

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**



**TESIS**

**“MODELADO DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN  
FUNCIÓN A LA FRECUENCIA Y EL COMPORTAMIENTO DE  
LOS ELECTRODOS ANTE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS,  
CALLAO 2020”**

**PARA OBTENER EL TITULO DE INGENIERO ELECTRICISTA**

**AUTORES:**

**Bach. ALVARADO ORTIZ, María Teresa**

**Bach. BACA AUCCAPURI, Roberto Martín**

**Bach. YNGA CAMPODONICO, Andree Jesus**

**Callao, 2021**

**PERÚ**



## **HOJA DE REFERENCIA DEL JURADO Y APROBACIÓN**

**PRESIDENTE : Dr. Ing. SANTIAGO LINDER RUBIÑOS JIMÉNEZ**  
**SECRETARIO : Mg. Ing. JESSICA ROSARIO MEZA ZAMATA**  
**VOCAL : MSc. Ing. ABILIO BERNARDINO CUZCANO RIVAS**  
**VOCAL : Mg. Ing. JORGE ELÍAS MOSCOSO SÁNCHEZ**

**ASESOR : Mg. Ing. ERNESTO RAMOS TORRES**

## **DEDICATORIA**

A nuestros padres por habernos forjado como las personas que somos en la actualidad; gracias a sus reglas con algunas libertades, pero al final, nos motivaron constantemente para alcanzar nuestros anhelos.

## **AGRADECIMIENTO**

A nuestra Universidad Nacional del Callao, que nos dio la bienvenida a un mundo con muchos retos y oportunidades, brindándonos enseñanzas incomparables.

Asi mismo a la ayuda de nuestros maestros y nuestros compañeros.

## INDICE

TABLAS DE CONTENIDO .....	7
RESUMEN .....	11
ABSTRACT .....	12
INTRODUCCIÓN .....	13
CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	14
1.1. Descripción de la realidad problemática.....	14
1.2. Formulación del problema .....	14
1.3. Objetivos .....	15
1.4. Limitantes de la investigación .....	15
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	17
2.1 Antecedentes .....	17
2.2 Marco .....	23
2.3 Definición de términos básicos .....	29
CAPÍTULO III. HIPÓTESIS Y VARIABLES.....	33
3.1 Hipótesis.....	33
3.2 Definición conceptual de variables .....	33
3.3 Operacionalización de Variables .....	34
CAPÍTULO IV. DISEÑO METODOLÓGICO.....	35
4.1 Tipo y diseño de la investigación.....	35
4.2 Método de investigación.....	45
4.3 Población y muestra.....	50
4.4 Técnicas e instrumentos para la recolección de la información .....	50
CAPÍTULO V: RESULTADOS.....	52
5.1 Resultados descriptivos.....	52
CAPÍTULO VI: DISCUSION DE RESULTADOS.....	56
6.1 Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados .....	56
CONCLUSIONES.....	89
RECOMENDACIONES .....	90
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91
ANEXO.....	94

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Modelo circuital .....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 2. Modelo de líneas de transmisión para SPAT .....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 3. División del electrodo del SPAT .....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 4. Modelo de imágenes .....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 5. Tipos de electrodos del SPAT .....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 6. Tipo de descarga entre diferentes superficies.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 7. Segmentación del electrodo.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 8. Proceso de la transformada rápida de Fourier para 4 muestras .....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 9. Efecto aliasing.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 10. Acople inductivo .....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 11. Fuente lineal de corriente.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 12. Acoplamiento capacitivo.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 13. Potencial medio.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 14. Electrodo horizontal .....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 15. Diferencia de potencial.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 16. Distribución de corrientes en un segmento .....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 17. Diagrama de entradas y salidas.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 18. Ingreso de datos .....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 19. Visualización de los nodos ingresados.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 20. Visualización de la topología del SPAT.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 21. Nodos virtuales .....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 22. Señal transformada del dominio del tiempo a dominio de la frecuencia.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 23. Modelo de líneas de transmisión.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 24. Resultados de la simulación electrodo horizontal de 10m de longitud .....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 25. Resultados de la simulación electrodo vertical de 10m de longitud</i>	<i>53</i>
<i>Figura 26. Resultados de la simulación electrodo vertical de 30m de longitud</i>	<i>53</i>
<i>Figura 27. Resultados de la simulación electrodo vertical de 60m de longitud</i>	<i>54</i>
<i>Figura 28. Resultados de la simulación electrodo horizontal de 20m de longitud .....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 29. Resultados de la simulación electrodo vertical de <math>r=0.2m</math> .....</i>	<i>55</i>

<i>Figura 30. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo horizontal resistividad de 10 <math>\Omega</math>m)</i> .....	56
<i>Figura 31. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo horizontal resistividad de 100 <math>\Omega</math>m)</i> .....	57
<i>Figura 32. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo horizontal resistividad de 1000 <math>\Omega</math>m)</i> .....	57
<i>Figura 33. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo horizontal resistividad de 10000 <math>\Omega</math>m)</i> .....	58
<i>Figura 34. Respuesta del SPAT en función de la frecuencia (Variación de resistividad electrodo horizontal)</i> .....	59
<i>Figura 35. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo vertical resistividad de 10 Ohm)</i> .....	60
<i>Figura 36. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo vertical resistividad de 100 Ohm)</i> .....	61
<i>Figura 37. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo vertical resistividad de 1000 Ohm)</i> .....	61
<i>Figura 38. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo vertical resistividad de 10000 Ohm)</i> .....	62
<i>Figura 39. Respuesta del SPAT en función de la frecuencia (Variación de resistividad electrodo vertical)</i> .....	63
<i>Figura 40. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo horizontal 1m)</i> .....	64
<i>Figura 41. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo horizontal 10m)</i> .....	65
<i>Figura 42. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo horizontal 30m)</i> .....	65
<i>Figura 43. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo horizontal 50m)</i> .....	66
<i>Figura 44. Respuesta del SPAT en función de la frecuencia (Variación de longitud electrodo horizontal)</i> .....	67
<i>Figura 45. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo vertical 1m)</i> .....	68
<i>Figura 46. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo vertical 10m)</i> .....	69
<i>Figura 47. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo vertical 30m)</i> .....	69
<i>Figura 48. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo vertical 50m)</i> .....	70
<i>Figura 49. Respuesta del SPAT en función de la frecuencia (Variación de longitud electrodo vertical)</i> .....	72
<i>Figura 50. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo horizontal <math>r=0.5</math> cm)</i> .....	73
<i>Figura 51. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo horizontal <math>r= 1</math> cm)</i> .....	73
<i>Figura 52. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo horizontal <math>r= 1.5</math> cm)</i> .....	74

<i>Figura 53. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo horizontal <math>r=2</math> cm) .....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 54. Respuesta del SPAT en función de la frecuencia (Variación del radio de un electrodo horizontal).....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 55. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo horizontal <math>\mu_r=1</math>).....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 56. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo horizontal <math>\mu_r=10</math>).....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 57. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo horizontal <math>\mu_r=100</math>) .....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 58. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo horizontal <math>\mu_r=1000</math>).....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 59. Respuesta del SPAT en función de la frecuencia (Variación de permeabilidad electrodo horizontal) .....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 60. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo horizontal <math>\epsilon_r=1</math>).....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 61. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo horizontal <math>\epsilon_r=10</math>).....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 62. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo horizontal <math>\epsilon_r=100</math>).....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 63. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo horizontal <math>\epsilon_r=1000</math>).....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 64. Respuesta del SPAT en función de la frecuencia (Variación de permitividad electrodo horizontal).....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 65. Impedancia en función de la frecuencia variando longitud del electrodo (Ejemplo explicativo <math>r=1</math> cm) .....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 66. Impedancia en función de la frecuencia variando longitud del electrodo (Ejemplo explicativo <math>r=2</math> cm) .....</i>	<i>87</i>

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Valores de las constantes para onda doble exponencial y Heidler . . .</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 2. Operacionalización de variables.....</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 3. Método del Bit Reverso .....</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 4. Valores de resistencias, capacitancias e inductancias empleados en ATPdraw .....</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 5. Variación de resistividad del suelo .....</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 6. Variación de resistividad del suelo, electrodo vertical .....</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 7. Variación de la longitud del electrodo horizontal. ....</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 8. Variación de la longitud del electrodo vertical .....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 9. Variación del radio del electrodo horizontal.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 10. Variación de la permeabilidad en un electrodo horizontal .....</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 11. Variación de la permitividad en un electrodo horizontal .....</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 12. Resultados de simulación ejemplo explicativo <math>r=1\text{cm}</math> .....</i>	<i>86</i>

## RESUMEN

La presente investigación desarrolla un diseño Descriptivo ya que el estudio en general busca determinar el grado de relación entre los variables objetos de estudio, es analizar la efectividad del tratamiento con cemento conductor de los pozos a tierra y verificar que el sistema de puesta a tierra tratado con cemento conductor cumpla con la seguridad de protección tanto del personal técnico como de los equipos electrónicos y este de acuerdo con la normativa vigente.

Para poder medir tanto los campos eléctricos como magnéticos, es necesario seguir procedimientos de tal manera que los valores medidos no sean erróneos. Hay normas internacionales que citan métodos adecuados para medir estos campos como es la norma IEEE Std. 644-1994 Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields From AC Power Lines.

Aun cuando la puesta a tierra constituye una parte intrínseca del sistema eléctrico, permanece en general como un tema mal comprendido y a menudo se refiere a él como un «arte oscuro»- algunas veces incluso por bien calificados ingenieros. En los años recientes ha habido rápidos desarrollos en el modelamiento de sistemas de puesta a tierra, tanto a frecuencia de potencia como superiores, principalmente facilitados por los nuevos recursos y procedimientos computacionales. Esto ha incrementado nuestra comprensión del tema, al mismo tiempo que la actividad de diseño ha llegado a ser significativamente más difícil y las nuevas normas están requiriendo un diseño seguro y más detallado.

Surge así una oportunidad para explicar más claramente los conceptos de puesta a tierra y una necesidad que esto se traspase a los diseñadores de sistemas de puesta a tierra y a los instaladores, de modo que pueda lograrse una mayor comprensión del tema.

## **ABSTRACT**

This research develops a descriptive design since the study in general seeks to determine the degree of relationship between the variables under study, is to analyze the effectiveness of the treatment with conductive cement of the wells to earth and verify that the grounding system treated with conductive cement, comply with the safety of protection of both technical personnel and electronic equipment and this in accordance with current regulations

In order to be able to measure both electric and magnetic fields, it is necessary to follow procedures so that the measured values are not erroneous. There are international standards that cite adequate methods to measure these fields, such as the IEEE Std. 644-1994 Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields From AC Power Lines.

Even though grounding is an intrinsic part of the electrical system, it remains a generally misunderstood subject and is often referred to as a "dark art" - sometimes even by well-qualified engineers. In recent years there have been rapid developments in the modeling of grounding systems, both at power frequencies and higher, mainly facilitated by new resources and computational procedures. This has increased our understanding of the subject, at the same time that design activity has become significantly more difficult and new standards are requiring more detailed and safe design.

There is thus an opportunity to explain grounding concepts more clearly and a need for this to be passed on to grounding system designers and installers so that a greater understanding of the subject can be achieved.

## INTRODUCCIÓN

El sistema de puesta a tierra es uno de los principales y más importantes elementos para el desarrollo, debiendo presentar altos parámetros de calidad y confiabilidad. En caso de presentar alguna falla en alguna etapa del sistema eléctrico de potencia, se producirían pérdidas tanto en la parte económica como productiva.

Una de las principales fallas que se presenta en el sistema es, la desconexión de líneas en las torres debido a las descargas atmosféricas, las mismas que provocan valores de voltaje que sobrepasan el nivel de aislamiento, produciendo así un cortocircuito con la consiguiente actuación de las protecciones eléctricas y la desconexión de la línea.

El sistema de puesta en tierra (SPAT), nos ayuda a reducir la recurrencia de este problema, que tiene como principales objetivos la seguridad de las personas y la protección de los equipos, ya que brinda un camino de baja impedancia para poder disipar la energía producida por una descarga atmosférica, evitando así la aparición de tensiones en las masas metálicas como son las torres eléctricas y posibles fallos en el sistema

En este proyecto de investigación, trata sobre la importancia del sistema de puesta a tierra para el sistema eléctrico de potencia, observando el comportamiento dinámico de la impedancia de los electrodos del SPAT, ante uno de los fenómenos más críticos al que está sometido como son las descargas atmosféricas, con lo que se espera tener una mejor comprensión de su funcionamiento ante este fenómeno, con lo que se puede llegar a tener mejoras en el diseño del sistema de puesta a tierra.

# CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

## 1.1. Descripción de la realidad problemática

Esta investigación es aplicada ya que utiliza los conocimientos en la práctica, para aplicarlos, en la mayoría de las veces, en provecho de la sociedad. Según la fuente de información es Investigación Mixta, la cual participa de la naturaleza de la investigación de campo y de la investigación documental.

El nivel de la investigación es descriptivo-explicativa: Es descriptiva por cuanto tiene la capacidad de seleccionar las características fundamentales del objeto de estudio, con una descripción detallada de sus partes y es explicativa en la medida que se analizan las causas y efectos de las relaciones entre las distintas variables.

## 1.2. Formulación del problema

### 1.2.1. Problema general

- ✓ ¿Es posible modelar un sistema de puesta a tierra en función a la frecuencia para analizar el comportamiento los electrodos ante descargas atmosféricas, callao 2021?

### 1.2.2. Problemas específicos

- ✓ ¿Es posible modelar los electrodos como un grupo de capacitores, inductores y resistencias interconectados, para poder analizar el SPAT en función de la frecuencia?
- ✓ ¿Es posible analizar los cambios que sufre la impedancia del SPAT para observar el comportamiento de los electrodos del sistema de puesta a tierra al ser sometido a una descarga atmosférica?
- ✓ ¿Es posible implementar el modelo de puesta a tierra para altas frecuencias en un programa computacional que nos permita analizar el comportamiento de los electrodos del sistema de puesta a tierra?

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo general**

- ✓ Modelar un sistema de puesta a tierra en función a la frecuencia para analizar el comportamiento los electrodos ante descargas atmosféricas, callao 2021.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- ✓ Modelar los electrodos como un grupo de capacitores, inductores y resistencias interconectados, para poder analizar el SPAT en función de la frecuencia.
- ✓ Analizar los cambios que sufre la impedancia del SPAT para observar el comportamiento de los electrodos del sistema de puesta a tierra al ser sometido a una descarga atmosférica.
- ✓ Implementar el modelo de puesta a tierra para altas frecuencias en un programa computacional para analizar el comportamiento de los electrodos del sistema de puesta a tierra.

### **1.4. Limitantes de la investigación**

La presente investigación se enfocará en verificar los resultados obtenidos del programa implementado; se realizará algunas simulaciones para observar cómo afecta cada uno de los parámetros tales como: resistividad, permeabilidad, permitividad, etc.; además de ofrecer las recopilaciones del análisis de la respuesta del sistema de puesta a tierra para altas frecuencias, con la ayuda de "Guide" de Matlab y el programa ATPdraw, verificando los resultados del programa computacional implementado mediante el modelo de líneas eléctricas en el programa mediante un barrido de frecuencia profundizar los conocimientos teóricos.

#### **1.4.1. Teórica**

Al hablar de justificación teórica, podemos afirmar que el presente trabajo de investigación realizó dicha justificación, ya que se analizó y buscó una relación existente entre el modelado de los SPAT y el comportamiento que tienen ante descargas atmosféricas, así mismo se busca ampliar el conocimiento que sirva de base para los conocimientos teóricos que se

van a aplicar a las instituciones de nivel superior, también se buscó hacer una contribución a las teorías que ya existen.

El presente trabajo de investigación podemos afirmar la importancia del estudio ya que menciona la problemática del comportamiento de los SPAT en función a la frecuencia que generan las descargas Atmosféricas, se presume que la frecuencia que este genera tiene mucha incidencia, por tal motivo nunca se realizó una indagación sobre esta incidencia, por tal motivo se puede afirmar la importancia del presente trabajo de investigación.

#### **1.4.2. Práctica**

El estudio de investigación se enfoca en modelar el comportamiento de los SPAT frente a las descargas atmosféricas en torno a la frecuencia que se genera, en la cual se buscó ver si es posible realizar ello mediante el método de elementos finitos.

Se buscó conocer a profundidad en dicho estudio de investigación las causas que influyen en el comportamiento de los SPAT y las frecuencias que se generan por descargas atmosféricas, haciendo uso de diferentes instrumentos de medición y softwares, el cual, nos permitirá tomar decisiones para adoptar diferentes medidas que ayuden a concluir y recomendar sobre la incidencia de las descargas atmosféricas.

El proyecto se justifica de forma práctica porque permitirá a la al modelo contar con un mecanismo que permitirá tener información precisa en todo momento sobre el comportamiento de los SPAT frente a las descargas Atmosféricas.

## **CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Antecedentes**

Algunos investigadores han presentado un enorme interés sobre este tema y han realizado algunos proyectos de investigación para poder comprender el comportamiento transitorio del sistema de puesta a tierra.

El sistema de puesta a tierra se puede clasificar en dos tipos: “comportamiento en estado estable” y “comportamiento en estado transitorio”. Por la gran importancia que tiene el SPAT para el sistema eléctrico de potencia.

Los primeros trabajos sobre el comportamiento transitorio del sistema de puesta a tierra empezaron a principios del siglo XX, pero debido a las limitaciones computacionales existentes en la época los investigadores realizaban varias simplificaciones en las técnicas y modelos empleados. Estas técnicas y modelos se han ido mejorando con el paso del tiempo. Uno de los principales indicios sobre el tema fue dado por Towne en 1929, quien señaló que el sistema de puesta a tierra presenta un comportamiento no lineal.

En 1981 R. Kosztaluk, M. Loboda y D. Mukhedkar realizaron algunas pruebas experimentales en mallas usadas en subestaciones y en algunas torres de líneas de transmisión. En el experimento se trató de reproducir todas las condiciones de una descarga atmosférica y observar los fenómenos que ocurrían en la malla de puesta a tierra. Posteriormente se representaron los electrodos de dicha malla como elementos resistivos, capacitivos e inductivos para ser analizados teórica y finalmente comparar los resultados obtenidos los cuales fueron muy aproximados.

A finales de 80 y principios de los 90 aparecen dos muy importantes investigadores sobre el análisis del comportamiento del sistema de puesta a tierra que son F. Dawalibi y L. Grcev, los que realizaron grandes aportes sobre este tema, cambiando así el enfoque que se tenía hasta el momento.

F. Dawalibi publicó un artículo en el cual analiza la respuesta de los electrodos de tipo cilíndricos con ayuda de la teoría electromagnética. En este trabajo se desarrollaron fórmulas aplicadas para fenómenos de alta y baja frecuencias.

En 1990 L. Grcev y F. Dawalibi publicaron un artículo en el cual se analizaba el comportamiento del sistema de puesta a tierra, se empleó la técnica de segmentación para los electrodos del SPAT con el objetivo de representar a cada segmento como una fuente de corriente uniforme. Además, se empleó el modelo de Sommerfeld para solucionar las integrales de los acoplamientos. El procedimiento se realizó en el dominio de la frecuencia y al tener los resultados, estos se los transforma al dominio del tiempo mediante la inversa de la transformada de Fourier.

En 1994 F.E. Mentre y L Grcev publica su trabajo, en el cual realizó un análisis para un electrodo recto al cual lo modeló como una línea de transmisión, el modelo se verificó mediante la comparación de resultados entre mediciones realizadas y el modelo electromagnético.

En 1995 B. Nekhoul, P. Labie, F.X. Zgainski, G. Meunier, F. Morillon, y S. Bourg mediante las ecuaciones de Maxwell y con la ayuda de la técnica de los elementos finitos se logra encontrar la impedancia del sistema de puesta a tierra. Además, se considera el efecto no lineal del suelo.

En 1999, A.F. Otero, J. Cidras, y J.L. del Alamo realizaron un estudio en el cual se segmenta a los electrodos, se consideran los efectos longitudinales y transversales, se calculan los parámetros resistivos, capacitivos e inductivos y posteriormente lo resuelve por teoría de circuitos eléctricos. Se trabaja en el dominio de la frecuencia. Se presenta la verificación mediante mediciones y otras comparaciones con diferentes modelos de análisis.

En 2005 L. Grcev, y M. Popov publicaron un artículo en el cual un electrodo tipo vertical se representaba como una línea de transmisión mediante un circuito equivalente de parámetros distribuidos, el cual presenta mayor aproximación al modelo electromagnético.

En 2009 L. Grcev realiza un trabajo en el cual expresa algunos modelos aproximados para el análisis dinámico del comportamiento de la impedancia del SPAT, Posteriormente compara con los modelos existentes para el análisis del sistema de puesta a tierra ante altas frecuencias.

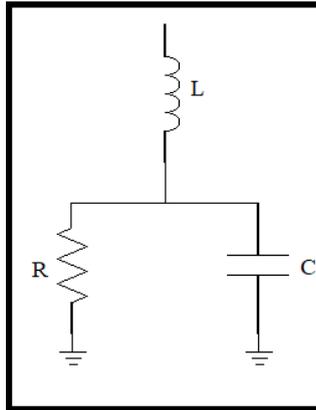
Actualmente el sistema de puesta a tierra es diseñado en base a normas internacionales, como, por ejemplo: IEEE Standard 142-2007 e IEEE Standard 80-2013.

Es una guía para el diseño de la puesta a tierra para subestaciones, en cual describe el modelamiento del terreno, tiempo de soporte máximos, distribución de corrientes entre otros.

La puesta a tierra normalmente es representada como una resistencia de bajo valor, pero ello sólo es válido para bajas frecuencias. Cuando se trabaja con altas frecuencias como es el caso de una descarga atmosférica, se producen ciertos efectos capacitivos e inductivos que cambian el comportamiento de la puesta a tierra. Para analizar el comportamiento del SPAT en altas frecuencia se han desarrollado diferentes modelos que se muestran a continuación.

- **Modelo circuital**

Fue uno de los primeros modelos que se aplicó para el estudio de los sistemas de puesta a tierra ante altas frecuencias. Es un modelo simple que describe a los electrodos de puesta a tierra como un circuito compuesto por una resistencia, un capacitor y un inductor.

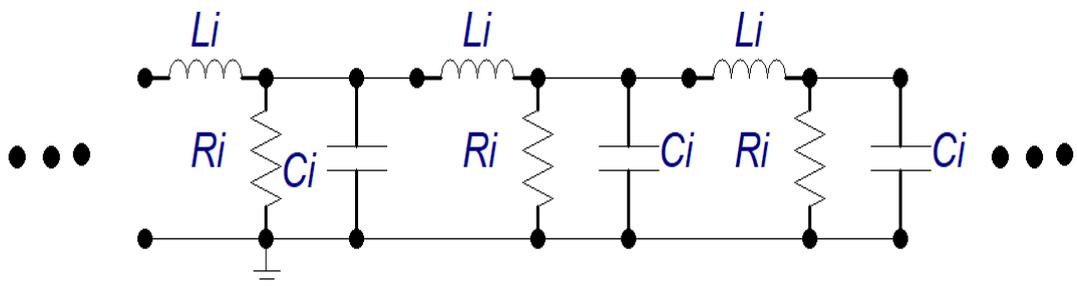


**Figura 1. Modelo circuital**

- **Modelo de línea transmisión (TL) para análisis del SPAT**

El modelo considera al sistema de puesta a tierra como una línea aérea de transmisión. El análisis se puede realizar mediante la unión de algunos segmentos con una configuración tipo pi o mediante la representación de una línea con parámetros distribuidos.

Los parámetros inductancia ( $L_i$ ), resistencia ( $R_i$ ) y capacitor ( $C_i$ ) son obtenidos mediante las ecuaciones de "Sunde", las cuales se presentan más adelante.



**Figura 2. Modelo de líneas de transmisión para SPAT**

Mediante la consideración del SPAT con parámetros distribuidos, se procede a analizar el sistema de puesta a tierra con la resolución de las ecuaciones de onda con pérdidas.

- **Modelo electromagnético**

El modelo electromagnético es el más preciso y complejo procedimiento para el análisis del SPAT; consiste en soluciones de las ecuaciones de

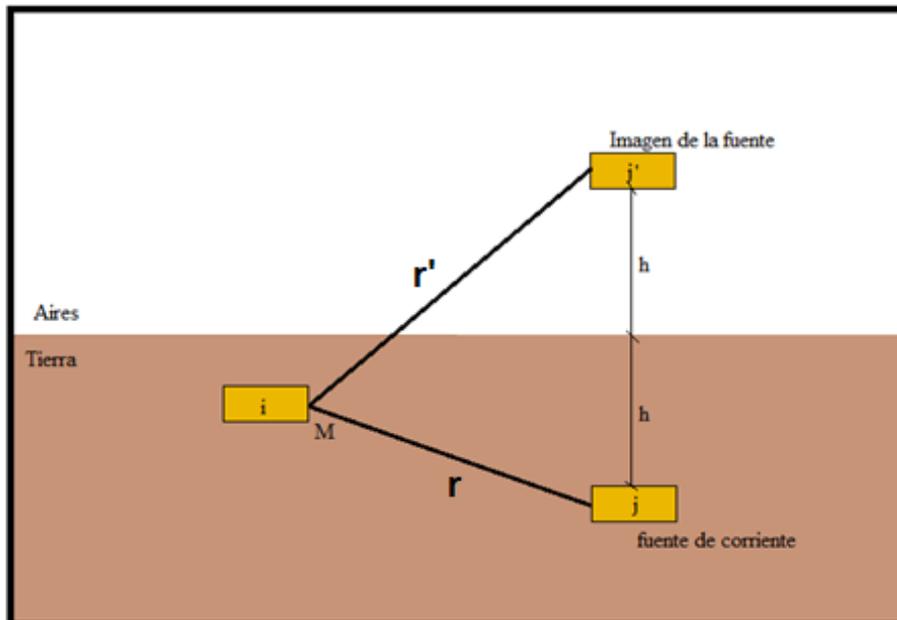
Maxwell para resolver los campos formados en el electrodo. Para la solución por el modelo electromagnético se emplea el método de elementos finitos, mediante la división del electrodo en pequeñas partes.



**Figura 3. División del electrodo del SPAT**

Se considera que la corriente se distribuye uniformemente en todo el electrodo, por lo tanto, cada elemento presenta una parte de la corriente total y un campo eléctrico incidente.

Para analizar el efecto aire tierra se emplea el modelo de imágenes, consiste en considerar una fuente ficticia ubicada perpendicularmente de la superficie del suelo, con una altura  $h$ .



**Figura 4. Modelo de imágenes**

El modelo de imágenes presenta una limitación, ya que sólo es aplicable para eventos iguales o menores a 10 MHz. Para un análisis de eventos

superiores a los 10 MHz es recomendable emplear el modelo de imágenes modificado, en el cual se emplean unos coeficientes de multiplicación que dependerán de la frecuencia y de los parámetros eléctricos de los medios involucrados.

## **2.2 Marco**

### **2.2.1 Teórico**

#### **Norma aplicadas para el diseño del SPAT**

Actualmente el sistema de puesta a tierra es diseñado en base a normas internacionales, como, por ejemplo:

➤ **IEEE Standard 142-2007**

Es una guía la cual indica los diferentes tipos de conexiones que se deben emplear para las instalaciones industriales y comerciales.

➤ **IEEE Standard 80-2013**

Es una guía para el diseño de la puesta a tierra para subestaciones, en cual describe el modelamiento del terreno, tiempo de soporte máximos, distribución de corrientes entre otros.

### **2.2.2 Conceptual**

Considerando su duración, al comportamiento del sistema de puesta a tierra se lo puede clasificar en dos tipos: “comportamiento en estado estable” y “comportamiento en estado transitorio”. Por la gran importancia que tiene el SPAT para el sistema eléctrico de potencia, algunos investigadores han presentado un enorme interés sobre este tema y han realizado algunos proyectos de investigación para poder comprender el comportamiento transitorio del sistema de puesta a tierra.

Los primeros trabajos sobre el comportamiento transitorio del sistema de puesta a tierra empezaron a principios del siglo XX, pero debido a las limitaciones computacionales existentes en la época los investigadores realizaban varias simplificaciones en las técnicas y modelos empleados. Estas técnicas y modelos se han ido mejorando con el paso del tiempo. Uno de los principales indicios sobre el tema fue dado por Towne en 1929, quien señaló que el sistema de puesta a tierra presenta un comportamiento no lineal.

