

Evaluación del impacto del uso de suelo artificial tipo gel en la respuesta dinámica de un electrodo vertical de puesta a tierra

Autor:
Rubén Valenzuela Arriagada

Profesores patrocinadores:
Dr. Johny Montaña Chaparro
Dr. Alejandro Angulo

Memoria de Titulación para optar al Título de Ingeniero Electricista

en el

Departamento de Ingeniería Eléctrica
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

Valparaíso, Chile

2 de octubre de 2023

"La paciencia es amarga, pero sus frutos son dulces"

— Jean Jacques Rousseau

Para los familiares y amigos que me acompañaron en el proceso . . .

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi familia, que sin su apoyo incondicional, no estaría escribiendo esto. Especialmente a mis padres, que fueron mis primeros educadores.

A mis amigos de Quillota, por ayudarme a despejarme de mis estudios para volver con la mente fresca y despejada para poder seguir estudiando.

A mis compañeros de universidad, muchos de los cuales los considero mis amigos, que nos hemos acompañado en este proceso que muchas veces vimos interminable, compartiendo victorias y derrotas.

A los chicos de pañol C.C.C.C y a mi compañero de cubículo Daniel, que siempre estuvieron dispuestos a ayudarme en la parte técnica de esta memoria y sin ellos no hubiera sido posible desarrollarla.

A todos los profesores que me trajeron hasta aquí con sus enseñanzas, especialmente a mi profesor guía, por su orientación y apoyo durante el proceso de la memoria. Siempre estuvo disponible para responder a mis preguntas, brindarme retroalimentación y ayudarme a mejorar mi trabajo. Sin su ayuda, no habría podido completar este proyecto.

A todos, muchas gracias.

Resumen

Esta memoria busca contribuir al estado del arte en el área de puestas a tierra, presentando resultados empíricos y teóricos, complementando la memoria previa realizada por Ignacio Abarca (Abarca, 2016) y completando la memoria iniciada por Cristian Antilao.

El objetivo principal de esta memoria es analizar el comportamiento de la puesta a tierra con el uso de suelos artificiales frente a excitaciones de tipo impulso. Esto se debe a que la puesta a tierra es fundamental para garantizar la seguridad de las personas y equipos en las instalaciones eléctricas.

El suelo artificial seleccionado fue el Erico GEM, debido a su disponibilidad en el mercado chileno. A lo largo de la memoria, se referirá al Erico GEM como GEM, gel o material de refuerzo de puesta a tierra.

Se estudiaron tres configuraciones. Varilla simple, que corresponde al escenario donde no se aplica el Erico GEM. Varilla con un tercio del GEM, donde solo un tercio de la parte de la varilla sumergida en el terreno está cubierta con GEM, esto corresponde a la parte superior. Varilla completamente cubierta con gel, donde toda la parte de la varilla que está sumergida en el terreno está cubierta con gel.

Durante el proceso de desarrollo de la memoria, se realizó una investigación en la literatura existente para estudiar modelos teóricos de simulación y modelos experimentales que permitieran obtener los datos empíricos necesarios.

Se implementó un modelo de escala reducida en el laboratorio de alta tensión de la Universidad Técnica Federico Santa María para desarrollar la parte experimental. Para la simulación de la puesta a tierra, se utilizó el modelo electromagnético híbrido para el caso de la varilla simple y el método de elementos finitos para los casos en que se usaba el GEM.

Las simulaciones entregaron porcentajes de reducción constantes en todo el rango de frecuencias siendo de 34 % para la varilla con 3 [cm] de gel, lo cual es cercano al 31.2 % obtenido en DC en la memoria (Abarca, 2016) y 53 % para la varilla con 10[cm] de gel. En cambio, experimentalmente se observaron variaciones en el porcentaje de reducción a lo largo de la frecuencia, pero presentando una tendencia creciente, lo porcentajes de reducción iniciales identificados son de 40 % para la varilla con 3 [cm] de gel, lo cual está dentro del rango de las mediciones realizadas en la memoria previa (Abarca, 2016) y 53 % para la varilla de 10 [cm].

