_{L'j}\frac{e^{-yr'}}{r'}\overrightarrow{dl'_j}\cdot\overrightarrow{dl_\iota}\right] (3)$$

3.3.2.3 Matriz de impedancia Longitudinal

La matriz de impedancia longitudinal es un arreglo de los efectos inductivos que están presentes en los electrodos de puesta a tierra, la cual presenta en su diagonal principal las impedancias propias de cada segmento del electrodo. A continuación, se presenta dicha matriz.

$$Z_L = \begin{bmatrix} Z_{L_{11}} & Z_{L_{12}} & Z_{L_{13}} & \cdots & Z_{L_{1n}} \\ Z_{L_{21}} & Z_{L_{22}} & Z_{L_{23}} & \cdots & Z_{L_{2n}} \\ Z_{L_{31}} & Z_{L_{32}} & Z_{L_{33}} & \cdots & Z_{L_{3n}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{L_{n1}} & Z_{L_{n2}} & Z_{L_{n3}} & Z_{L_{n3}} & Z_{L_{nn}} \end{bmatrix} (1)$$

3.3.2.4 Matriz de impedancia transversal

La matriz de impedancia longitudinal es un arreglo de los efectos inductivos que están presentes en los electrodos de puesta a tierra, la cual presenta en su diagonal principal las impedancias propias de cada segmento del electrodo. A continuación, se presenta dicha matriz.

$$Z_T = \begin{bmatrix} Z_{T_{11}} & Z_{T_{12}} & Z_{T_{13}} & \cdots & Z_{T_{1n}} \\ Z_{T_{21}} & Z_{T_{22}} & Z_{T_{23}} & \cdots & Z_{T_{2n}} \\ Z_{T_{31}} & Z_{T_{32}} & Z_{T_{33}} & \cdots & Z_{T_{3n}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{T_{n1}} & Z_{T_{n2}} & Z_{T_{n3}} & Z_{T_{n3}} & Z_{T_{nn}} \end{bmatrix} (2)$$

3.3.2.5 Arreglo matricial

Una vez calculadas las matrices transversales y longitudinales se proceden a desarrollar ciertos arreglos matriciales donde primero se le emplea la ley de Ohm y se desarrolla una relación del voltaje promedio con respecto a los puntos de los terminales del segmento, esta relación se emplea ´para crear una matriz auxiliar que se compone de "n" filas y "m" columnas donde "n" es el número de segmentos y "m" el número de nodos. A continuación, se presenta el arreglo matricial resultante.

$$I_{T[nx1]} = Y_{T[nxn]} \cdot [A_T]_{[nxm]} \cdot V_{N[mx1]} \ (3)$$

Para relacionar la diferencia de potencial en los nodos de los electrodos se tiene que expresar en forma matricial y se realiza igual que la matriz auxiliar. A continuación, se presenta el arreglo matricial resultante.

$$I_{L[nx1]} = Y_{T[nxn]} \cdot [A_L]_{[nxm]} \cdot V_{N[mx1]} \ (4)$$

Se emplea la ley de nodos de Kirchhoff en la configuración de electrodos de puesta a tierra, la corriente transversal se concentra en los extremos del segmento, en cambio la corriente longitudinal atraviesa todo el segmento. A continuación, se presenta el arreglo matricial resultante.

$$\left[[-A'_L A'_L]_{mx2n} \cdot \begin{bmatrix} Y_L \cdot A_L \\ Y_T \cdot A_T \end{bmatrix}_{2nxm}\right] \cdot [V_N]_{mx1} = I_{y[mx1]} \ (5)$$

3.3.2.6 Impedancia

Para obtener la gráfica de frecuencia e impedancia se necesita calcular dicha impedancia, la cual es la relación entre el voltaje y la corriente, a continuación, se presenta la ecuación [7].

$$Z_g = \frac{V_i}{I_i} \ (4)$$

Donde:

Z_g: Impedancia de puesta a tierra

V_i : Voltaje

I_i : Corriente

3.3.3 Ecuaciones matemáticas del modelo de circuitos

Las ecuaciones matemáticas del modelo de circuitos son determinadas por el comportamiento que puede tener el electrodo de puesta a tierra ante una descarga atmosférica. Las ecuaciones que se utilizaron se mencionan a continuación.

3.3.3.1 Resistencia

Representa las pérdidas de energía en el electrodo y el suelo. A continuación, se presenta la ecuación.

$$R = \frac{\rho}{\pi L}\left(\ln\left(\frac{2L}{2ha}\right) - 1\right) \quad (5)$$

Donde:

ρ = Resistividad del suelo

L = Longitud del electrodo

h = Profundidad

a = Radio del electrodo

Para el cálculo de la impedancia en función de la frecuencia

3.3.3.2 Capacitancia

Modela el acoplamiento eléctrico entre el electrodo y la tierra. A continuación, se presenta la ecuación.

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r L}{2\pi}\left(\ln\left(\frac{2L}{2ha}\right) - 1\right) (6)$$

Donde:

μ_0 = Permeabilidad del vacío

μ_r = Permeabilidad relativa del suelo

L = Longitud del electrodo

h = Profundidad

a = Radio del electrodo

Para el cálculo la impedancia en función de la frecuencia se debe calcular la reactancia capacitiva. A continuación, se presenta la ecuación.

$$XC = \frac{1}{2\pi f C} (7)$$

Donde:

C = Capacitancia

f = Frecuencia

3.3.3.3 Inductancia

Refleja los efectos electromagnéticos y la oposición a cambios rápidos de corriente. A continuación, se presenta la ecuación.

$$C = \left(\left(\frac{\pi e_0 e_r L}{\ln\left(\frac{2L}{2ha}\right)}\right) - 1\right) (8)$$

Donde:

e_0 = Permitividad del vacío

e_r = Permitividad relativa del suelo

L = Longitud del electrodo

h = Profundidad

a = Radio del electrodo

Para el cálculo la impedancia en función de la frecuencia se debe calcular la reactancia inductiva. A continuación, se presenta la ecuación.

$$XL = 2\pi fL \quad (9)$$

Donde:

L = Inductancia

f = Frecuencia

3.3.3.4 Impedancia

Calcula la impedancia para cada valor de frecuencia tomando en cuenta la resistencia, inductancia y capacitancia. A continuación, se presenta la ecuación.

$$Z = abs\left(jXL - \left(\frac{RXCj}{R - XCj}\right)\right) \quad (10)$$

3.3.4 Potencia disipada

La potencia disipada en el estudio térmico se define como la energía convertida en calor debido al paso de corriente a través del electrodo de puesta a tierra. Esta potencia, se calcula a partir de la impedancia y la corriente, es un factor clave en el

aumento de temperatura del electrodo, lo que puede afectar su integridad estructural y desempeño a largo plazo. A continuación, se presenta la ecuación.

$$P = I^2 \cdot R \quad (11)$$

Donde:

P= Potencia disipada

I= Corriente

R= Magnitud de la impedancia

CAPITULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados y discusiones parten de la pregunta de investigación ¿Cómo inciden las altas frecuencias por descargas atmosféricas en el comportamiento de los electrodos de puesta a tierra?

Mediante el software MATLAB se evaluaron diferentes frecuencias que puede tener una descarga atmosférica para así observar el comportamiento de los electrodos de puesta a tierra. A continuación, se presentan los resultados y discusiones obtenidos del presente proyecto.

4.1 Aplicación de los modelos matemáticos para análisis de electrodos de puesta a tierra

Se investigó los tipos de modelos existentes sobre el análisis del comportamiento de electrodos de puesta a tierra ante altas frecuencias entre los cuales se ha optado por aplicar un modelo de circuitos y un modelo híbrido en Matlab, esto con la finalidad de observar cómo mejora la precisión de los resultados de un modelo a otro. A continuación, se presenta la aplicación de dichos modelos.

4.2 Aplicación del modelo de circuitos en Simulink

Se utilizó simulink para la aplicación de un modelo de circuitos que tiene la finalidad de ser un modelo más didáctico que permite realizar simulaciones y observar el comportamiento del electrodo de puesta a tierra de una manera más sencilla.

Para la aplicación del modelo de circuitos en Simulink, se seleccionaron los bloques que se va a utilizar para ingresar los parámetros de entrada, el cálculo de las ecuaciones y además en donde se observa la gráfica de la frecuencia e impedancia, los bloques utilizados fueron:

- Constant: Permite generar un valor constante, el cual sirve para los datos de entrada.

- Display: Se utiliza para mostrar el valor de una señal durante la simulación, en este bloque va a mostrar los valores de resistencia, capacitancia, inductancia calculados.
- Goto y From: Se utilizan para transferir señales de un punto a otro sin tener que hacer conexiones físicas, estos sirven para transferir los valores de resistencia, inductancia y capacitancia hacia otro espacio de cálculo.
- Slider: Útil para ajustar parámetros en tiempo real la cual sirve para hacer el barrido de frecuencia y a su vez también ingresar la corriente.

Para el cálculo de las ecuaciones utilizadas en el modelo de circuitos, se empleó el bloque 'MATLAB function', el cual permitió ingresar el código correspondiente, incluir las ecuaciones del modelo de circuito y realizar los cálculos con los valores de entrada.

Para visualizar las gráficas en Simulink, se utilizó el bloque “Scope”, que permite observar señales durante la simulación, para así obtener la gráfica resultante frecuencia e impedancia. A continuación, se presenta una imagen que muestra la disposición de los bloques en Simulink.

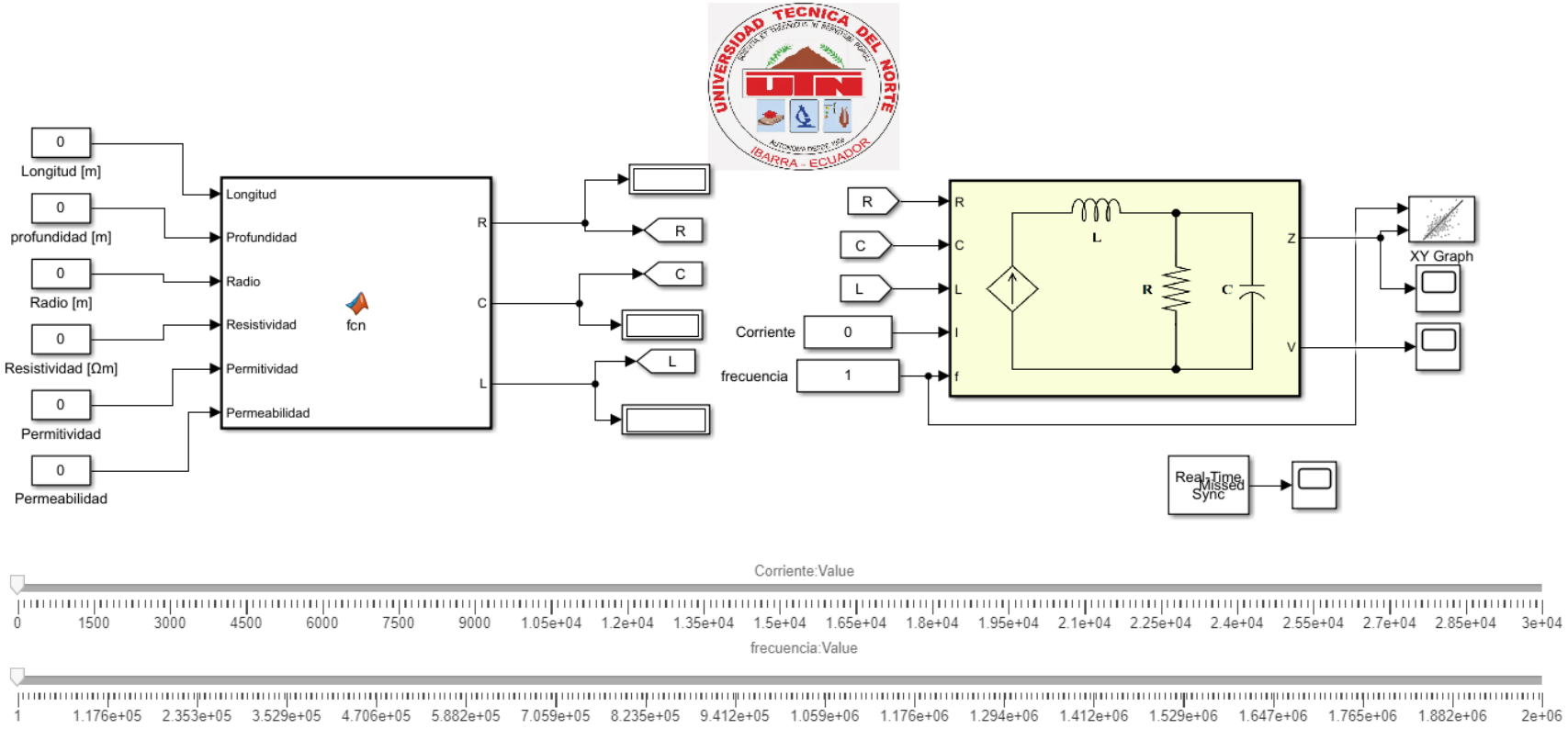


Fig. 9. Configuración del modelo de circuitos en Simulink.

En la **Fig. 9** se presenta la configuración de los bloques en Simulink, la cual permitió ingresar los datos de entrada, tales como la longitud y el radio del electrodo, la profundidad en la que se encuentra ubicado, así como la resistividad, permeabilidad y permitividad relativa del suelo.

Una vez ingresado los valores de entrada, el primer bloque "Matlab function" realiza los cálculos para obtener el valor de la resistencia con la **Ecuación (5)**, el valor de la capacitancia con la **Ecuación (6)** y el valor de la inductancia con la **Ecuación (8)**.

El siguiente "Matlab function" realiza los cálculos para obtener la impedancia en función de la frecuencia, para lo cual se calcula la reactancia capacitiva con la **Ecuación (7)**, la reactancia inductiva con la **Ecuación (9)** y la impedancia con la **Ecuación (10)**, para así obtener la gráfica resultante frecuencia e impedancia.

4.2.1 Simulación del modelo de circuitos

Para comprobar la funcionalidad del modelo de circuitos se realizó una simulación utilizando un ejemplo con los siguientes valores.

La simulación se realizó con un electrodo vertical de longitud de 3m, radio de 0.008m, profundidad de 3m, estos valores son los recomendados por un instructivo para el diseño de puesta a tierra en líneas de transmisión elaborado por CELEC EP (Corporación Eléctrica del Ecuador) [30].

El valor de permeabilidad y permitividad relativa se establece en 1, esto siguiendo la recomendación de Hernán Montaña en la cual menciona que el valor de estos parámetros puede ser tomados igual a los del vacío.

El valor de la resistividad del suelo es de 22Ωm, este valor se extrajo de una tesis titulada "Modelamiento de la resistividad típica para los diferentes tipos de suelos en la parroquia el sagrario del cantón de Ibarra" donde se realizó mediciones a diferentes tipos de suelo, y este valor es para un suelo humus.

El barrido de frecuencia es de 1 Hz a 2MHz, este valor es debido a que ciertas investigaciones mencionan que el comportamiento del electrodo de puesta a tierra se ve afectado a una frecuencia cercana a 1MHz, para lo cual escoger una frecuencia mayor ayuda a observar dicho comportamiento. La gráfica obtenida se muestra en la **Fig. 13**.