- Posteriormente Bewley, realizó uno de los primeros estudios experimentales sobre el comportamiento del sistema de puesta a tierra. Para la realización de dicho experimento uso electrodos cilíndricos ante una fuente de voltaje de tipo unitario. Mediante los resultados obtenidos de dicho estudio se pudo obtener una expresión para poder realizar el cálculo de la impedancia del electrodo de contrapeso.
  
- P.L. Bellaschi realizó algunos estudios entre 1941 a 1942 en los cuales logró obtener la sobretensión en el punto de inserción causada por diferentes fuentes de tipo impulso. Estos estudios sirvieron para confirmar que el comportamiento del sistema de puesta a tierra presenta una gran relación con respecto a la ionización que sufre el suelo alrededor del electrodo.
  
- G.M. Petropulos realizó algunos estudios por la época de 1948, en los cuales trabajó con corrientes de muy alta intensidad, las cuales fueron aplicadas a electrodos de tipo esféricos. Con ayuda de los trabajos desarrollados por P.L. Bellaschi se pudieron obtener las ecuaciones con las que se puede determinar la impedancia para electrodos esféricos.
  
- En el año de 1968, E. D. Sunde publica una de las obras más importante y más citada para los estudios posteriores sobre el comportamiento del sistema de puesta a tierra. En su libro, Sunde procede a realizar un análisis más riguroso tomando aspectos físicos y matemáticos. El libro muestra algunos elementos muy importantes para el estudio del sistema de puesta a tierra en estado transitorio, como es el desarrollo de las ecuaciones de Maxwell y su relación con los electrodos del sistema de puesta a tierra. El libro también presenta una metodología para analizar efectos transitorios del sistema de puesta a tierra, mediante las expresiones obtenidas con ayuda de la teoría electromagnética, asumiendo a los electrodos como una línea de transmisión en un medio uniforme. Además, se consideraron parámetros como profundidad, resistividad, permeabilidad y permitividad del suelo.
  
- A principios de los 80 B. Thapar y B. R. Gupta realizaron algunos

experimentos con configuraciones complejas de los electrodos del sistema de puesta a tierra, los mismos que fueron sometidos a señales tipo impulso. De estos experimentos se pudo realizar un análisis empírico, en el cual se emplearon por primera vez los conceptos de impedancia impulsiva, la cual se define como la relación entre la sobretensión con la corriente medidas en el punto de inserción del sistema de puesta a tierra. Además, se pudo determinar que, en mallas rectangulares grandes, el efecto de ionización del suelo podría ser despreciado.

- En 1981 R. Kosztaluk, M. Loboda y D. Mukhedkar realizaron algunas pruebas experimentales en mallas usadas en subestaciones y en algunas torres de líneas de transmisión. En el experimento se trató de reproducir todas las condiciones de una descarga atmosférica y observar los fenómenos que ocurrían en la malla de puesta a tierra. Posteriormente se representaron los electrodos de dicha malla como elementos resistivos, capacitivos e inductivos para ser analizados teóricamente y finalmente comparar los resultados obtenidos los cuales fueron muy aproximados.
- En 1983 los investigadores C. Mazzetti y G.M. Veca presentaron un modelo matemático para analizar el comportamiento de un electrodo del sistema de puesta a tierra tipo horizontal, el cual se lo consideraba infinito y se lo modelaba como una línea de transmisión. Este modelo sólo consideró parámetros conductivos (G) e inductivos (L) para el análisis del comportamiento la impedancia del sistema de puesta a tierra.
- A mediados de 1983, A.P. Meliopoulos y M.G. Moharram realizaron investigaciones basándose en un modelo de segmentación de los electrodos, y cada uno de esos segmentos fue modelado como una línea de transmisión la cual está caracterizada por parámetros inductivos (L), capacitivos (C), resistivos (R) y conductivos (G). Estos parámetros eran calculados mediante la ecuación de Laplace y el

modelo de propagación de ondas. Además, se considera el efecto aire-tierra. Estos estudios sirvieron para analizar electrodos tipo horizontal.

- R. Velázquez junto con D. Mukhedkar presentaron un método, en el año de 1984, en el cual mediante el uso de los modelos analíticos se trata de analizar el comportamiento del sistema de puesta a tierra ante una descarga atmosférica. Para la realización del estudio se emplearon parámetros constantes del suelo. Además, se analizó el comportamiento no lineal mediante la linealización por partes o segmentación de los electrodos. Mediante este estudio se logró crear un modelo de circuito equivalente para electrodos largos del sistema de puesta a tierra.
- En 1985 los investigadores M. Loboda y Z. Pochanke realizaron estudios sobre el comportamiento transitorio del sistema de puesta a tierra. Sus estudios se basaron en experimentos realizados en laboratorio en los cuales se trató de reproducir los efectos producidos en el estado transitorio del SPAT en diferentes tipos de suelos. Mediante estos estudios se logró observar que se forma una zona de ionización alrededor del electrodo.
- Papalexopoulos y Meliopoulos en el año de 1987 presentan un artículo en el cual aproximaban los electrodos del sistema de puesta a tierra a líneas de transmisión, pero para el cálculo de los parámetros de resistencia, capacitancia, inductancia y conductancia se calcularon a partir de soluciones elaboradas de las ecuaciones de Maxwell. En este trabajo no se consideró el acoplamiento mutuo inductivo, debido a varias simplificaciones que se emplearon para facilitar la solución del problema. En la realización de este trabajo se emplearon varias pruebas, variando la permitividad y la resistividad lo que arrojó que el modelo era válido sólo para bajas frecuencias.

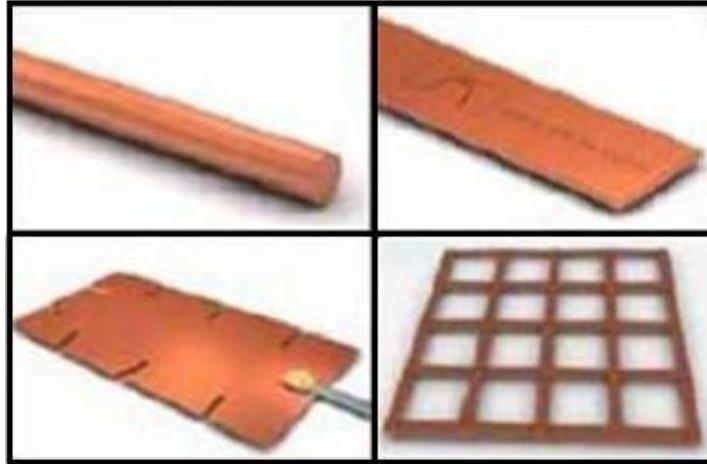
- M. Ramamoorthy, M. M. Babu Narayanan, S. Parameswaran y D. Mukhedkar presentaron un nuevo modelo para análisis del comportamiento del sistema de puesta a tierra en 1989. En este modelo se procedió a representar a los electrodos mediante un circuito equivalente de parámetros concentrados. Los circuitos equivalentes de los segmentos van conformando una red, que podría ser resuelta mediante teoría de circuitos eléctricos. En la realización de este trabajo se presentaron algunas simplificaciones como la falta de los parámetros capacitivos. Además, no se considera el efecto aire-tierra. A pesar de las simplificaciones realizadas se logró un gran resultado al ser comparados con algunos datos de medición.
  
- A finales de 80 y principios de los 90 aparecen dos muy importantes investigadores sobre el análisis del comportamiento del sistema de puesta a tierra que son F. Dawalibi y L. Grcev, los que realizaron grandes aportes sobre este tema, cambiando así el enfoque que se tenía hasta el momento.
  
- F. Dawalibi publicó un artículo en el cual analiza la respuesta de los electrodos de tipo cilíndricos con ayuda de la teoría electromagnética. En este trabajo se desarrollaron fórmulas aplicadas para fenómenos de alta y baja frecuencias.
  
- Años posteriores surge la unión de los dos más grandes investigadores sobre este tema L. Grcev y F. Dawalibi. En 1990 publicaron un artículo en el cual se analizaba el comportamiento del sistema de puesta a tierra para lo cual se empleó la técnica de segmentación para los electrodos del SPAT con el objetivo de representar a cada segmento como una fuente de corriente uniforme. Además, se empleó el modelo de Sommerfeld para solucionar las integrales de los acoplamientos. El procedimiento se lo realizó en el dominio de la frecuencia y al tener los resultados estos se los transforma al dominio del tiempo mediante la inversa de la transformada de Fourier.

- En 1994 F.E. Mentre y L. Grcev publican su trabajo, en el cual realizó un análisis para un electrodo recto al cual lo modeló como una línea de transmisión, el modelo se verificó mediante la comparación de resultados entre mediciones realizadas y el modelo electromagnético.
- En 1995 B. Nekhou, P. Labie, F.X. Zgainski, G. Meunier, F. Morillon, y S. Bourg mediante las ecuaciones de Maxwell y con ayuda de la técnica de los elementos finitos se logra encontrar la impedancia del sistema de puesta a tierra. Además, se considera el efecto no lineal del suelo.
- A.F. Otero, J. Cidras, y J.L. del Alamo en 1999 realizaron un estudio en el cual segmentan a los electrodos, se considera los efectos longitudinales y transversales, se calcula los parámetros resistivos, capacitivos e inductivos y posteriormente lo resuelven por teoría de circuitos eléctricos. Se trabaja en el dominio de la frecuencia. Se presenta la verificación mediante mediciones y otras comparaciones con diferentes modelos de análisis.
- En 2005 L. Grcev, y M. Popov publicaron un artículo en el cual un electrodo tipo vertical se representaba como una línea de transmisión mediante un circuito equivalente de parámetros distribuidos, presentando mayor aproximación al modelo electromagnético.
- En 2009 L. Grcev realiza un trabajo en el cual expresa algunos modelos aproximados para el análisis dinámico del comportamiento de la impedancia del SPAT. Posteriormente compara con los modelos existentes para el análisis del sistema de puesta a tierra ante altas frecuencias.

### **2.3 Definición de términos básicos**

El sistema de puesta a tierra está conformado por una serie de elementos, los cuales dependerá si se aplica a un edificio residencial, una torre de transmisión o una subestación de energía eléctrica. Si bien existe alguna diferencia entre estos tipos de sistemas, los elementos que conforman todo sistema de puesta a tierra son los siguientes

- Conductor de tierra: Es un cable que conecta las masas metálicas o el conductor de protección con los electrodos del sistema de puesta a tierra.
- Borne principal de tierra: Es el elemento mediante el cual se une el conductor de protección o masa metálica al conductor a tierra.
- Conductor de protección: Este elemento generalmente se emplea para el sistema de puesta a tierra en los edificios. Es el encargado de unir la masa metálica con el equipo. Además, protege contra contactos indirectos.
- Barrajes o conductor equipotencial: Este elemento consiste generalmente en una barra rectangular o un conductor cilíndricos del cual se toman múltiples conexiones para los diferentes equipos eléctricos que se dispongan.
- Conexiones: Consiste en las soldaduras o dispositivos mecánicos que se emplea para realizar las uniones entre los electrodos del sistema de puesta a tierra.
- Electrodo: Son elementos metálicos resistentes a la corrosión que están directamente en contacto con el suelo. Generalmente los electrodos del SPAT son de cobre, acero galvanizado o hierro zincado y pueden tener diferentes modelos como: varillas, cintas, placas, mallas o cables.



**Figura 5. Tipos de electrodos del SPAT**

- **Terreno:** El terreno es un elemento del SPAT que hace referencia a las propiedades del suelo, las mismas que presentan una gran importancia en el diseño de este. Las propiedades del suelo que más influyen en el funcionamiento del SPAT son:
  - ✓ La resistividad del suelo: Es la capacidad que presenta el suelo para evitar el paso de corriente eléctrica a través de él. La resistividad a su vez depende de las sales solubles, la compactación, humedad, composición propia del terreno entre otras.
  - ✓ Permeabilidad: Es la capacidad que presenta el medio para permitir que atraviese el flujo magnético.
  - ✓ Permitividad: Es la capacidad de afectación que tiene un material al ser expuesto ante un campo eléctrico.

### **Descargas atmosféricas en el sistema de puesta a tierra**

Uno de los fenómenos más críticos a los cuales está expuesto el sistema eléctrico de potencia son las llamadas descargas atmosféricas. Para evitar todos los problemas que producen las descargas atmosféricas en el sistema de potencia eléctrica se emplea el sistema de puesta a tierra, que debe ser capaz de disipar toda la energía de la descarga atmosférica.

## Descargas atmosféricas

La descarga atmosférica es una sollicitación eléctrica de elevada intensidad producida cuando la diferencia de potencial entre dos superficies sobrepasa el voltaje de ruptura. Las nubes se cargan eléctricamente debido al rozamiento entre las partículas producido por las grandes velocidades que presenta el aire a esa altura. Las descargas entre superficies pueden darse de tres formas diferentes:

- Intra-nube
- Entre nubes
- Nubes y tierra

Estas tres formas diferentes en que se puede producir una descarga atmosférica se muestra en la Figura 6.

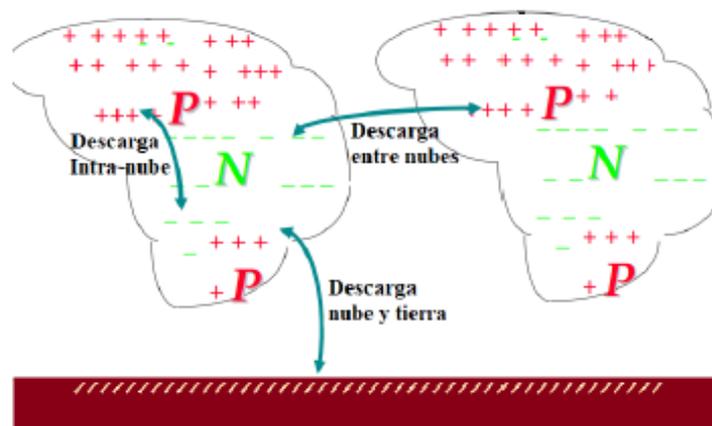


Figura 6. Tipo de descarga entre diferentes superficies

**Tabla 1.** Valores de las constantes para onda doble exponencial y Heidler .

Forma de onda ( $\mu\text{s}$ )	$\tau_1$	$\tau_2$	E	a	b
1/5	1E-6	5E-6	1300	1.88E+5	2.82E+06
1/50	1E-6	5E-5	1020	1.40E+04	2.98E+06
1/100	1E-6	1E-4	1010	7.10E+04	6.77E+06
1/500	1E-6	5E-4	1000	1.38E+03	8.79E+06
1.2/5	1.2E-6	5E-6	1110	1.60E+05	8.15E+06
1.2/50	1.2E-6	5E-5	1010	1.42E+04	1.35E+07
1.2/100	1.2E-6	1E-4	1004	6.60E+03	1.50E+07
1.2/500	1.2E-6	5E-4	1000	1.38E+03	1.91E+07
1.4/5	1.4E-6	5E-6	1044	1.45E+05	1.97E+07
1.4/50	1.4E-6	5E-5	1033	1.40E+04	2.95E+07
1.4/100	1.4E-6	1E-4	1001	6.80E+03	3.37E+07
1.4/500	1.4E-6	5E-4	1000	1.38E+03	4.13E+07

## **CAPÍTULO III. HIPÓTESIS Y VARIABLES**

### **3.1 Hipótesis**

#### **3.1.1 Hipótesis general**

- ✓ Hi: Modelando un sistema de puesta a tierra en función a la frecuencia se podrá analizar el comportamiento los electrodos ante descargas atmosféricas, callao 2021.
- ✓ Ho: Modelando un sistema de puesta a tierra en función a la frecuencia NO se podrá analizar el comportamiento los electrodos ante descargas atmosféricas, callao 2021.

#### **3.1.2 Hipótesis específicas**

- ✓ Modelando los electrodos como un grupo de capacitores, inductores y resistencias interconectados, se podrá analizar el SPAT en función de la frecuencia.
- ✓ Analizando los cambios que sufre la impedancia del SPAT se observará el comportamiento de los electrodos del sistema de puesta a tierra al ser sometido a una descarga atmosférica.
- ✓ La implementación el modelo de puesta a tierra para altas frecuencias en un programa computacional nos permitirá analizar el comportamiento de los electrodos del sistema de puesta a tierra.

### **3.2 Definición conceptual de variables**

#### **a) Variable Dependiente:**

Modelado de un sistema de puesta a tierra en función a la frecuencia.

#### **b) Variable Independiente:**

Comportamiento los electrodos ante descargas atmosféricas

### 3.3 Operacionalización de Variables

**Tabla 2. Operacionalización de variables**

VARIABLE	DEFINICION CONCEPTUAL	DEFINICION OPERACIONAL	DIMENSION	INDICADORES	INSTRUMENTOS
VARIABLE INDEPENDIENTE	<b>MODELADO DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN LA FUNCIÓN A LA FRECUENCIA</b>	El modelo predictivo es un modelo de datos, basado en estadísticas inferenciales, que se utiliza para predecir la respuesta a un determinado nivel de tensión de las ondas de Campo Electromagnético en las Líneas de Transmisión.			Software Data histórica
			Análisis Predictivo	Desarrollo de código de programación	Software Data histórica
VARIABLE DEPENDIENTE	<b>COMPORTAMIENTO DE LOS ELECTRODOS ANTE DESCARGAS ATMOSFERICAS</b>	Saber en qué punto específico de la línea se tiene el comportamiento del Campo Electromagnético.		Cantidad de Atención adicional	Software Data histórica
				Reporte Histórico de datos.	Software Data histórica

Fuente: UNAC 2019, Elaboración Propia

## **CAPÍTULO IV. DISEÑO METODOLÓGICO**

Mediante la información sobre los diferentes modelos para el análisis del STP en altas frecuencias, se procederá a seleccionar uno de ellos; utilizando el modelo híbrido ya que presenta una buena exactitud en los resultados y su implementación computacional tiene una dificultad media. Entonces se desarrollará el modelo seleccionado e implementarlo en un programa computacional el cual sistematizará todo el proceso y presentará, a partir de una interfaz gráfica al comportamiento de la impedancia de los electrodos del sistema de puesta a tierra.

### **4.1 Tipo y diseño de la investigación**

Presentada la información sobre los diferentes modelos para el análisis del STP en altas frecuencias, se procede a seleccionar uno de ellos. En la presente investigación, se ha escogido el modelo híbrido ya que presenta una buena exactitud en los resultados y su implementación computacional tiene una dificultad media. Posteriormente se procederá a desarrollar el modelo seleccionado e implementarlo en un programa computacional el cual sistematizará todo el proceso y presentará, mediante una interfaz gráfica, el comportamiento de la impedancia de los electrodos del sistema de puesta a tierra.

#### **4.1.1 Desarrollo del modelo híbrido**

El modelo híbrido fue desarrollado en la “Universidad Federal de Minas”, con el fin de presentar una gran exactitud en los resultados obtenidos al analizar el comportamiento transitorio del SPAT. Además, brinda una mayor facilidad con respecto al modelo electromagnético que se asume es el más exacto.

Para el desarrollo del modelo híbrido se emplean ciertas características del suelo:

- Lineal: el medio presenta una proporcionalidad entre los efectos de los parámetros eléctricos y magnéticos.

- Isotrópico: las propiedades del medio no dependen de la dirección en el espacio en el que se analiza.
- Homogéneo: las características del medio no varían de un lugar a otro.

De igual forma se realizan ciertas consideraciones para el conductor:

- Cilíndricos: los conductores deben ser cilíndricos por la simetría de los campos alrededor del electrodo del sistema de puesta a tierra
- Rectilíneos: los conductores a analizar deben ser rectos y se los puede unir formando mallas.
- Delgados: el radio del conductor debe ser mucho menor que la longitud de este.

#### 4.1.2 Técnica de segmentación e integración

La técnica de segmentación e integración consiste en descomponer cada electrodo en pequeños segmentos como se muestra en la figura 7, en los cuales se pueda considerar que la densidad de la corriente es uniforme, solucionando así la distribución no homogénea de la corriente en el electrodo.

La técnica de la segmentación e integración presenta una mayor exactitud cuando el número de subdivisiones sea más alto, pero a su vez el esfuerzo y tiempo de procesamiento será mayor. En varios estudios realizados anteriormente sobre el tema se indica que el número de divisiones óptimo debería ser 10.



**Figura 7. Segmentación del electrodo**

### 4.1.3. Obtención de frecuencias de la señal

En esta etapa se escogen las frecuencias más importantes que caracterizan a la señal de la fuente inyectada al SPAT, con el objetivo de disminuir el número de cálculos.

Para esto, es necesario pasar la señal al dominio de la frecuencia, lo cual se hace mediante la Transformada rápida de Fourier. Una vez pasada la señal al dominio de la frecuencia se procede a determinar las frecuencias más significativas, con las cuales se va a trabajar.

### 4.1.4 Transformada rápida de Fourier

La transformada rápida de Fourier es una herramienta matemática que permite pasar una señal en dominio del tiempo al dominio de la frecuencia para lo cual se emplea la Ecuación y un algoritmo de optimización el cual se muestra más adelante.

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

En 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.

$e^{-j * \frac{2 * \pi}{N} * k * n}$  : es el denominado factor de fase.

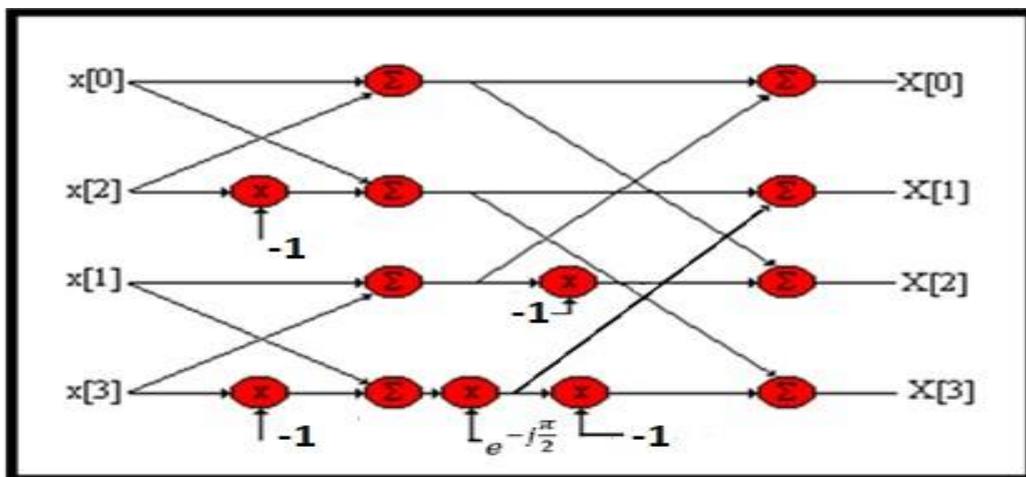
### 4.1.5 Algoritmo de optimización

Se procede a dividir el número de muestras en  $N/2$  y dicho resultado se sigue dividiendo para 2 hasta formar grupos pares de muestras, estos grupos se los puede obtener de forma sencilla, empleando el modelo de “bit reverso” el cual consiste en escribir el valor de “n” en binario, invertirlo, y volver el resultado obtenido a sistema decimal para finalmente agruparlo en términos de 2. En la Tabla 3 se muestra este procedimiento para un sistema de 4 muestras).

**Tabla 3. Método del Bit Reverso.**

Orden original n	Numero binario	Bit Reverso	Nuevo Orden n	Grupos
0	00	00	0	Grupo 1
1	01	10	2	
2	10	01	1	Grupo 2
3	11	11	3	

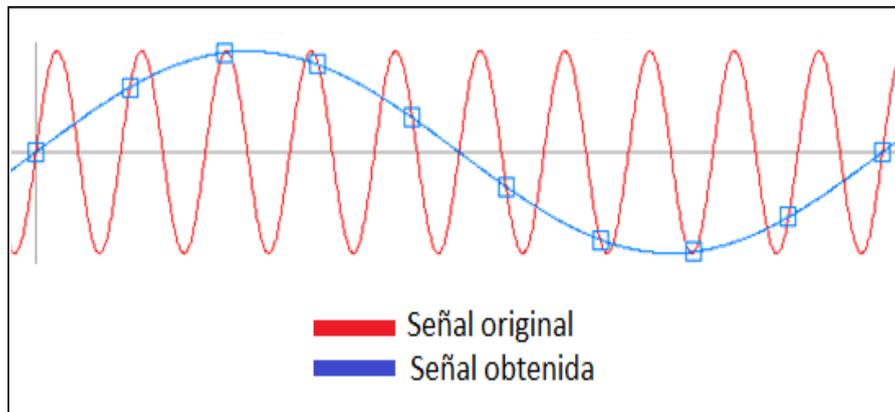
Una vez obtenido los grupos de muestras, se procede a emplear la “operación mariposa” que es un método de sumas, restas y multiplicaciones que toma en consideración el factor de fase para poder resolver las transformadas discretas de Fourier en grupos minimizados de muestras para luego ir uniendo estos resultados hasta completar el proceso para el número total de muestras, obteniendo así la señal en el dominio de la frecuencia. En la figura 8 se presenta un diagrama de operación de mariposa para una transformada rápida de Fourier de 4 muestras.



**Figura 8. Proceso de la transformada rápida de Fourier para 4 muestras**

**Nota:** Para poder aplicar la transformada rápida de Fourier será necesario tener en consideración el teorema de Nysquist, el cual indica que “la frecuencia de muestreo debe ser mayor que el doble de la frecuencia máxima a ser analizada”, con lo que se puede asegurar de obtener la señal original y no una

señal totalmente diferente por una mala selección en el tamaño de muestreo, efecto el cual se denomina “aliasing” y se muestra en la figura 9.



**Figura 9. Efecto aliasing**

#### 4.1.6 Efectos predominantes en altas frecuencias

Al someter a los electrodos del SPAT a una fuente que contenga altas frecuencias se deberá tomar en cuenta los efectos longitudinales y transversales que empezarán a predominar en el comportamiento del sistema de puesta a tierra. Estos efectos longitudinales y transversales se han denominado acoplamientos inductivos y capacitivos y se los representará mediante impedancias longitudinales y transversales respectivamente.

Para poder calcular los efectos producidos en altas frecuencia se procede a encontrar el campo eléctrico generado por una fuente de corriente, el cual debido a que la densidad de corriente ( $J$ ) no es constante en el tiempo, se lo define en términos del vector potencial magnético ( $A$ ) y del potencial escalar ( $\Phi$ ) como se muestra en la Ecuación:

$$\vec{E} = -\nabla\Phi - j\omega\vec{A}$$

El potencial escalar describe los efectos transversales mientras que el vector potencial magnético describe los efectos longitudinales. Ahora se procederá a encontrar una expresión para el cálculo del potencial escalar y del vector potencial magnético, para lo cual se procede a emplear la ley de Gauss:

$$\nabla\cdot\vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon}$$

Con lo que se obtiene la Ecuación:

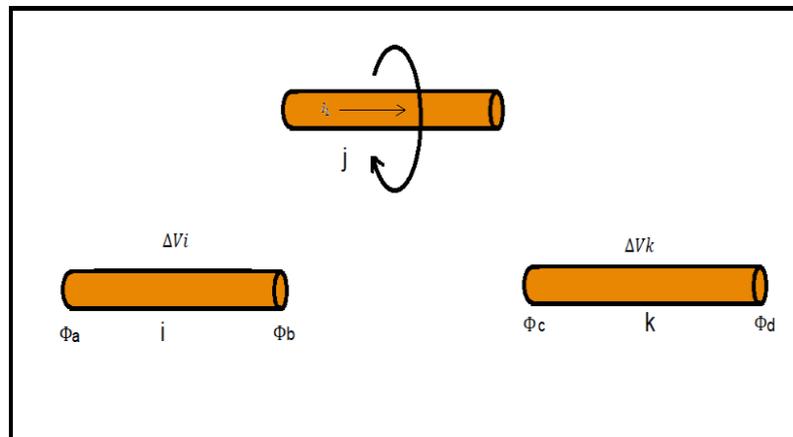
$$\nabla^2 \Phi + \gamma^2 \Phi = -\frac{\rho}{\epsilon}$$

Resolviendo la Ecuación de diferencias parciales se obtiene una expresión del vector potencial magnético, la cual servirá para los cálculos posteriores

$$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_{L_j} \frac{I_j e^{-\lambda r}}{r} .dL_j$$

#### 4.1.7 Acoplamiento inductivo

El acoplamiento inductivo es un fenómeno electromagnético que se produce debido a una fuente de corriente. Esta fuente de corriente inducirá una fuerza electromagnética (fem) en cada uno de los segmentos, lo cual se representa como una diferencia de potencial ( $\Delta V$ ) entre los terminales del segmento.