La aplicación de suelos disminuye efectivamente la impedancia de puesta a tierra, presentando beneficios adicionales como la disminución del ruido en las mediciones. Permitiendo una mejor lectura de la realidad.

Se propone como tema de investigación de continuación, el estudio de la eficacia del producto GEM en altas frecuencias con otras configuraciones de electrodos de puesta a tierra.

Índice general

Índice general IX

Índice de figuras XI

Índice de tablas XIII

1 Introducción 1
1.1. Contexto . . . 1
1.2. Objetivos . . . 2

2 Marco teórico 3
2.1. Estado del arte . . . 3
2.2. Puesta a tierra . . . 4
2.3. Impulso tipo rayo . . . 6
2.4. Propiedades del suelo . . . 8
2.5. Tratamiento del suelo de puesta a tierra . . . 11
2.6. Transformada rápida de Fourier . . . 12
2.7. Ecuaciones de Maxwell . . . 13
2.8. Modelo de escala reducida . . . 16
2.9. Modelo electromagnético Híbrido . . . 17
2.10. Método de elementos finitos . . . 22
2.11. MATLAB . . . 22
2.12. Gmsh + GetDp . . . 23

3 Marco metodológico 25
3.1. Instrumentación y materiales . . . 25
3.2. Resistividad del agua en continua . . . 26
3.3. Construcción de las varillas con gel . . . 27
3.4. Implementación del modelo de escala reducida . . . 27
3.5. Generación y medición . . . 28
3.6. Procesamiento de los datos medidos . . . 31

4 Simulación 33
4.1. Determinación de los parámetros del agua . . . 33
4.2. Simulación de la varilla sin gel . . . 34
4.3. Simulación de la varilla con gel . . . 36

5 Resultados y análisis 39
5.1. Resultados de las mediciones . . . 39
5.2. Resultados de las simulaciones . . . 43
5.3. Porcentaje de reducción de puesta a tierra . . . 47
5.4. Comparación entre los resultados de la simulación y los experimentos . . . 48

5.5. Limitaciones presentadas 51

6 Conclusión **53**
Referencias 56

A Fotografías **61**
A.1. Fotografías de la instrumentación y materiales 61

B Configuraciones del Osciloscopio **69**

C Código MATLAB **71**
C.1. Código de MATLAB para la impedancia experimental 71

Índice de figuras

2.1. Parámetros de una onda de impulso. (Da Silva Ferraz, Oliveira, de Oliveira, y Calixto, 2006). . . . 7
2.2. Circuitos básicos de una etapa para la generación de impulsos de tensión. (Schon, 2013). . . . 7
2.3. Diagrama de principio de un generador con almacenamiento de energía capacitivo para la generación de impulsos de corriente exponenciales. (Schon, 2013). . . . 8
2.4. Ejemplo de interfaz entre dos materiales diferentes.(Ruehli y cols., 2017). . . . 15
2.5. Configuración física de un problema típico tratado por MEH. (Visacro y Soares, 2005). . . . 18
2.6. Acoples entre segmento emisor j y receptor i. (Montaña, Duarte, Sarmiento, Marín, y Torres, 2006). . . . 20

3.1. Circuito implementado en el laboratorio. . . . 28
3.2. Esquemas de las varillas 29
3.3. Circuito de impulso 30
3.4. Espinterómetros. . . . 30
3.5. Esquema del circuito implementado en el laboratorio. . . . 31

4.1. Resultados de los parámetros del agua 34
4.2. Mallado de la simulación para la varilla con gel. . . . 37

5.1. Tensión y corriente para la varilla simple. . . . 40
5.2. Tensión y corriente para la varilla con 3 [cm] de gel. . . . 40
5.3. Tensión y corriente para la varilla con 10 [cm] de gel. . . . 41
5.4. Mediciones experimentales. . . . 42
5.5. |Z| según interpolación. . . . 44
5.6. Comparación de las simulaciones con MEH Y MEF para la varilla simple. . . . 44
5.7. Comparación de las simulaciones de la varilla con 3 [cm] de gel. . . . 45
5.8. Comparación de las simulaciones de la varilla con 10 [cm] de gel. . . . 45
5.9. Impedancia de puesta a tierra a escala real. . . . 46
5.10. Reducciones de |Z| de puesta a tierra debido al gel en escala reducida. . . . 47
5.11. Comparación entre experimental y simulación para la varilla simple. . . . 49
5.12. Comparación entre experimental y simulación de la varilla con 3 [cm] de gel. 49
5.13. Comparación entre experimental y simulación de la varilla con 10 [cm] de gel. 50