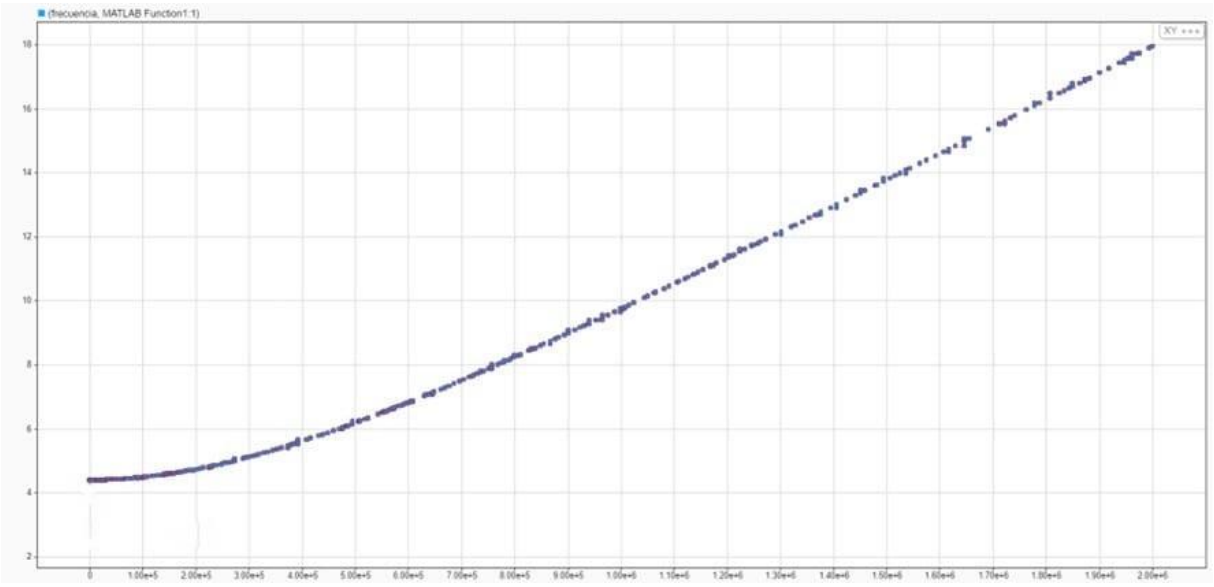


Fig. 10. Gráfica frecuencia e impedancia del modelo de circuitos

En la **Fig. 10** se muestra la gráfica de frecuencia e impedancia del modelo de circuitos, se observa que la impedancia va aumentando conforme aumenta la frecuencia, este aumento se realiza de una manera lineal el cual para representar el comportamiento del electrodo no es el adecuado ya que en altas frecuencias parámetros como la inductancia y capacitancia tienden a dominar dicho comportamiento.

Para representar de manera adecuada el comportamiento del electrodo de puesta a tierra es necesario tomar en cuenta la propagación de ondas electromagnéticas en el suelo, para ello se utilizó el modelo híbrido que consiste en una combinación entre el modelo de circuitos realizado y un modelo electromagnético el cual toma en cuenta el parámetro de la onda del rayo, mejorando la precisión de los resultados.

4.3 Aplicación del modelo híbrido en Matlab

La aplicación del modelo híbrido permitió observar el comportamiento del sistema de puesta a tierra en función de la frecuencia. Para ello, se empleó el software MATLAB, el cual fue utilizado para crear una interfaz que permitió el ingreso de los datos necesarios para el análisis del sistema de puesta a tierra. Dicho software realizó los cálculos pertinentes y presentó los resultados en una gráfica de frecuencia e impedancia. A continuación, se muestra un diagrama con los datos de entrada y salida implementados en el modelo híbrido.

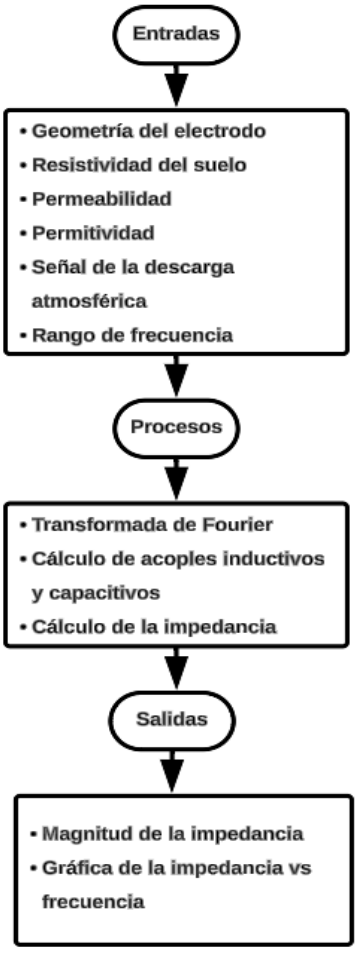


Fig. 11. Procesos del modelo Híbrido

La **Fig. 11** ilustró el proceso realizado por el modelo híbrido en MATLAB. Al ingresar los datos de entrada en la interfaz, estos fueron enviados al modelo en MATLAB, el cual efectuó los cálculos correspondientes para obtener las salidas, como la magnitud de la impedancia y las frecuencias analizadas. Posteriormente, se generó la gráfica de frecuencia e impedancia, lo que permitió realizar un análisis detallado del comportamiento del electrodo de puesta a tierra ante altas frecuencias. Esta configuración respondió la correcta transmisión de los datos desde la interfaz hasta el modelo en MATLAB, facilitando una representación precisa y visual del fenómeno estudiado.

4.3.1 Aplicación del modelo híbrido e interfaz en Matlab

A continuación, se presenta como se realizó el modelo híbrido y la interfaz en Matlab, además se muestra la imagen de como está planteado la interfaz y el algoritmo que sigue el modelo para encontrar los resultados.

4.3.1.1 Desarrollo de la interfaz

Para el desarrollo de la interfaz se utilizó una función de Matlab llamada appdesigner la cual permite crear bloques para ingresar datos, botones de inicio, etiquetas y visualización de la simulación, a continuación, se detalla cómo se realizó la interfaz.

Para la configuración de la interfaz gráfica en Simulink, se seleccionaron los siguientes bloques:

- Button: Utilizado como el botón de inicio, permitiendo iniciar la simulación de manera controlada.
- Axes: Permite la visualización de la gráfica de impedancia versus frecuencia en la interfaz, facilitando el análisis visual de los resultados.
- Edit Field (number): Facilita el ingreso de valores numéricos, siendo esencial para introducir los parámetros de entrada como la resistividad, permeabilidad, permitividad y la geometría del electrodo.

Estos bloques fueron cuidadosamente escogidos para asegurar una interacción intuitiva y Los bloques fueron seleccionados cuidadosamente para garantizar una interacción intuitiva y eficiente con la simulación. El bloque *Button* proporcionó un control sencillo para iniciar la simulación, mientras que *Axes* ofreció una representación gráfica clara y detallada de los resultados, aspecto fundamental para el análisis de la impedancia en función de la frecuencia. Por último, *Edit Field (number)* permitió la entrada precisa de los datos necesarios, asegurando que los parámetros de la simulación se ajustaran a las especificaciones del modelo híbrido.

A continuación, se presenta una imagen de la interfaz realizada, mostrando la disposición y funcionalidad de los bloques seleccionados.

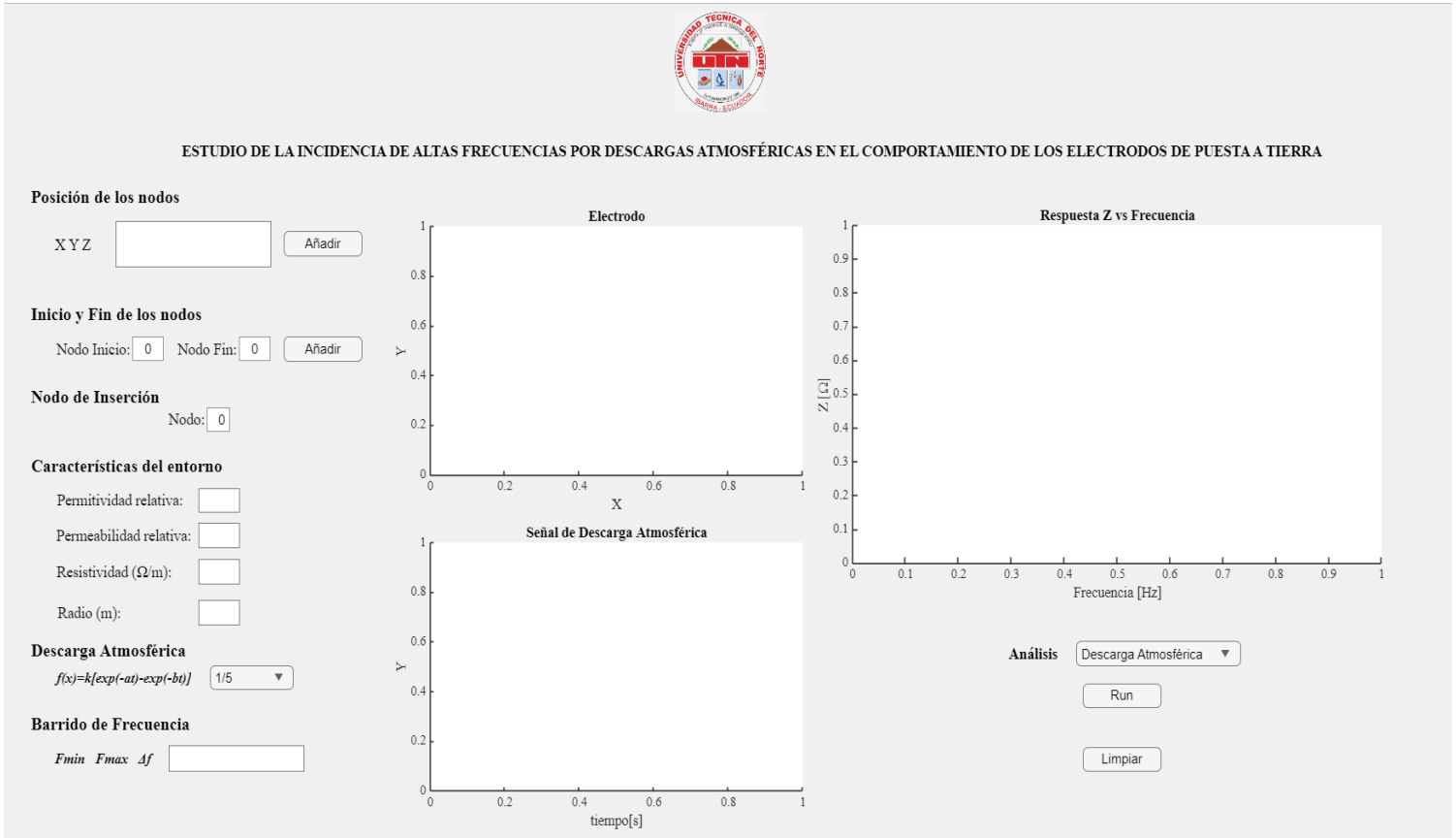


Fig. 12. Interfaz gráfica del modelo híbrido

La **Fig. 12** muestra la interfaz gráfica donde se ingresan los datos de entrada, tales como la permeabilidad relativa, permitividad relativa, resistividad, geometría del electrodo, tipo de descarga atmosférica y los valores de frecuencia a utilizar. Esta interfaz cuenta con dos botones: "Run", que inicia la simulación, y "Limpiar", que borra todos los datos simulados previamente para evitar errores. El resultado de la simulación se visualiza en una gráfica de frecuencia e impedancia.

4.3.1.2 Aplicación del modelo híbrido en Matlab

Para la aplicación del modelo híbrido se sigue un algoritmo el cual permite analizar el sistema de puesta a tierra en función de la frecuencia, dicho algoritmo se presenta de la siguiente manera.

Para su inicio se debe ingresar los datos eléctricos y geométricos del sistema de puesta a tierra, seleccionar las frecuencias en las cual se va a trabajar y se procederá hacer una segmentación de los electrodos del STP donde se realiza los cálculos pertinentes entre los cuales se tiene:

Transformada rápida de Fourier: Esto se realiza con la **Ecuación (1)**,

Cálculo de los acoples inductivos: Esto se realiza con la **Ecuación (2)** para una de las frecuencias no trabajadas mediante la sumatoria de Riemann

Cálculo de los acoples capacitivos: Esto se realiza con la **Ecuación (3),** al igual que el de los acoples inductivos se realiza para una de las frecuencias no trabajadas mediante la sumatoria de Riemann.

Posteriormente se crean las matrices de impedancias longitudinales y transversales mediante las **Matrices (1) y (2)**. Una vez se creen las matrices se realiza la inversa de estas.

Se procede a calcular la matriz auxiliar transversal y longitudinal por medio de las **Matrices (3) y (4)**.

Una vez terminado este proceso se formula el sistema matricial mediante la **Matriz (5)** donde la matriz auxiliar es obtenida mediante las leyes de nodos.

Todo el proceso anterior se realiza para cada una de las frecuencias que se va a trabajar y una vez terminada la última frecuencia se procede a calcular la impedancia mediante la **Ecuación (4)**.

Para así lograr obtener la respuesta del algoritmo que será mediante la gráfica de frecuencia e impedancia.

4.3.1.3 Simulación del modelo híbrido

Para comprobar la funcionalidad del modelo híbrido se realizó una simulación utilizando un ejemplo con los siguientes valores.

La simulación se realizó con un electrodo vertical de longitud de 3m, radio de 0.008m, profundidad de 3m, estos valores son los recomendados por un instructivo para el diseño de puesta a tierra en líneas de transmisión elaborado por CELEC EP (Corporación Eléctrica del Ecuador) [30].

El valor de permeabilidad y permitividad relativa se establece en 1, considerando los criterios establecidos por Jaimis Leon en un artículo científico publicado en la revista "SciElO" [27].

El valor de la resistividad del suelo es de 22Ωm, este valor se extrajo de una tesis titulada "Modelamiento de la resistividad típica para los diferentes tipos de suelos en la parroquia el sagrario del cantón de Ibarra" donde se realizó mediciones a diferentes tipos de suelo, y este valor es para un suelo humus.

El barrido de frecuencia es de 1 Hz a 2MHz, este valor es debido a que ciertas investigaciones mencionan que el comportamiento del electrodo de puesta a tierra se ve afectado a una frecuencia cercana a 1MHz, para lo cual escoger una frecuencia mayor ayuda a observar dicho comportamiento. La gráfica obtenida se muestra en la **Fig. 13**.

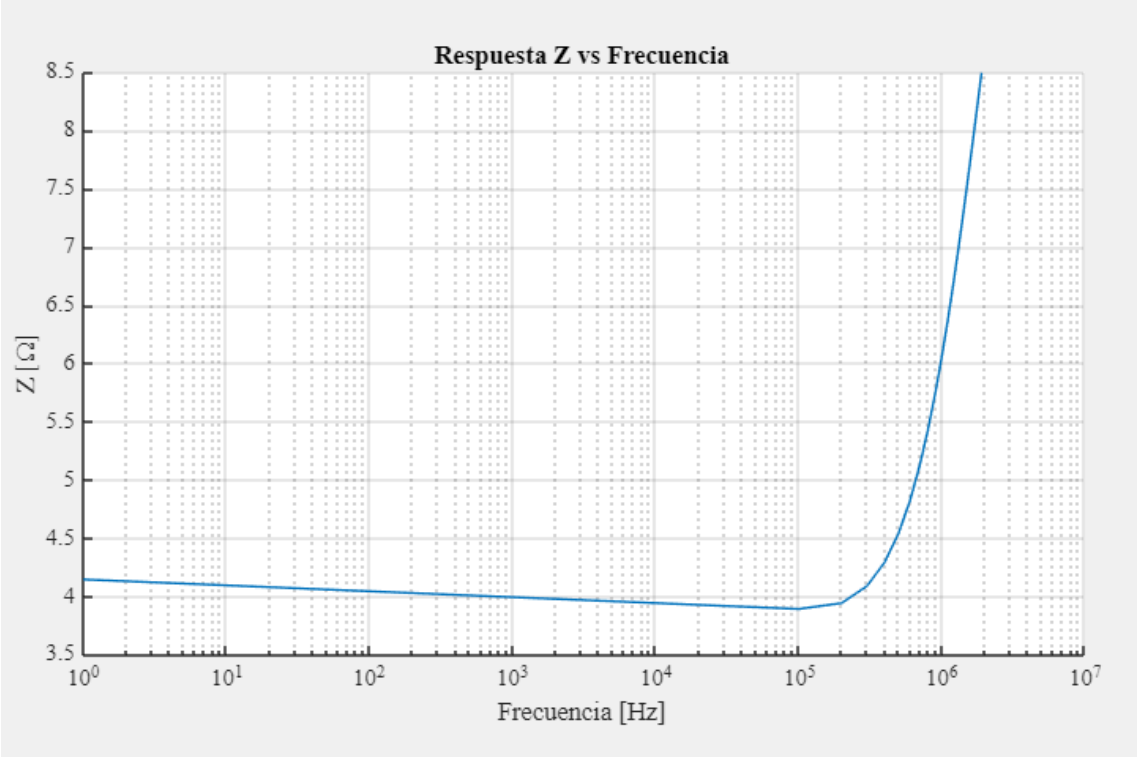


Fig. 13. Gráfica frecuencia e impedancia del modelo híbrido

En la **Fig. 13** se muestra la gráfica de frecuencia e impedancia del modelo híbrido, en este caso el aumento de la impedancia se realiza de manera exponencial en donde corrobora lo mencionado en un artículo científico de Hernán Montaña publicado en la revista de “Ingeniería e Investigación”, indica que para electrodos verticales el valor de la impedancia se mantiene en bajas frecuencias y que alrededor de 300KHz la impedancia comienza a aumentar [31].