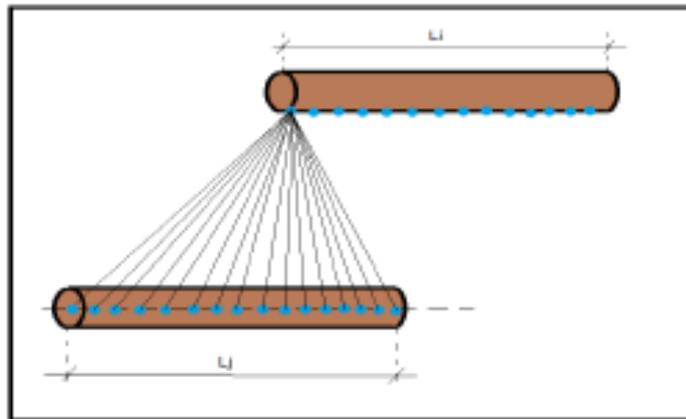


**Figura 10. Acople inductivo**

La diferencia de potencial producido por una fuente puntual de corriente (fuente de corriente en forma de punto en el espacio) en el segmento  $i$  queda expresado mediante la ecuación.

$$\Delta V = -j\omega \int A .dl$$

La ecuación sirve para un punto fuente de corriente, pero al analizar el electrodo, se asume que este se comporta como una fuente lineal de corriente y está compuesta por infinitas fuentes puntuales como se indica en la Figura 13. Para lograr emplear la ecuación anterior como una fuente lineal de corriente se procede a emplear una integral con la que se representará matemáticamente la suma de los efectos longitudinales producidos por las fuentes puntuales. Una vez empleada la integral se obtiene que la diferencia de potencial ( $\Delta V$ ) queda expresada



**Figura 11. Fuente lineal de corriente**

El acople inductivo se representa mediante elementos inductivos con una impedancia  $Z_L$  (Impedancia longitudinal), la cual se define como la relación que existe entre la caída de voltaje en el segmento inductor y la corriente longitudinal que atraviesa por el mismo. Ecuación:

$$Z_{Lij} = \frac{\Delta V_{ij}}{IL_j} = -j \frac{w\mu}{4\pi} \int_{L_1} \int_{L_2} \frac{e^{-\gamma T}}{\gamma} \vec{dl}_j \cdot \vec{dl}_i$$

#### 4.1.8 Acoplamiento capacitivo

El acoplamiento capacitivo es el fenómeno en el cual se produce un campo divergente hacia el infinito, producto de una fuente de corriente (Figura 14). Este acoplamiento capacitivo produce un incremento del potencial (V) en el resto de los segmentos. Para su modelamiento se procede a representar al segmento fuente como una densidad de corriente transversal ( $I/l$ ) que produce una elevación de potencial en el resto de los segmentos.

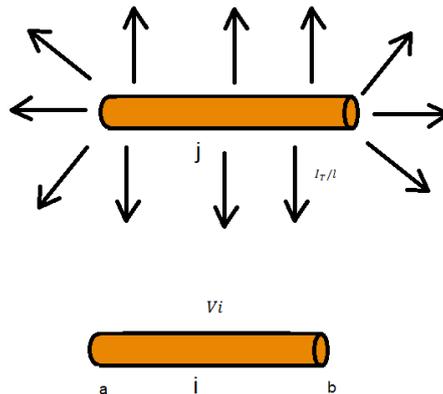


Figura 12. Acoplamiento capacitivo

#### 4.1.9 Método de imágenes

El método de imágenes fue desarrollado por Lord Kelvin en 1848 y se basa en el teorema unidad ( $V=0$  en un plano infinito) y se lo puede aplicar en casos en los cuales exista una superficie equipotencial. Este método consiste en reflejar la carga o la distribución de carga de un plano semi-infinito hacia el otro plano con carga contraria. En el caso del sistema de puesta a tierra se lo empleará para solucionar el efecto de la frontera que existe entre dos medios (Aire-Tierra) como se muestra en la Figura 15. Mediante ciertos estudios realizados, se demostró que el modelo de imágenes presenta un límite superior de 10 MHz, luego de lo cual se debería aplicar un modelo de imágenes modificada para frecuencias mayores

#### ❖ Matriz de impedancia longitudinal

La matriz de impedancia longitudinal es un arreglo de los efectos inductivos, que se presentan en los electrodos del SPAT. La matriz de impedancia longitudinal presenta en su diagonal principal las impedancias propias internas de cada uno de los segmentos del SPAT, mientras que los elementos que se presentan fuera

de dicha diagonal representan los acoplos inductivos que se producen entre los diferentes segmentos existentes.

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

#### ❖ Matriz de impedancia transversal

La matriz de impedancia trasversal es un arreglo de los efectos capacitivos, que se presentan en los electrodos del SPAT. La matriz de impedancia transversal presenta en su diagonal principal las impedancias propias externas de cada uno de los segmentos del SPAT, mientras que los elementos que se presentan fuera de dicha diagonal representan los acoplos capacitivos que se producen entre los diferentes segmentos existentes.

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

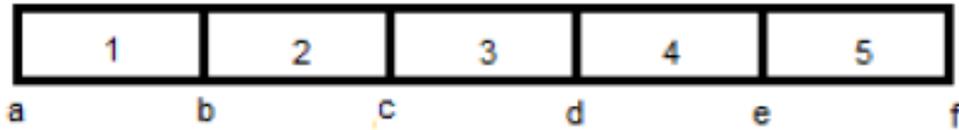
Se procede a desarrollar una relación de voltaje promedio (V) con respecto a los puntos de tensión en los terminales del segmento



**Figura 13. Potencial medio**

Esta relación se la emplea para formar una matriz auxiliar  $[A_T]$ , la cual está compuesta por “n” filas y “m” columnas, donde “n” está dado por el número de segmentos y “m” por el número de nodos. La matriz presenta valores de “1/2”

en los nodos que relaciona a los extremos del segmento y de “0” en el resto de los nodos. Para facilitar su entendimiento, en la figura 14, se presenta el esquema de un electrodo horizontal subdividido 5 segmentos



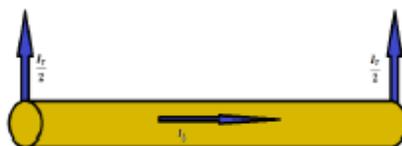
**Figura 14. Electrodo horizontal**

Un procedimiento similar al aplicado para el potencial promedio se emplea en el análisis de la diferencia de potencial (figura 15). La diferencia de potencial presenta la relación mostrada en la ecuación.



**Figura 15. Diferencia de potencial**

Posteriormente se procede a emplear la ley de nodos de Kirchhoff en la configuración de electrodos del SPAT. Se considera que cada segmento se comporta como un dipolo en el cual existirán corrientes transversales y longitudinales. La corriente trasversal se concentrará en los extremos del segmento, mientras que la corriente longitudinal atravesará todo el segmento, como se muestra en la figura 16.



**Figura 16. Distribución de corrientes en un segmento**

## 4.2 Método de investigación

### 4.2.1 Implementación del modelo en un programa computacional

Se implementa el modelo híbrido en un programa computacional, el cual permite observar la respuesta del SPAT en función de la frecuencia. Para el desarrollo de programa se hace uso de la plataforma “Guide” perteneciente a la herramienta computacional “Matlab”. El programa pedirá al usuario ingresar los datos necesarios para realizar el análisis del SPAT, posteriormente realizará los cálculos pertinentes y presentará los resultados mediante una gráfica de la impedancia en función de la frecuencia. En la figura 17 se muestra un diagrama de entradas y salidas del programa implementado.

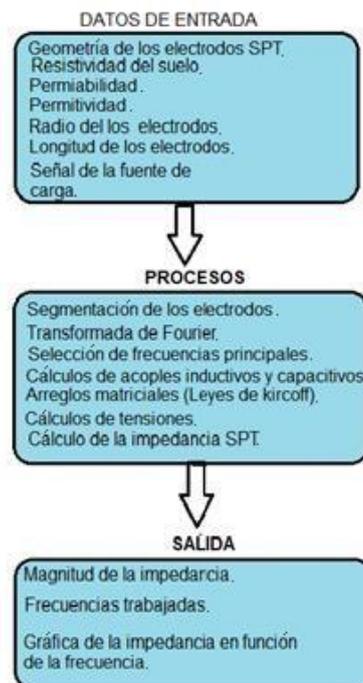


Figura 17. Diagrama de entradas y salidas

### 4.2.2 Datos de entrada

Para poder observar el comportamiento de los electrodos del SPAT, al ser sometidos a muy altas frecuencias, será necesario disponer de algunos parámetros como son: el radio, la geometría, la profundidad de enteramiento del electrodo, entre otros, así como también la permeabilidad, permitividad, resistividad del suelo y la señal o frecuencias con la que se va a realizar el

análisis. La ejecución, se realiza mediante la caja de diálogo mostrada en la figura 18.

Ingreso\_de\_Datos

**Configuración geométrica**

**Configuración de nodos**

Posición del nodo

X	Y	Z

Ingresar

**Configuración de conductores**

N. Inicio N. Fin

Ingresar

**Corriente de inyección**

$f(x)=k(\exp(-at)-\exp(-bt))$  1/5

Normalizada ( $\mu s$ )

**Nodo de inyección**

**Características del medio**

Permitividad relativa

Permeabilidad relativa

Resistividad

Radio

Figura 18. Ingreso de datos

El primer dato para ingresar será la posición de los nodos. Mediante una matriz de coordenadas “x”, “y” y “z” para cada nodo, esta información será almacenada en la matriz “Geometría”. Además, se mostrará en un plano cartesiano la posición de los nodos ingresados como se muestra en la figura 19.

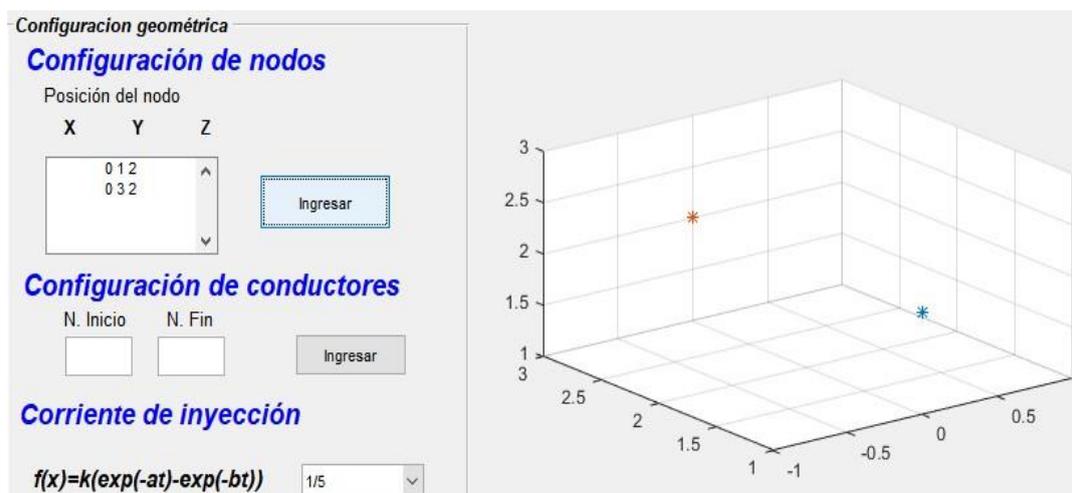
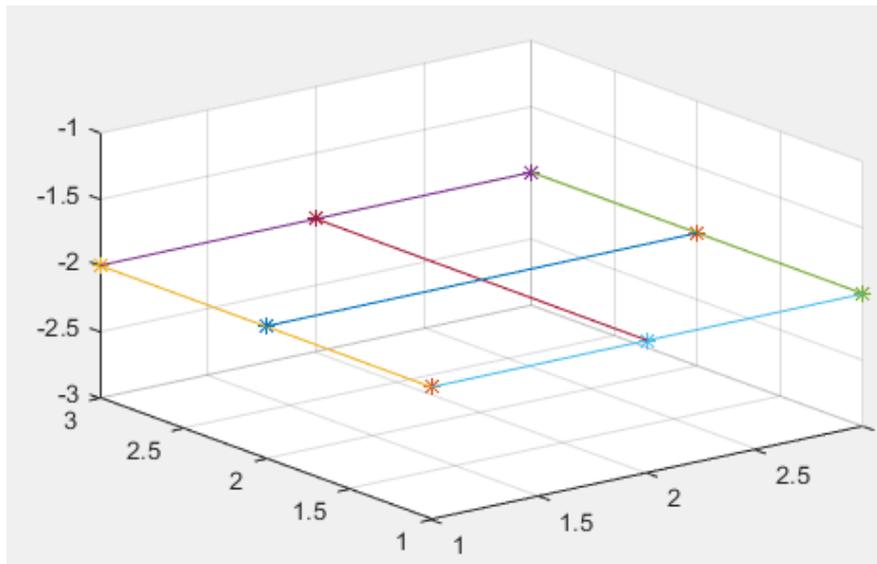


Figura 19. Visualización de los nodos ingresados

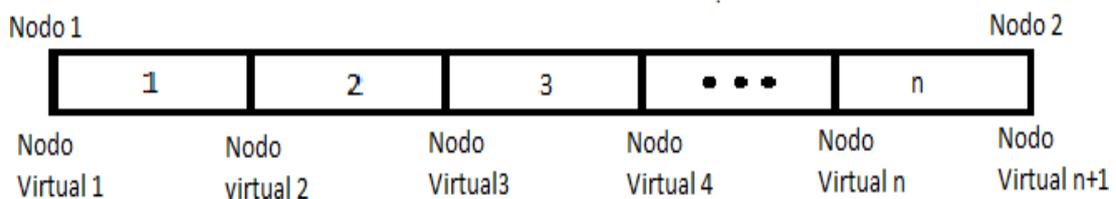
Al momento de ingresar la topología de los electrodos del SPAT, el programa presentará un gráfico para que el usuario pueda visualizar si la geometría del SPAT ingresada será la correcta, esto se muestra en la figura 20. El programa realizará automáticamente la división de cada electrodo en 10 segmentos y se almacenarán las coordenadas de los extremos de inicio y fin de cada segmento en dos matrices llamadas “CoorInicio” y “CoorFin” respectivamente.



**Figura 20. Visualización de la topología del SPAT**

#### 4.2.3 Nodos virtuales

Debido a la segmentación que se realiza para evitar el problema de la no homogeneidad de la corriente, se presentarán una especie de nuevos nodos, denominados “nodos virtuales” como se ilustra en la figura 21. Las posiciones de estos nodos virtuales serán almacenadas en una matriz llamada “nodos”. Con los nodos virtuales se procederá a realizar los cálculos pertinentes para la aplicación de la teoría de circuitos eléctricos (Leyes de Kirchoff).



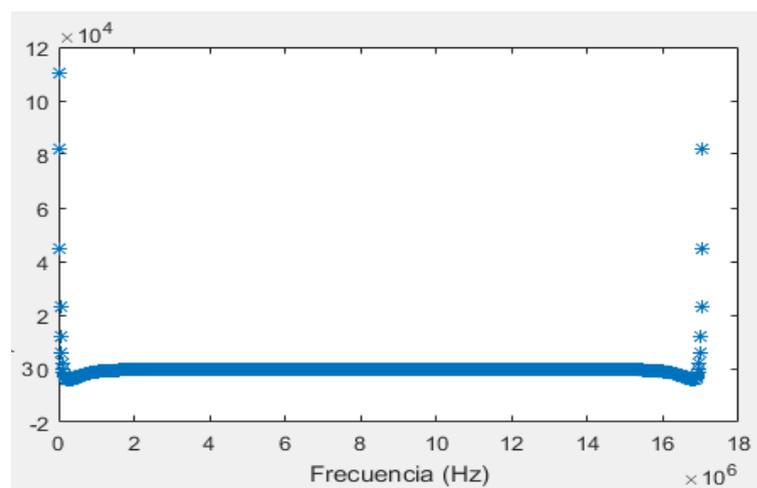
**Figura 21. Nodos virtuales**

#### 4.2.4 Determinación de frecuencias

El programa solicita al usuario que seleccione una señal en función del tiempo, la cual se considerará como fuente de inserción. Debido a que la aplicación del programa será dirigida a descargas atmosféricas, el programa dará la opción de seleccionar la señal tipo impulso de doble exponencial normalizada. Una vez ingresada la señal a trabajar, se deberán calcular las frecuencias de dicha señal, para lo cual se empleará la herramienta matemática de la “Transformada rápida de Fourier”.

Para implementar la Transformada rápida de Fourier se emplea la herramienta de Matlab mediante el comando “fft”, el cual determina la magnitud de la señal pasada al dominio de la frecuencia. El valor del intervalo de las frecuencias se calcula mediante la ecuación en la cual la duración de la señal se tomará como 10 veces el valor del tiempo de cola de la señal impulsiva, con un número de muestras de 1024 para evitar el efecto de “Alias”. Una vez que se obtenga la frecuencia y las magnitudes de la señal en el dominio del tiempo se procede a seleccionar las frecuencias más importantes. Las frecuencias seleccionadas serán las mayores al 5% de la frecuencia de mayor valor.

$$\nabla f = \frac{1}{duración}$$



**Figura 22. Señal transformada del dominio del tiempo a dominio de la frecuencia**

El programa también presenta la opción de realizar un barrido de frecuencias, ya sea de modo manual, en el cual se debe ingresar la frecuencia inicial, final y el paso de incremento, o de modo automático, para el cual tiene establecidas las frecuencias con las que se trabajará.

#### **4.2.5 Cálculo de matrices de impedancia longitudinales y transversales**

Para el cálculo de las matrices de impedancia longitudinales y transversales se procede a resolver las ecuaciones para todas las combinaciones entre los segmentos existentes. Para la solución se utiliza un algoritmo que verifica la geometría entre los segmentos y los clasifica en paralelos y perpendiculares. Dependiendo de la clasificación, se podrá definir la función a ser integrada. Debido a la dificultad de integrar de forma analítica, se procede a integrar mediante el método de “sumatoria de Riemann”.

#### **4.2.6 Implementación del arreglo matricial**

Se implementa un algoritmo que encuentra las matrices  $[A_T]_{[n \times m]}$  y  $[A_L]_{[n \times m]}$ . El algoritmo consiste en comparar las coordenadas de los extremos del segmento con las coordenadas de los nodos virtuales; en caso de que coincidan se coloca el valor de “ $\frac{1}{2}$ ” en el elemento correspondiente de la matriz  $[A_T]_{[n \times m]}$  y el valor “1” o “-1” según corresponda para los elementos de la matriz  $[A_L]_{[n \times m]}$ . En caso de que no coincida la coordenada de los extremos con los nodos virtuales se pondrá “0” en los elementos correspondientes de la matriz. Una vez obtenidas las matrices  $[A_T]_{[n \times m]}$  y  $[A_L]_{[n \times m]}$ ,

#### **4.2.7 Impedancia de puesta a tierra**

La impedancia de puesta a tierra ( $Z_g$ ) se define como la relación entre el voltaje ( $V_i$ ) y la corriente ( $I_i$ ) en el nodo de inserción como se muestra en la ecuación La impedancia de puesta a tierra es calculada para todas las frecuencias trabajadas y se la presenta en el gráfico de impedancia vs frecuencia.

### 4.3 Población y muestra

Entendiendo la importancia del sistema de puesta a tierra para el sistema eléctrico de potencia, se realiza esta investigación para observar el comportamiento dinámico de la impedancia de los electrodos del SPAT, ante uno de los fenómenos más críticos al que está sometido como son las descargas atmosféricas, con lo que se espera tener una mejor comprensión de su funcionamiento ante este fenómeno, con lo que se puede llegar a tener mejoras en el diseño del sistema de puesta a tierra.

### 4.4 Técnicas e instrumentos para la recolección de la información

#### 4.4.1 Verificación de la validez del programa

Para demostrar la validez del programa se procede a presentar los resultados de algunos ejemplos en los cuales se variarán los parámetros de la longitud, radio, posición de los electrodos, entre otros. Posteriormente se comparan los resultados con los que se obtienen del modelo de líneas mediante la configuración tipo pi, modelo evaluado en el programa ATPdraw, que permite realizar un barrido de frecuencias para obtener los resultados a ser comparados.

El modelo implementado en el programa ATPdraw se presenta en los valores de las resistencias, capacitancias e inductancias se muestran en la Tabla 3. Estos valores son calculados con ayuda del programa implementado en "Matlab", el cual emplea las ecuaciones y muestra en el Anexo 2. La alimentación será mediante una fuente de corriente alterna con amplitud de 1 amperio, con lo que la impedancia en función de la frecuencia será igual al voltaje medido en la entrada del sistema como se indica en la Figura 24, permitiendo así, poder graficarla.

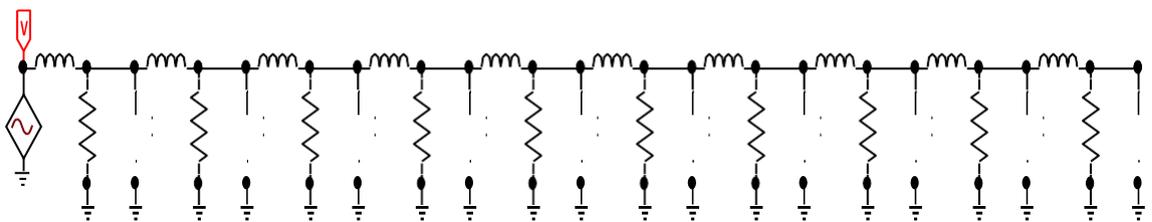


Figura 23. Modelo de líneas de transmisión

**Tabla 4.** Valores de resistencias, capacitancias e inductancias empleados en *ATPdraw*

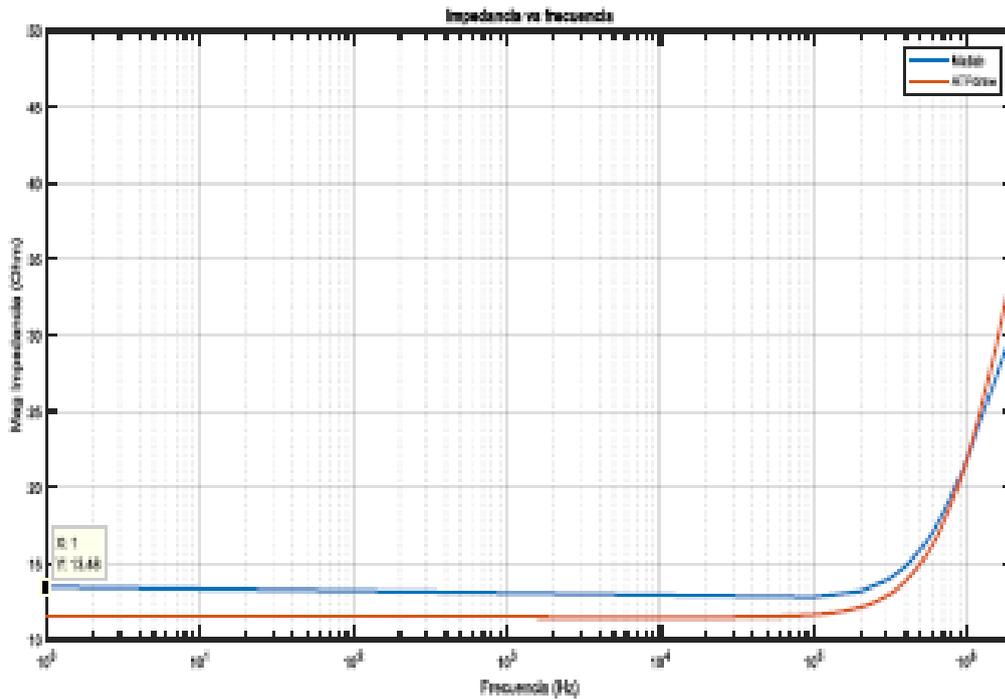
	Resistencia ( $\Omega$ )	Capacitancia ( $\mu\text{F}$ )	Inductancia (mH)
<b>Caso 1</b>	114.7561	7.7157E-06	7.21E-04
<b>Caso 2</b>	116.0884	4.06E-04	1.46E-03
<b>Caso 3</b>	44.5245	1.40E-03	5.04E-03
<b>Caso 4</b>	24.1009	3.03E-02	1.09E-02
<b>Caso 5</b>	68.4098	2.59E-05	3.44E-03
<b>Caso 6</b>	40.8472	1.29E-03	4.62E-03

# CAPÍTULO V: RESULTADOS

## 5.1 Resultados descriptivos

### 5.1.1 Caso 1

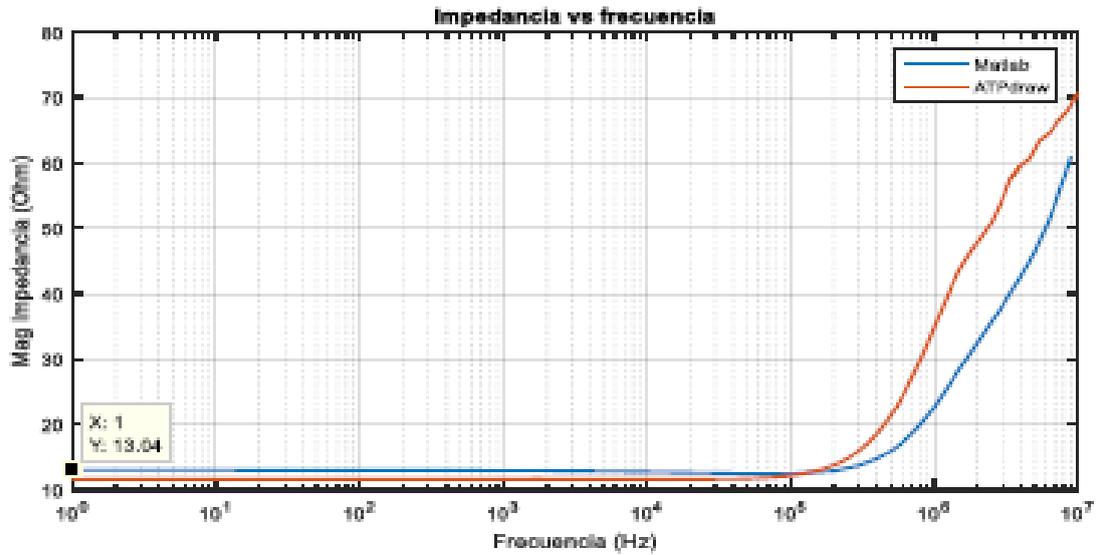
Los resultados obtenidos para un electrodo de tipo horizontal de 10 m de longitud con un radio de 1 cm, profundidad de 2 m, resistividad de 100  $\Omega\text{m}$ , permeabilidad y permitividad relativas de 1, son presentados en la figura 24.



**Figura 24. Resultados de la simulación electrodo horizontal de 10m de longitud**

### 5.1.2. Caso 2

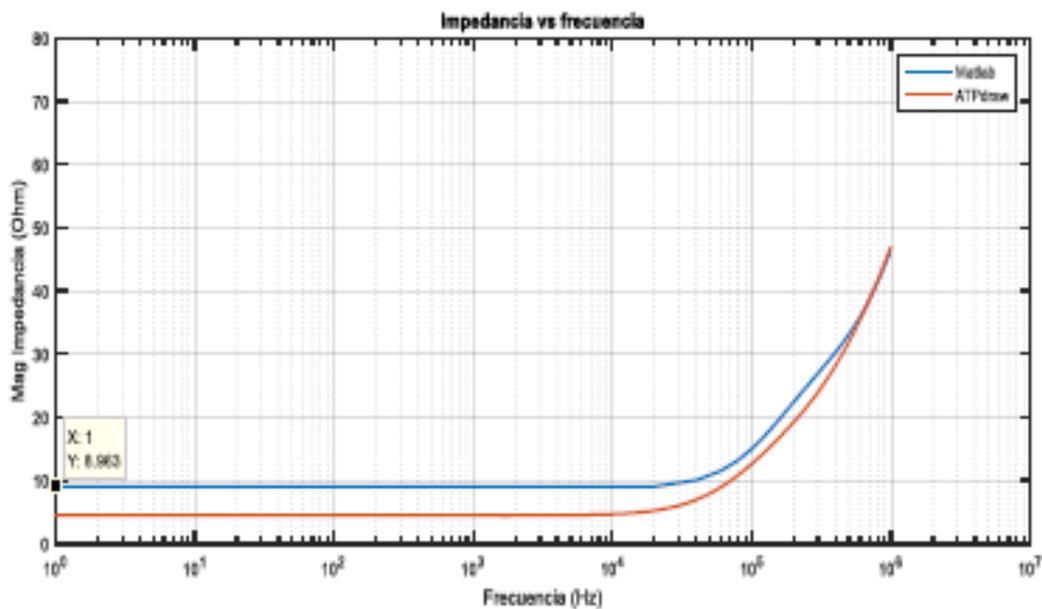
Los resultados obtenidos para un electrodo de tipo vertical de 10 m de longitud con un radio de 1 cm, resistividad de 100  $\Omega\text{m}$ , permeabilidad y permitividad relativas de 1, son presentados en la figura 25.