A.1. Fuente Continua de alta tensión 61
A.2. Osciloscopio 61
A.3. Circuito de impulso 62
A.4. Pinza de voltaje 62
A.5. Resistencia shunt de corriente 63
A.6. Recipiente cilíndrico 63

A.7. Moldes para las varillas con gel 64
A.8. Conductímetro 64
A.9. Producto Erico GEM 65
A.10.Electrodo vertical 65
A.11.Electrodos con gel 66
A.12.Sistema de puesta a tierra a escala reducida 67

B.1. Configuraciones del Osciloscopio 69

Índice de tablas

2.1. Relación entre valores a escala reducida y a escala real. (Montaña, Angulo, Torres, y Valenzuela, 2023) 18

3.1. Características del osciloscopio 26
3.2. Características de la punta de tensión 26

4.1. Valores de los parámetros para la simulación de la varilla simple 35
4.2. Datos simulados de la varilla con gel 38

5.1. Resultados de la resistividad del agua en DC 39
5.2. Reducción de |Z| en bajas frecuencias debido al gel. 48

6.1. Rangos de frecuencias de los tramos 54
6.2. |Z| experimental 54
6.3. |Z| simulación 54
6.4. Porcentajes de reducción de |Z| de puesta a tierra 54
6.5. Diferencias Simulación-Experimental 55

Acrónimos

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers

MATLAB MATrix LABoratory

MEF Método de elementos finitos

MEH Modelo electromagnético híbrido

NCh Norma chilena

FFT Transformada rápida de Fourier (Fast Fourier Transform)

DFT Transformada de Fourier discreta

UTFSM Universidad Técnica Federico Santa María

Capítulo 1

Introducción

En este primer capítulo de introducción se establecerá primero el contexto en el cual se sitúa la memoria, señalando la importancia del tema en el área de la ingeniería eléctrica. Posteriormente se indicará los objetivos que se buscan cumplir con el desarrollo de este trabajo.

1.1. Contexto

La energía eléctrica, ha tomado cada vez más relevancia para la humanidad, en un principio solo se ocupaba para iluminar las noches oscuras, pero en la actualidad, el acelerado desarrollo de la tecnología ha conllevado a un aumento considerable del uso y dependencia de este tipo de energía. Debido a la masificación y la exposición cotidiana de este tipo de energía, es que han surgidos diversos elementos tantos tangibles (aparatos de protección) como intangibles (normas) que permiten el uso seguro de este tipo de energía.

La puesta a tierra es un componente fundamental de seguridad en las estructuras eléctricas. Permite crear un camino alternativo para la corriente eléctrica en caso de falla, lo que evita que la corriente fluya a través de personas o equipos, lo que podría causar lesiones o daños. Por esta razón, las puestas a tierra son tan importantes en los proyectos eléctricos.

El presupuesto de un proyecto es un factor importante que determina la viabilidad de este. Existen un gran número de proyectos que no han podido ser ejecutados debido al valor monetario que implican.

En las construcciones eléctricas, uno de los costos a considerar es la puesta a tierra. Existen dos maneras de mejorar la efectividad de la puesta a tierra: aumentando la conductividad del terreno o el volumen del electrodo. Ambas opciones requieren de una mayor inversión.

Por lo anterior es que han aparecidos diversos métodos para mejorar la resistencia de puesta a tierra, es decir, disminuir su valor, de una forma más económica. Uno de los métodos que se ha vuelto popular en los últimos años, correspondo al tratamiento con suelo artificial, el cual consiste en reemplazar una parte del terreno por una mezcla de menor resistividad, que debe estar en contacto con los electrodos de puesta a tierra.

Los tratamientos del terreno con suelo artificial se suelen aplicar en terrenos que no poseen una buena conductividad, en espacios reducidos donde se deben ocupar electrodos de tamaño reducido, disminuyendo su efectividad, o en terrenos donde el suelo es corrosivo, disminuyendo la vida útil de los electrodos e incurriendo en un mayor gasto

en su mantenimiento.