Para el caso del modelo híbrido la impedancia en baja frecuencia se mantiene por un largo periodo y comienza a aumentar desde una frecuencia aproximadamente 300KHz, lo que demuestra que este modelo funciona bien en baja frecuencia y también para alta frecuencia, donde se mantiene aproximadamente en el mismo rango que establece el artículo científico.

4.4 Simulación y análisis de las gráficas del modelo híbrido

Para realizar las simulaciones del modelo híbrido se deben definir las frecuencias a trabajar y los valores de entrada que necesita el modelo. A continuación, se presenta como se determinan estos valores.

4.4.1 Determinación del rango de frecuencia

Para la simulación del modelo híbrido, se ha establecido un rango de frecuencias que abarca desde 60 Hz hasta 2 MHz. La elección de este rango se basa en consideraciones teóricas basada en el artículo científico de Hernán Montaña publicado en la revista de Ingeniería e Investigación [31].

Rango de Frecuencia de Inicio: La frecuencia inicial de 60 Hz ha sido seleccionada de acuerdo con criterios propios, debido a que la frecuencia estándar de operación del sistema eléctrico ecuatoriano es de 60 Hz, una frecuencia similar permite observar el comportamiento del sistema en condiciones similares, para evaluar cómo responde el modelo a un valor de frecuencia igual al de operación nacional.

Rango de Frecuencia Final: En cuanto a la frecuencia final, se ha optado por 2 MHz, basándose en investigaciones previas que indican que el comportamiento del electrodo experimenta cambios significativos a partir de 1 MHz [31]. Esta frecuencia final se elige para proporcionar una visualización más clara y detallada de estos cambios en el comportamiento del electrodo. El rango seleccionado asegura que la simulación abarque un espectro amplio y detallado, facilitando la observación de las transiciones y efectos a altas frecuencias.

El rango de frecuencia se establecerá con incrementos de 20 kHz, esta decisión se tomó con base a los resultados de la simulación de prueba del modelo híbrido, donde se simuló variando los pasos de frecuencia para observar si los resultados tienen cambios significativos. Se simulo para pasos de 5KHZ, 10KHz, 20KHz y 40KHz. A continuación, en la **TABLA I** se muestran los resultados de la impedancia para cada paso de frecuencia.

TABLA I

VARIACIÓN DE PASOS DE FRECUENCIA

Pasos de 5KHz		Pasos de 10KHz		Pasos de 20KHz		Pasos de 40KHz	
Frecuencia (Hz)	Impedancia (Ω)	Frecuencia (Hz)	Impedancia (Ω)	Frecuencia (Hz)	Impedancia (Ω)	Frecuencia (Hz)	Impedancia (Ω)
300001	4,086	300001	4,086	300001	4,086	300001	4,086
305001	4,096	310001	4,105	320001	4,124	340001	4,163
310001	4,105	320001	4,124	340001	4,163	380001	4,247
315001	4,114	330001	4,143	360001	4,204	420001	4,339
320001	4,124	340001	4,163	380001	4,247	460001	4,437
325001	4,133	350001	4,183	400001	4,292	480001	4,488
330001	4,143	360001	4,204	420001	4,339	520001	4,594
335001	4,153	370001	4,226	440001	4,387	560001	4,703
340001	4,163	380001	4,247	460001	4,437	600001	4,817
345001	4,173	390001	4,270	480001	4,488	640001	4,933
350001	4,183	400001	4,292	500001	4,540	680001	5,052
355001	4,194	410001	4,316	520001	4,594	720001	5,172
360001	4,204	420001	4,339	540001	4,648	760001	5,294
365001	4,215	430001	4,363	560001	4,703	800001	5,417
370001	4,226	440001	4,387	580001	4,760	840001	5,541
375001	4,236	450001	4,412	600001	4,817	880001	5,665
380001	4,247	460001	4,437	620001	4,874	920001	5,790
385001	4,259	470001	4,462	640001	4,933	960001	5,914
390001	4,270	480001	4,488	660001	4,992	1000001	6,038
395001	4,281	490001	4,514	680001	5,052	1040001	6,161
400001	4,292	500001	4,540	700001	5,112	1080001	6,283

En la tabla se observa que no existe mucha variación en los resultados, por ende, se ha optado por utilizar pasos de 20KHz para limitar el numero de datos y no perder precisión.

4.4.2 Determinación de los valores a simular

Para la determinación de los valores que se utilizarán en la simulación, se ha decidido utilizar los valores de una puesta a tierra existente la cual se encuentra ubicada en la Universidad Técnica del Norte precisamente en el edificio de la Carrera de Electricidad. A continuación, se muestra una imagen con la ubicación de la puesta a tierra.

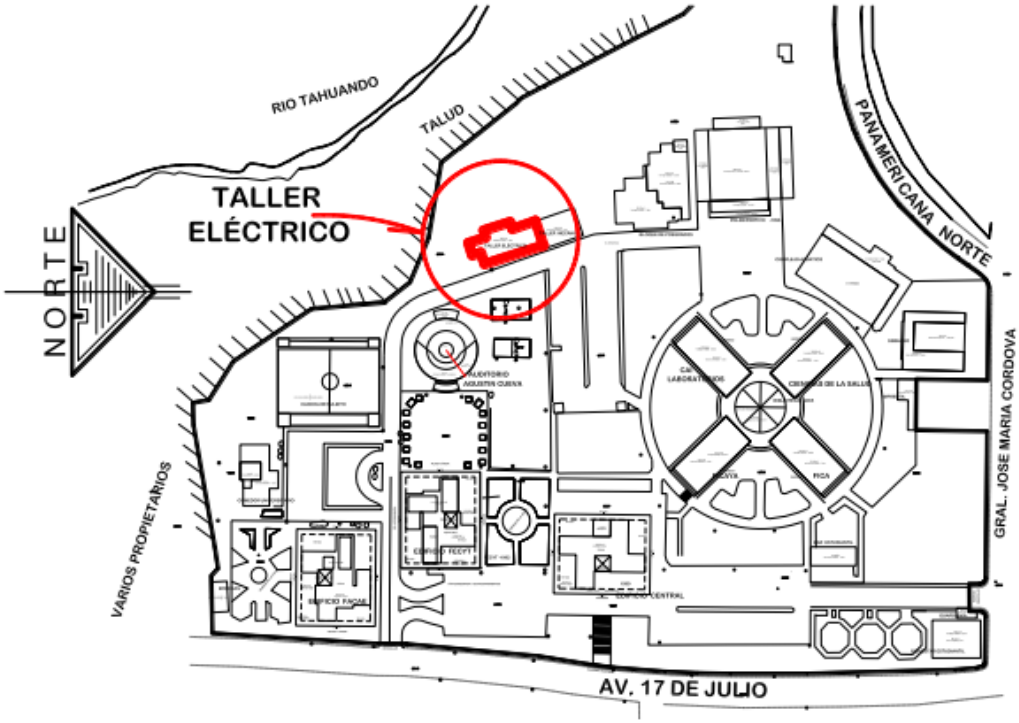


Fig. 14. Ubicación del edificio de la Carrera de Electricidad [32]

Los valores que se utilizó en el estudio para la puesta a tierra de la Carrera de Electricidad son la geometría del electrodo y la resistividad del suelo. Así mismo se debe determinar los valores de la permeabilidad y la permitividad relativas del suelo, estas mediciones no se realizan debido a que los métodos empleados para obtener dichos valores requieren una alteración física del entorno de la puesta a tierra, lo cual puede interferir en su desempeño.

En este sentido, se considera el criterio establecido por Jaimis León en un artículo científico publicado en la revista “SciELO”, donde se indica que los valores de permeabilidad y permitividad del suelo pueden asumirse constantes e iguales a los del vacío. Dado que el modelo híbrido utilizado en este estudio trabaja con la permeabilidad y permitividad absolutas, definidas como el producto entre los valores del suelo y los del vacío, se adopta un valor unitario para la permeabilidad y permitividad relativas del suelo. Esta aproximación minimiza el impacto en los resultados de las simulaciones y no afecta significativamente la precisión del análisis [33].

La puesta a tierra del edificio de la Carrera de Electricidad cuenta con interconexiones de diferentes puestas a tierra entre las cuales se tiene un sistema de puesta a tierra que corresponde a un proyecto de tesis denominado CONSTRUCCIÓN DE UNA BOBINA DE TESLA PARA LA GENERACIÓN Y CONTROL DE ALTO VOLTAJE. La cual cuenta con 2 electrodos de copperweld de 1.8m de longitud y 0.008m de radio ubicados a 0.5m de profundidad desde la parte superior del electrodo hasta la superficie del suelo.

Otra puesta a tierra que esta interconectada es la de un proyecto de tesis denominado DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO, ILUMINACIÓN, Y SEGURIDAD DE LOS LABORATORIOS. La cual cuenta con 4 electrodos copperweld en malla con una longitud de 1.8m y radio de 0.008 ubicados a una profundidad de 0.5m.

Una puesta a tierra que también esta interconectada es la de un proyecto de tesis denominado IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED DE ENTRENAMIENTO DE DISTRIBUCIÓN SMART GRID. La cual cuenta con un electrodo copperweld de 1.8m de longitud y 0.008m de radio ubicado a una profundidad de 0.5m.

Otra puesta a tierra que también esta interconectada es la de un proyecto de tesis denominado IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICA CON INTEGRACIÓN A LA RED ELÉCTRICA. La cual cuenta con un electrodo de copperweld de 1.8m de longitud y 0.008m de radio ubicado a una profundidad 0.5m, en este caso la puesta a tierra cuenta con otro proyecto de tesis conectado ahí mismo denominado IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MICROGENERACIÓN EÓLICA.

Todas estas puestas a tierra están interconectadas a una nueva malla correspondiente a un proyecto de tesis denominado RECONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DEL EDIFICIO DE LA CARRERA DE ELECTRICIDAD. La cual cuenta con 4 electrodos Copperweld conectados en malla con

una longitud de 1.8m y radio de 0.008m ubicados a una profundidad de 0.5. Esta interconexión es realizada a través de una barra de cobre como se muestra en la **Fig. 15**.

Fig. 15. Ubicación de la puesta a tierra

El modelo híbrido aplicado en Matlab muestra el comportamiento para un solo electrodo, en este caso como se tiene una interconexión entre las diferentes puestas a tierra se va a analizar el comportamiento de la puesta a tierra que contenga un solo electrodo, esto en el caso critico de que suceda la desconexión de la malla.

Para comprobar que el modelo híbrido aplicado en Matlab tiene una mejor precisión de los resultados se midió la resistencia de la puesta a tierra de un solo electrodo desconectada de la malla. Para medir la resistencia se utilizó el método del 62% o caída de potencial, este método consiste en ingresar una corriente entre el electrodo a medir y un electrodo auxiliar ubicado a una distancia “d”, y medir la tensión entre la puesta a tierra y un electrodo de potencial auxiliar ubicado al 62% de la distancia “d” esto con la ayuda de un telurómetro.

Como resultado de la medición realizada se obtuvo un valor de 5.6Ω para la puesta a tierra de un solo electrodo. A continuación, en la **Fig. 16** se muestra el resultado de la resistencia de puesta a tierra medida.

Fig. 16. Medición de la resistencia de puesta a tierra

La resistividad del suelo influye en el comportamiento del electrodo, debido a que afecta directamente la distribución de la corriente durante una descarga. Por esta razón, se realizó la medición de la resistividad de la puesta a tierra ubicada en la Carrera de Electricidad.

Para medir la resistividad del suelo en el área donde se construyó la puesta a tierra, se utilizó el método de Wenner. Este procedimiento consistió en colocar cuatro picas alineadas en línea recta y separadas a una misma distancia. Con la ayuda de un telurómetro, se inyectó corriente a través de las dos picas externas, mientras que la diferencia de potencial fue medida en las dos picas internas, lo que permitió calcular la resistividad del suelo. A continuación, se presenta una imagen que ilustra el método de Wenner.

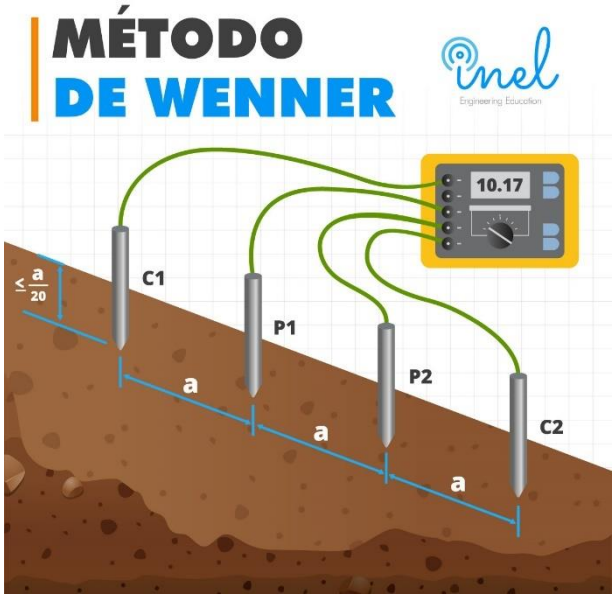


Fig. 17. Método de Wenner

Se aplicó este método para medir la resistividad del suelo, utilizando cuatro picas enterradas a una profundidad de 0.2 m y separadas a distancias de 1 m y 2 m. La conexión se realizó según lo mostrado en la **Fig. 17**. Una vez completadas las conexiones, se ingresó en el telurómetro la distancia de separación entre las picas y se procedió a iniciar la medición. A continuación, se presenta la imagen del método de Wenner aplicado.

Fig. 18. Medición de la resistividad por medio del método de Wenner

TABLA II

MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD

Separación de picas (m)	Profundidad de las picas (m)	Resistividad del suelo (Ωm)
1	0.20	27.8
2	0.20	28.2

En la **TABLA II** se muestra los resultados de las mediciones por método Wenner, los resultados que se obtuvieron para la resistividad del suelo con separaciones de 1m y 2m entre las picas fueron 27.8 Ωm para 1 m de separación y 28.2 Ωm para 2m de separación.

Para determinar el valor adecuado de la resistividad del suelo, es fundamental considerar la profundidad del electrodo. Dado que este se encuentra a 2.3m de

profundidad, el valor más apropiado es el obtenido con una separación de 2m, pues corresponde a una profundidad de medición más cercana a la del electrodo.