**Figura 25. Resultados de la simulación electrodo vertical de 10m de longitud**

### 5.1.3 Caso 3

Los resultados obtenidos para un electrodo de tipo vertical de 30 m de longitud con un radio de 1 cm, resistividad de 100  $\Omega\text{m}$ , permeabilidad y permitividad relativas de 1, son presentados en la figura 26.



**Figura 26. Resultados de la simulación electrodo vertical de 30m de longitud**

### 5.1.4 Caso 4

Los resultados obtenidos para un electrodo de tipo vertical de 60 m de longitud con un radio de 1 cm, resistividad de 100  $\Omega\text{m}$ , permeabilidad relativa de 1 y una permitividad relativa de 10, son presentados en la figura 27.

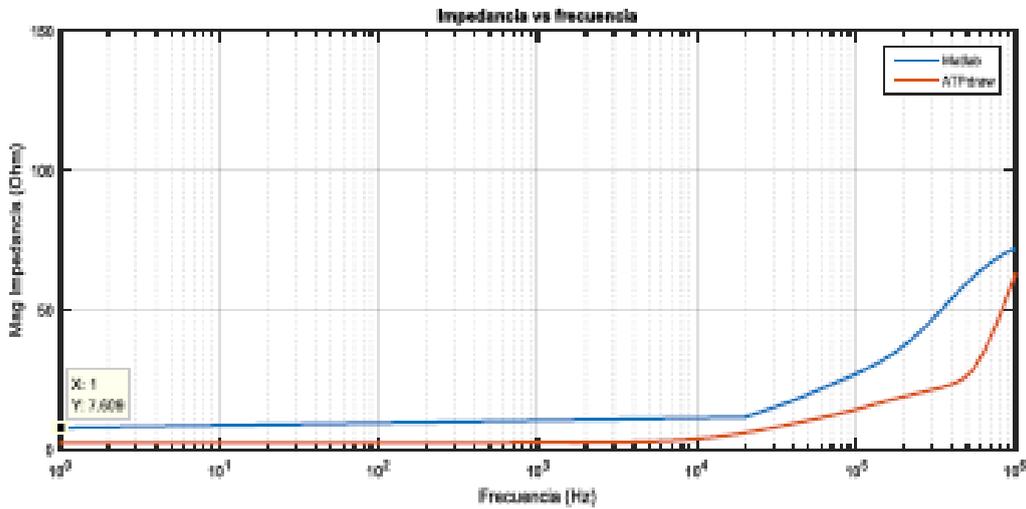


Figura 27. Resultados de la simulación electrodo vertical de 60m de longitud

### 5.1.5 Caso 5

Los resultados obtenidos para un electrodo de tipo horizontal de 20 m de longitud con un radio de 1 cm, profundidad de 2 m, resistividad de 100  $\Omega\text{m}$ , permeabilidad y permitividad relativas de 2, son presentados en la figura 28.

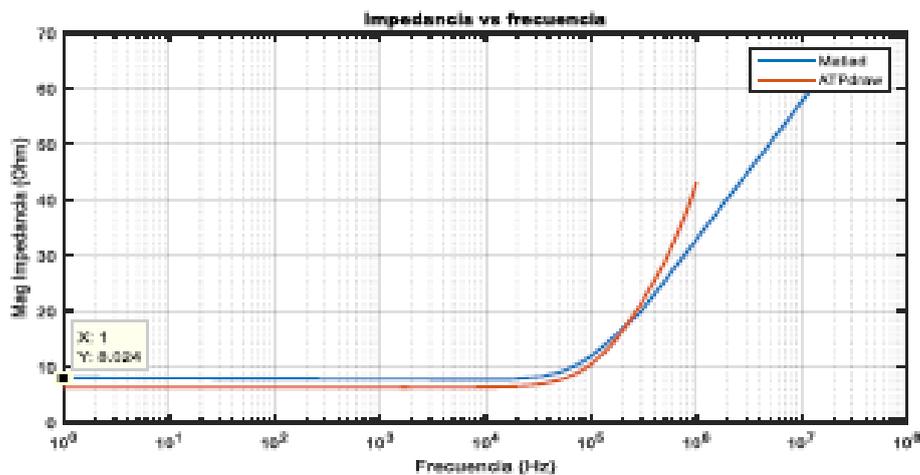
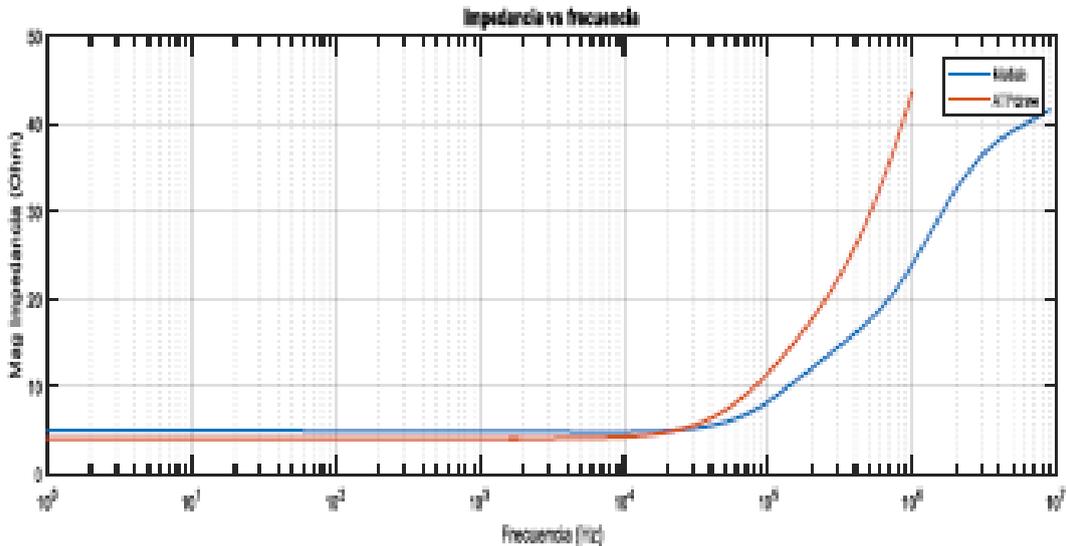


Figura 28. Resultados de la simulación electrodo horizontal de 20m de longitud

### 5.1.6 Caso 6

Los resultados obtenidos para un electrodo de tipo vertical de 30 m de longitud con un radio de 2 cm, resistividad de 100  $\Omega\text{m}$ , permeabilidad y permitividad relativas de 1, son presentados en la figura 29.



**Figura 29. Resultados de la simulación electrodo vertical de  $r=0.2\text{m}$**

Como se puede observar en los ejemplos presentados los resultados obtenidos por ambas metodologías son muy similares. Mediante estas comparaciones se puede verificar que los resultados obtenidos por el programa son correctos y permitirán realizar cualquier tipo de análisis sobre la impedancia del sistema de puesta a tierra.

## CAPÍTULO VI: DISCUSION DE RESULTADOS

### 6.1 Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados

En esta parte se presenta los resultados obtenidos de las simulaciones que fueron realizadas con ayuda del programa diseñado. Éstos corresponden a la variación de los parámetros que influyen en la respuesta en función de la frecuencia. Mediante las simulaciones realizadas se pretende observar cómo interviene cada parámetro en la respuesta de la impedancia del sistema de puesta a tierra.

#### 6.1.1 Respuesta a variación de la resistividad del suelo

##### ➤ *Electrodo horizontal*

Para observar del efecto de la resistividad en la respuesta del sistema de puesta a tierra en función de la frecuencia, se realizaron simulaciones con un electrodo de tipo horizontal de longitud de 2 m, radio de 0.5 cm, profundidad de 3 m, con permeabilidad y permitividad relativa de 1.5. Los valores de resistividad son: 10, 100, 1000, 10000  $\Omega\text{m}$ . Las gráficas obtenidas de las simulaciones realizadas se presentan a continuación.

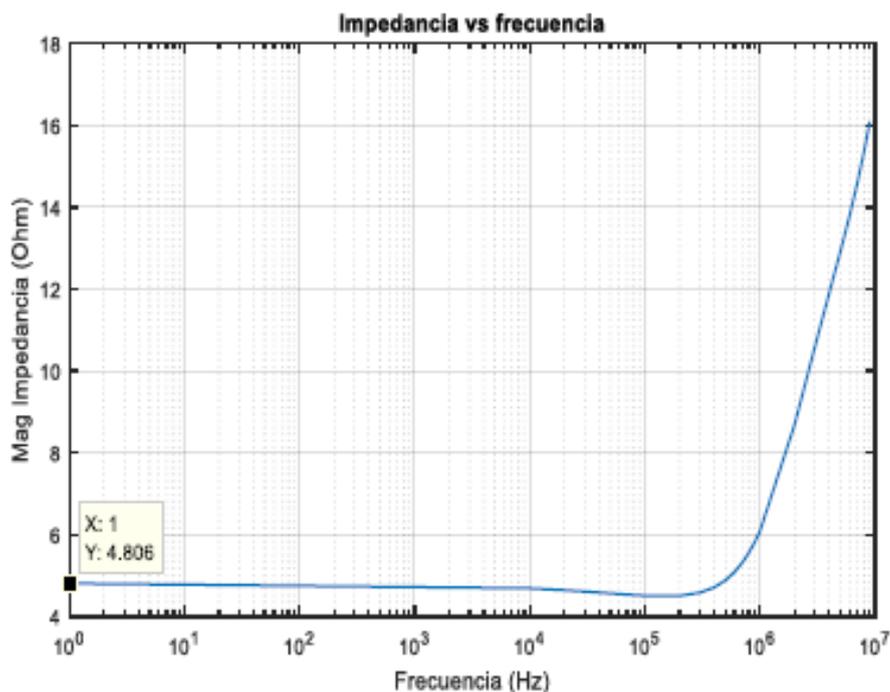
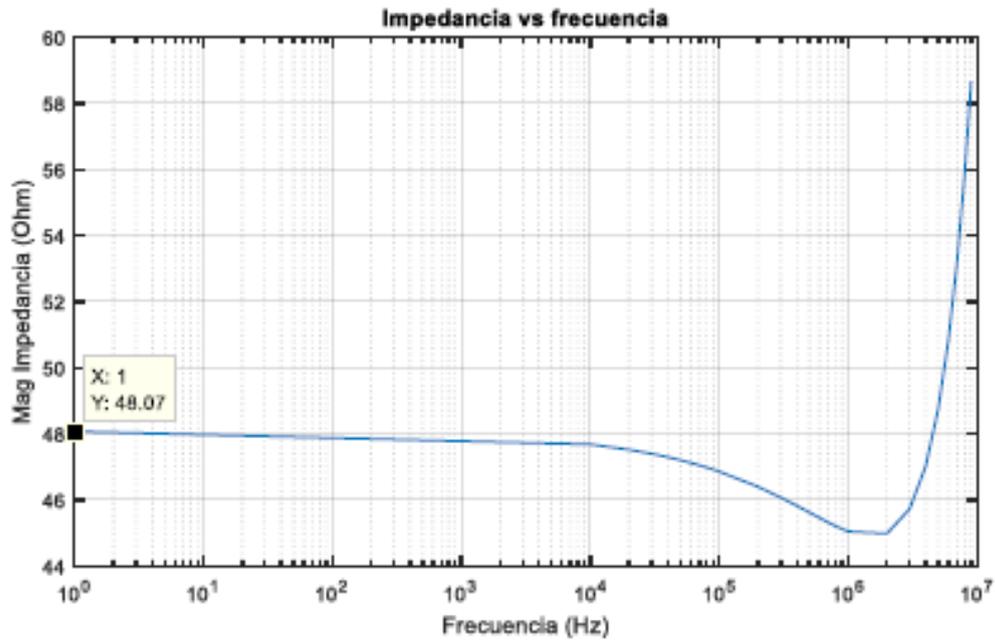
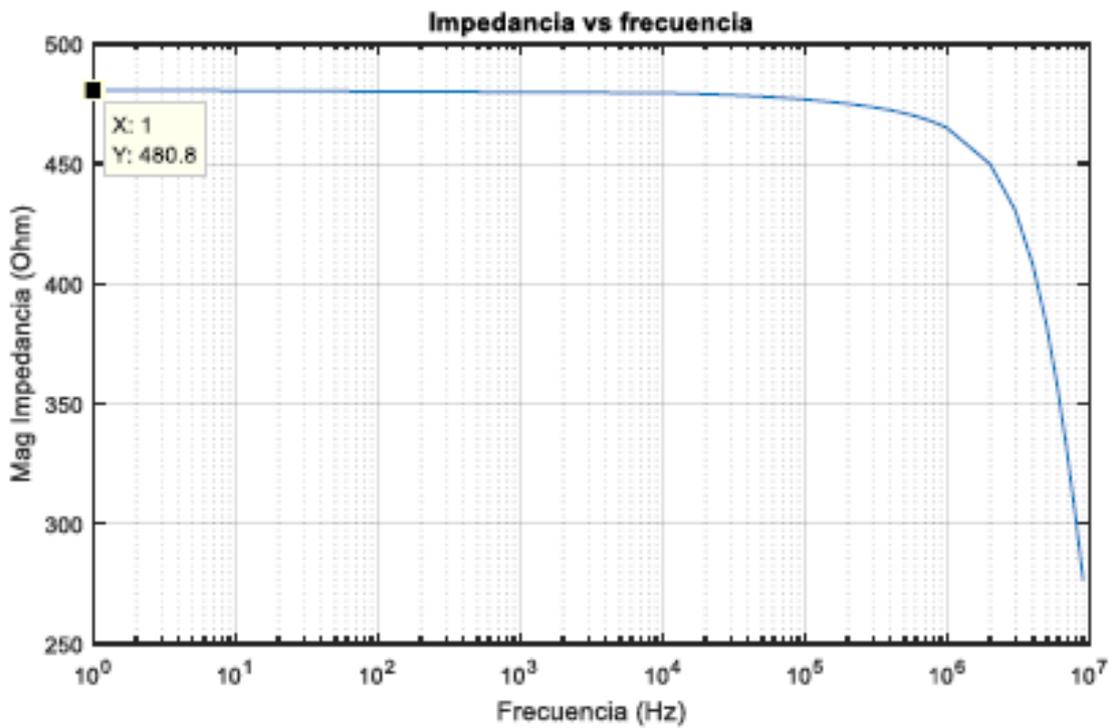


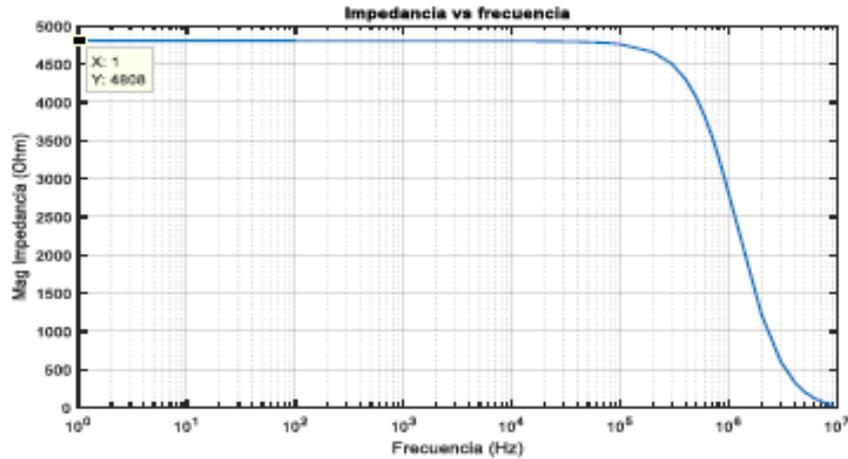
Figura 30. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo horizontal resistividad de 10  $\Omega\text{m}$ )



**Figura 31. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo horizontal resistividad de 100  $\Omega$ m)**



**Figura 32. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo horizontal resistividad de 1000  $\Omega$ m)**



**Figura 33. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo horizontal resistividad de 10000  $\Omega\text{m}$ )**

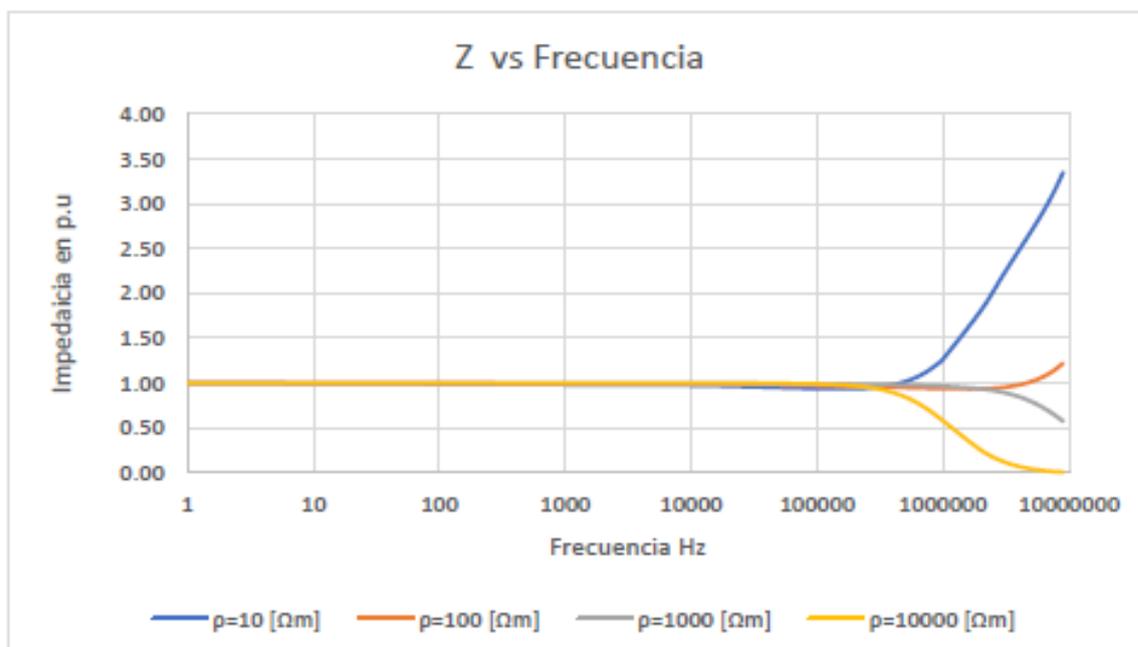
Los valores de la magnitud de la impedancia en función de la frecuencia, obtenidos en las simulaciones realizadas, variando la resistividad del suelo para un electrodo de tipo horizontal de longitud 2 m, un radio de 0.5 cm, con una permeabilidad y permitividad relativa de 1,5. son tabulados en la Tabla 5.

**Tabla 5. Variación de resistividad del suelo**

Z [ohm]				
Frecuencia [Hz]	$\rho=10$ [ $\Omega\text{m}$ ]	$\rho=100$ [ $\Omega\text{m}$ ]	$\rho=1000$ [ $\Omega\text{m}$ ]	$\rho=10000$ [ $\Omega\text{m}$ ]
1	4.8064	48.0724	480.7512	4807.5974
10000	4.6861	47.6824	479.5138	4803.3351
20000	4.6402	47.5207	478.9950	4800.6651
30000	4.6078	47.3977	478.5959	4797.6993
40000	4.5829	47.2948	478.2583	4794.2570
50000	4.5629	47.2049	477.9598	4790.2704
60000	4.5466	47.1242	477.6889	4785.7060
70000	4.5332	47.0506	477.4388	4780.5460
80000	4.5222	46.9827	477.2048	4774.7802
90000	4.5133	46.9194	476.9841	4768.4032
100000	4.5061	46.8600	476.7742	4761.4131
200000	4.5020	46.4000	475.0280	4658.4243
300000	4.5781	46.0753	473.5932	4500.3574
400000	4.7079	45.8244	472.2871	4297.7837
500000	4.8784	45.6229	471.0392	4063.2326
600000	5.0808	45.4581	469.8137	3809.2260

700000	5.3078	45.3224	468.5893	3546.9355
800000	5.5537	45.2106	467.3528	3285.4482
900000	5.8131	45.1192	466.0948	3031.5549
1000000	6.0816	45.0455	464.8089	2789.8957
2000000	8.6876	44.9833	449.8038	1216.0262
3000000	10.5837	45.7300	430.5404	604.9837
4000000	11.9038	47.0308	407.6329	339.0448
5000000	12.9175	48.7657	382.1864	204.8458
6000000	13.7828	50.8556	355.3828	129.2648
7000000	14.5787	53.2383	328.2941	83.2791
8000000	15.3427	55.8607	301.7918	53.7634
9000000	16.0911	58.6756	276.5205	34.1339

Para obtener una mejor comprensión de los efectos de la resistividad en la impedancia del SPAT en altas frecuencia, se han tabulado los resultados obtenidos en la Tabla 5 y se procedió a graficarlos en por unidad, cuya base es el valor de la impedancia mostrada para 1 Hz respectivamente para cada caso. El gráfico resultante se muestra en la figura 34.

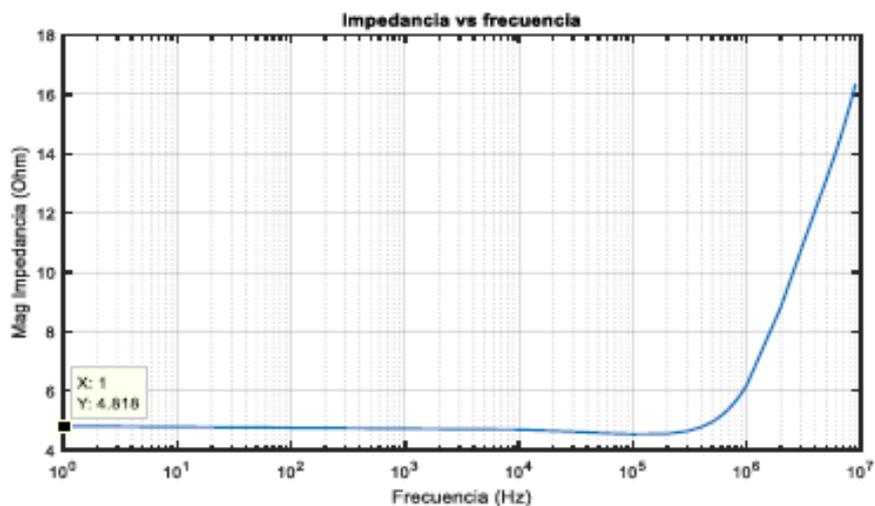


**Figura 34. Respuesta del SPAT en función de la frecuencia (Variación de resistividad electrodo horizontal)**

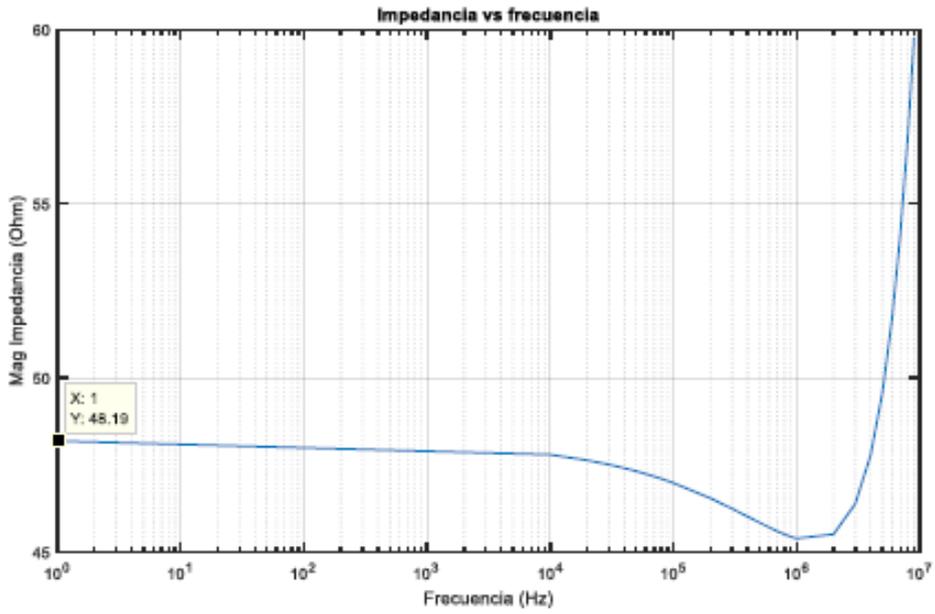
Se puede observar que la mayor variabilidad de la respuesta del SPAT para altas frecuencia se presenta para una resistividad de suelo baja. Además, se puede observar que para resistividades entre 100 y 1000  $\Omega\text{m}$  no se presenta gran variación, esto puede cambiar dependiendo de otros parámetros eléctricos y geométricos del SPAT como se muestra más adelante. También se observó que para valores mucho mayores a los 1000  $\Omega\text{m}$ , el valor de la impedancia del SPAT disminuye.

➤ *Electrodo Vertical*

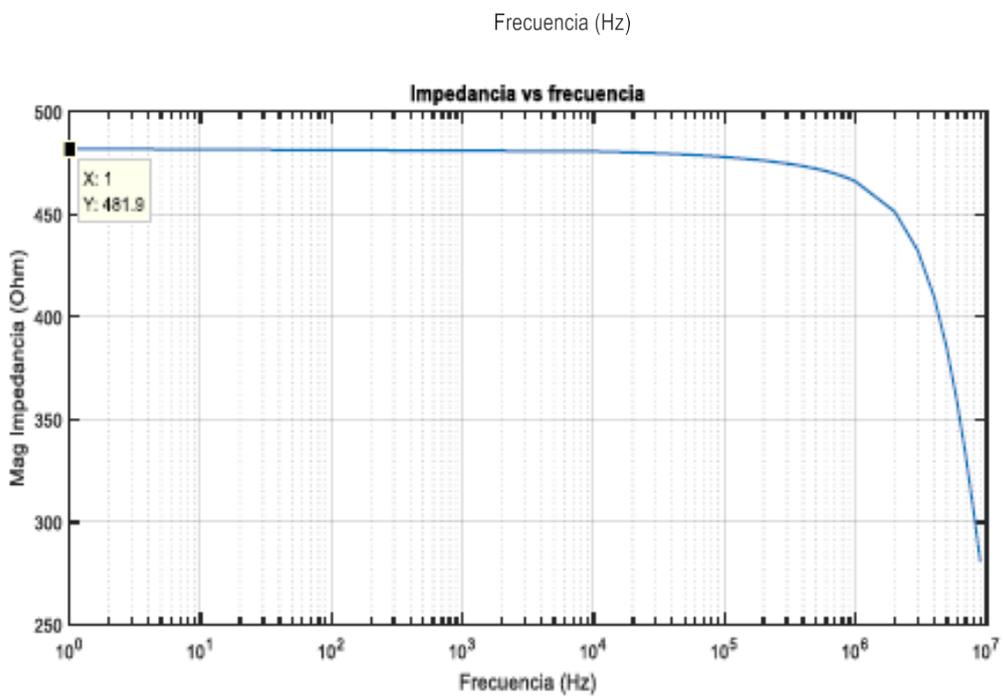
Para observar la respuesta del SPAT en función de la frecuencia al variar la resistividad, se realizaron las simulaciones con un electrodo de tipo vertical de longitud 2 m, radio de 0.5 cm, profundidad de 3 m, permeabilidad y permitividad relativa de 1.5. Los valores de resistividad usados son: 10, 100, 1000, 10000 Ohm respectivamente. Las gráficas obtenidas de las simulaciones se presentan a continuación.