A pesar de la popularidad de este método, en la literatura existente, es escasa la información sobre el comportamiento de la resistencia de puesta a tierra con suelo artificial frente a la excitación de tipo impulso.

1.2. Objetivos

El objetivo principal de este documento es entregar una evaluación sobre el uso de suelo artificial tipo gel en la impedancia de puesta a tierra de un electrodo vertical, frente a una excitación de tipo impulso. Para lograr lo anterior se establecieron los siguientes objetivos específicos.

- Revisar en la literatura existente los modelos de puesta a tierra en lo relativo al análisis de suelos artificiales en el dominio de la frecuencia, incluyendo las técnicas de simulación computacional comúnmente utilizadas en esta área.
- Evaluar el comportamiento de la impedancia transitoria de un sistema de puesta a tierra que considere un electrodo vertical, con y sin suelo artificial, y utilizando herramientas computacionales para su modelación.
- Registrar experimentalmente la impedancia transitoria de puesta a tierra de un electrodo vertical, con y sin suelo artificial, a través de un modelo de escala reducida implementado en el laboratorio de alta tensión.
- Comparar los resultados entregados por la simulación con aquellos obtenidos experimentalmente, con el fin de ajustar el modelo computacional y realizar análisis paramétrico de distintas configuraciones de sistemas de puesta a tierra que consideren suelo artificial.

Capítulo 2

Marco teórico

En el presente capitulo se abarcará sobre el estado del arte de las puestas a tierras y las bases teóricas para poder desarrollar la presente memoria.

2.1. Estado del arte

La puesta a tierra es un sistema de conductores que proporciona un punto de potencial de referencia cero y un camino de desvío para la corriente en caso de falla o impacto de rayo atmosférico. Debido a su importancia, existen muchos documentos que analizan y normalizan las características de las puestas a tierra como la Norma chilena (NCh) y la Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Algunos artículos proponen cálculos estimativos del valor de la resistencia de puesta a tierra (Committee, 1982), mientras que otros establecen valores máximos de la resistencia de las mallas de puesta a tierra a nivel nacional ((S.E.C.), 2003).

La forma más sencilla de configurar una puesta a tierra es mediante un electrodo vertical, debido a lo fácil que resulta su instalación. Existen diferentes documentos y recomendaciones que utilizan esta configuración de tipo varilla para calcular la resistencia de puesta a tierra. Por ejemplo, la IEEE ("IEEE Guide for Safety in Substation Grounding", 1976), brinda estimaciones de cálculo de este valor. Asimismo, las dimensiones necesarias para su implementación son recomendadas por la "S.E.C."((S.E.C.), 2003). Además, se han desarrollado modelos de simulación simple (Gonos, Topalis, y Stathopulos, 1999) y aplicando suelos artificiales para su estudio (Androvitsaneas, Gonos, y Stathopulos, 2014).

Las pruebas de resistencia de puesta a tierra requieren tiempo y dinero. Por lo cual es útil tener una estimación de la resistencia de puesta a tierra antes de hacer las pruebas en el terreno. Por lo anterior han surgidos distintos modelos que permitan simular el comportamiento de la puesta a tierra. En general, el modelado de redes de puesta a tierra se puede clasificar en cuatro categorías (Ramezani y Shahrtash, 2011):

1. Modelado de circuitos: Corresponde a la sustitución de todos los conductores del sistema de puesta a tierra por un circuito equivalente que contiene condensadores, inductores y resistencias agrupados con excesivas aproximaciones.
2. Método de cálculo de campos electromagnéticos: Resuelve el problema en los dominios de tiempo y frecuencia utilizando el conjunto completo de ecuaciones de Maxwell. Al realizar las menores suposiciones los procedimientos son más precisos.
3. Método híbrido: Combina el enfoque de los dos anteriores. El análisis se realiza más fácilmente en comparación con el método del campo electromagnético, pero

con menor precisión.
4. Sustitución equivalente de líneas de transmisión: Se basa en cálculos de onda viajeras. Descuida el acoplamiento electromagnético mutuo entre los conductores de puesta a tierra y posee una baja precisión.