La descarga atmosférica se representa mediante una función doble exponencial, la cual simula la forma de onda del rayo para analizar el comportamiento del electrodo de puesta a tierra ante este fenómeno. La onda del rayo se caracteriza por un ascenso rápido y un descenso más lento, por lo que es necesario definir estos tiempos adecuadamente.

La interfaz incluye valores comunes de descargas atmosféricas, como se muestra en la **Fig. 19**. Para este análisis, se ha seleccionado un valor de 1/5, debido a que corresponde a un tiempo de ascenso más corto, ideal para representar una descarga más intensa. Específicamente, esto significa 1 µs de ascenso y 5 µs de descenso.

.

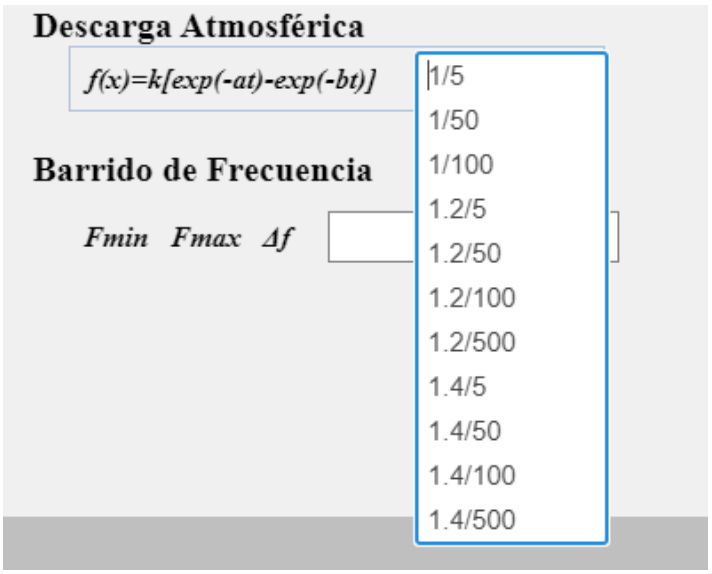


Fig. 19. Valores de impulsos para la descarga atmosférica

4.4.3 Simulación del modelo híbrido de puesta a tierra existente

Para la simulación del modelo híbrido, se utilizan los valores de entrada seleccionados anteriormente. Se considera un electrodo vertical de 1.8 m de longitud con 0.008m de radio, ubicado a una profundidad de 2.3m. La permeabilidad y permitividad

relativa se establece en 1 considerando los criterios establecidos por Jaimis Leon en un artículo científico publicado en la revista "SciElO" [27].

La resistividad del suelo es 28.2 Ωm. El rango de frecuencias es de 60Hz a 2MHz en pasos de 20KHz. El impulso de la descarga es 1/5. A continuación, se presenta la disposición de los datos de entrada en la **Fig. 20**.

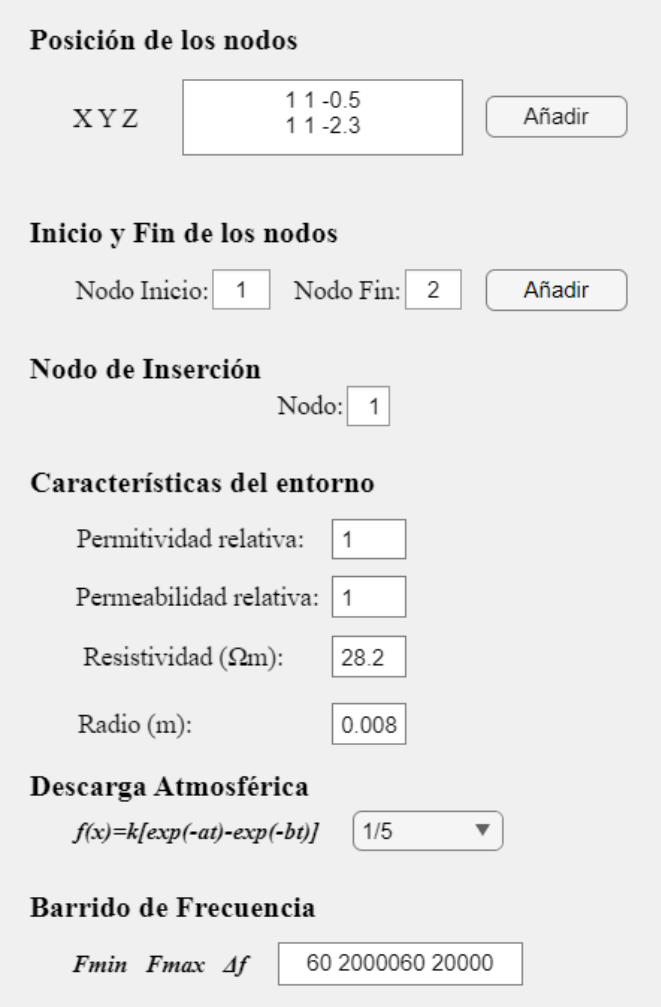


Fig. 20. Valores de entrada ingresados en la interfaz

A su vez la interfaz muestra la disposición del electrodo para revisar si sus medidas son correctas. A continuación, se muestra la disposición del electrodo.

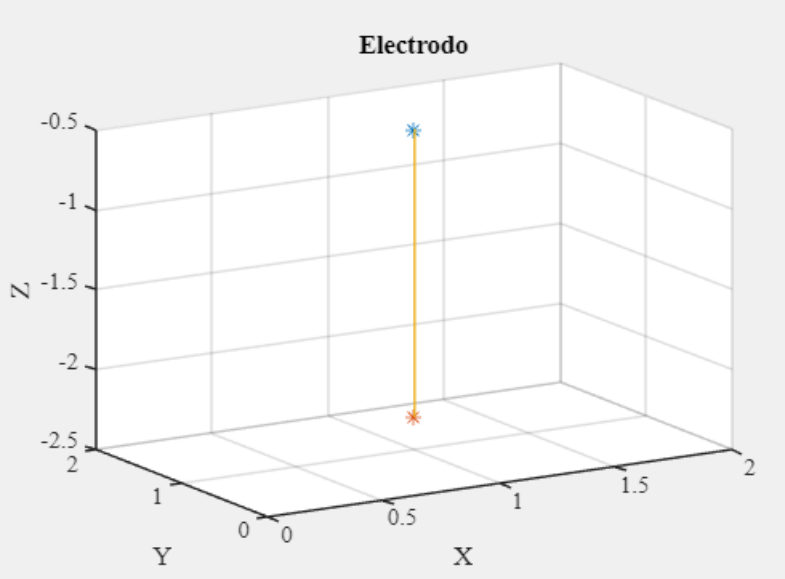


Fig. 21. Visualización de la ubicación del electrodo

Una vez ingresados los valores de entrada, se procedió a ejecutar la simulación. Al finalizar el proceso, se generó una gráfica de frecuencia e impedancia, la cual permitió realizar el análisis correspondiente. A continuación, se presenta dicha gráfica.

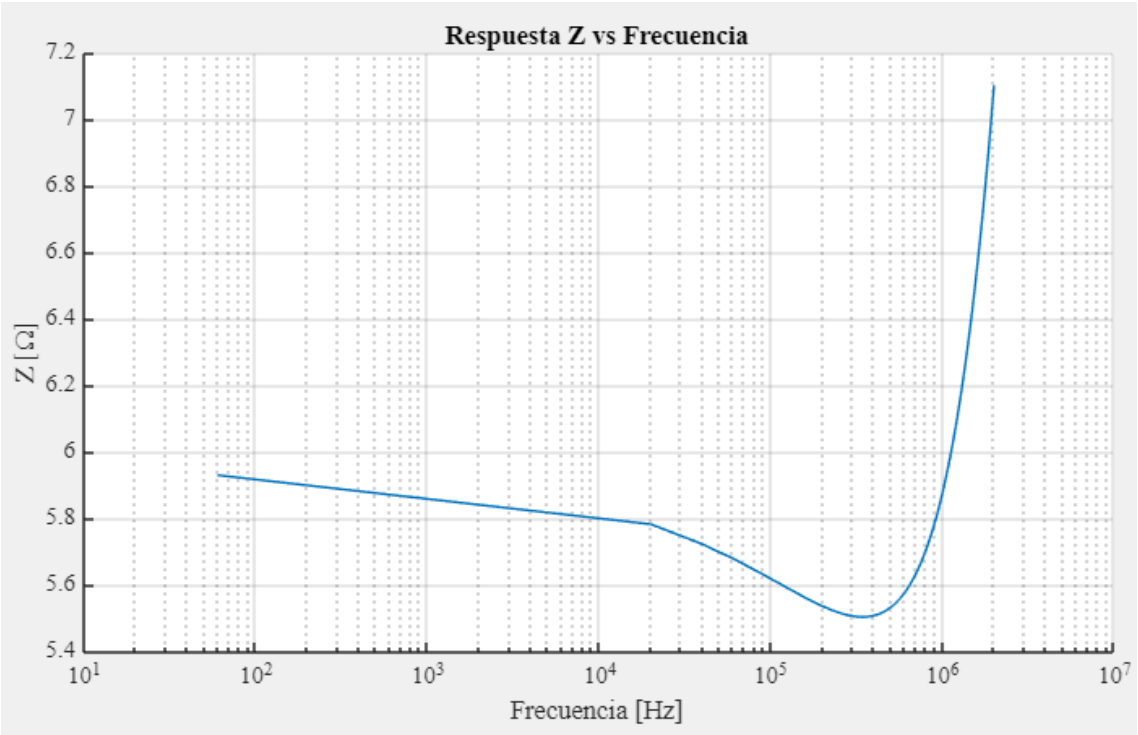


Fig. 22. Gráfica frecuencia e impedancia

En la **Fig. 22** se muestra la simulación con los valores de la puesta a tierra de un solo electrodo del edificio de la Carrera de Electricidad, en la cual se observa que cuando sucede una descarga atmosférica y se encuentra a una baja frecuencia de 60Hz igual al de Operación Nacional de Ecuador, la impedancia del electrodo está en un valor cercano a los 6Ω, este valor es similar al de resistencia medido el cual es 5.6Ω teniendo como error aproximado 0.3Ω. Por lo cual se considera que el modelo híbrido aplicado en Matlab muestra como resultado cierta similitud con el valor real.

Una vez que la frecuencia de la descarga comienza a aumentar se observa que el valor de la impedancia disminuye un poco esto se debe que a estas frecuencias son dominadas por la capacitancia del electrodo donde tiende a disminuir la impedancia, alrededor de 300KHz la impedancia comienza a aumentar esto se debe que a partir de estas frecuencias son dominadas por la inductancia donde logra superar un valor de 7Ω cuando esta supera los 2MHz. A continuación, en la **TABLA III** se muestra los valores de frecuencia, impedancia y corriente obtenidos de la simulación.

TABLA III

MAGNITUDES DE LA FRECUENCIA, IMPEDANCIA Y CORRIENTE

Frecuencia (Hz)	Impedancia (Ω)	Corriente (A)
60	5,930	20,231
20060	5,783	282,557
40060	5,723	550,068
60060	5,680	820,774
80060	5,646	1093,795
100060	5,619	1377,72
200060	5,536	2749,739
300060	5,506	4124,303
400060	5,508	5491,48
500060	5,533	6849,654
600060	5,575	8194,458
700060	5,633	9526,188
800060	5,703	10857,737
900060	5,785	12195,105
1000060	5,875	13540,112
1100060	5,974	14905,01
1200060	6,081	16322,557
1300060	6,194	17752,023

1400060	6,312	19191,441
1500060	6,435	20639,936
1600060	6,562	22097,304
1700060	6,694	23563,088
1800060	6,828	25038,561
1900060	6,964	26523,881
2000060	7,103	27719,045

En la **TABLA III** se muestra el incremento de la impedancia a medida que la frecuencia alcanza valores elevados, considerándose alta frecuencia a partir de 300 KHz. Asimismo, se observa un aumento progresivo de la corriente, alcanzando valores elevados a altas frecuencias.

Tener una impedancia alta en un sistema de puesta a tierra provoca que las altas corrientes generadas por la descarga no sean drenadas con facilidad, según la norma IEEE Std 142 se recomienda tener una impedancia menor a 25Ω, y para casos donde se tenga equipos sensibles debe ser menor a 5Ω. En la simulación realizada se observa que la impedancia está por encima de este valor alcanzando en altas frecuencias los 7Ω, esto puede perjudicar si se tiene una descarga atmosférica debido a que la puesta a tierra simulada contiene equipos sensibles pertenecientes al edificio de la Carrera de Electricidad.

En una puesta a tierra el valor que puede variar es el de la resistividad del suelo ya sea por químicos aplicados o por la estación del año en el que se encuentre, por ello se va a realizar 4 simulaciones adicionales unas con un cambio ±5Ω y ±10 Ω con respecto al valor real medido, estas variaciones se consideran adecuadas debido a que la variación de la resistividad del suelo no tiene un cambio excesivo, por ende considerar un valor mayor puede alejarse de la realidad, con este análisis se busca evaluar el impacto de la resistividad del suelo en el comportamiento del electrodo ante una descarga atmosférica.

En la **Fig. 23** se muestra la gráfica de frecuencia e impedancia para un valor de resistividad de 33.2Ωm.

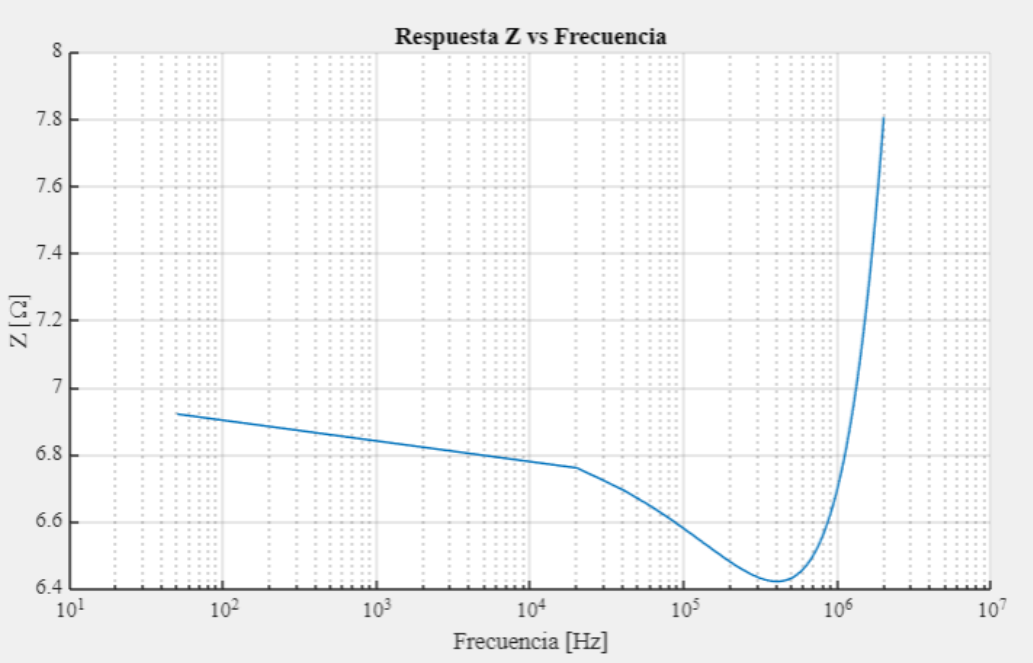


Fig. 23. Gráfica frecuencia e impedancia para resistividad de 33.2Ωm

En la **Fig. 24** se muestra la gráfica de frecuencia e impedancia para un valor de resistividad de 23.2Ωm.