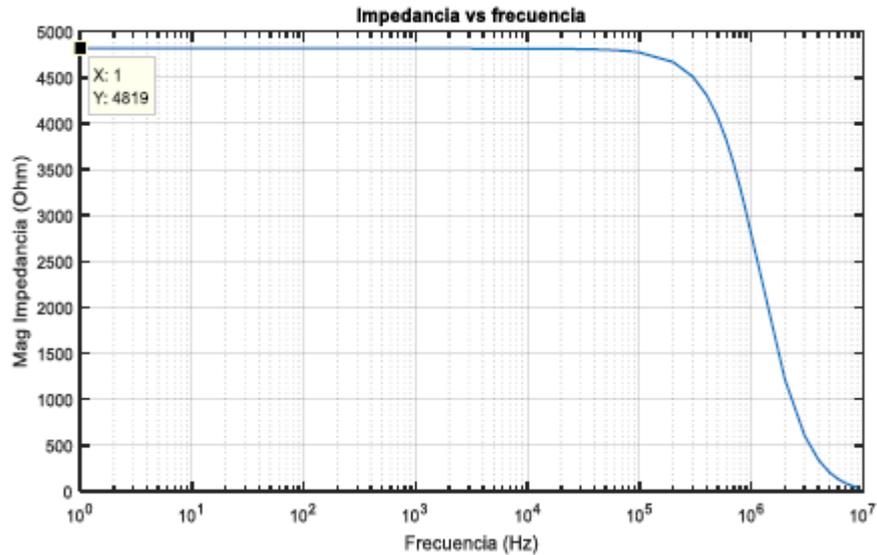
**Figura 35. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo vertical resistividad de 10 Ohm)**



**Figura 36. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo vertical resistividad de 100 Ohm)**



**Figura 37. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo vertical resistividad de 1000 Ohm)**



**Figura 38. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo vertical resistividad de 10000 Ohm)**

Los valores de la magnitud de la impedancia en función de la frecuencia, obtenidos en las simulaciones realizadas, para un electrodo vertical de longitud 2 m, radio de 0.5 cm, con una permeabilidad y permitividad relativa de 1.5, son tabulados en la Tabla 6.

**Tabla 6. Variación de resistividad del suelo, electrodo vertical**

Frecuencia [Hz]	Z [ohm]			
	$\rho=10$ [ $\Omega\text{m}$ ]	$\rho=100$ [ $\Omega\text{m}$ ]	$\rho=1000$ [ $\Omega\text{m}$ ]	$\rho=10000$ [ $\Omega\text{m}$ ]
1	4.8179	48.1873	481.9001	4819.0876
10000	4.6983	47.7947	480.6525	4814.7911
20000	4.6546	47.6328	480.1297	4812.1048
30000	4.6247	47.5102	479.7277	4809.1241
40000	4.6024	47.4082	479.3880	4805.6671
50000	4.5850	47.3193	479.0877	4801.6652
60000	4.5713	47.2400	478.8153	4797.0847
70000	4.5604	47.1679	478.5639	4791.9076
80000	4.5518	47.1015	478.3289	4786.1235
90000	4.5452	47.0400	478.1073	4779.7272
100000	4.5403	46.9824	477.8967	4772.7163
200000	4.5540	46.5443	476.1486	4669.4499

300000	4.6423	46.2447	474.7179	4510.9824
400000	4.7813	46.0198	473.4197	4307.9074
500000	4.9596	45.8446	472.1824	4072.7834
600000	5.1687	45.7056	470.9695	3818.1617
700000	5.4020	45.5951	469.7596	3555.2402
800000	5.6535	45.5078	468.5391	3293.1277
900000	5.9182	45.4399	467.2983	3038.6310
1000000	6.1916	45.3889	466.0309	2796.4010
2000000	8.8341	45.5089	451.2568	1218.9915
3000000	10.7573	46.3812	432.2819	606.9268
4000000	12.0973	47.7779	409.7038	340.9613
5000000	13.1262	49.5936	384.6182	207.1916
6000000	14.0043	51.7558	358.1991	132.2900
7000000	14.8119	54.2052	331.5092	87.1302
8000000	15.5871	56.8896	305.4095	58.5177
9000000	16.3464	59.7622	280.5326	39.8128

Al igual que en el caso anterior se procedió a graficar los resultados obtenidos de las simulaciones en el sistema por unidad, cuya base es el valor de la impedancia mostrada para 1 Hz respectivamente para cada caso. El gráfico resultante se muestra en la figura 39.



**Figura 39. Respuesta del SPAT en función de la frecuencia (Variación de resistividad electrodo vertical)**

Los resultados obtenidos para el electrodo vertical son similares a los del tipo horizontal. Se puede observar que la mayor variabilidad de la respuesta del SPAT para altas frecuencia se presenta para una resistividad de suelo baja. Además, se puede observar que para una resistividad entre 100 y 1000  $\Omega\text{m}$  no se presenta mayor variación. También se observó que para valores mucho mayores a los 1000  $\Omega\text{m}$ , el valor de la impedancia del sistema del SPAT disminuye.

### 6.1.2 Variación de la longitud del electrodo del sistema de puesta a tierra.

#### ➤ *Electrodo Horizontal*

Para observar los cambios que sufre la impedancia del sistema de puesta a tierra debido a la variación de la longitud de los electrodos, se realizaron simulaciones con un electrodo de tipo horizontal de radio 0.5 cm, permeabilidad y permitividad relativa de 1.5, resistividad de 100 ohm, con una profundidad de 2 m y una longitud de: 1, 10, 30, 50 m respectivamente. Las gráficas obtenidas de las simulaciones realizadas son presentadas a continuación.

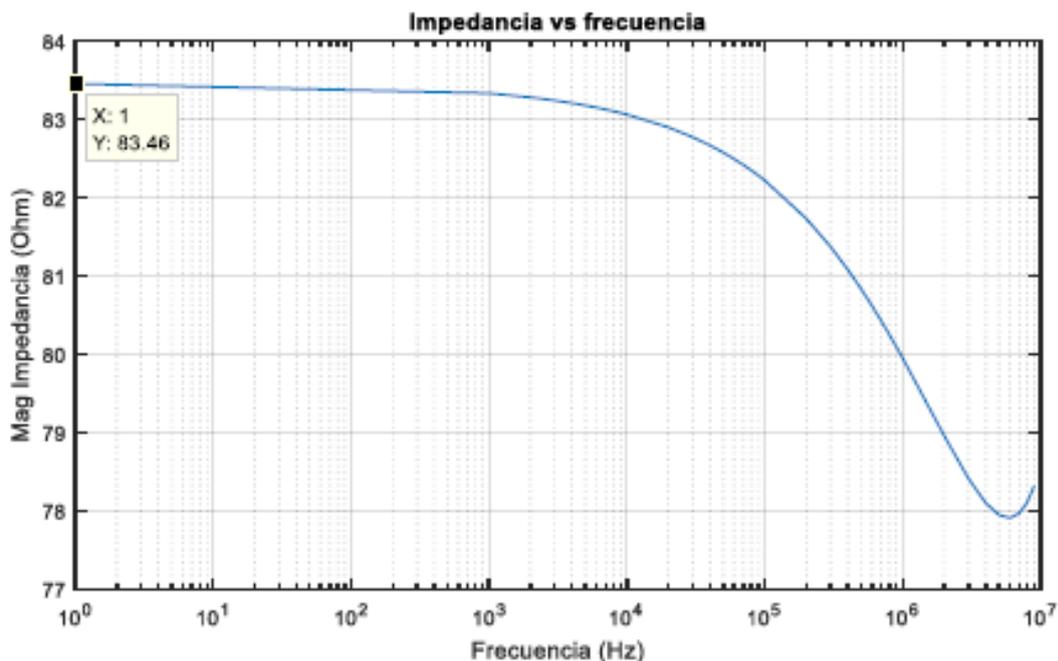
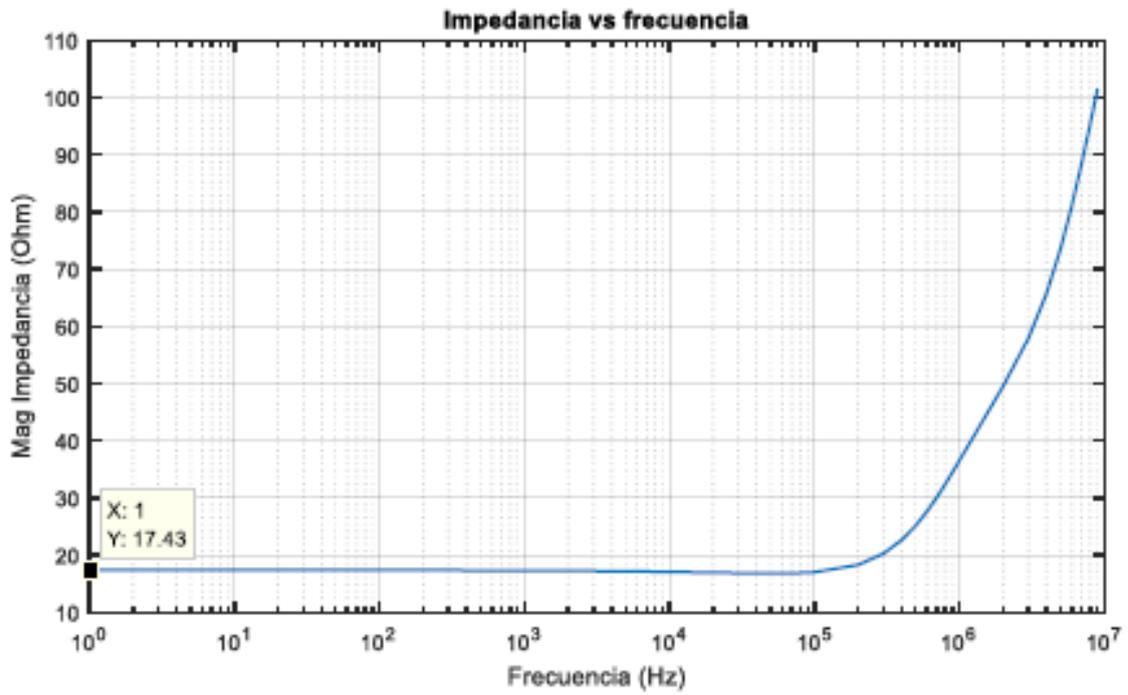
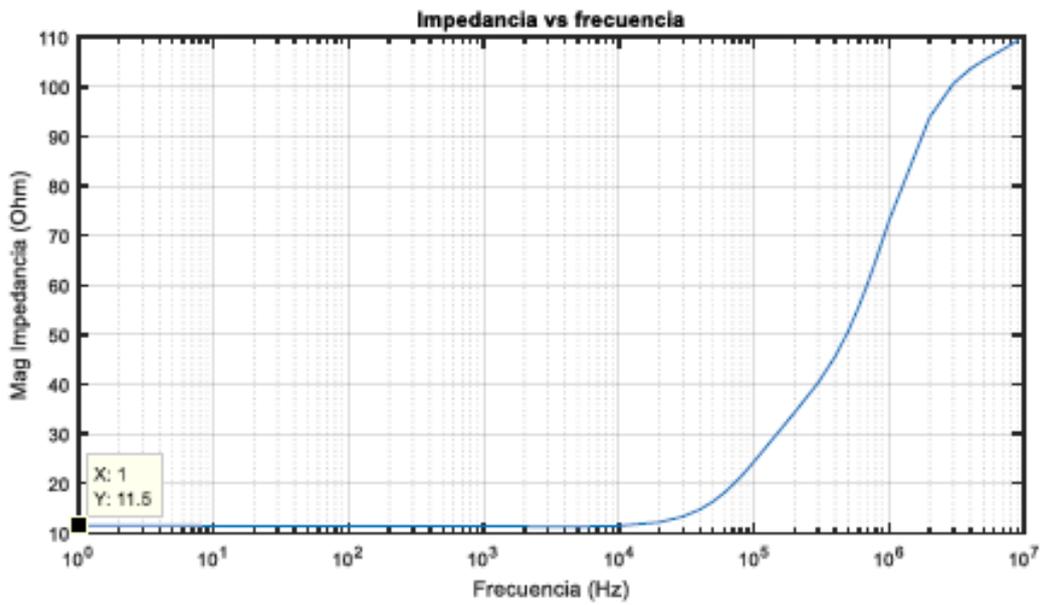


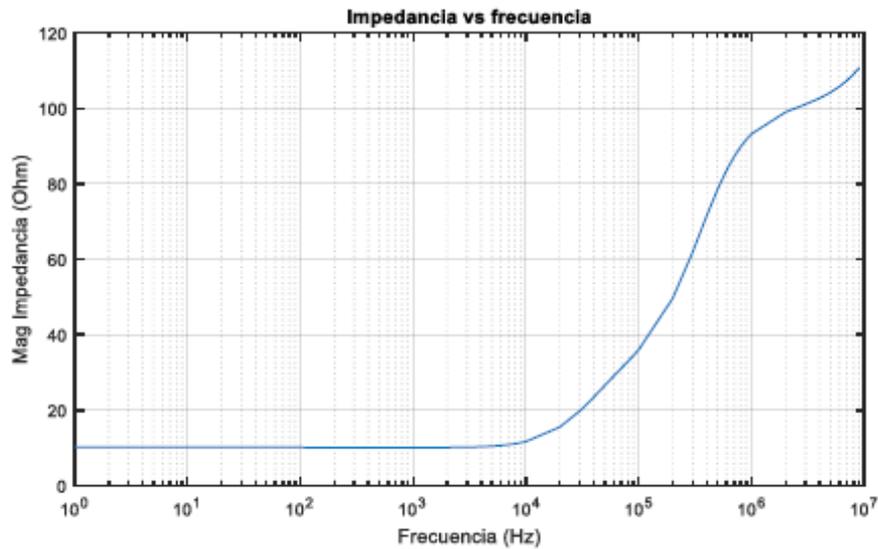
Figura 40. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo horizontal 1m)



**Figura 41. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo horizontal 10m)**



**Figura 42. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo horizontal 30m)**



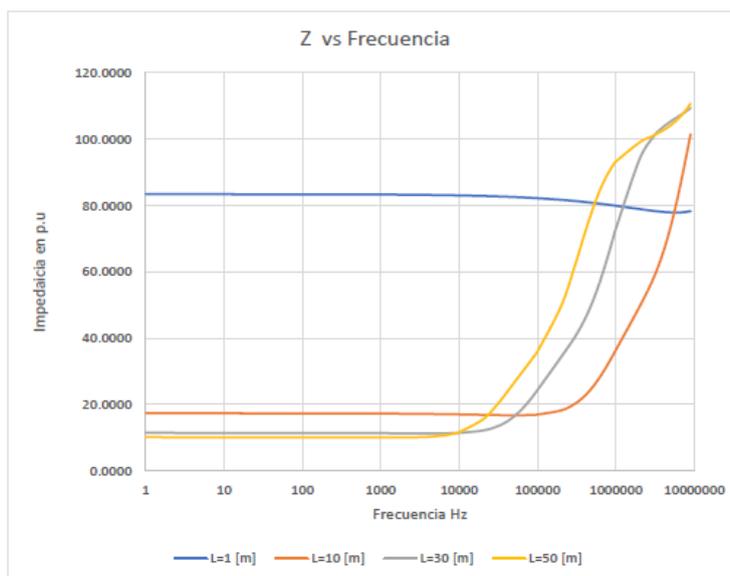
**Figura 43. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo horizontal 50m)**

Los valores de la magnitud de la impedancia en función de la frecuencia, obtenidos en las simulaciones realizadas, variando la longitud de un electrodo horizontal de radio 0.5 cm, resistividad de 100 ohm, profundidad de 2m, permeabilidad y permitividad relativa de 1.5, son tabulados en la Tabla 7.

**Tabla 7. Variación de la longitud del electrodo horizontal.**

Frecuencia [Hz]	Z [ohm]			
	L=1 [m]	L=10 [m]	L=30 [m]	L=50 [m]
1	83.4577	17.4295	11.5037	10.1839
1000	83.3357	17.3080	11.3881	10.0898
2000	83.2835	17.2567	11.3504	10.1083
3000	83.2435	17.2180	11.3319	10.1776
4000	83.2099	17.1857	11.3262	10.2894
5000	83.1802	17.1578	11.3308	10.4394
6000	83.1534	17.1329	11.3442	10.6244
7000	83.1287	17.1104	11.3656	10.8416
8000	83.1058	17.0899	11.3943	11.0884
9000	83.0843	17.0709	11.4299	11.3625
10000	83.0639	17.0533	11.4720	11.6613
20000	82.9002	16.9265	12.1963	15.5200
30000	82.7751	16.8536	13.3494	19.7586
40000	82.6702	16.8146	14.7896	23.4809
50000	82.5782	16.8010	16.3976	26.5240

60000	82.4954	16.8083	18.0768	29.0029
70000	82.4197	16.8338	19.7553	31.0774
80000	82.3495	16.8753	21.3840	32.8799
90000	82.2838	16.9315	22.9328	34.5056
100000	82.2220	17.0011	24.3862	36.0189
200000	81.7339	18.2698	34.3229	49.6280
300000	81.3743	20.2471	40.3773	61.8586
400000	81.0824	22.6075	45.6393	71.5065
500000	80.8344	25.1264	50.7624	78.5441
600000	80.6180	27.6511	55.7753	83.5641
700000	80.4256	30.0858	60.5805	87.1628
800000	80.2524	32.3776	65.0846	89.7865
900000	80.0950	34.5031	69.2283	91.7407
1000000	79.9509	36.4582	72.9864	93.2297
2000000	78.9596	49.4553	93.8763	98.9993
3000000	78.4123	57.9041	100.6686	101.0579
4000000	78.1003	65.7526	103.6124	102.6576
5000000	77.9449	73.5806	105.3121	104.1947
6000000	77.9072	81.2612	106.5378	105.7567
7000000	77.9653	88.5734	107.5648	107.3680
8000000	78.1053	95.3473	108.5064	109.0351
9000000	78.3181	101.4879	109.4142	110.7578



**Figura 44. Respuesta del SPAT en función de la frecuencia (Variación de longitud electrodo horizontal)**

En la figura 44, se observa que en bajas frecuencias el electrodo que presenta menor valor de impedancia es el de mayor longitud, pero a medida que incrementa la frecuencia esto va cambiando hasta el punto en que en los rangos de muy alta frecuencias, el que presenta una menor impedancia es el de menor longitud.

➤ **Electrodo Vertical**

Para observar los cambios que sufre la impedancia del sistema de puesta a tierra debido a la variación de la longitud de los electrodos tipo vertical, se realizaron simulaciones con un electrodo de radio 0.5 cm, permeabilidad y permitividad relativa de 1.5, resistividad de 100 ohm y una longitud de: 1, 10, 30, 50 m respectivamente. Las gráficas obtenidas de las simulaciones realizadas se presentan a continuación.

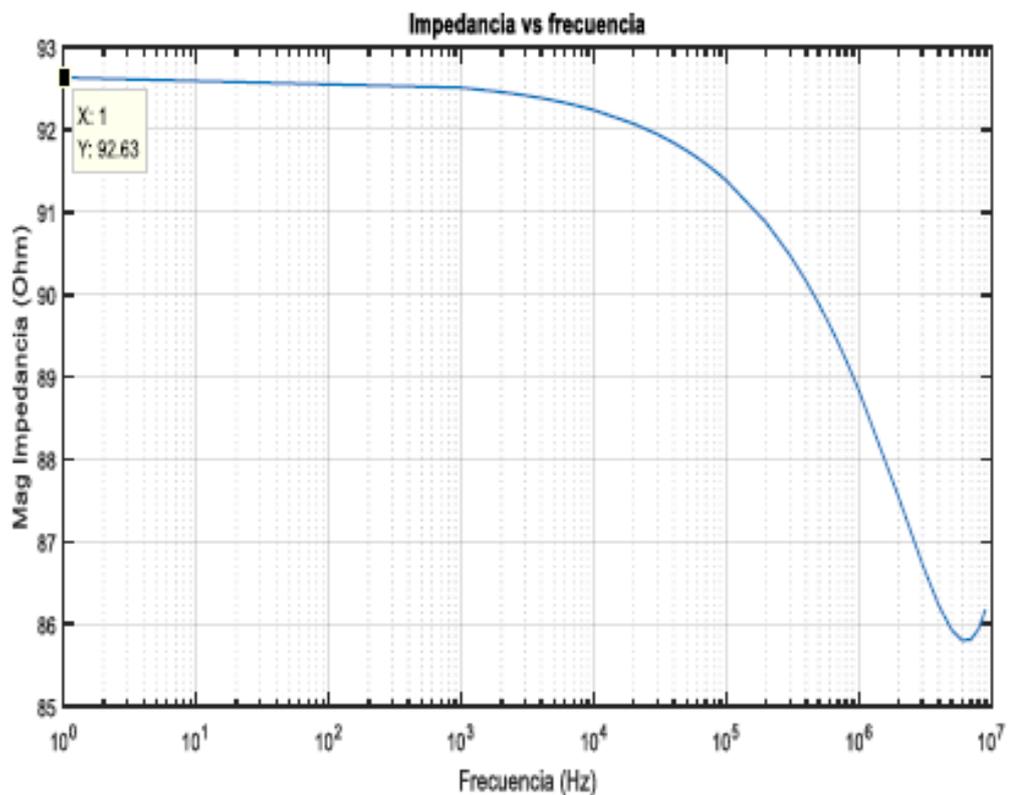
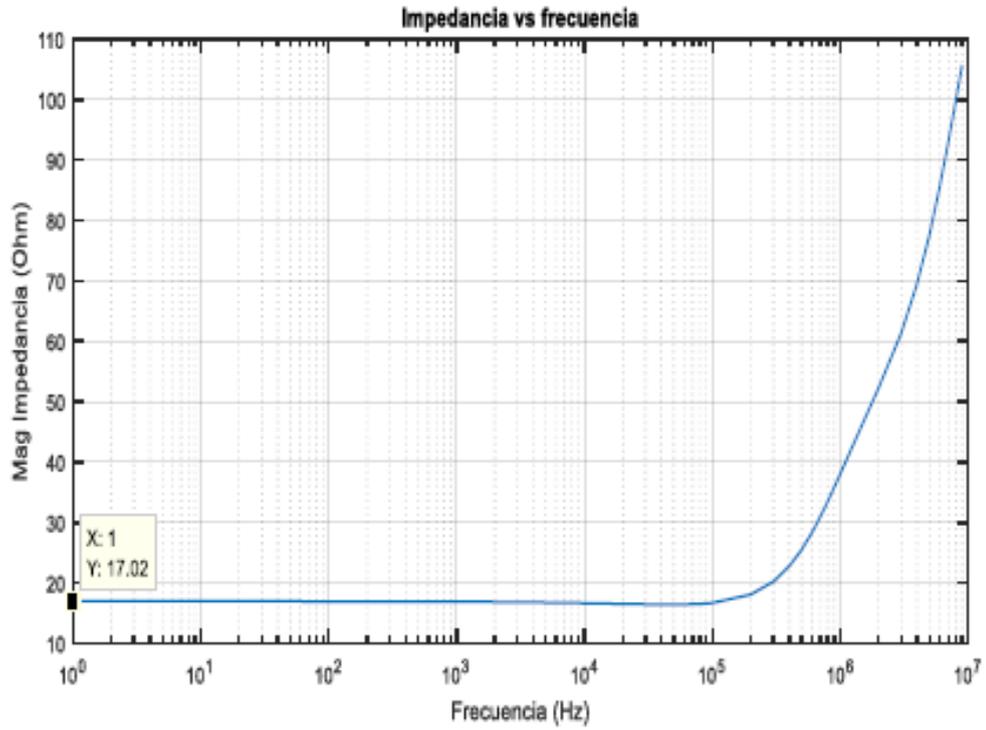
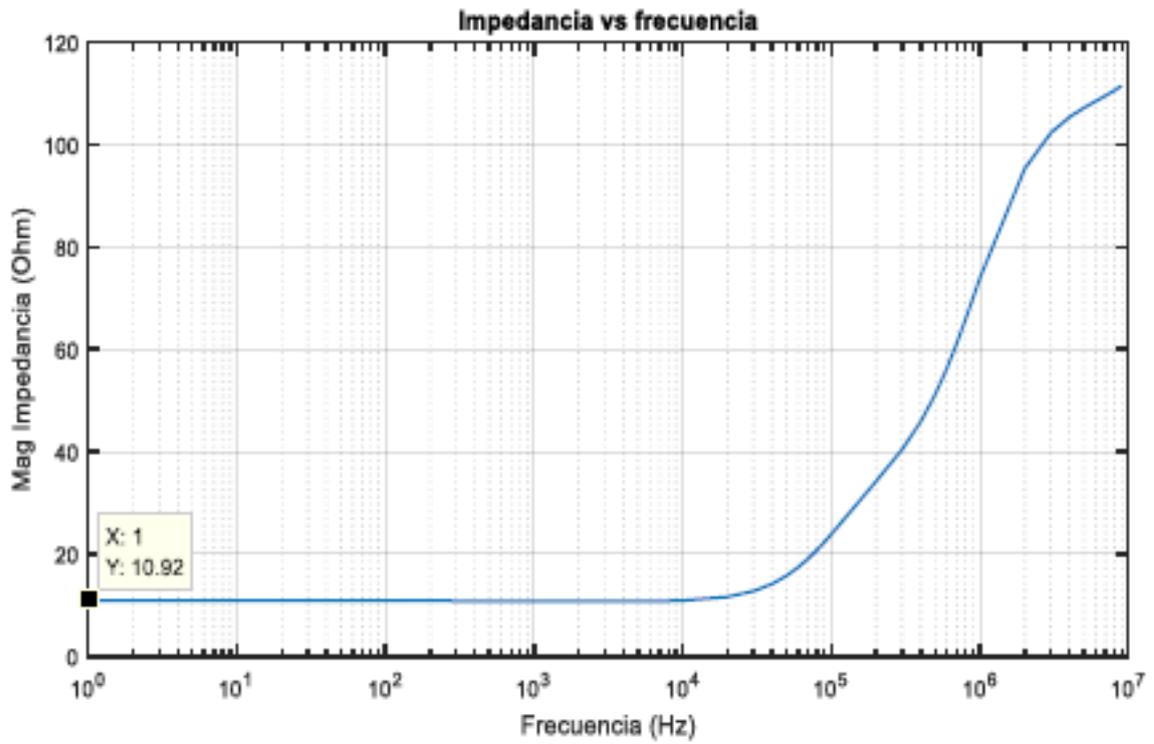


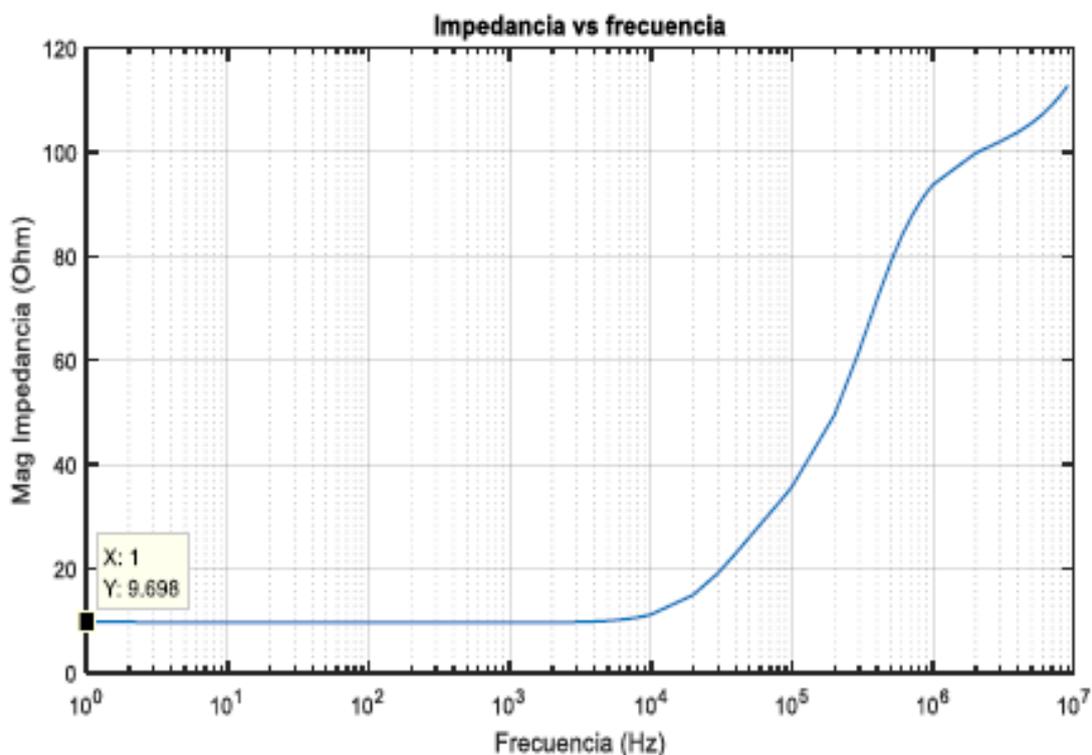
Figura 45. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo vertical 1m)



**Figura 46. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo vertical 10m)**



**Figura 47. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo vertical 30m)**



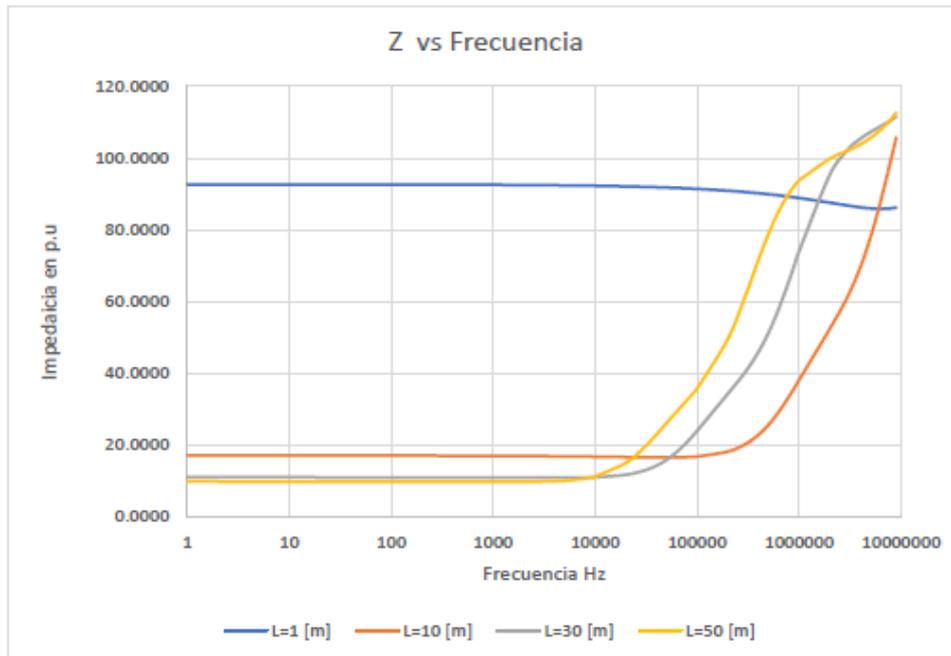
**Figura 48. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo vertical 50m)**

Los valores de la magnitud de la impedancia en función de la frecuencia, obtenidos en las simulaciones realizadas, variando la longitud de un electrodo vertical de radio 0.5 cm, resistividad de 100 ohm con una permeabilidad y permitividad relativa de 1.5, se muestran en la Tabla 8.