Cada modelo posee sus ventajas y desventajas. Las cuales deben ser consideradas al momento de seleccionar una.

El comportamiento de la resistencia de puesta a tierra frente a excitaciones de tipo impulso ha sido estudiado para establecer una relación entre la impedancia de puesta a tierra y la frecuencia de excitación (Hamzehbahmani, Haddad, Griffiths, Harid, y Guo, 2016). Se han propuesto varios modelos de simulación para representar el comportamiento del sistema de puesta a tierra, entre ellos: un modelo de circuito equivalente (Gonos y cols., 1999), un modelo en FEM (Brenna, Foiadelli, Longo, y Zaninelli, 2018), un modelo en ATP-EMTP (Hao, Minfang, Zhipeng, Xianfeng, y Yunyan, 2012) y un modelo en COMSOL (Coelho y Almaguer, 2014).

Para mejorar los valores de resistencia de puesta a tierra, es decir, disminuir su valor, se ha experimentado variando la geometría del electrodo y las propiedades del terreno (Rio y Bambang, 2014). En relación con esta última viene el uso de materiales de refuerzo de puesta a tierra, lo cual ha conllevado a realizar estudios a diversos materiales, para analizar cómo afectan a las puestas a tierra. La bentonita ha sido un tema de investigación popular, de la cual se ha concluido que su resistividad dependerá, de su porcentaje de sal, agua y Ácido clorhídrico, presentando una menor resistividad para mayores contenidos de los compuestos mencionados, esta relación se observó en AC y DC. Además, se ha presentado un aumento de la resistividad de la bentonita a la frecuencia de 10 [MHz] (Rahman Noor, Anggoro Soedjarno P, y Hadi, 2021).

Hay pocos estudios sobre el impacto del uso de material de refuerzo en los sistemas de puesta a tierra frente a excitaciones de tipo impulso. En la década de 1980, Ji Liu et al. investigaron el comportamiento de impulso de los dispositivos de puesta a tierra cubiertos con material químico de baja resistividad (Liu, Ye, Zhang, y Xia, 1981). Posteriormente, se realizaron investigaciones sobre la influencia de la magnitud de la corriente de impulso, las dimensiones geométricas y la resistividad del suelo en el comportamiento transitorio de los dispositivos de puesta a tierra, ocupando distintos compuestos, como una mezcla de materiales de mejora con arena (Nor, 2006) y utilizando una especie de bentonita mejorada(Tu, He, y Zeng, 2006).

2.2. Puesta a tierra

En la norma IEEE-81 (“IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System”, 2012) se define la puesta a tierra (grounding) cómo "Tierra (Sistema de tierra). Una conexión conductora, ya sea intencional o accidental, por medio de la cual un circuito eléctrico o equipo se conecta a la tierra o a algún cuerpo conductor de dimensión relativamente grande que cumpla la función de la tierra". En su mayoría las puestas a tierras son intencionales debido a que se deben considerar en el diseño de construcción de las instalaciones eléctricas, teniendo presente las exigencias de las normas nacionales.

Otra definición de interés dentro de la norma IEEE-81, es la de impedancia de tierra (ground impedance) "La suma vectorial de resistencia y reactancia entre un electrodo, rejilla o sistema de tierra y la tierra remota.". Si bien la impedancia de un electrodo de puesta a tierra generalmente se mide en términos de resistencia porque la reactancia generalmente es insignificante con respecto al componente resistivo, el componente reacti-

vo aumenta con el tamaño de la red de puesta a tierra y especialmente cuando la red de puesta a tierra está interconectada con sistemas de cables de protección y neutros puestos a tierra, como en las grandes sub estaciones eléctricas. La determinación del componente reactivo es necesaria cuando el análisis involucra corrientes de sobretensión o de impulso. Los grandes sistemas de puesta a tierra, especialmente en áreas de baja resistividad del suelo, tendrán un componente reactivo más significativo.