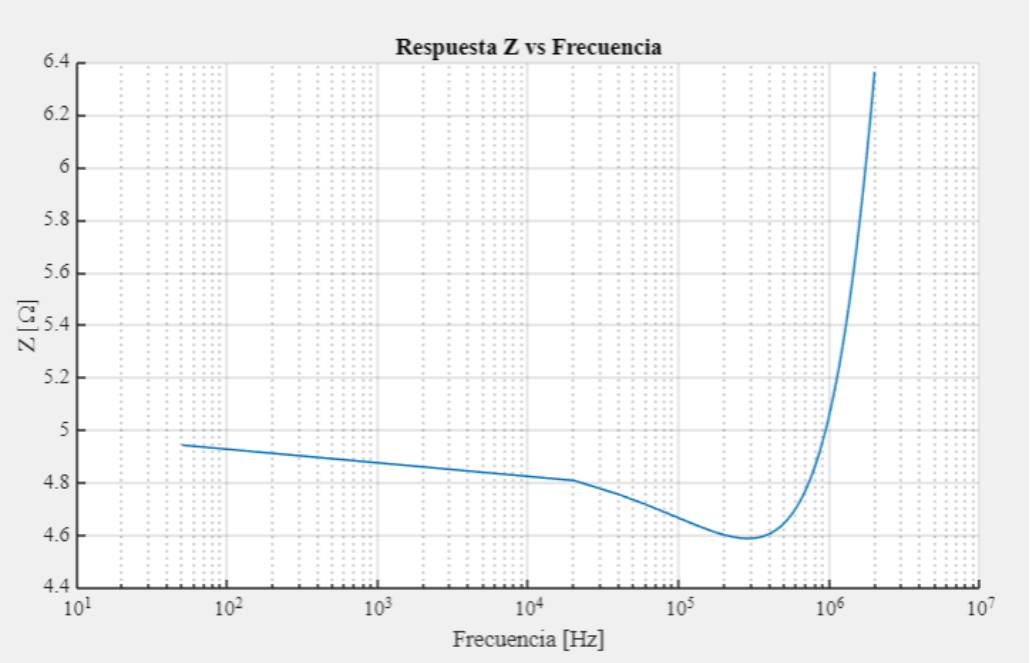


Fig. 24. Gráfica frecuencia e impedancia para resistividad de 23.2Ωm

En la **Fig. 25** se muestra la gráfica de frecuencia e impedancia para un valor de resistividad de 38.2Ωm.

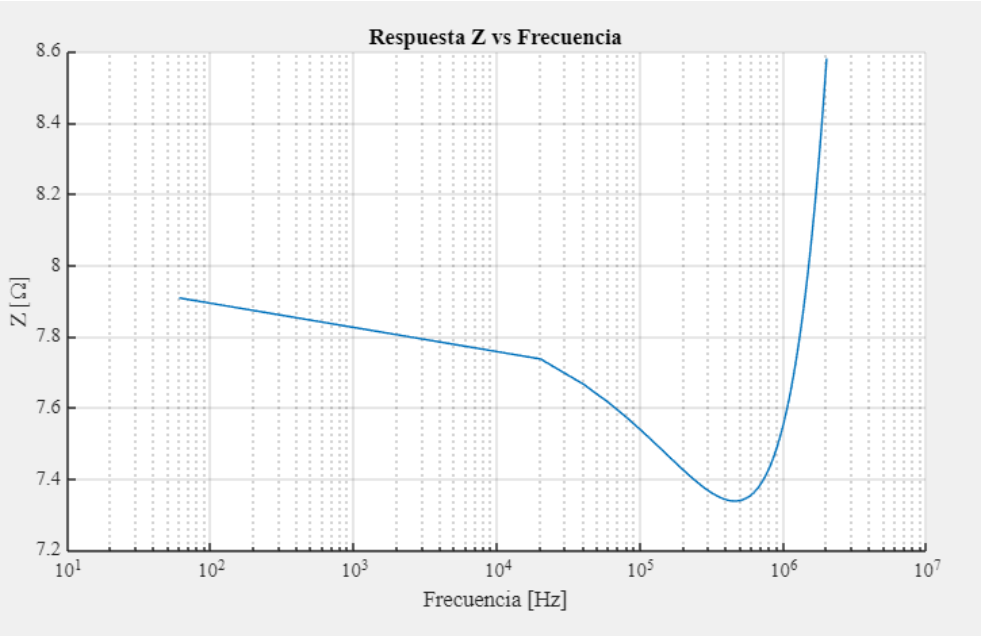


Fig. 25. Gráfica frecuencia e impedancia para resistividad de 38.2Ωm

En la **Fig. 26** se muestra la gráfica de frecuencia e impedancia para un valor de resistividad de 18.2Ωm.

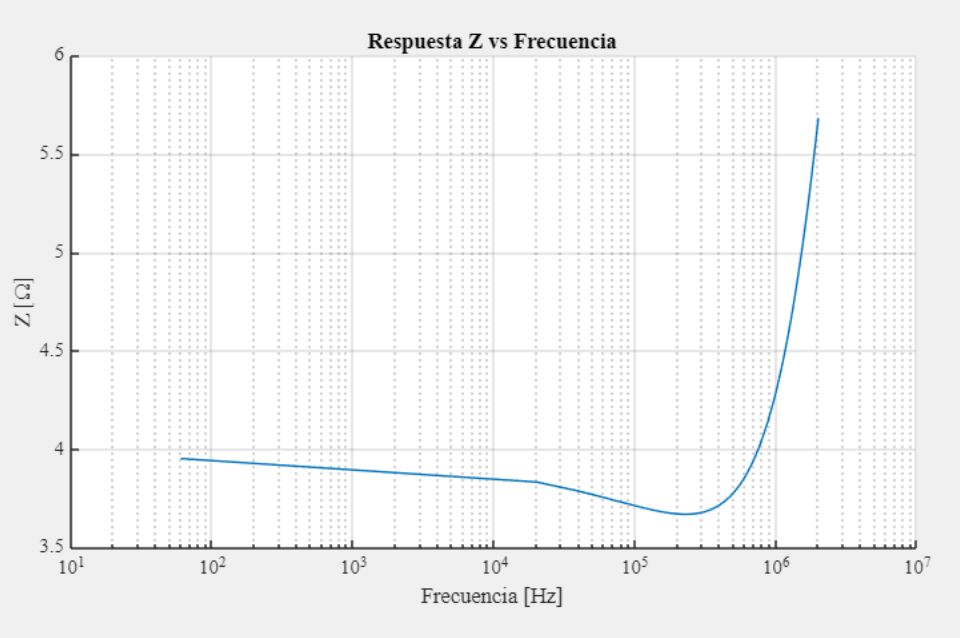


Fig. 26. Gráfica frecuencia e impedancia para resistividad de 18.2Ωm

Lo que se observa en las gráficas del cambio de ±5Ω y ±10Ω es que existe un valor más alto de la impedancia cuando se tiene valores más altos de resistividad del suelo, esto implica que si se desea aumentar la protección de la puesta a tierra ante descargas atmosféricas se debe tener una resistividad del suelo más baja.

En la graficas también se puede observar que al aumentar o disminuir la resistividad del suelo el cambio es mucho mas notorio en baja frecuencia que en alta, esto se debe a que la resistividad del suelo influye mucho más en la parte resistiva del electrodo, en alta frecuencia la inductancia en el electrodo predomina por ende la resistividad del suelo influye en menor valor.

Durante una descarga atmosférica, se generaron altas corrientes que atravesaron el electrodo, por lo que fue fundamental analizar sus efectos sobre la estructura física. Para ello, se realizó un estudio adicional enfocado en la respuesta térmica del electrodo durante la descarga, con el objetivo de determinar la temperatura alcanzada y los posibles efectos sobre su integridad.

4.4.4 Análisis térmico del electrodo

Para realizar el análisis térmico del electrodo de la Carrera de Electricidad se va a utilizar el software COMSOL Multiphysics, el cual brinda herramientas avanzadas para modelar fenómenos físicos complejos. En este caso, se enfocará en el análisis del comportamiento térmico del electrodo debido a la potencia disipada por las corrientes generadas durante una descarga atmosférica.

Para realizar el análisis se debe simular un electrodo con la misma geometría y material que el sistema de puesta a tierra existente. Gracias a la potencia disipada, calculada utilizando la impedancia y la corriente obtenidas de la simulación en MATLAB, se podrá determinar la temperatura alcanzada por el electrodo y asociarla con las diferentes frecuencias. A continuación, se detalla el procedimiento llevado a cabo para este análisis.

Dentro del software COMSOL Multiphysics, es necesario definir la forma del electrodo, que en este caso corresponde a un cilindro. Una vez definida, se inserta la geometría correspondiente, con dimensiones de 1.8 m de longitud y 0.008 m de radio. En la **Fig. 27** se muestra la representación gráfica del electrodo.

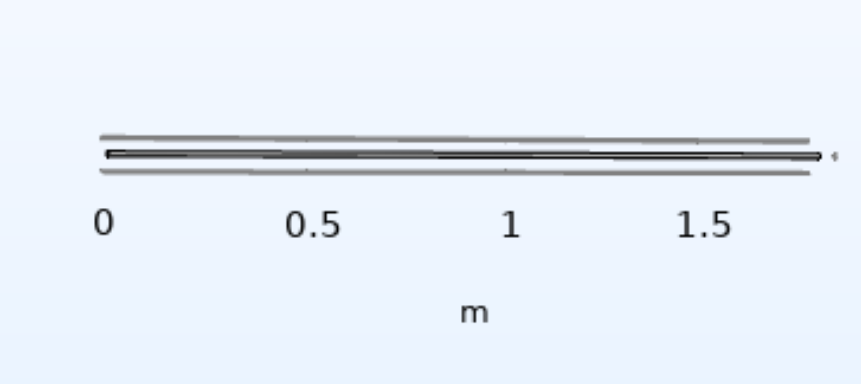


Fig. 27. Electrodo modelado en COMSOL

Una vez definida la geometría del electrodo, se procede a asignar el material con el que está compuesto. En el software, es posible seleccionar automáticamente el material de una base de datos predefinida. En este caso, se busca Copperweld y se lo selecciona como el material del electrodo.

Dentro del sowtfware se debe escoger la física adecuada para realizar el estudio en este caso se escoge transferencia de calor en sólidos, dentro de esta física se da opciones de cómo se desea realizar el estudio, es decir estacionario o temporal por lo cual como se va a analizar la potencia en cada frecuencia se va a escoger el estudio estacionario.

Cuando se ha elegido la transferencia de calor en sólidos se inserta el valor de la potencia disipada la cual será tomada como una fuente de calor. En la **TABLA IV** se presenta los valores de la frecuencia y de potencia disipada calculada con la **Ecuación (11)**.

TABLA IV

VALORES DE FRECUENCIA Y POTENCIA DISIPADA

Frecuencia (Hz)	Potencia Disipada (W)
60	2427,924596
20060	461681,2997
40060	1731546,664
60060	3826297,664
80060	6755010,802
100060	10665144,82
200060	41861146,1
300060	93661127,95
400060	166098774,2
500060	259576823,7
600060	374382571,8
700060	511195170,4
800060	672385511,2
900060	860308394,1
1000060	1077175289
1100060	1327288501
1200060	1620083561
1300060	1951789391
1400060	2324718587
1500060	2741365463
1600060	3204385146
1700060	3716364040
1800060	4280453032

1900060	4899536698
2000060	5436198399

Con los valores de la potencia disipada mostrados en la **TABLA IV** se procede a calcular la temperatura en el electrodo, A continuación, se muestra algunos de los resultados en donde se observa el valor de temperatura.

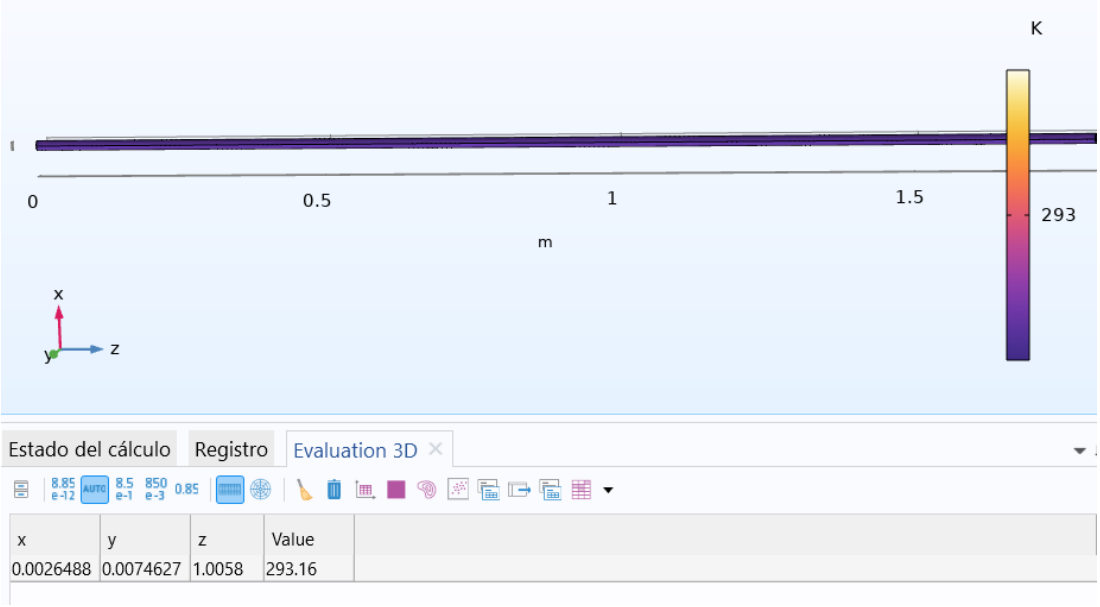


Fig. 28. Temperatura en el electrodo a una frecuencia de 60Hz

En la **Fig. 28** se observa el valor de temperatura resultante para una frecuencia de 60Hz, el resultado de la temperatura es de 293.16 K lo que equivale a 20.01°C. Esto indica que a una frecuencia igual a la de Operación Nacional de Ecuador la temperatura será similar a la del ambiente.

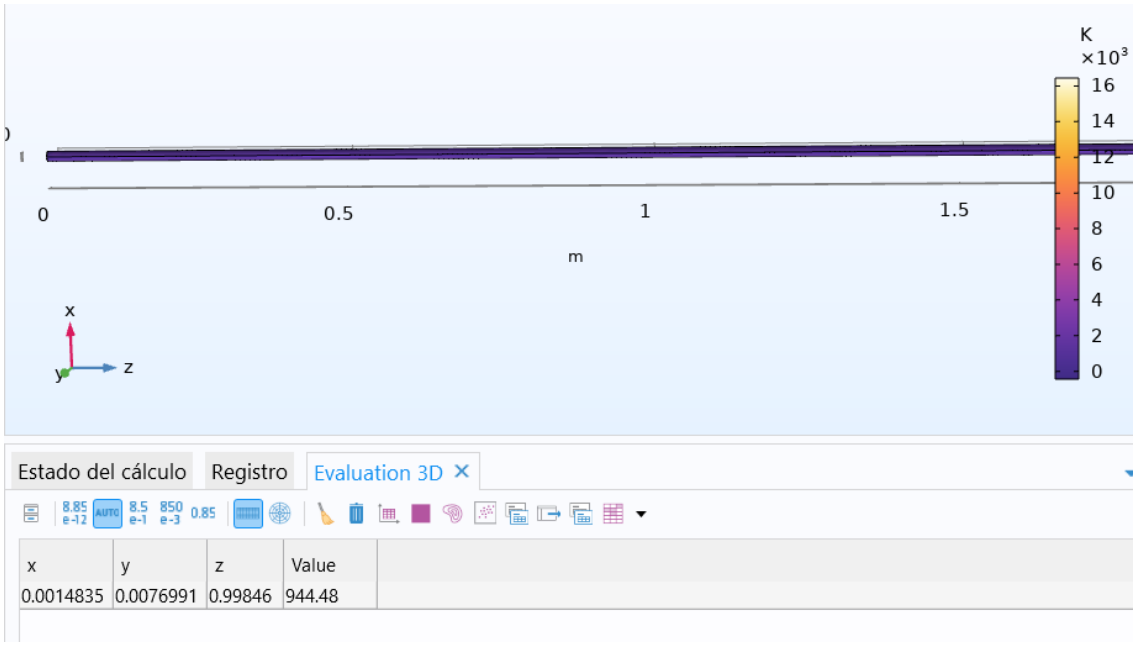


Fig. 29. Temperatura en el electrodo a una frecuencia de 1MHz

En la **Fig. 29** se observa el valor de temperatura resultante para una frecuencia de 1MHz, el resultado de la temperatura es de 944.48K lo que equivale a 671.33°C. Esto indica que a una frecuencia alta la temperatura aumenta.