**Tabla 8. Variación de la longitud del electrodo vertical.**

Frecuencia [Hz]	Z [ohm]			
	L=1 [m]	L=10 [m]	L=30 [m]	L=50 [m]
1	92.6311	17.0151	10.9202	9.6981
1000	92.5091	16.8937	10.8053	9.6055
2000	92.4569	16.8427	10.7689	9.6246
3000	92.4169	16.8041	10.7516	9.6930
4000	92.3832	16.7722	10.7470	9.8023
5000	92.3534	16.7446	10.7524	9.9481
6000	92.3266	16.7202	10.7665	10.1275
7000	92.3018	16.6981	10.7884	10.3380

<b>8000</b>	92.2789	16.6780	10.8173	10.5770
<b>9000</b>	92.2573	16.6595	10.8529	10.8424
<b>10000</b>	92.2368	16.6424	10.8948	11.1320
<b>20000</b>	92.0721	16.5215	11.6052	14.9059
<b>30000</b>	91.9459	16.4560	12.7324	19.1282
<b>40000</b>	91.8396	16.4250	14.1473	22.8889
<b>50000</b>	91.7461	16.4202	15.7400	25.9871
<b>60000</b>	91.6617	16.4369	17.4187	28.5182
<b>70000</b>	91.5841	16.4721	19.1114	30.6364
<b>80000</b>	91.5121	16.5238	20.7669	32.4746
<b>90000</b>	91.4445	16.5904	22.3518	34.1296
<b>100000</b>	91.3806	16.6707	23.8471	35.6678
<b>200000</b>	90.8689	18.0615	34.1725	49.4519
<b>300000</b>	90.4819	20.1917	40.4441	61.8254
<b>400000</b>	90.1603	22.7404	45.8675	71.5867
<b>500000</b>	89.8812	25.4788	51.1359	78.7152
<b>600000</b>	89.6328	28.2437	56.2832	83.8120
<b>700000</b>	89.4079	30.9263	61.2108	87.4778
<b>800000</b>	89.2019	33.4625	65.8237	90.1605
<b>900000</b>	89.0116	35.8204	70.0627	92.1670
<b>1000000</b>	88.8346	37.9912	73.9041	93.7023
<b>2000000</b>	87.5352	52.2690	95.2685	99.7571
<b>3000000</b>	86.7350	61.2995	102.2926	102.0107
<b>4000000</b>	86.2290	69.5396	105.3782	103.8028
<b>5000000</b>	85.9339	77.6357	107.1755	105.5311
<b>6000000</b>	85.8048	85.4757	108.4743	107.2737
<b>7000000</b>	85.8138	92.8575	109.5581	109.0482
<b>8000000</b>	85.9419	99.6337	110.5442	110.8569
<b>9000000</b>	86.1755	105.7308	111.4858	112.6984



**Figura 49. Respuesta del SPAT en función de la frecuencia (Variación de longitud electrodo vertical)**

En la figura 49, se observa que al igual que en el electrodo tipo horizontal, en bajas frecuencias el electrodo que presenta menor valor de impedancia es el de mayor longitud, mientras que a muy altas frecuencias el que presenta una menor impedancia es el de menor longitud.

### 6.1.3 Variación del radio

Para observar los cambios que sufre la impedancia del sistema de puesta a tierra debido a la variación del radio de los electrodos, se realizaron simulaciones para un electrodo de tipo horizontal de longitud 2 m, permeabilidad y permitividad relativa de 1.5, resistividad de 100 ohm, profundidad de 1 m y un radio de: 0.5, 1, 1.5 y 2 cm respectivamente. Las gráficas obtenidas de las simulaciones son presentadas a continuación.

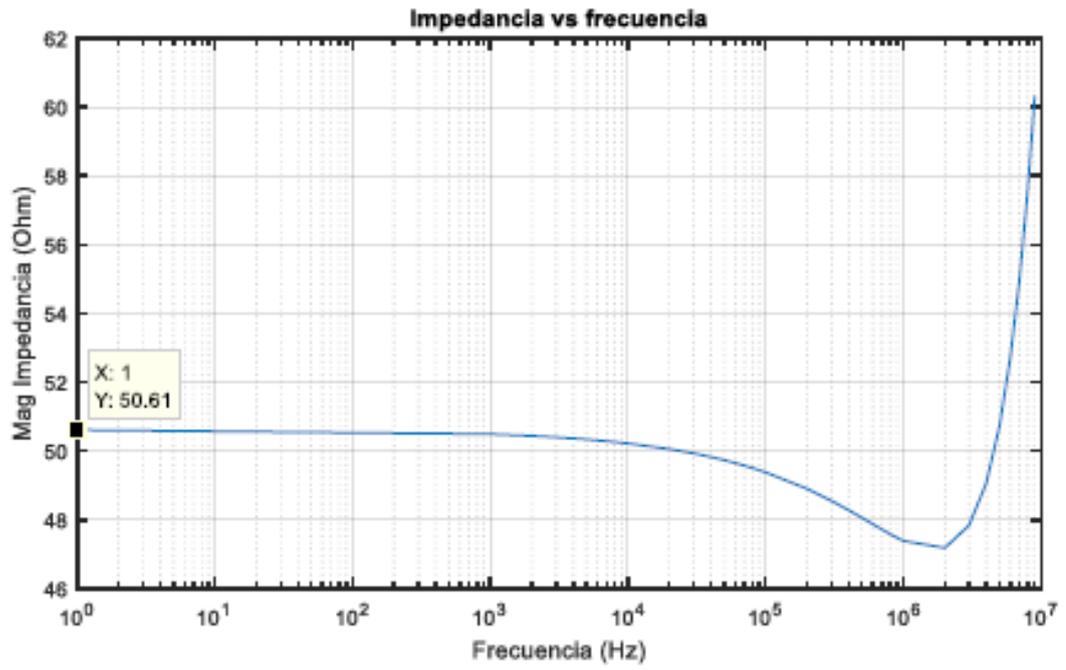


Figura 50. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo horizontal  $r=0.5$  cm)

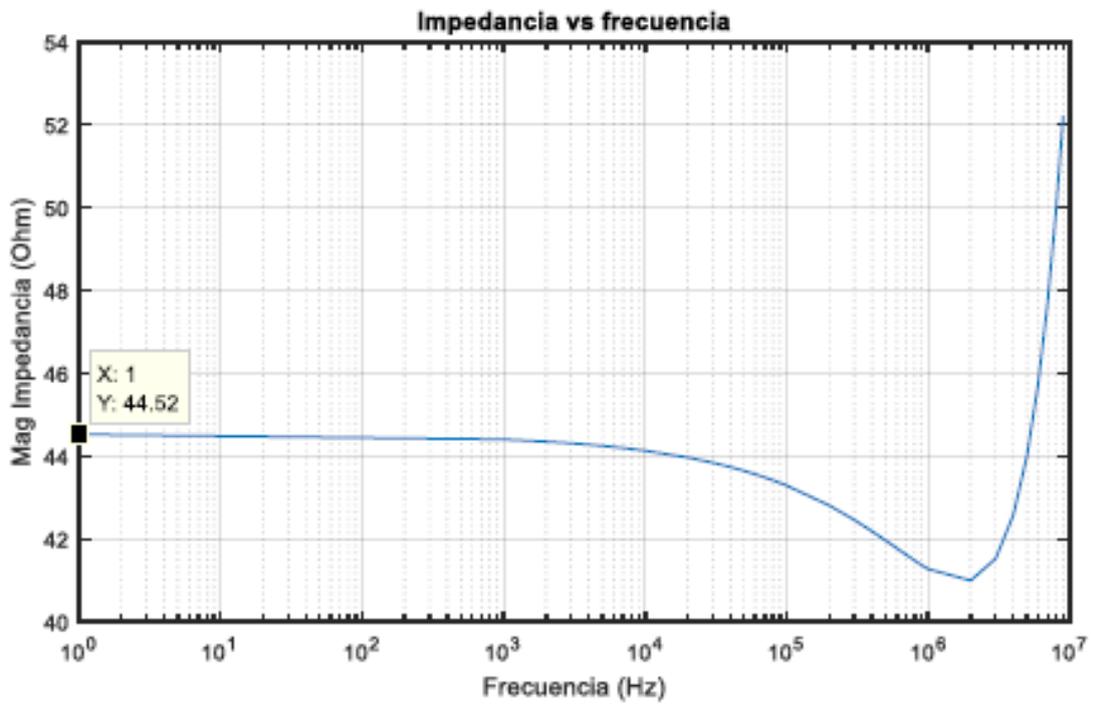


Figura 51. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo horizontal  $r= 1$  cm)

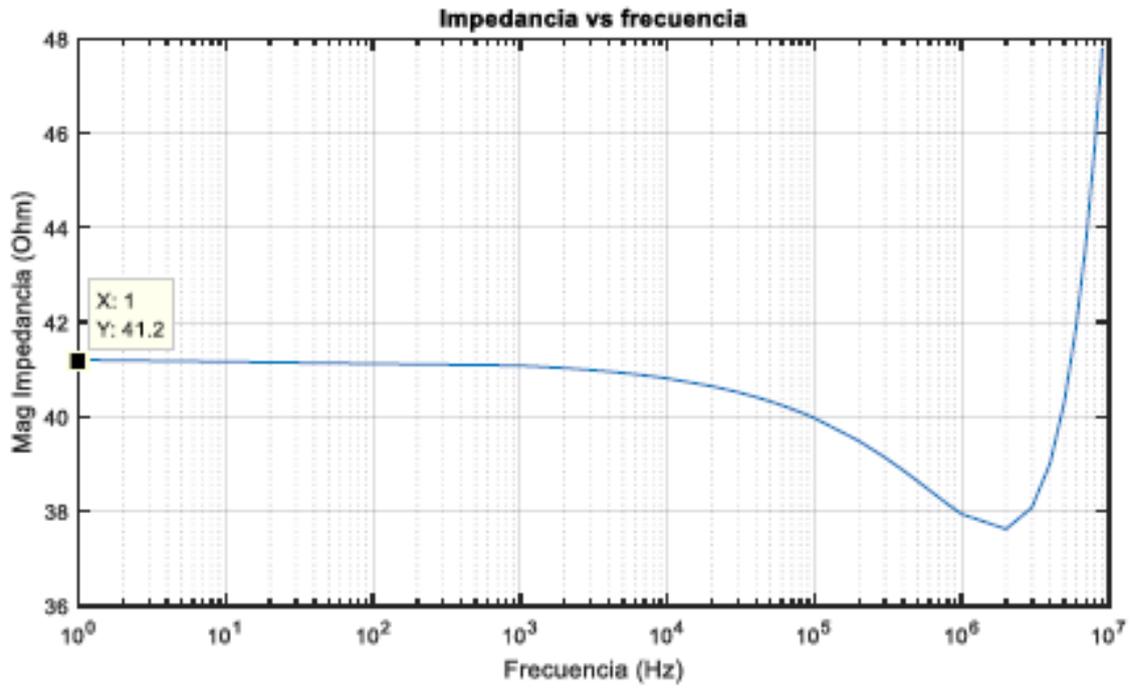


Figura 52. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo horizontal  $r = 1.5$  cm)

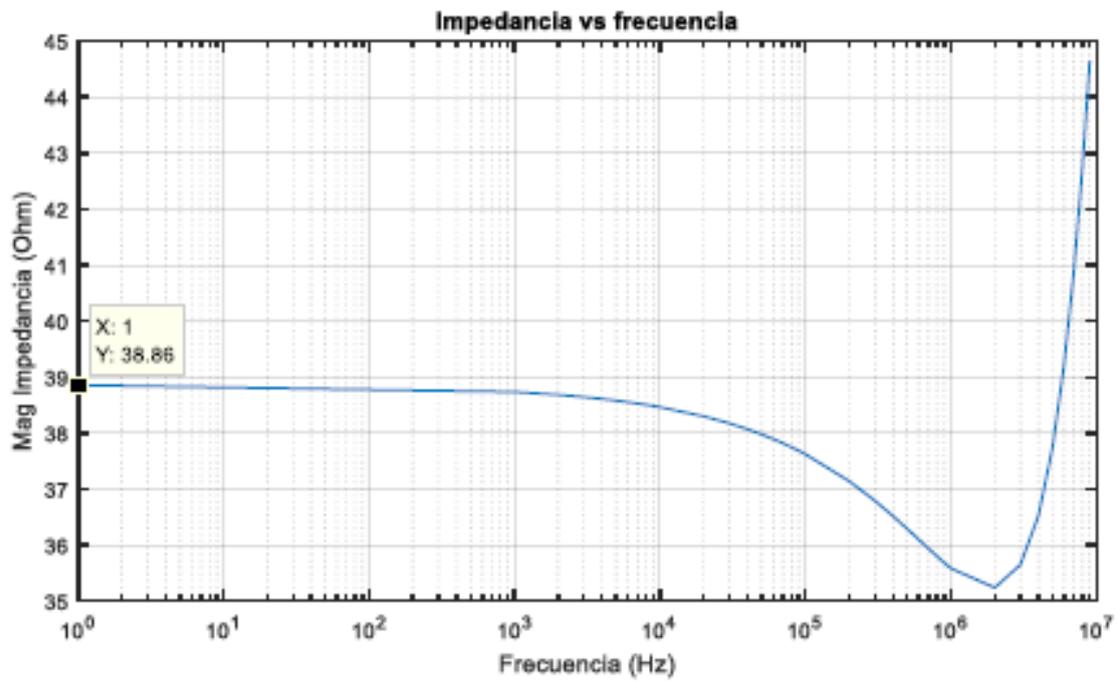


Figura 53. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo horizontal  $r = 2$  cm)

**Tabla 9. Variación del radio del electrodo horizontal**

Frecuencia [Hz]	Z [ohm]			
	r=0.5 [cm]	r=1 [cm]	r=1.5 [cm]	r=2 [cm]
1	50.61120	44.52267	41.20114	38.85795
1000	50.48921	44.40068	41.07914	38.73596
2000	50.43706	44.34853	41.02699	38.68381
3000	50.39706	44.30853	40.98699	38.64381
4000	50.36336	44.27483	40.95329	38.61011
5000	50.33368	44.24515	40.92362	38.58043
6000	50.30687	44.21833	40.89680	38.55361
7000	50.28222	44.19369	40.87215	38.52897
8000	50.25929	44.17076	40.84922	38.50604
9000	50.23777	44.14923	40.82770	38.48451
10000	50.21742	44.12889	40.80735	38.46417
20000	50.05363	43.96509	40.64355	38.30036
30000	49.92862	43.84007	40.51853	38.17533
40000	49.82379	43.73523	40.41368	38.07049
50000	49.73194	43.64336	40.32180	37.97860
60000	49.64936	43.56075	40.23918	37.89597
70000	49.57384	43.48520	40.16362	37.82040
80000	49.50393	43.41527	40.09367	37.75044
90000	49.43865	43.34995	40.02833	37.68509
100000	49.37726	43.28852	39.96688	37.62362
200000	48.89673	42.80733	39.48535	37.14187
300000	48.55078	42.46025	39.13769	36.79382
400000	48.27859	42.18646	38.86306	36.51862
500000	48.05617	41.96195	38.63745	36.29226
600000	47.87099	41.77418	38.44832	36.10219
700000	47.71546	41.61557	38.28808	35.94083
800000	47.58457	41.48109	38.15170	35.80314
900000	47.47476	41.36719	38.03562	35.68555
1000000	47.38340	41.27123	37.93720	35.58542
2000000	47.18198	40.99501	37.62065	35.24060
3000000	47.83783	41.52301	38.07894	35.64962

4000000	49.07021	42.57470	39.03154	36.53182
5000000	50.74175	44.01429	40.34345	37.75280
6000000	52.76340	45.75520	41.92953	39.22848
7000000	55.06864	47.73412	43.72833	40.89879
8000000	57.60365	49.90098	45.69194	42.71743
9000000	60.32289	52.21433	47.78129	44.64711

En la figura 53 se grafican los de los valores tabulados en la Tabla 8 que corresponden a los resultados de las simulaciones al variar el radio de un eléctrico horizontal del SPAT.



**Figura 54. Respuesta del SPAT en función de la frecuencia (Variación del radio de un electrodo horizontal)**

En la Figura 54 se observa que entre mayor sea el radio del electrodo, menor será el valor de la impedancia del SPAT y viceversa. Este fenómeno sucede para bajas y altas frecuencias.

#### 6.1.4 Variación permeabilidad magnética

##### ➤ *Electrodo Horizontal*

Para observar los cambios que sufre la impedancia del sistema de puesta a tierra debido a la variación de la permeabilidad se realizaron simulaciones para un electrodo de tipo horizontal de longitud 2 m, con una permitividad relativa de 1.5, resistividad de 100 ohm, un radio de 0.5 cm, profundidad de 1 m y los valores de permeabilidad relativa de 1, 10, 100, 1000 respectivamente. Las gráficas obtenidas de las simulaciones son presentadas a continuación.

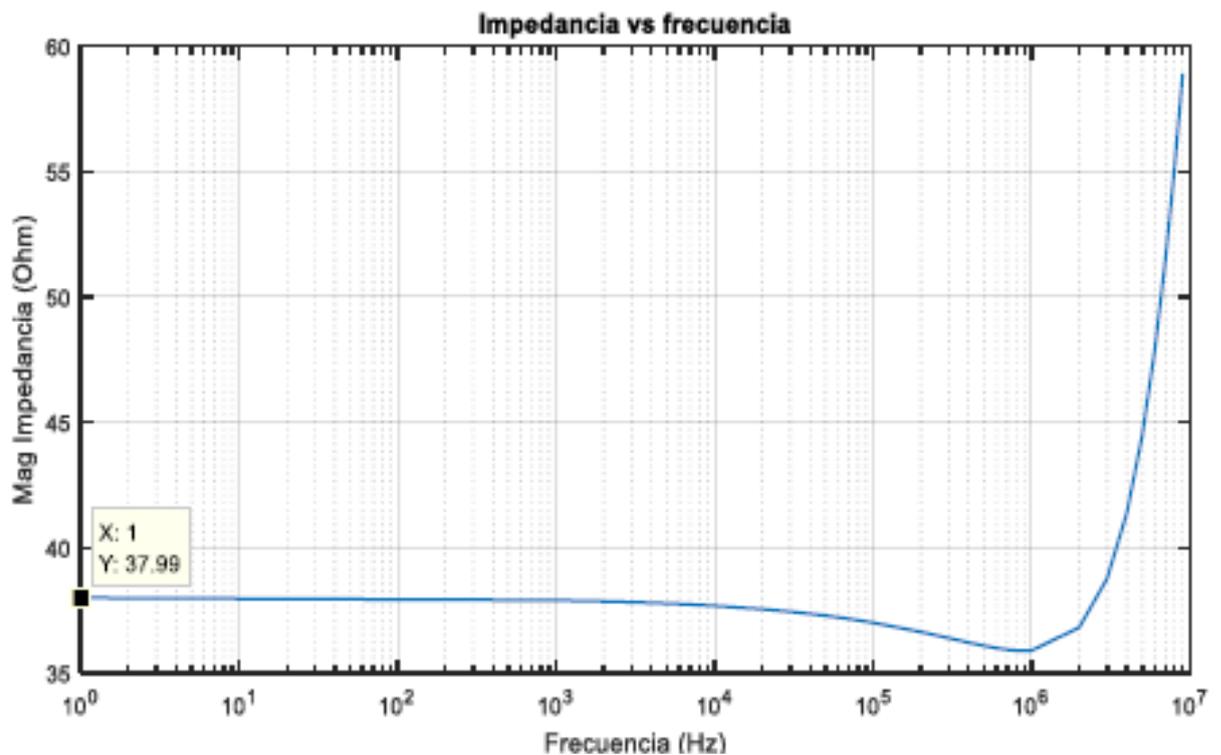


Figura 55. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo horizontal  $\mu_r = 1$ )

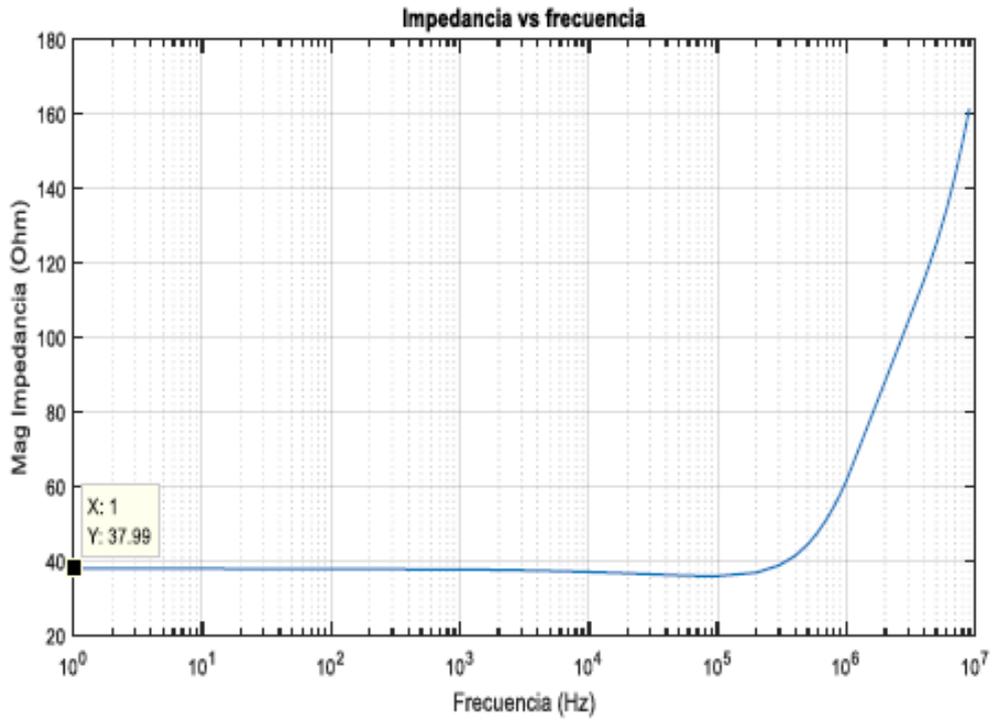


Figura 56. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo horizontal  $\mu_r = 10$ )

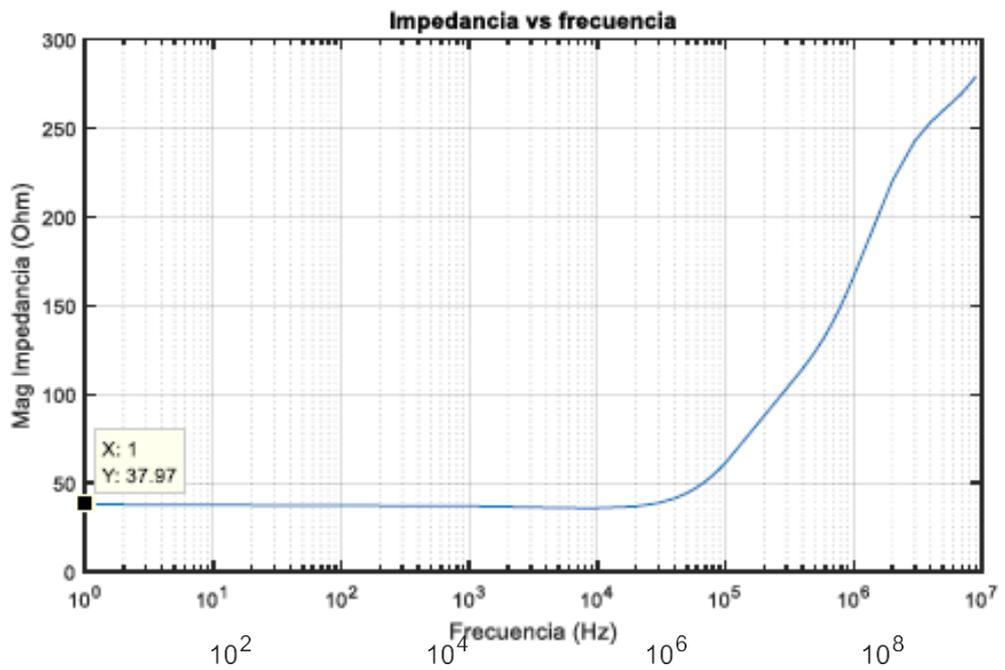


Figura 57. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo horizontal  $\mu_r = 100$ )

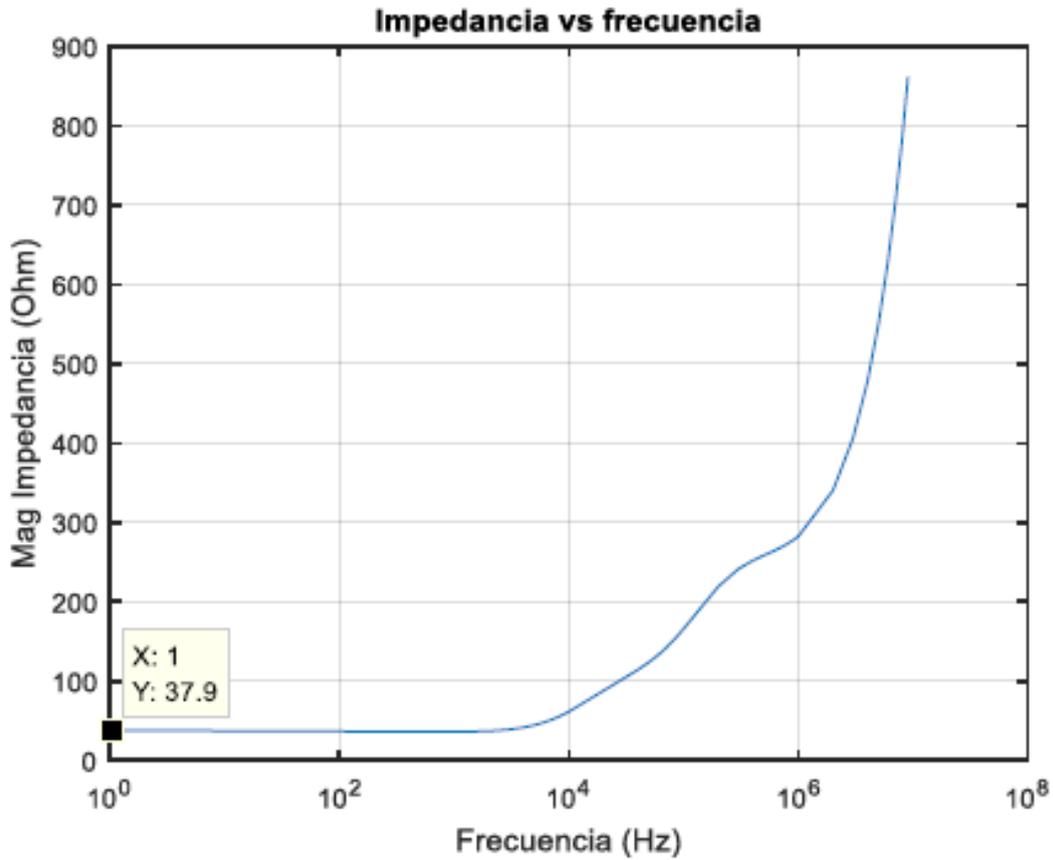
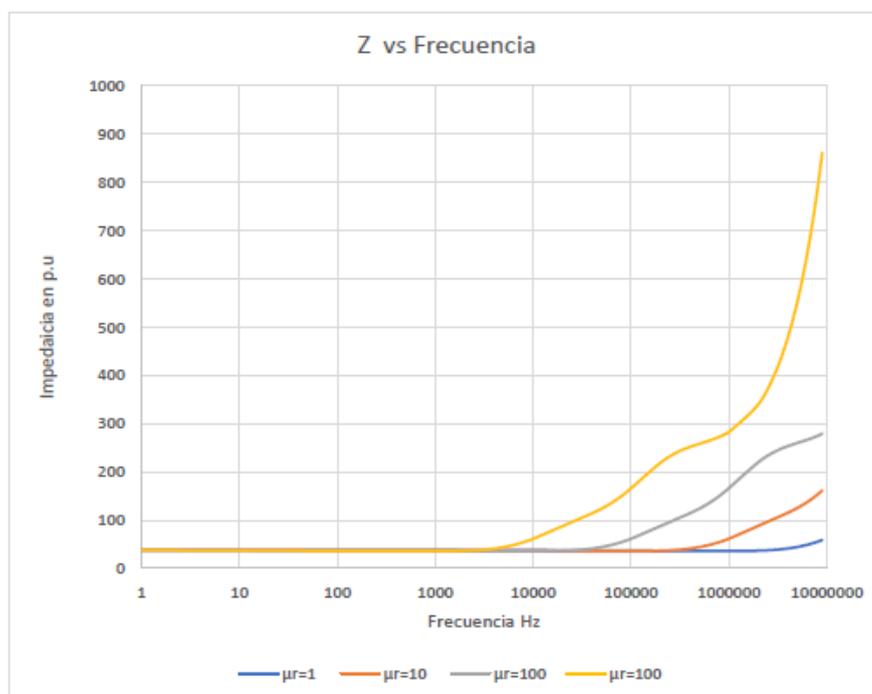


Figura 58. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo horizontal  $\mu_r = 1000$ )

Tabla 10. Variación de la permeabilidad en un electrodo horizontal.