Un sistema eléctrico conectado a tierra, presentan las siguientes ventajas:

- Proporcionar una impedancia lo suficientemente baja para facilitar la operación adecuada de las protecciones en condiciones de falla.
- Asegurar que seres vivos que se encuentren en las cercanías de las subestaciones no queden expuestos a potenciales inseguros, en régimen permanente o en condiciones de falla.
- Mantener la tensión del sistema dentro de límites razonables bajo condiciones de falla y asegurar que no se excedan las tensiones de ruptura dieléctrica de las aislaciones.
- Limitar la tensión a tierra sobre materiales conductivos que circundan conductores o equipos.
- Estabilizar la tensión fase a tierra en líneas eléctricas bajo condiciones de régimen permanente.
- Monitorear la aislación del sistema de suministro de potencia. Para eliminar fallas a tierra con arco eléctrico persistente.
- Asegurar que una falla que se desarrolla entre los enrollados de alto y bajo tensión de un transformador pueda ser manejada por la protección primaria.
- Proporcionar una trayectoria alternativa para las corrientes inducidas y de tal modo minimizar el ruido eléctrico en cables.
- Proporcionar una plataforma equipotencial sobre la cual pueda operar el equipo electrónico.

Dentro las múltiples ventajas de contar con una puesta a tierra, la principal ventaja y finalidad de la puesta a tierra es la seguridad. La seguridad que aporta la puesta a tierra se entrega a través de dos funciones(Procobre, 1998).

La primera forma es a través de conexiones equipotenciales, donde todas las estructuras metálicas que puedan entrar en contacto con personas se conectan mediante conductores de conexión eléctrica. Esto asegura que todas las estructuras metálicas conductoras tengan virtualmente el mismo potencial eléctrico. De esta manera, si la cubierta metálica de un equipo eléctrico entra en contacto con un conductor energizado, no se producirá una diferencia de potencial suficiente como para provocar una descarga eléctrica en una persona que toque dos partes diferentes de la estructura metálica expuesta.

La segunda función de seguridad de un sistema a puesta a tierra es que la corriente de falla, originada por una falla a tierra, pueda retornar a la fuente evitando daños a los equipos y a las personas. La impedancia del sistema tierra debe ser lo bastante baja de modo que pueda fluir suficiente corriente de falla a tierra para que operen correctamente los dispositivos de protección.

Frente a fallas convencionales que se suelen dar en las subestaciones, industrias o en los recintos domiciliarios, la mayor parte de la energía disipada en la falla será a frecuencia industrial (50/60 Hz), pero en algunas instalaciones tales como estaciones transmisoras de radio o televisión, donde se rectifica grandes cantidades de potencia o se opera bancos de condensadores, la energía estará disponible a frecuencias mayores que la industrial, con lo cual las altas frecuencias toman mayor relevancia en el diseño de sistema de puesta a tierra (Quiuchaca Cuentas y Ticona Chambi, 2018).

La puesta a tierra no solo opera en casos de falla, también cumple un rol fundamental en la operación rutinaria, como mejorar la calidad de potencia o aumentando el factor de potencia. Un caso es en los alimentadores de potencia que incluyen conexión a tierra y dispersan las corrientes residuales y corrientes armónicas al suelo del terreno, estas corrientes vuelven a la fuente formando bucles cerrados provocando diferencias de potencial, causando ruido, zumbido y posibles daños a equipos electrónicos. Por lo anterior, algunos equipos disponen de pantallas de puesta a tierra, para disminuir estos efectos (Procobre, 1998).

2.3. Impulso tipo rayo

El ser humano siempre ha tratado de imitar los fenómenos naturales, para poder disponer de mejores casos de estudios, considerando diferentes escenarios. En el área de la ingeniería eléctrica uno de los escenarios que ha sido de gran utilidad replicar, es el comportamiento que se tendrá frente a un impacto de rayo, debido al daño que pueden ocasionar a los dispositivos e instalaciones eléctricas que se encuentran más expuestas que las personas (da Silva Ferraz, Oliveira, de Oliveira, y Calixto, 2016).

El rayo se define como una descarga eléctrica transitoria de alta corriente, cuya longitud puede alcanzar kilómetros de extensión (Uman, 2012). Generalmente involucra a la nube cumulonimbus, que es una nube altamente cargada, ya sea positiva o negativamente.