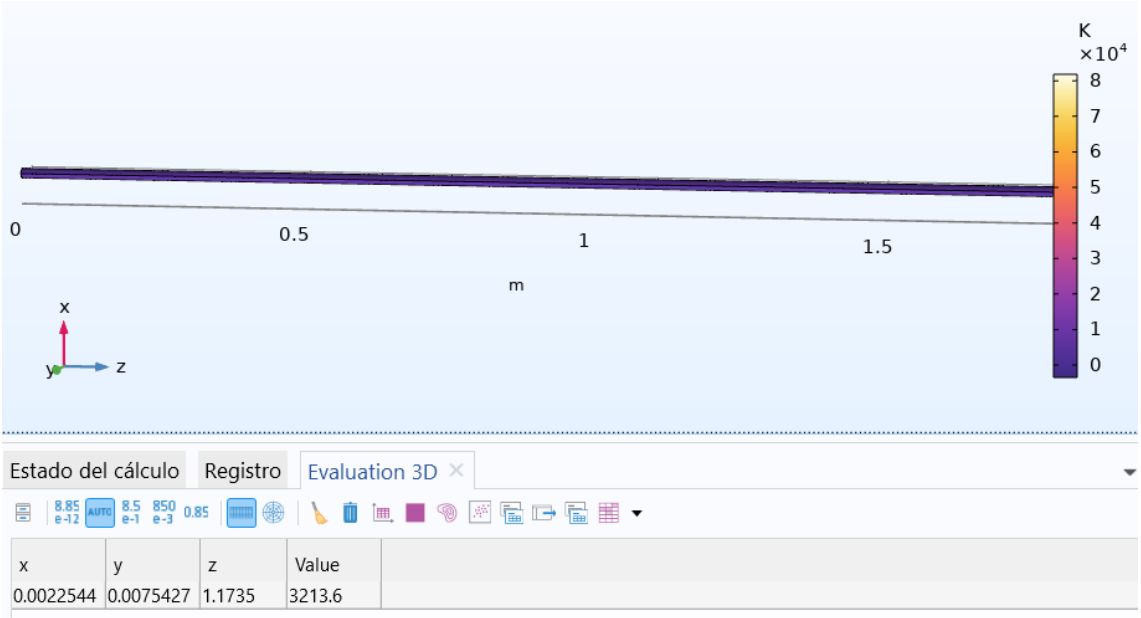


Fig. 30. Temperatura en el electrodo a una frecuencia de 2MHz

En la **Fig. 30** se muestra la temperatura resultante para una frecuencia de 2 MHz, obteniendo un valor de 3213.16 K, equivalente a 2940.45 °C. Esto indica que, a frecuencias muy elevadas, la temperatura del electrodo también alcanzará valores considerablemente altos. A continuación, en la **TABLA V** se muestra los valores de frecuencia y temperatura simulados en COMSOL.

TABLA V

VALORES DE FRECUENCIA Y TEMPERATURA

Frecuencia (Hz)	Temperatura (°C)
60	20,01
20060	20,22
40060	20,86
60060	22,25
80060	23,66
100060	26,1
200060	42,64
300060	70,71
400060	98,33
500060	160,35
600060	243,62
700060	327,89
800060	564,31
900060	636,18
1000060	671,33
1100060	925,05
1200060	1014,15
1300060	1184,45
1400060	1425,35
1500060	1750,55
1600060	2242,55
1700060	2364,05
1800060	2485,95
1900060	2645,05
2000060	2940,45

El electrodo Copperweld está compuesto por un núcleo de acero y una superficie de cobre. Durante una descarga atmosférica, las temperaturas generadas en el electrodo pueden ser extremadamente altas, incluso superando el punto de fusión del cobre y del acero. Sin embargo, esto no implica que el electrodo se derrita debido a que las descargas atmosféricas son extremadamente rápidos, con una duración en el orden de microsegundos. En este breve tiempo, la mayor parte del calor generado se concentra en la superficie externa del electrodo (la capa de cobre), mientras que el núcleo de acero permanece relativamente frío. Además, este calor se disipa rápidamente hacia el suelo, que actúa como un disipador térmico, enfriando el electrodo casi de inmediato tras la descarga.

Sin embargo, esto no significa que el electrodo esté exento de sufrir daños ya que la parte externa del electrodo al recibir un calor extremo, aunque sea por un corto período de tiempo, puede experimentar deterioro. Este estrés térmico podría provocar pequeñas grietas o microfisuras en la capa de cobre, comprometiendo su integridad. Con el tiempo, estas grietas pueden facilitar la corrosión o reducir la capacidad del electrodo para disipar futuras descargas, lo que incrementaría el riesgo de fallas en el sistema de puesta a tierra.

CONCLUSIONES

Se identificó que, para el análisis de los electrodos de puesta a tierra, es fundamental determinar los parámetros utilizados en cada modelo, como es la geometría del electrodo, resistividad del suelo, permeabilidad, permitividad y profundidad del electrodo. Estos parámetros influyen directamente en la precisión de los modelos, por lo tanto, al realizar el estudio de una puesta a tierra existente, es necesario considerar estos parámetros para obtener resultados que representen su comportamiento.

El modelamiento del electrodo mostró que el modelo de circuitos presenta un aumento casi lineal de la impedancia con la frecuencia, lo que limita su precisión a altas frecuencias. Para mejorar la estimación de su comportamiento, se aplicó un modelo híbrido que combina el modelo de circuitos con un enfoque electromagnético, considerando la propagación de ondas en el suelo. Este enfoque permite una representación más precisa de la impedancia en un amplio rango de frecuencias, brindando una mejor comprensión del comportamiento de los electrodos bajo descargas atmosféricas.

El análisis reveló que para una puesta a tierra de un solo electrodo desconectada de la malla de la Carrera de Electricidad la impedancia en baja frecuencia es similar al valor de resistencia medido, teniendo como error 0.3Ω. Al incrementar la frecuencia hasta un valor cercano a 300KHz se tuvo una disminución de la impedancia generada por el efecto capacitivo en el electrodo y a partir de esta frecuencia la impedancia tuvo un aumento generado por el efecto inductivo, alcanzando un valor de 7.1 Ω a una frecuencia cercana a 2 MHz. Asimismo, se evidenció que la resistividad del suelo donde se encuentra el electrodo influye directamente en su impedancia mayormente en baja frecuencia. Además, la descarga provocó un aumento considerable de temperatura, llegando a 2940.45 °C a una frecuencia de 2 MHz.

RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar un estudio complementario enfocado en el análisis de fisuras y daños estructurales en el electrodo cuando es sometido a una o múltiples descargas atmosféricas. Este estudio debería incluir simulaciones térmico-mecánicas que permitan evaluar los efectos de la expansión térmica y las tensiones inducidas en el material del electrodo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] K. Verdugo, L. Aries y H. Merchan, «Contribución para la Implementación de una Red de Detección de Rayos en Ecuador,» *Revista Politécnica ,* 2018.

[2] L. Abril y F. Azogue, «Diseño y modelado del sistema de puesta a tierra y apantallamiento para la estación Cotopaxi del instituto geográfico militar,» *Tesis de Ingenieria Electrica,* 2021.

[3] V. Basante, «Análisis de modelos de sistemas de puesta a tierra para diferentes electrodos,» *Tesis de Ingeniería Electríca,* 2019.

[4] O. Astudillo, «Modelo matemático de un descargador eléctrico para mejorar la protección contra descargas atmosféricas en transformadores monofásicos de distribución eléctricaconsiderando sobretenciones,» *Tesis de maestría en Electricidad,* 2018.

[5] R. Franklin, «Diseño de los sistemas de puesta a tierra y protección contra descargas atmosféricas para el complejo agroecológico de investigación y desarrollo productivo San José de Ayora, cantón Cayambe,» *Tesis de Ingenieria Eléctrica,* 2021.

[6] K. Cabezas, «Diseño de una malla de puesta a tierra; en un galón de la fábrica inplastico,» *Tesis de Ingeniería Eléctrica,* 2018.

[7] J. Cardona y V. Doval, «Análisis del comportamiento de los sistemas de puesta a tierra bajo impulsos de alta frecuencia bajo impulsos de alta frecuencia,» *Tesis de Ingeniería Eléctrica,* 2018.

[8] W. Flores, *Sistema de alerta temprana para descargas eléctricas atmosféricas para la cuenca del río Mantaro-Perú,* Universidad Nacional Agraria, 2019.

[9] M. D' Agosto, *Coordinación de aislación a las descargas atmosféricas en instalaciones de alta tensión,* Universidad de la República, 2022.

[10] J. Silva, *Caracterización espacio temporal de las descargas eléctricas atmosféricas a tierra en la región caribe colombiana,* Universidad del Norte, 2013.

[11] L. González, *Caracterización preliminar del campo eléctrico radiado por rayo en zona tropical montañosa. Caso Manizales (Caldas),* Universidad Nacional de Colombia, 2022.

[12] S. López, *Análisis de la variabilidad espacio-temporal de los eventos de precipitación extrema y su relación con descargas eléctricas en la región andina colombiana,* Universidad Nacional de Colombia, 2021.

[13] J. Reis, A. Fernandez y J. Giséle, *Coordenação de Isolamento para Surtos de Frente Rápida: Dependência do Modelo Computacional do Transformador,* Florianópolis, 2014.

[14] J. Herrera, *Comparación de métodos de apantallamiento, (método electrogeométrico, puntas captadoras con dispositivo de cebado),* Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2018.

[15] C. Wall, M. Barbiri, R. Bianchi, P. Arnera y P. Barrientos, *Diseño de un sistema de protección contra descargas atmosféricas para el edificio de electrotecnica de la FI-UNLP,* Facultad de Ingeniería-UNLP, 2021.

[16] F. Rojas, *Diseño de los sistemas de puesta a tierra y protección contra descargas atmosféricas para el complejo agroecológico de investigación y desarrollo productivo San José de Ayora, cantón Cayambe,* Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito, 2021.

[17] Y. Agudelo y J. Mora, *Evaluación y diseño del sistema de protección contra descargas atmosféricas para el edificio de Bellas Artes (bloque h),* Universidad Tecnológica de Pereira, 2015.

[18] V. Revelo, *Análisis del comportamiento de los electrodos de puesta a tierra ante altas frecuencias, aplicación a descargas atmosféricas.,* 2020.

[19] T. Ortiz, *Diseño del sistema de protección contra descargas atmosfericas para un edificio, aplicando el método electrogeométrico,* Instituto Politécnico Nacional, 2013.

[20] W. Bravo y R. Reinoso, *Construcción de un electrodo activo y análisis técnico-económico,* Universidad Técnica de Cotopaxi, 2019.

[21] H. Hernandez, «Electrodos de puesta a tierra aprobados por la NOM,» 2022.

[22] I. Villamarín, *Diseño de los sistemas de puesta a tierra para protección de equipos eléctricos instalados y de protección contra descargas atmosféricas para las instalaciones de la empresa Royal Master Group,* Universidad Politécnica Salesiana sede Quito, 2021.

[23] A. Ramirez, A. Navarro y G. Escuadra, *Propuesta de diseño de un sistema de puesta a tierra de una industria manufacturera de polímeros en expansión ubicada en Ecatepec de Morelos, Estado de México,* Instituto Politécnico Nacional, 2019.

[24] B. Anggoro, R. Dharmawanwas, H. Kumala, J. Burhan y M. Bin, «Grounding Impedance Characteristics for Two-Layer Soil of Vertical Rod Configuration with Variation of Length

and Diameter,» *International Journal on Electrical Engineering and Informatics,* p. 801, 2018.

[25] C. Gallardo, *Eficiencia a Impulso de sistemas de puesta a tierra,* 2016.

[26] G. Ramos, «Modelo electromagnético de un electrodo enterrado en un suelo homogeneo,» 2017.

[27] J. Leon, A. Justo y S. Kurokawa, «Análisis de sobretensiones resultantes de descargas atmosféricas para suelos dependientes de la frecuencia,» *SciELO Analytics,* vol. 30, 2020.

[28] UNIGAL, «Lineas de transmición».

[29] B. Velasco, *Desarrollo de una herramienta computacional para el estudio del comportamiento de los electrodos de puesta a tierra frente a altas frecuencias aplicado a descargas atmosféricas,* Universidad Politécnica SalesianaSede Quito, 2022.

[30] B. Tito, «Instructivo para el diseño de puesta a tierra en lineas de transmisión,» *CELEC EP,* 2017.

[31] H. Montaña, «UN_PAT: Programa para el cálculo de potenciales transitorios en puestas a tierra,» *Ingeniería e investigación,* vol. 26, 2006.

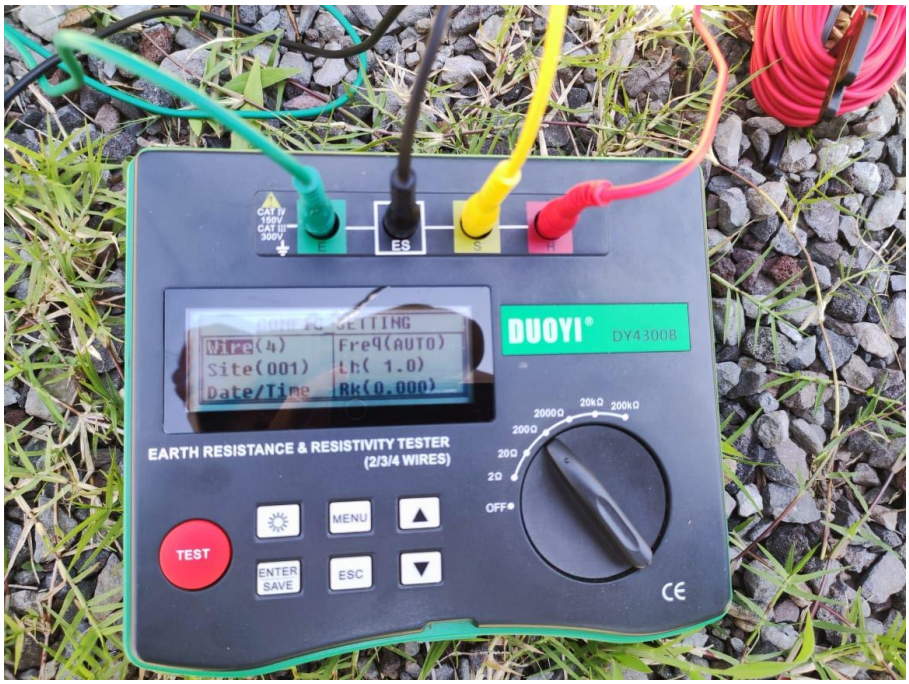
[32] E. Núñez, «Valoración del campus académico de la Universidad Técnica del Norte ubicado en la av. 17 de julio - Ibarra,» 2015.

[33] J. Leon, «Análisis de sobretensiones resultantes de descarga atmosféricas para suelos dependientes de la frecuencia,» *SciELO,* vol. 30, 2020.