Frecuencia [Hz]	Z [ohm]			
	$\mu_r=1$	$\mu_r=10$	$\mu_r=100$	$\mu_r=1000$
1	37.994972	37.9879378	37.96569366	37.89537639
1000	37.895376	37.6738196	37.0007631	35.89762061
2000	37.852815	37.5407879	36.63522352	36.81929871
3000	37.820184	37.4396541	36.38956096	38.75680431
4000	37.792698	37.3552016	36.21272646	41.33988484
5000	37.768504	37.2815186	36.0842447	44.34760965
6000	37.746649	37.2155642	35.99323982	47.62125378
7000	37.726569	37.1555269	35.93301437	51.04012879
8000	37.707895	37.1002227	35.89903993	54.51164975
9000	37.690371	37.0488271	35.88804882	57.96575684
10000	37.673811	37.000738	35.89756694	61.35089349
20000	37.540765	36.6351544	36.81925353	87.74131162
30000	37.439611	36.3894379	38.75695708	103.2433906
40000	37.355135	36.2125435	41.34052523	114.2888918
50000	37.281426	36.0839984	44.34910212	123.8234945
60000	37.215442	35.992929	47.62400775	132.820474

70000	37.155373	35.9326396	51.04456813	141.5402123
80000	37.100035	35.8986035	54.51818522	150.0003271
90000	37.048603	35.8875546	57.97476421	158.1457059
100000	37.000476	35.8970202	61.36269831	165.9115589
200000	36.634422	36.8187623	87.78713455	218.9535229
300000	36.388115	38.7583987	103.3172032	241.2469405
400000	36.21055	41.3467818	114.386344	251.81729
500000	36.08128	44.3638075	123.9474696	258.3311212
600000	35.989453	47.6512497	132.9781432	263.4479398
700000	35.928393	51.0885824	141.7405487	268.1438734
800000	35.893589	54.5830792	150.2524954	272.7983027
900000	35.881792	58.0642959	158.458038	277.5610345
1000000	35.890542	61.4801222	166.2909462	282.4875056
2000000	36.809909	88.242433	220.0489333	340.12209
3000000	38.764212	104.043383	242.7331651	406.7577301
4000000	41.394642	115.332374	253.4384729	477.8110628
5000000	44.488996	125.13664	259.9789545	551.532217
6000000	47.894014	134.478651	265.088845	627.1007137
7000000	51.491039	143.64016	269.7789828	704.06875
8000000	55.186318	152.641766	274.445623	782.1655926
9000000	58.905967	161.419267	279.2473426	861.215189



**Figura 59. Respuesta del SPAT en función de la frecuencia (Variación de permeabilidad electrodo horizontal)**

Mediante la figura 59 se pudo observar que para bajas frecuencias la respuesta del SPAT básicamente no dependería de la permeabilidad ya que no existe mayor variación, mientras que, en altas frecuencias a mayor permeabilidad, mayor será el valor de la impedancia del SPAT.

### 6.1.5 Variación permitividad eléctrica

Para observar los cambios que sufre la impedancia del sistema de puesta a tierra debido a la variación de la permitividad se realizaron simulaciones para un electrodo de tipo horizontal de longitud 2 m, con una permeabilidad relativa de 1.5, resistividad de 100 ohm, un radio de 0.5 cm, profundidad de 1 m y los valores de permitividad de 1, 10, 100, 1000 respectivamente. Las gráficas obtenidas de las simulaciones son presentadas a continuación.

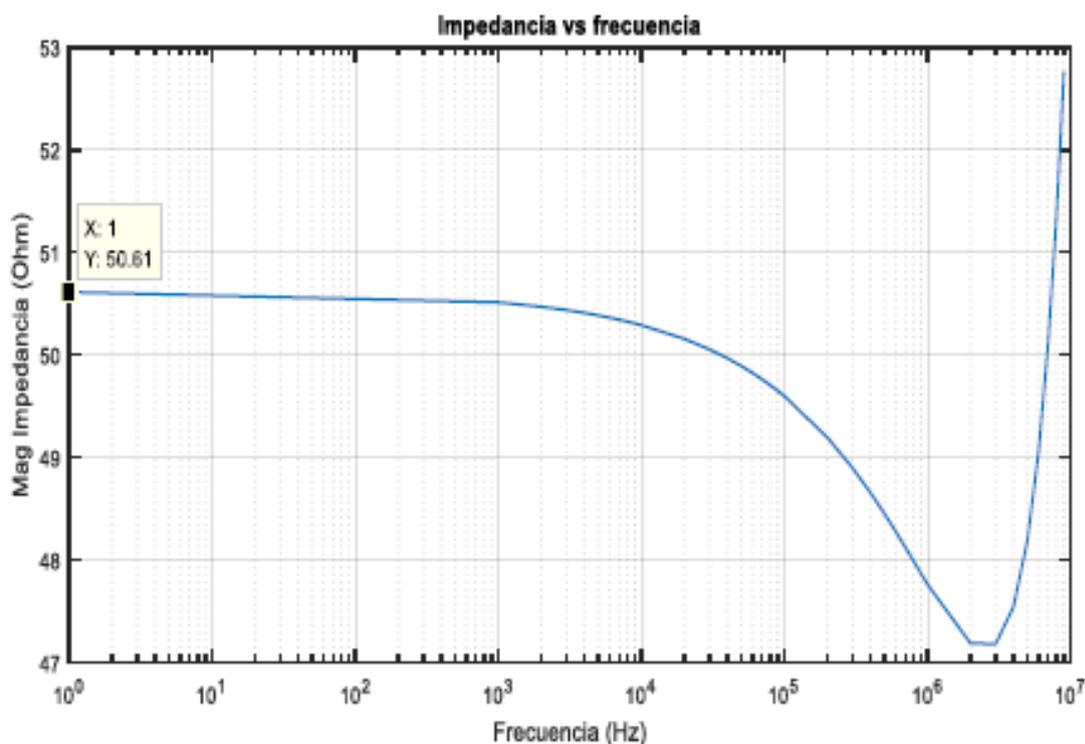


Figura 60. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo horizontal  $\epsilon= 1$ )

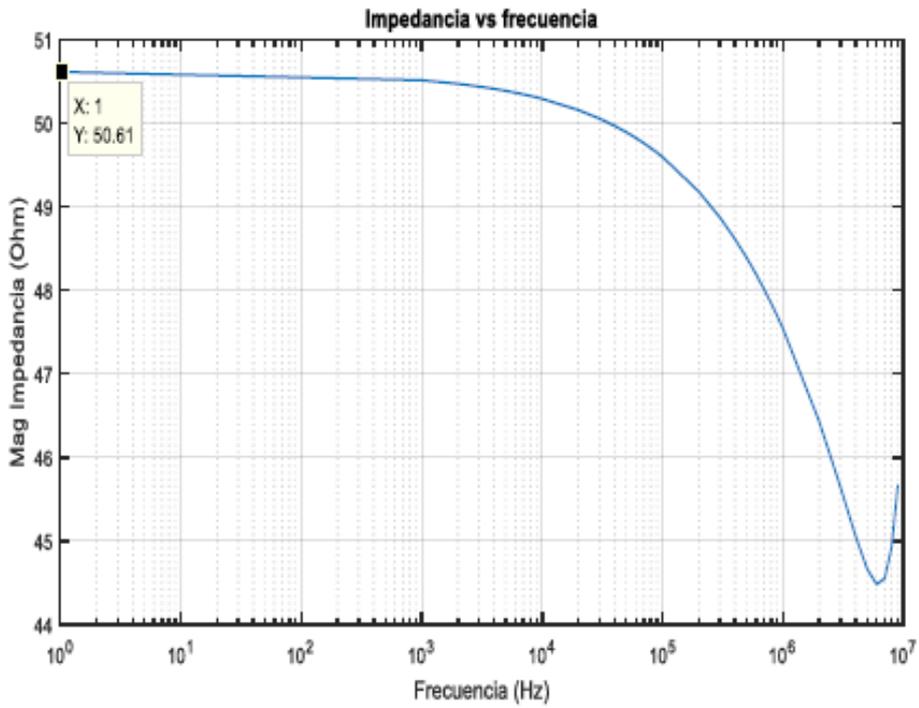


Figura 61. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo horizontal  $\epsilon_r= 10$ )

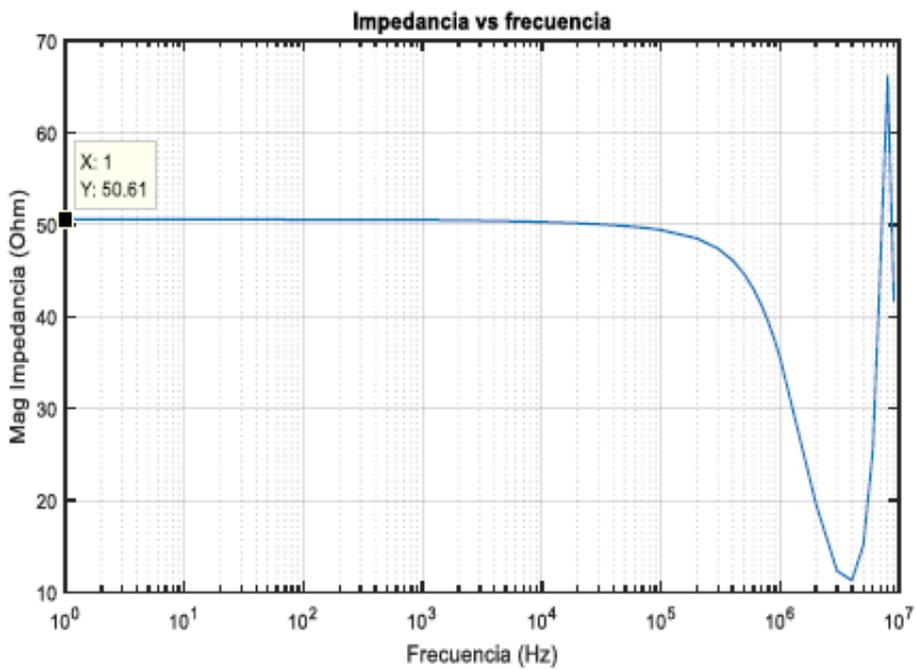
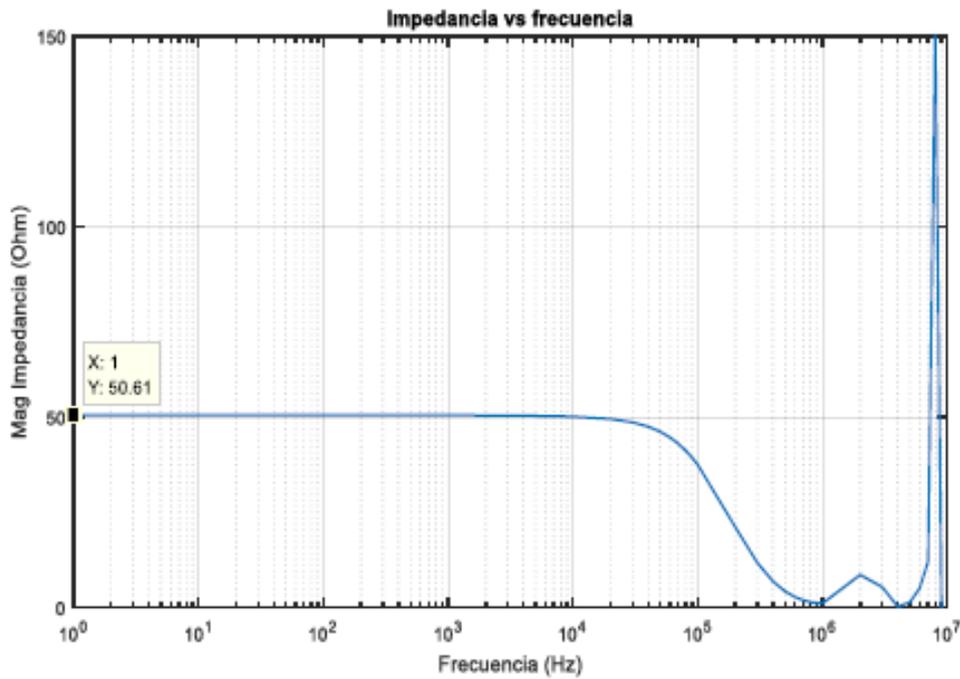


Figura 62. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo horizontal  $\epsilon_r= 100$ )



**Figura 63. Impedancia vs Frecuencia (Electrodo horizontal  $\epsilon_r=1000$ )**

Los valores de la impedancia del SPAT de las simulaciones realizadas de muestran en la Tabla 11.

**Tabla 11. Variación de la permitividad en un electrodo horizontal**

Frecuencia [Hz]	Z [ohm]			
	$\epsilon_r=1$	$\epsilon_r=10$	$\epsilon_r=100$	$\epsilon_r=1000$
1	50.6119	50.6119	50.6119	50.6119
1000	50.5123	50.5123	50.5123	50.5105
2000	50.4697	50.4697	50.4696	50.4627
3000	50.4371	50.4370	50.4368	50.4215
4000	50.4095	50.4095	50.4090	50.3822
5000	50.3853	50.3852	50.3846	50.3430
6000	50.3634	50.3633	50.3624	50.3029
7000	50.3432	50.3432	50.3419	50.2614
8000	50.3245	50.3244	50.3228	50.2182
9000	50.3069	50.3068	50.3048	50.1729
10000	50.2902	50.2901	50.2878	50.1254
20000	50.1561	50.1559	50.1474	49.5140
30000	50.0536	50.0531	50.0350	48.6417
40000	49.9675	49.9666	49.9354	47.5212
50000	49.8919	49.8906	49.8430	46.1810
60000	49.8238	49.8221	49.7547	44.6571
70000	49.7614	49.7591	49.6688	42.9886

80000	49.7035	49.7007	49.5841	41.2146
90000	49.6494	49.6459	49.4998	39.3724
100000	49.5983	49.5942	49.4154	37.4958
200000	49.1945	49.1812	48.5047	21.1014
300000	48.8967	48.8701	47.4041	11.7511
400000	48.6561	48.6121	46.0964	6.8963
500000	48.4534	48.3883	44.5995	4.2635
600000	48.2786	48.1888	42.9446	2.7650
700000	48.1257	48.0077	41.1682	1.8943
800000	47.9908	47.8413	39.3078	1.4020
900000	47.8710	47.6868	37.3998	1.1579
1000000	47.7644	47.5422	35.4771	1.0910
2000000	47.1890	46.4299	19.5922	8.5900
3000000	47.1820	45.6464	12.3253	5.4058
4000000	47.5460	45.0636	11.2920	0.2364
5000000	48.1928	44.6668	15.1672	1.3538
6000000	49.0702	44.4813	25.4932	5.0910
7000000	50.1419	44.5510	46.9133	12.1078
8000000	51.3804	44.9289	66.1868	151.8376
9000000	52.7634	45.6717	41.5902	4.9853



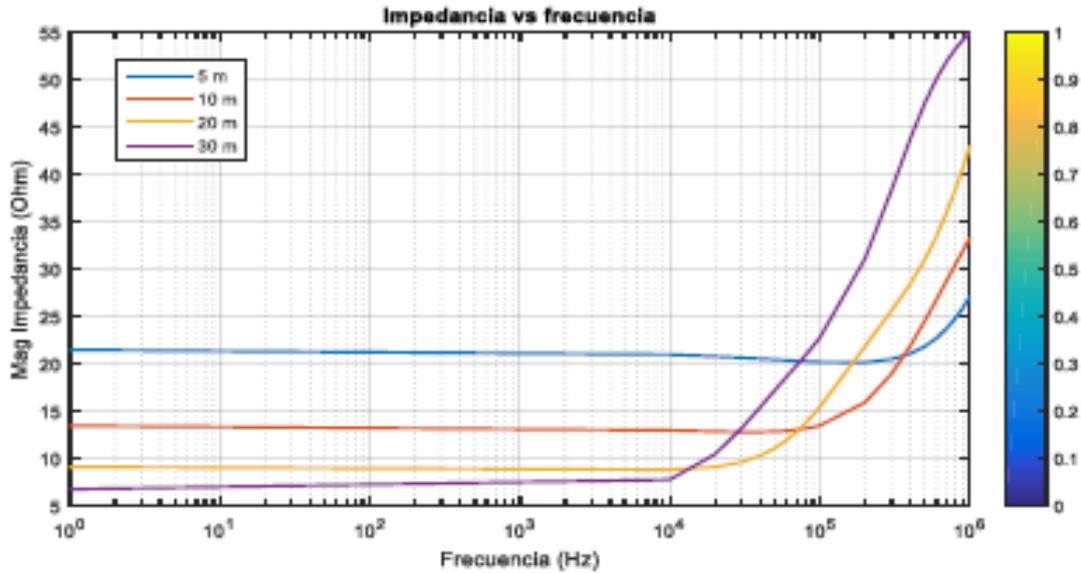
**Figura 64. Respuesta del SPAT en función de la frecuencia (Variación de permitividad electrodo horizontal)**

Mediante los resultados obtenidos se pudo observar que la permitividad eléctrica no afecta a la respuesta de la impedancia del SPAT en bajas frecuencias, mientras que en altas frecuencias se observó que entre mayor sea el valor de la permitividad, la impedancia del SPAT presenta una variabilidad muy alta, pero ningún patrón típico de comportamiento.

#### **6.1.6 Análisis de la mejora en el diseño del sistema de puesta a tierra desde una perspectiva de alta frecuencia**

Como se conoce, el sistema de puesta a tierra debe presentar una baja impedancia para poder conducir hacia tierra la energía eléctrica que podría producir daño a las personas o a los equipos; esto se cumple perfectamente para bajas frecuencias mediante el diseño tradicional del SPAT, pero en altas frecuencias el valor de la impedancia del sistema de puesta a tierra presenta valores que pueden ser muy elevados y no son considerados en los modelos tradicionales, pudiendo así afectar el correcto funcionamiento del SPAT.

Mediante la comprensión del comportamiento de la impedancia del SPAT en altas frecuencias frente a la variación de algunos parámetros como son: la resistividad, permitividad eléctrica, permeabilidad magnética, longitud y radio del electrodo, entre otros, se puede tratar de establecer un equilibrio entre su comportamiento en altas y bajas frecuencias logrando así mejorar el diseño del SPAT. Mediante los resultados mostrados anteriormente se pueden observar ciertas peculiaridades, especialmente el comportamiento de la impedancia del SPAT al variar la longitud de electrodo, ya que se observa que en altas frecuencia el incremento de la impedancia es menor cuando el electrodo del SPAT sea más pequeño; de esta manera, el valor de la impedancia de un electrodo muy grande puede ser mayor que la de un pequeño en altas frecuencias. Para ilustrar de mejor manera lo mencionado anteriormente, se procede a implementar un ejemplo explicativo hipotético para una puesta a tierra a una profundidad de 1m, para un suelo de resistividad de  $100 \Omega\text{m}$ , permeabilidad y permitividad relativa de 2.5, en el cual se empleará un electrodo tipo horizontal de un radio de 0.1 cm y una longitud de 5,10, 20 y 40 m respectivamente, Los resultados obtenidos mediante el programa desarrollado se muestran en la Figura 66 y adicionalmente son tabulados en la Tabla 11.

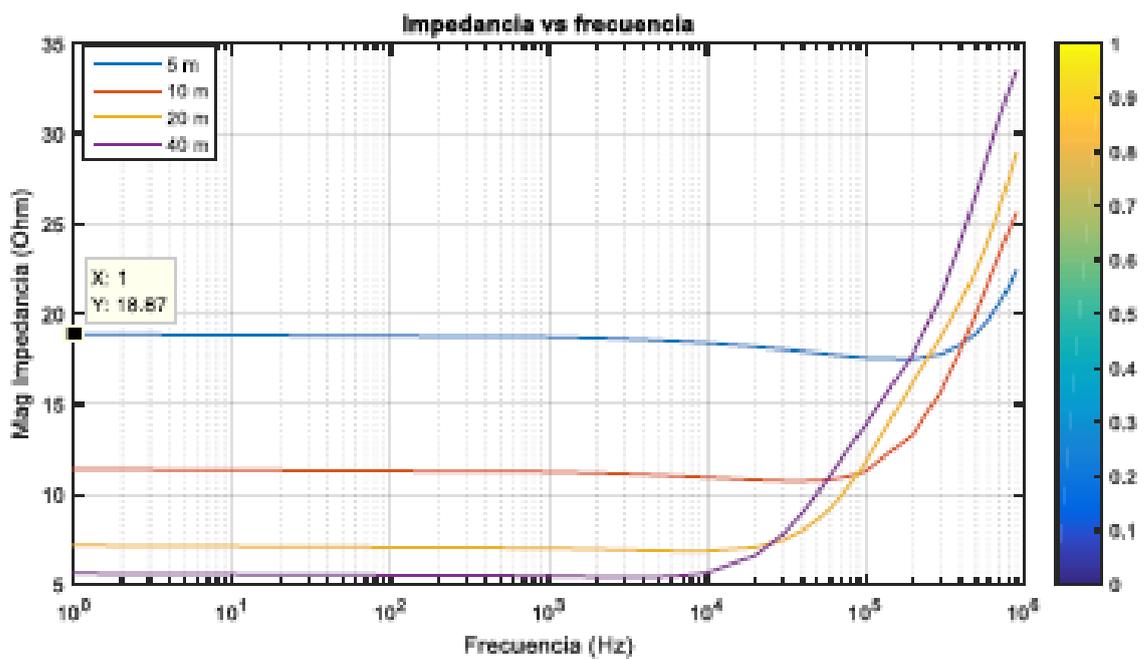


**Figura 65. Impedancia en función de la frecuencia variando longitud del electrodo (Ejemplo explicativo  $r=1$  cm)**

**Tabla 12. Resultados de simulación ejemplo explicativo  $r=1$  cm**

Z [ohm]				
Frecuencia [Hz]	l=5m	l=10 m	l=20m	l=40m
1	21.4999529	13.4763144	9.13555453	6.77089537
10000	20.9997791	13.0061001	8.84470399	7.78759962
20000	20.8040216	12.8739267	9.12008394	10.4781775
30000	20.6635868	12.8230274	9.63770708	13.1951455
40000	20.5536475	12.8250965	10.3192322	15.4444276
50000	20.4643995	12.8678742	11.1093004	17.2245104
60000	20.390718	12.9442475	11.9645296	18.6581453
70000	20.3294991	13.0493903	12.8509397	19.8614817
80000	20.2786803	13.1796912	13.7426851	20.9185503
90000	20.2368001	13.3322635	14.6209102	21.8850487
100000	20.2027717	13.5046926	15.472567	22.796554
200000	20.1683963	15.9512811	21.866759	31.1464092
300000	20.5041199	18.9522992	25.6213504	38.36301
400000	21.0855333	21.8978473	28.4559138	43.7662543
500000	21.8479138	24.5448034	31.029412	47.5415356
600000	22.7474839	26.8387165	33.5335824	50.146765
700000	23.7509601	28.8074659	36.0032542	51.9698207
800000	24.8315758	30.5058421	38.4231565	53.2782465
900000	25.9672358	31.9907607	40.7658782	54.2458042
1000000	27.1395198	33.3120483	43.005754	54.9840981

Como se observa en la figura 65, en baja frecuencia la mejor opción para la puesta a tierra sería el electrodo de 40 m, con un valor promedio de impedancia de 7 ohm aproximadamente; pero en altas frecuencias cambia, siendo la mejor opción el electrodo de 5 m con una impedancia máxima de 55 ohm aproximadamente a una frecuencia de 1 MHz. Si este caso se aplicara a una estructura de línea de transmisión donde la resistencia permitida es inferior a los 20 ohm , se podría usar el electrodo de 5 m que presenta una impedancia aproximada de 21.5 ohm en bajas frecuencia dando un ajuste a dicho valor de impedancia mediante la variación del radio del electrodo el cual permite básicamente realizar un desplazamiento vertical de las curvas mostradas en la figura 65. Para ilustrar lo mencionado se procede a realizar el mismo ejemplo mostrado anteriormente, pero con un radio de 2 cm. Los resultados obtenidos son mostrados en la figura 66.



**Figura 66. Impedancia en función de la frecuencia variando longitud del electrodo (Ejemplo explicativo  $r=2$  cm)**

Como se observa en la figura 66, la impedancia para el electrodo de 5 m presenta un valor aproximado de 18.87 ohm en bajas frecuencias, satisfaciendo el valor requerido para estructuras de líneas de transmisión. Además, se puede observar que el valor de la impedancia para el electrodo de 5 m es inferior al que se presenta para el electrodo de 40 m en altas frecuencias.

De esta manera, se logra mejorar el diseño del SPAT mediante la aplicación de los resultados presentados en esta investigación, ya que además de considerar los aspectos tradicionales de bajas frecuencias, permite verificar que el valor de la impedancia en altas frecuencias pueda ser bajo, obteniendo así un funcionamiento más adecuado del SPAT ante señales que tienen elevadas frecuencias como las presentes en descargas atmosféricas.

## CONCLUSIONES

1. Mediante la implementación del modelo híbrido se logró representar al sistema de puesta a tierra mediante elementos resistivos, capacitivos e inductivos, los cuales caracterizan a los acoples existentes entre los diferentes segmentos de los electrodos del sistema de puesta a tierra, que se producen al ser sometidos a una fuente que contenga altas frecuencias.
2. Se logró desarrollar un programa computacional que permite al usuario realizar un análisis del sistema de puesta a tierra en altas frecuencias. Se comprobó la validez del programa creado mediante la comparación con un modelo simple de análisis del SPAT para altas frecuencias en el programa ATPdraw.
3. Mediante el uso del programa creado, se logró comprobar analíticamente que el valor de la impedancia del sistema de puesta a tierra en muy altas frecuencia varia, dependiendo de la geometría de los electrodos del SPAT, de la permeabilidad magnética, permitividad eléctrica, resistividad y de la longitud del electrodo.
4. Mediante los resultados obtenidos se pueden observar ciertos fenómenos que sólo ocurren en el sistema de puesta a tierra al ser analizado en altas frecuencias.
5. Se observó que, a mayor longitud del electrodo, la impedancia del sistema de puesta a tierra será mayor, esto contradice a su comportamiento en bajas frecuencias. Se logra analizar que, en altas frecuencias, entre mayor sea la permeabilidad magnética, mayor será el valor de la impedancia del SPAT, mientras que en bajas frecuencia el valor de la permeabilidad no afecta en gran medida el comportamiento del SPAT.