Las descargas intranube son descargas zigzagueantes que se producen entre los centros de carga internos de un cumulonimbus. Son las más comunes, pero también son las más difíciles de abordar y estudiar. Por ello, la mayoría de las investigaciones se centran en las descargas de nube a tierra o tierra a nube, que son menos frecuentes, pero más peligrosas y fáciles de observar.

Se identifican tres parámetros principales para evaluar la forma de onda de un rayo: amplitud, tiempo de frente (T1) y tiempo de cola (T2). La amplitud corresponde al valor máximo de la forma de onda, el tiempo de frente es el tiempo que tarda el impulso en alcanzar su valor máximo y el tiempo de cola es el tiempo que tarda el impulso en alcanzar el 50 % de su valor máximo después del peak (da Silva Ferraz y cols., 2016). En la figura 2.1 se puede visualizar estos parámetros.

Los tiempos T1 y T2 están establecidas por las normas 62305-1(Commission, 2010b) y la IEC 60060-1 (Commission, 2010a). T1 suele ser hasta 10 $[\mu s]$, en cambio T2 puede variar entre los 10 hasta los 350$[\mu s]$.

Existen dos tipos de generadores de impulso. Los cuales se describen brevemente a continuación (Schon, 2013):

1. Generadores de impulso de voltaje: se centra en la combinación del proceso de descarga y carga de condensadores en paralelo y en serie con resistencias, ver figura 2.2, para hacer la forma de onda deseada.

2. Generador de impulso de corriente: Utiliza la respuesta de un sistema RLC, ver figura 2.3, para simular el comportamiento transitorio de la corriente de impulso.

El generador de impulso se puede utilizar para analizar el comportamiento transitorio de las puestas a tierra. Diversos estudios indicados en (da Silva Ferraz y cols., 2016) han demostrado que cuando el suelo se somete a corrientes de alta frecuencia, presenta un comportamiento diferente al de bajas frecuencias. Dado que las descargas atmosféri-

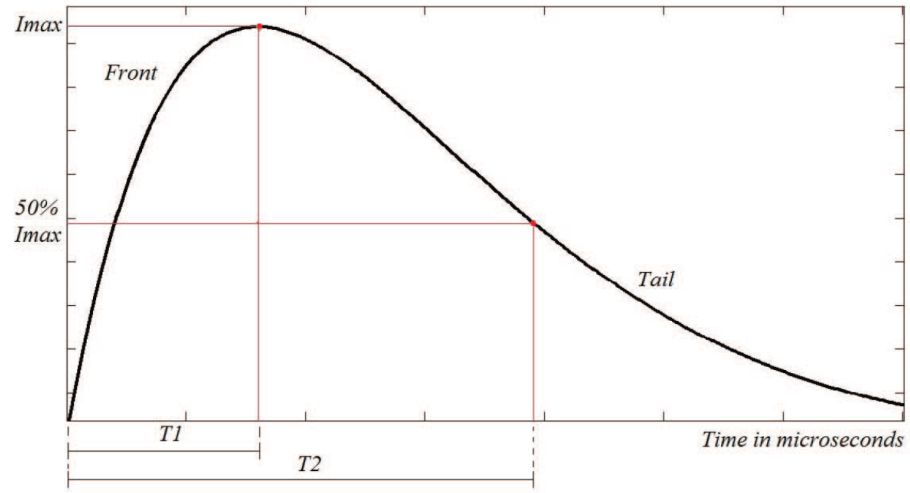


Figura 2.1: Parámetros de una onda de impulso. (Da Silva Ferraz, Oliveira, de Oliveira, y Calixto, 2006).