[34] M. Alvarado, R. Baca y A. Ynga, *Modelado de un sistema de puesta a tierra en función a la frecuencia y el comportamiento de los electrodos ante descargas atmosféricas, Callao 2020,* 2021.

Anexos

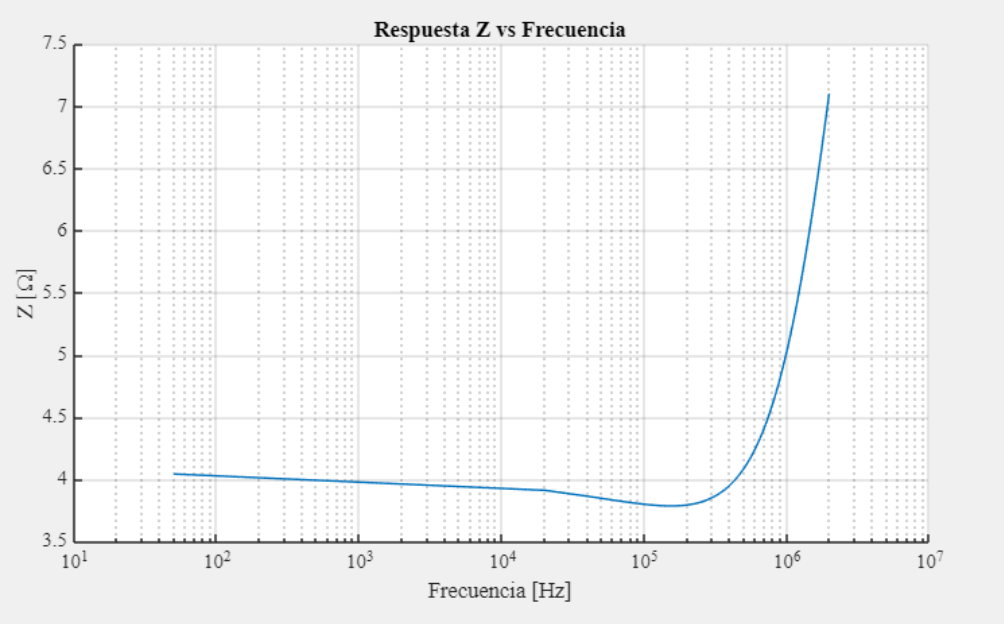
Anexo 1. Telurómetro utilizado para medir la resistividad



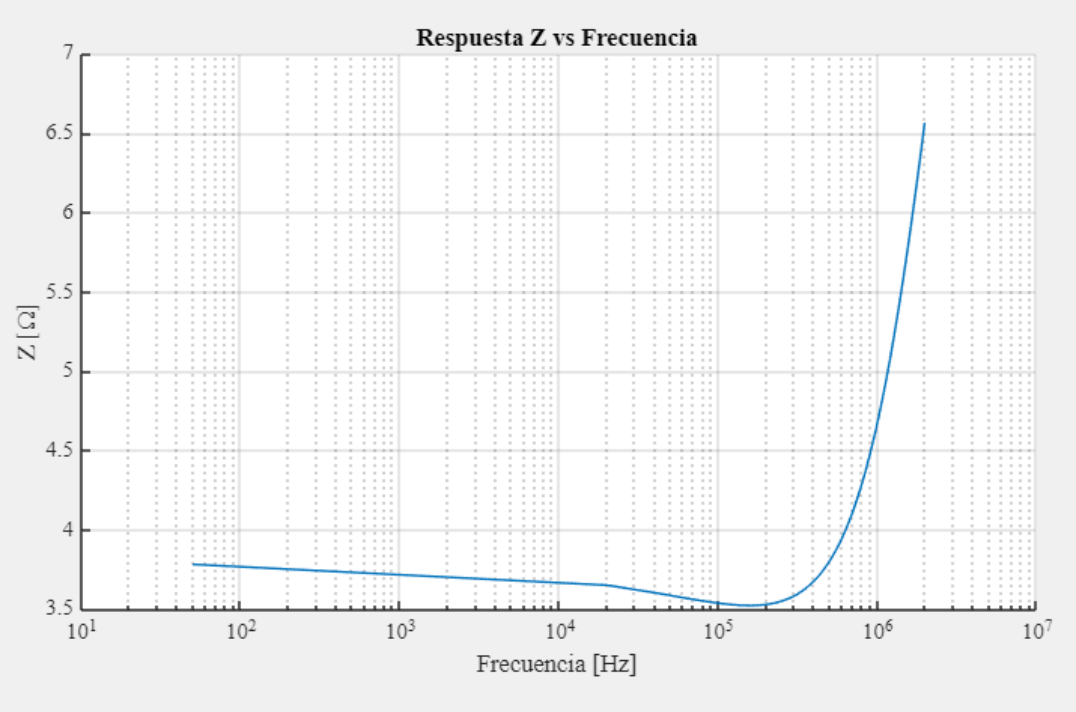
Anexo 2. Enterramiento de picas

Anexo 3. Conexión de las picas al telurómetro

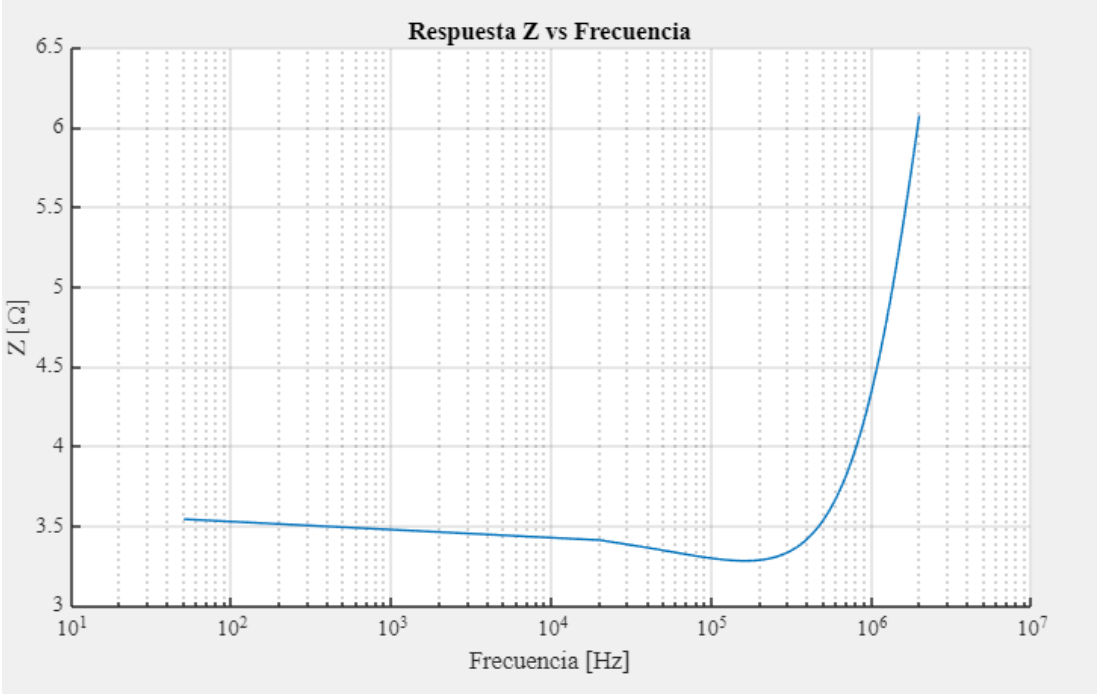
Anexo 4. Simulación con valores de un electrodo vertical de 2.4 m de longitud con 6.35mm de radio, ubicado a una profundidad de 2.4m. La permeabilidad relativa se establece en 1, la permitividad relativa en 10 y la resistividad en 10Ωm.



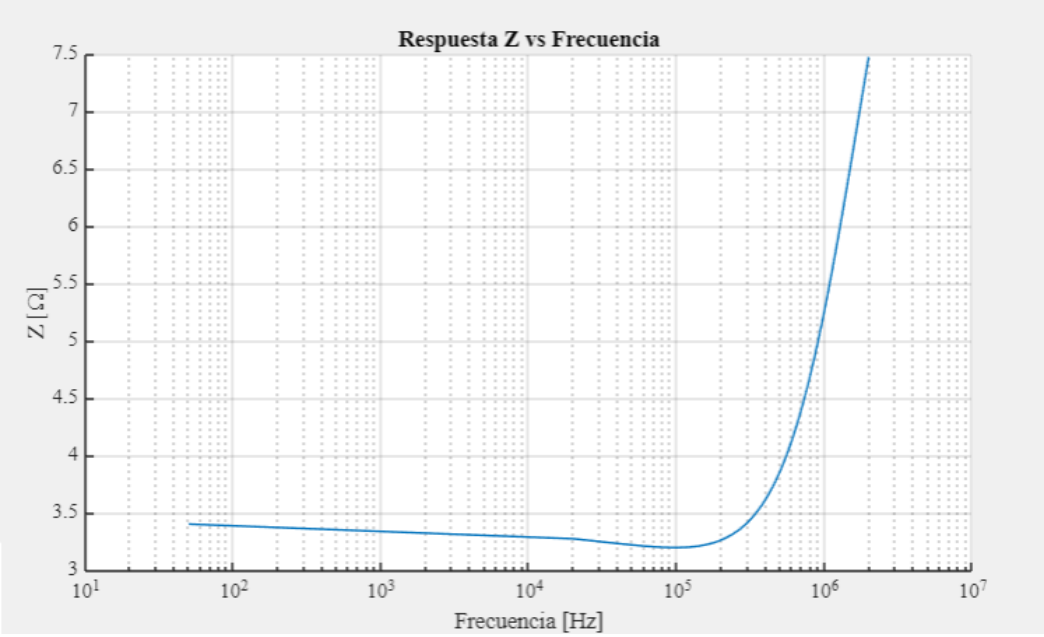
Anexo 5. Simulación con valores de un electrodo vertical de 2.4m de longitud y 9.5mm de radio, ubicado a una profundidad de 2.4m. La permeabilidad relativa se establece en 1, la permitividad relativa en 10 y la resistividad en 10Ωm.



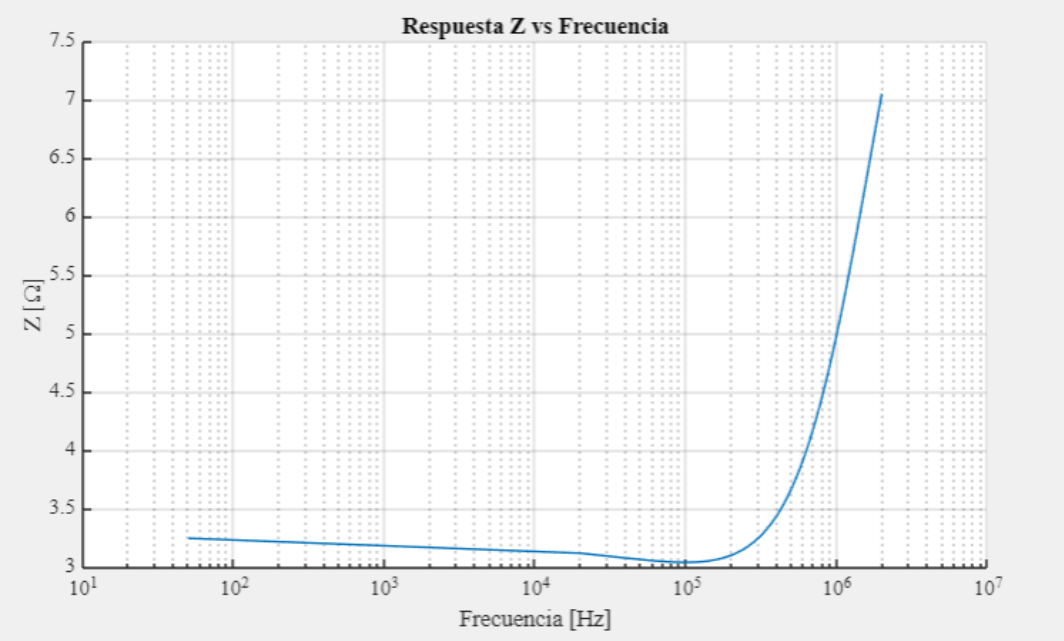
Anexo 6. Simulación con valores de un electrodo vertical de 2.4m de longitud con 12.7mm de radio, ubicado a una profundidad de 2.4 m. La permeabilidad relativa se establece en 1, la permitividad relativa en 10 y la resistividad en 10Ωm



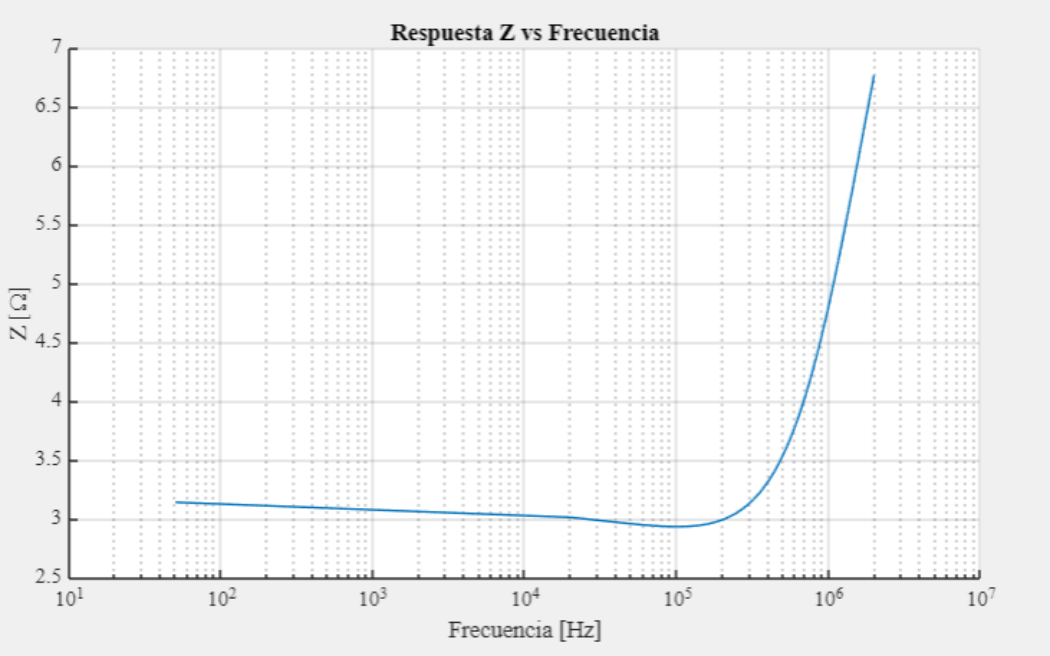
Anexo 7. Simulación con valores de un electrodo vertical de 3m de longitud con 6.35mm de radio, ubicado a una profundidad de 3m. La permeabilidad relativa se establece en 1, la permitividad relativa en 10 y la resistividad en 10Ωm.