## RECOMENDACIONES

1. El método presentado en esta investigación se podría aplicar a futuros estudios de SPAT con diferentes configuraciones de electrodos, y de ser posible, ampliar estos criterios a mallas de puesta a tierra.
2. Una consideración adicional sería el análisis de los efectos de alta frecuencia en las torres de transmisión, ya que estas están constituidas por metales, en los cuales se producirán efectos capacitivos e inductivos, dificultando así la disipación de energía producida por las descargas atmosféricas.
3. Para mejor la exactitud en los valores obtenidos de la impedancia del sistema de puesta a tierra se sugiere emplear las integrales de Sommerfiel para la solución del cálculo de las matrices longitudinales y transversales.
4. También se logró observar que, en altas frecuencias, para valores muy bajos de resistividad, el valor de la impedancia aumenta mientras que, para resistividades de suelo muy altas, la impedancia disminuye respecto a su valor en bajas frecuencias, se puede seguir investigando sobre estos comportamientos.
5. Además, en bajas frecuencias la permitividad eléctrica no produce mayor variación en el comportamiento de la impedancia del SPAT, pero en altas frecuencias entre mayor sea la permitividad eléctrica, el comportamiento de la impedancia del SPAT presenta una gran variabilidad, pero ningún patrón típico de comportamiento, se puede tratar de realizar un incremento en las frecuencias para ver el comportamiento de la permitividad.
6. De acuerdo a los resultados obtenidos en este trabajo se pueden mejorar los diseños del SPAT mediante la variación de los parámetros geométricos y eléctricos del mismo (resistividad, permitividad eléctrica, permeabilidad magnética, longitud y radio del electrodo, entre otros), tratando de obtener el valor más bajo posible para la impedancia del SPAT en altas frecuencias, considerando, al mismo tiempo, que se cumpla con los valores de las normas ya establecidas en bajas frecuencias.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ✓ C. Crisóstomo, "Sistema puesta a tierra menor a 02 ohmios para protección de equipos electrónicos, contra descargas eléctricas, en entidades financieras," Tesis de grado, Facultad de ingeniería electrónica-sistemas, Universidad Nacional de Huancavelica, Perú, 2014. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.unh.edu.pe/bitstream/handle/UNH/787/TP%20%20UNH%20ELEC T.%200024.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- ✓ C. G. Sánchez, "Eficiencia a Impulso de sistemas de puesta a tierra," Tesis doctoral, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Departamento de Estudios Electroenergéticos, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa clara, 2016.
- ✓ D. Mukhedkar, M.M.B. Narayanan, S. Parameswaran, y M, Ramamoorthy, "Transient Performance of Grounding Grids," IEEE Power Engineering Review., vol. 9, nº 10, pp. 48-48, oct. 1989.
- ✓ E. D. Sunde, Earth Conduction Effect in Transmission System, New York: Dover, 1968.
- ✓ F. C. Ospina, Tierras, Soporte de la seguridad eléctrica., Tercera ed., Bogotá: ICONTEC, 2006.
- ✓ F. S. Sinchi, "Diseño y determinación de sistemas de puesta a tierra mediante pruebas de campo con elementos comunes utilizados en la región, incluyendo gem y electrodo químico," Tesis ingeniería, Carrera de ingeniería eléctrica, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/14487/5/UPSC007132.pdf>.

- ✓ GAMMA – Aisladores Corona, «Características de las descargas atmosféricas y su efecto sobre las líneas de transmisión,» GAMMA, 15 abril 2011. [En línea]. Disponible en: <http://gamma.bigdev.xyz/caracteristicas-las-descargas-atmosfericas-efecto-las-lineas-transmision/>. [Último acceso: 02 septiembre 2019].
- ✓ H. D. Gómez y E. Velilla Modelación de puestas a tierra para evaluación de sobretensiones transitorias, 28 ed., Tesis de grado, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Antioquia, Colombia, 2002, p. 139.
- ✓ H. Melchor, “Homogeneidad e isotropía en el universo,” Física: enseñanza y curiosidades, 11 septiembre 2017. Disponible en: <http://fisicastaqueteaburras.blogspot.com/2017/09/homogeneidad-e-isotropia-en-el-universo.html>.
- ✓ J. A. Martínez-Velasco, Power System Parameter Determination, New York: CRC Press, 2010.
- ✓ J. M. Aller, “Diseño de sistemas complejos de puesta a tierra,” Tesis doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid, España, 1993.
- ✓ J. Montaña, Teoría De Puestas a Tierra, Barranquilla (Colombia): Editorial Universidad Del Norte, 2011.
- ✓ L. Á. Gamboa, "Mejoramiento de Puesta a Tierra en la Subestación de Transformación de la Compañía Minera Quiruvilca S.A., Santiago de Chuco, La Libertad," Tesis de grado, Facultad de ingeniería, Universidad César Vallejo, Perú, 2018. [En línea]. Disponible en: [http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/UCV/26366/avila\\_gl.pdf?sequence=1 &isAllowed=y](http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/UCV/26366/avila_gl.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

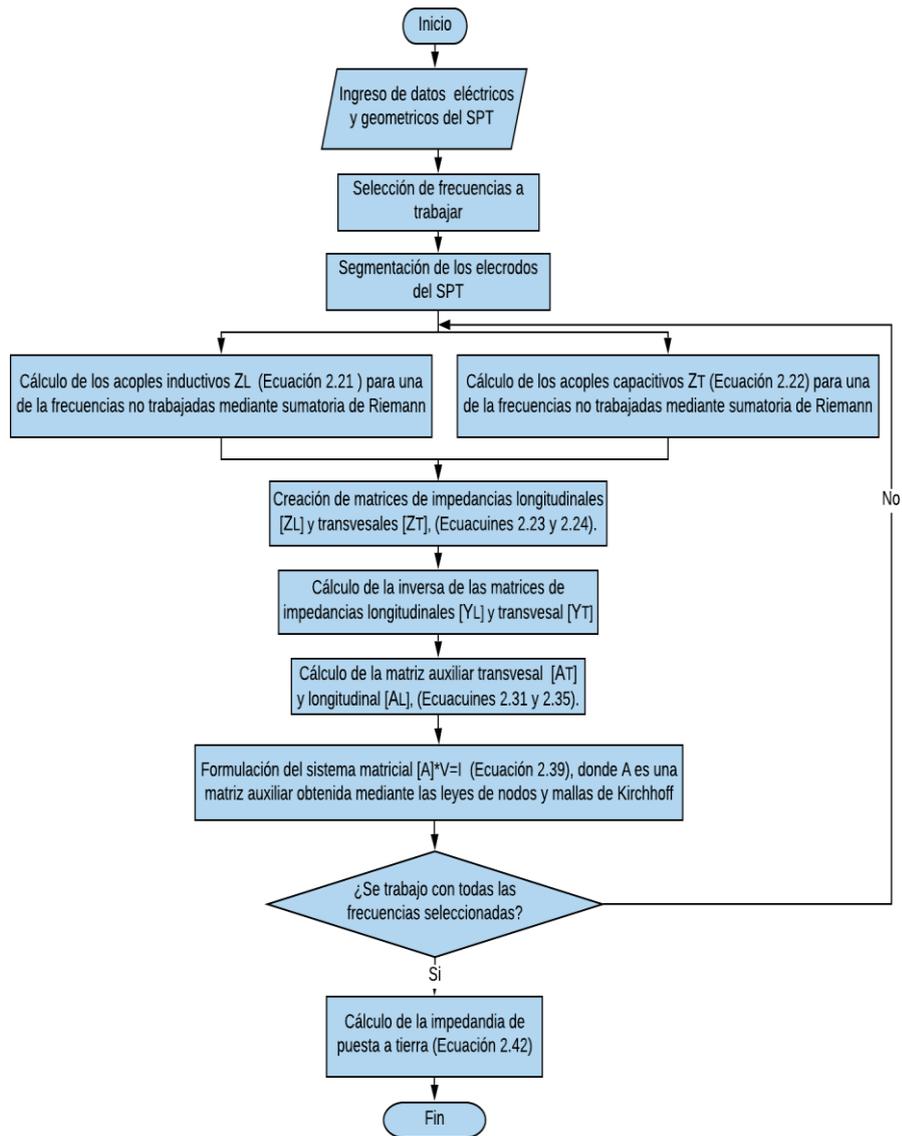
- ✓ L. Grcev y M. Popov, "On high-frequency circuit equivalents of a vertical ground rod," IEEE Transactions on Power Delivery., vol. 20, nº 2, pp. 1598-1603, April. 2005.
- ✓ M. Huerte, "Sistema de puesta a tierra y protección para sistemas de telecomunicaciones," Tesis de grado, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, 2008. [En línea]. Disponible en: [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_0214\\_EO.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0214_EO.pdf)
- ✓ M. Loboda, D. Mukhedkar, y R. Kosztaluk, "Experimental Study of Transient Ground Impedances," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vols. PAS-100, nº 11, pp. 4653 - 4660, nov. 1981.
- ✓ N. O. Blancas, "Minimización del efecto de acoplamiento," Tesis de grado, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Nacional del Centro del Perú, Perú, 2010. [en línea]. Disponible en: <http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/3599/Ordo%c3%b1ez%20Blancas.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- ✓ R. Guzmán, J. Gómez, Y. Peña, "Diseño del sistema de puesta a tierra de la Universidad de la Costa aplicando las reglamentaciones vigentes," tesis de grado, Facultad de ingeniería, Universidad de la Costa, Colombia, 2012. [En línea]. Disponible en: <https://docplayer.es/28357898-Diseno-del-sistema-de-puesta-a-tierra-de-la-universidad-de-la-costa-aplicando-las-reglamentaciones-vigentes-rafael-daza-guzman.html>
- ✓ S. Martínez, "Objetivos de un Sistema de puesta a tierra," Sistemapuestatierra, 11 julio 2009. [En línea]. Disponible en: <http://sistemapuestatierra.blogspot.com/2009/07/objetivos-de-un-sistema-de-puesta.html>. [Último acceso: 21 octubre 2019].

# ANEXO

## ANEXO A

### ALGORITMO DEL PROGRAMA IMPLEMENTADO

Se procede a mostrar el algoritmo realizado en la implementación de modelo híbrido para el análisis de sistema de puesta a tierra en función de frecuencia



## ANEXO B

Manual del programa para analizar la impedancia del sistema de puesta a tierra en altas frecuencias

1.- Ingresar en la parte que indica la figura todas las coordenadas de los puntos de inicio, final o unión de los electrodos como una matriz en la cual las columnas son dimensiones "x", "y" y "z" y se debe tomar en cuenta que el plano "xy" representa la superficie de la tierra. Presiones en ingresar.

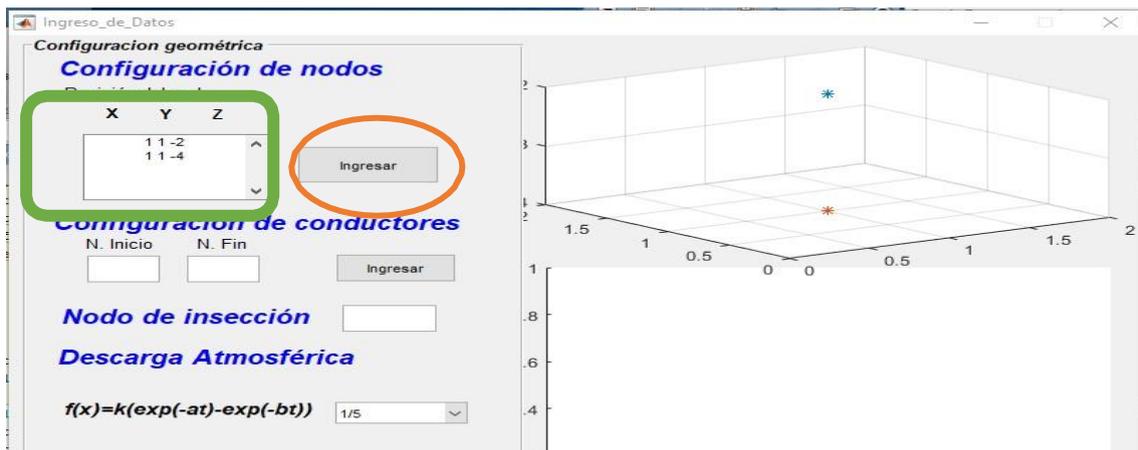


Figura 1. Coordenada de los extremos de los electrodos del SPAT

2.- Ingresar de que punto a que punto están conformados los electrodos del SPAT considerando a la fila de la matriz ingresada en el paso 1 es el número del nodo. Posteriormente presionar en ingresarlos. Realizar el paso hasta que quede configurado la geometría de los electrodos del SPAT.

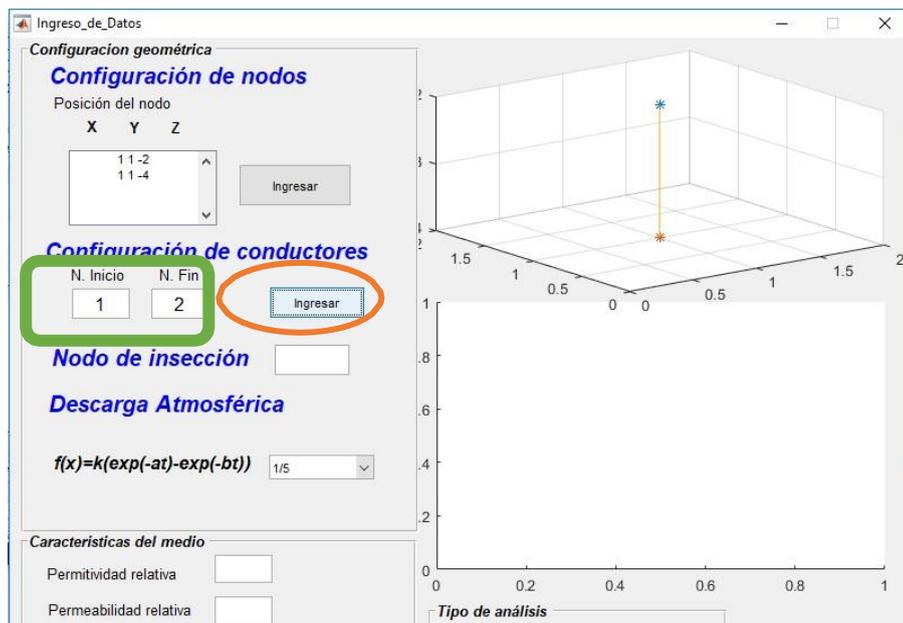


Figura 2. Unión de las coordenadas

3.- Ingresar la fila del nodo en el que se inserte la señal corriente. Tomar en cuenta que el número del nodo de inserción es el de la fila de la matriz ingresada en el paso 1.

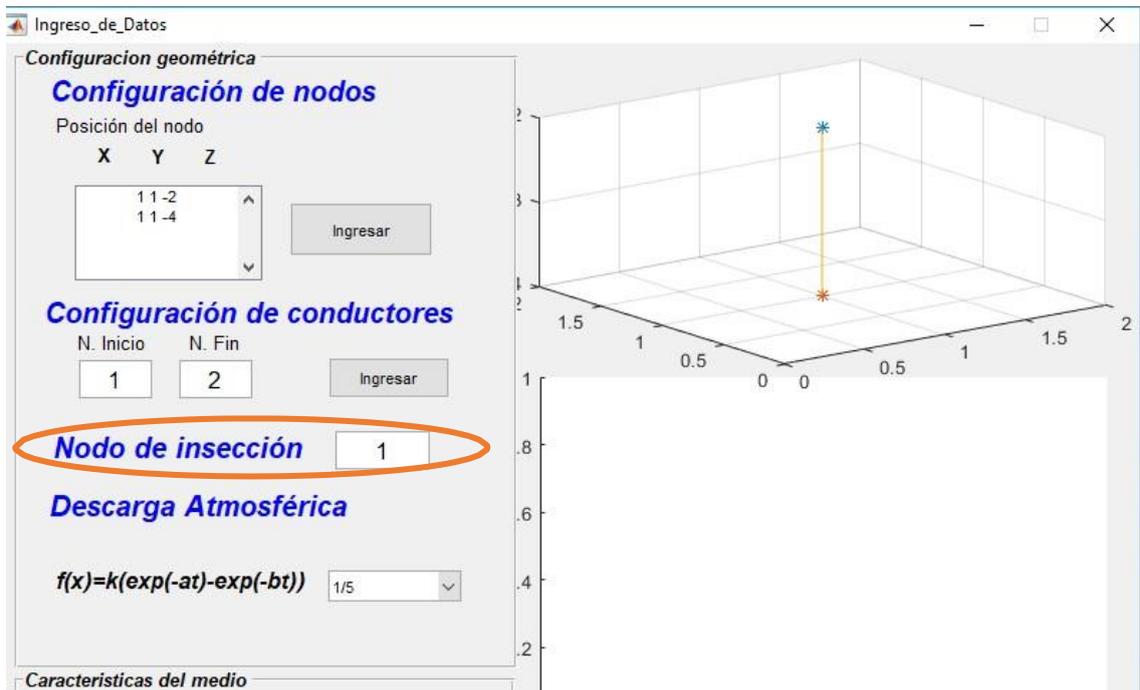


Figura 3. Nodo de inserción.

4.- Seleccionar el tipo de análisis a realizar ya sea para “Descargas atmosféricas” o “Barrido de frecuencias”.

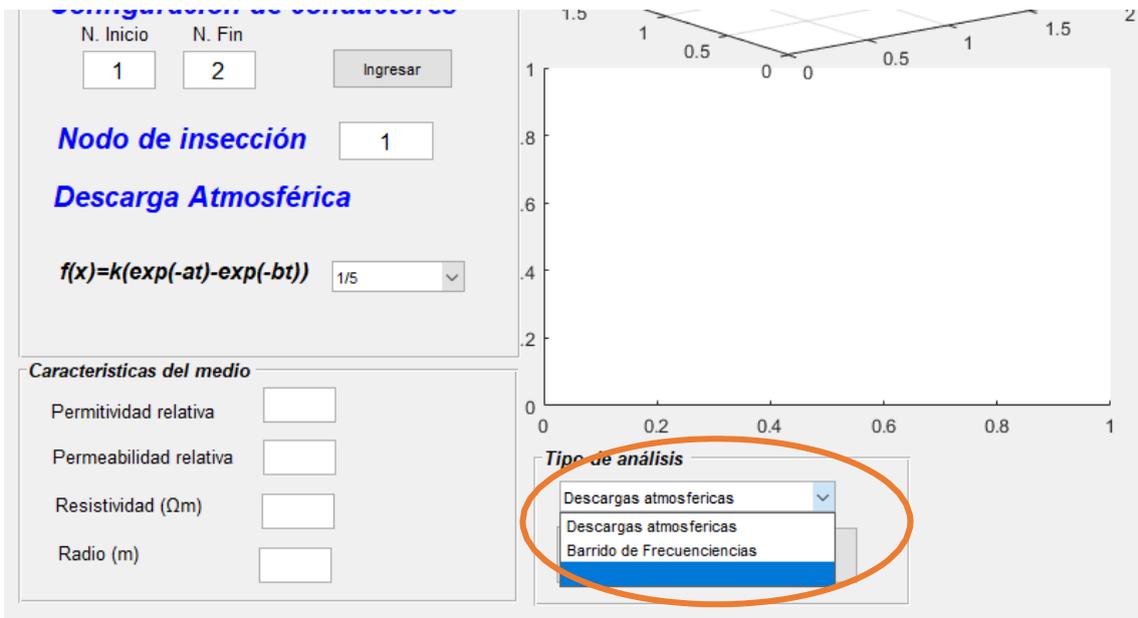


Figura 4. Selección tipo de análisis.

## Descargas Atmosféricas

4.1.- Escoger una de las señales tipo impulso normalizadas.

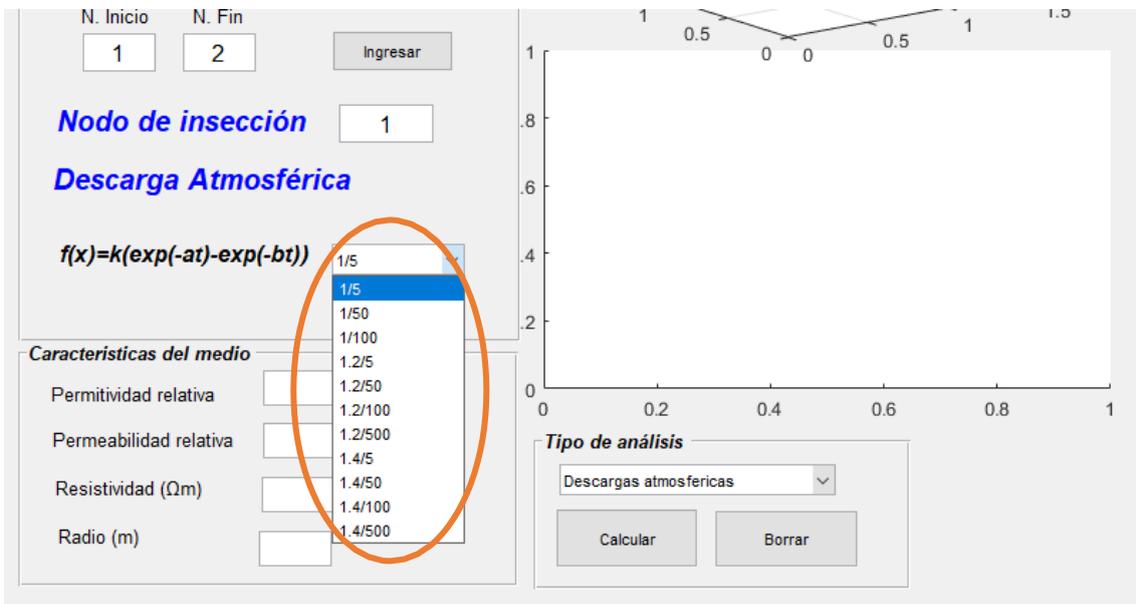


Figura 5. Selección señal tipo impulso normalizada.

## Barrido de frecuencias

4.2.- Se deberá ingresar la frecuencia en la cual desea que inicie y finalice el análisis, así como también el intervalo en que se desea que se incremente hasta el valor de la frecuencia indicado como final o se puede el modo automático en el que tiene una serie de frecuencias prescritas.

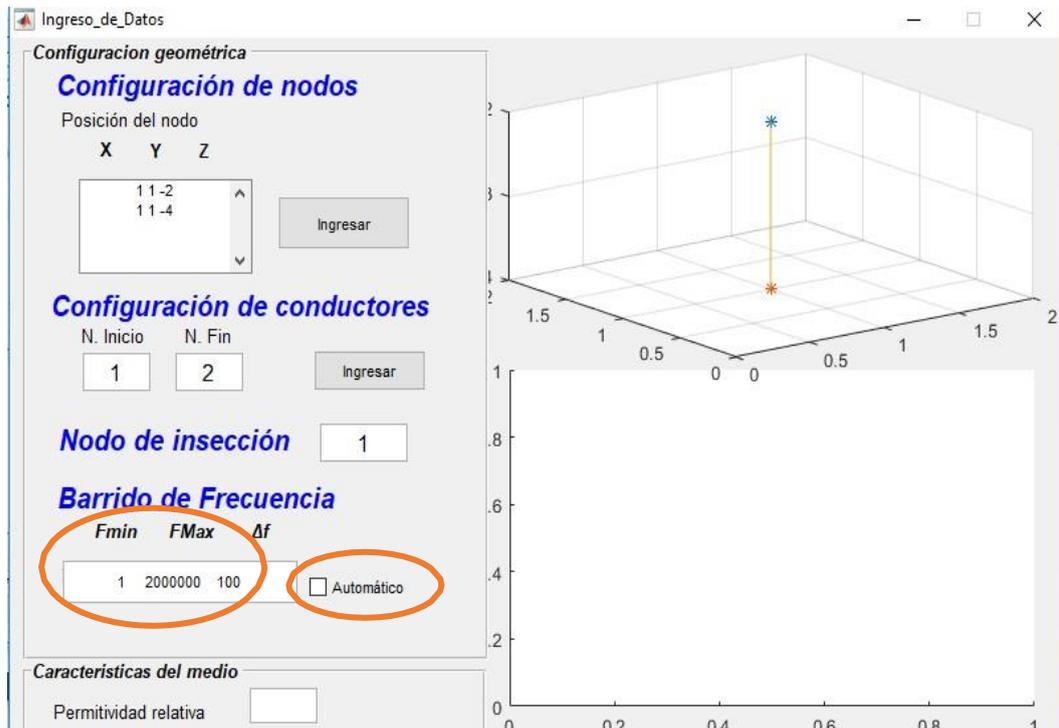


Figura 6. Configuración realizar un barrido de frecuencia

5.- Ingresar los valores de resistividad, permitividad relativa, permeabilidad relativa y radio en las unidades que están indicas.

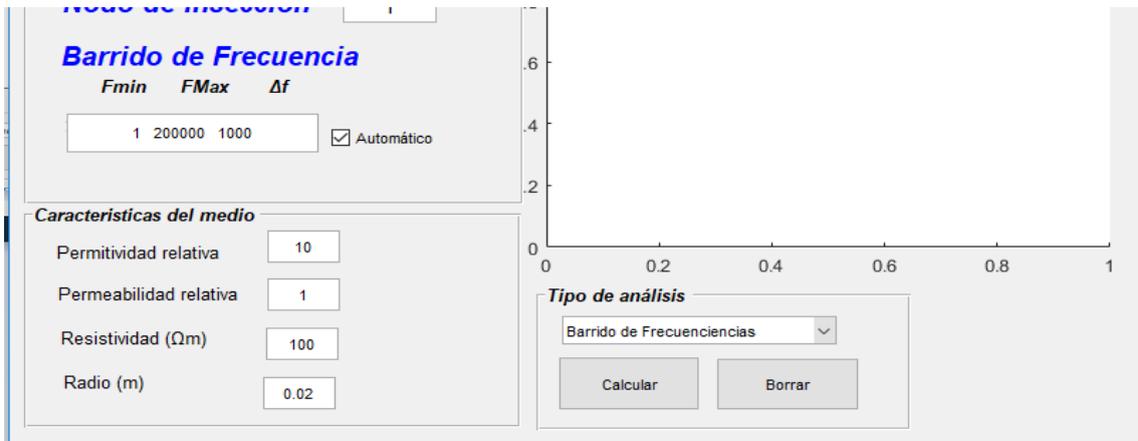


Figura 7. Características de medio.

6.- Presionar el botón de calcular.

7.-Si se desea realizar un nuevo estudio de caso se puede presionar en el botón de “Borrar”.

**Nota:** La configuración de electrodos deben ser lineal, o arreglos de cuadriláteros que sean paralelos a los ejes. El programa finalizará presentando la gráfica de la magnitud de la impedancia en función de la frecuencia, adema guardará estos valores en un Excel en la carpeta en la que se encuentra en programa con en nombre de “resultado”.

## ANEXO C

Programa para calcular los parámetros usados en el ATPdraw

```
%% Calculo de resistencias, capacitores e inductores %%

1. sel=input('vertical 1, horizontal 2 = ');
2. ra=input('Ingrese el radio (m) = ');
3. resis=input('Ingrese la resistividad (Ohm por m)= ');
4. permitividad=(8.8541878176*(10^-
12))*input('Ingrese la permitividad relativa = ');
5. permeabilidad=(4*pi*(10^-7))*input('Ingrese
la permeabilidad relativa = ');
6. l=input('Ingrese longitud (m) = ');
7. n=input('Ingrese la division = ');
8. if (sel==1)
9.     (.....PROPIEDAD DEL AUTOR.....)

10.     h=input('Ingrese profundidad (m) = ');
14.     R=(resis*n/(pi*l))*(log(2*l/sqrt(2*h*ra))-1)

15.     C=(pi*permitividad*l/n)/(log(2*l/sqrt(2*h*ra))-1)
16.     L=(permeabilidad*l/(2*pi*n))*(log(2*l/sqrt(2*h*ra))-1)
17. else
18.     disp('Selección incorrecta');
19. end
```