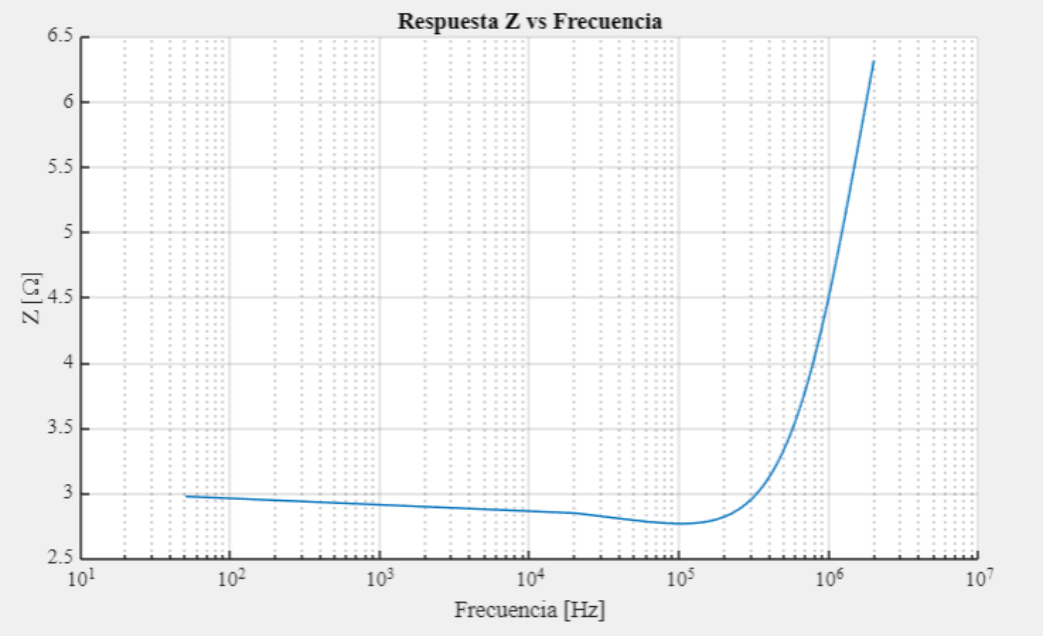
Anexo 8. Simulación con valores de un electrodo vertical de 3m de longitud con 8mm de radio, ubicado a una profundidad de 3m. La permeabilidad relativa se establece en 1, la permitividad relativa en 10 y la resistividad en 10Ωm.



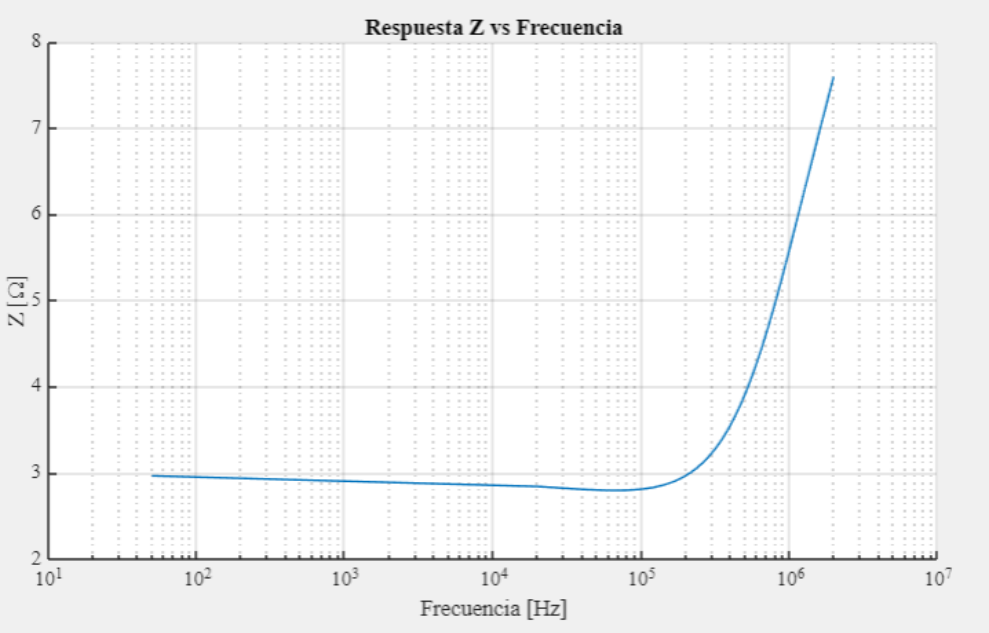
Anexo 9. Simulación con valores de un electrodo vertical de 3m de longitud con 9.5mm de radio, ubicado a una profundidad de 3m. La permeabilidad relativa se establece en 1, la permitividad relativa en 10 y la resistividad en 10Ωm.



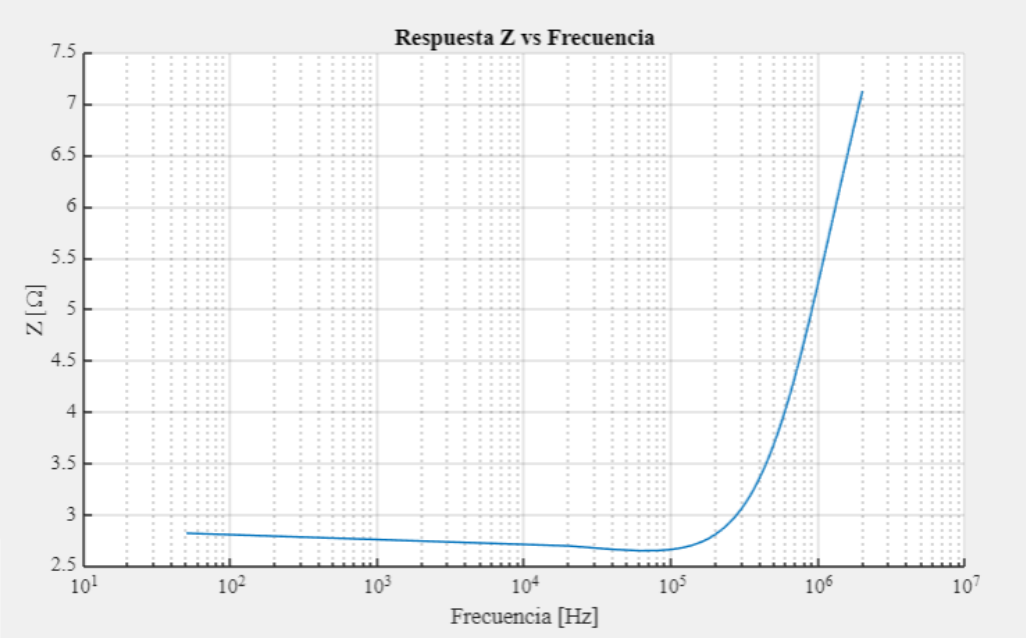
Anexo 10. Simulación con valores de un electrodo vertical de 3m de longitud con 12.7mm de radio, ubicado a una profundidad de 3m. La permeabilidad relativa se establece en 1, la permitividad relativa en 10 y la resistividad en 10Ωm.



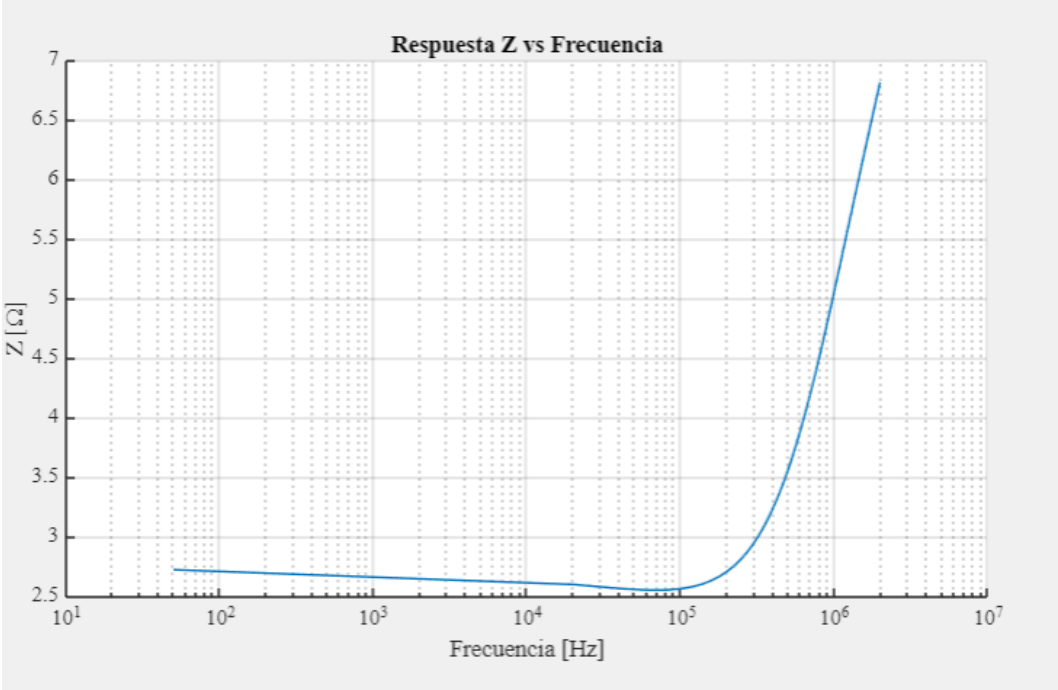
Anexo 11. Simulación con valores de un electrodo vertical de 3.6m de longitud con 6.35mm de radio, ubicado a una profundidad de 3.6m. La permeabilidad relativa se establece en 1, la permitividad relativa en 10 y la resistividad en 10Ωm.



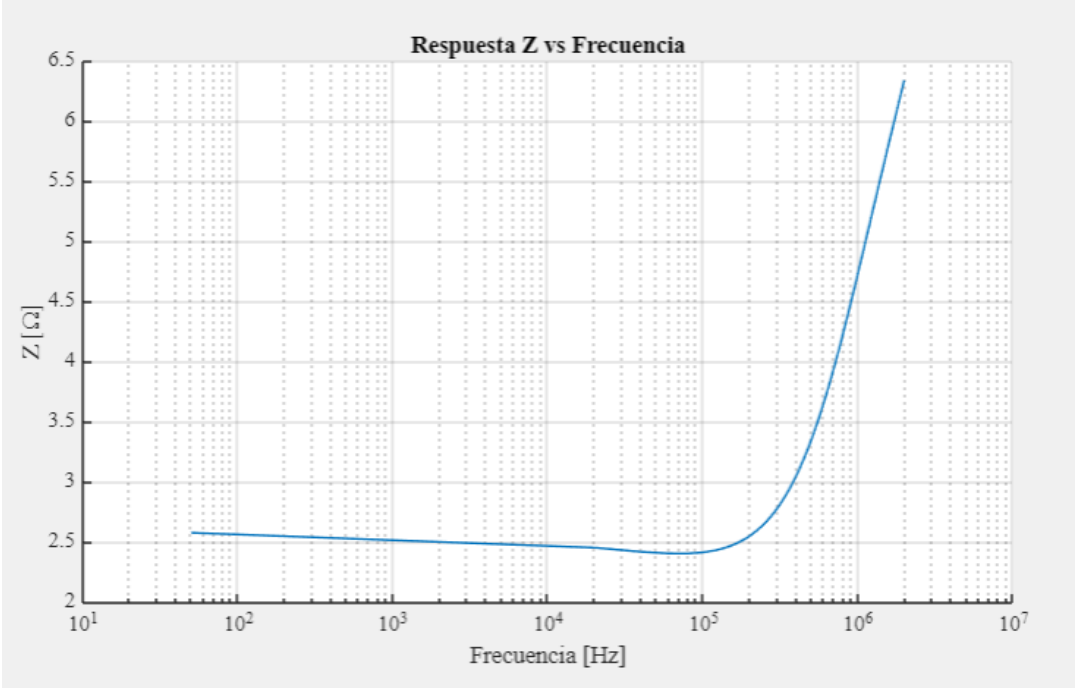
Anexo 12. Simulación con valores de un electrodo vertical de 3.6m de longitud con 8mm de radio, ubicado a una profundidad de 3.6m. La permeabilidad relativa se establece en 1, la permitividad relativa en 10 y la resistividad en 10Ωm.



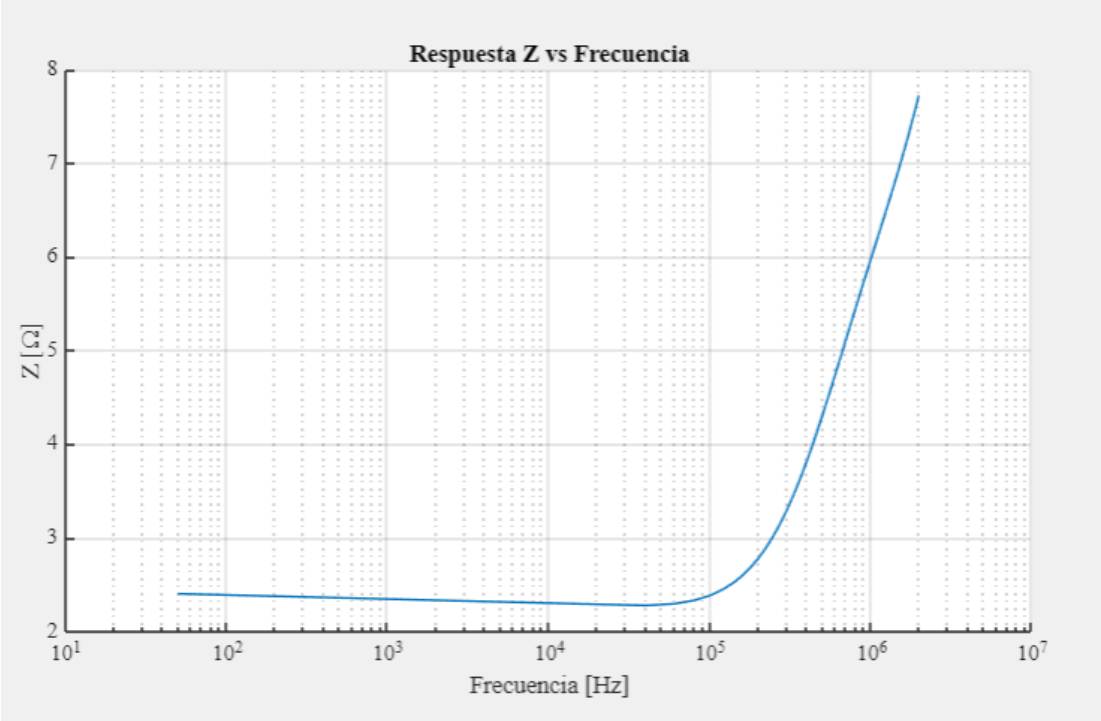
Anexo 13. Simulación con valores de un electrodo vertical de 3.6m de longitud con 9.5mm de radio, ubicado a una profundidad de 3.6m. La permeabilidad relativa se establece en 1, la permitividad relativa en 10 y la resistividad en 10Ωm.



Anexo 14. Simulación con valores de un electrodo vertical de 3.6m de longitud con 12.7mm de radio, ubicado a una profundidad de 3.6m. La permeabilidad relativa se establece en 1, la permitividad relativa en 10 y la resistividad en 10Ωm.



Anexo 15. Simulación con valores de un electrodo vertical de 4.8m de longitud con 6.35mm de radio, ubicado a una profundidad de 4.8m. La permeabilidad relativa se establece en 1, la permitividad relativa en 10 y la resistividad en 10Ωm.



Anexo 16. Código para el calculo de resistencia, inductancia y capacitancia

```
function [R,C,L] = fcn(Longitud,Profundidad,Radio,Resistividad,Permitividad,Permeabilidad)

Permi=Permitividad*(8.8541878176*(10^-12));
Perme=Permeabilidad*(4*pi*(10^-7));

R=(Resistividad/(pi*Longitud))*(log(2*Longitud/sqrt(2*Profundidad*Radio))-1);
C=(pi*Permi*Longitud)/(log(2*Longitud/sqrt(2*Profundidad*Radio))-1);
L=(Perme*Longitud/(2*pi))*(log(2*Longitud/sqrt(2*Profundidad*Radio))-1);
```

Anexo 17. Código para el calculo de impedancia

```
function [Z] = fcn(R,C,L,I,f)

XL=2*pi*f*L;
XC=1/(2*pi*f*C);
Z=abs(j*XL-(R*XC*j/(R-j*XC)));
```

Anexo 18. Medición de la resistencia de puesta a tierra para un solo electrodo

Anexo 19. Medición de la resistencia de puesta a tierra para una malla