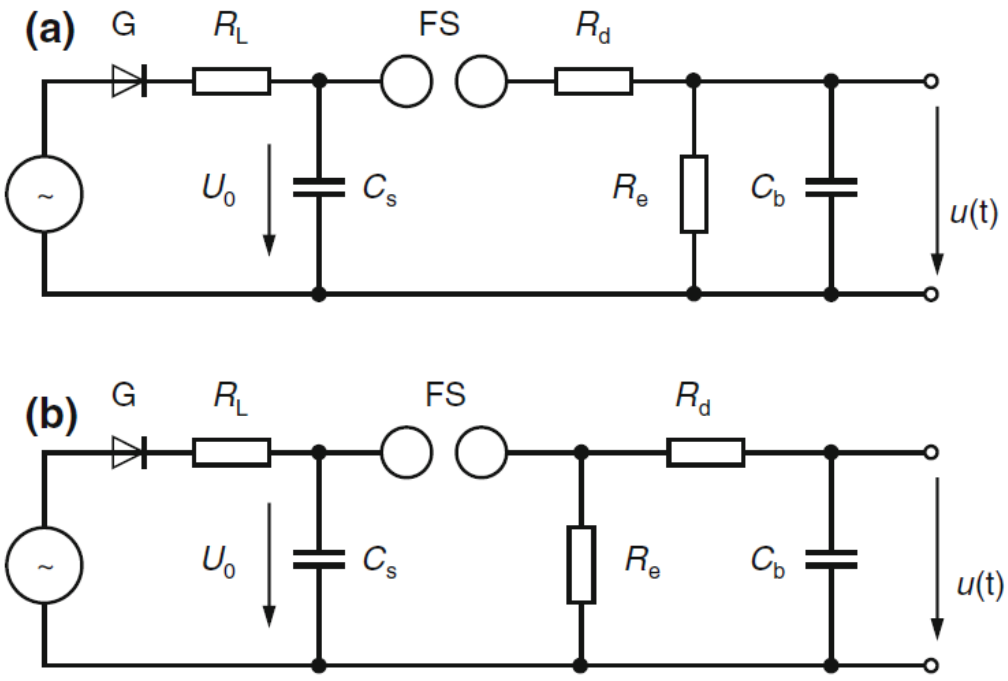


Figura 2.2: Circuitos básicos de una etapa para la generación de impulsos de tensión. (Schon, 2013).

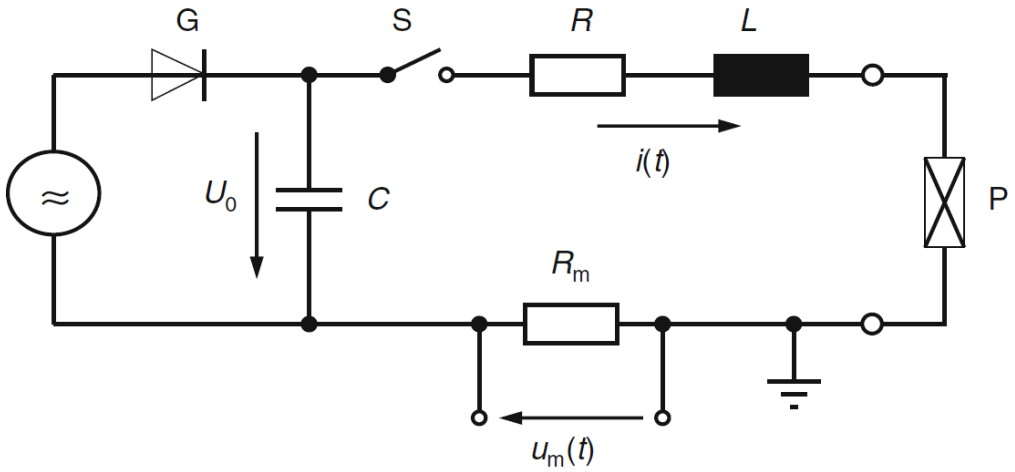


Figura 2.3: Diagrama de principio de un generador con almacenamiento de energía capacitivo para la generación de impulsos de corriente exponenciales. (Schon, 2013).

cas presentan un comportamiento transitorio que solo dura microsegundos, sí un proyecto de sistema de puesta a tierra no toma en cuenta estos cambios en el comportamiento de los parámetros del suelo, aumenta la posibilidad de falla (Visacro y Rosado, 2009).

2.4. Propiedades del suelo

Las propiedades eléctricas de los constituyentes del suelo son de gran importancia, particularmente la resistividad del suelo. La resistividad del suelo, expresada en ohmios-metros, es la resistencia de una unidad cúbica de suelo medida entre superficies opuestas. La resistividad es uno de los factores para determinar la resistencia de cualquier sistema de puesta a tierra (Prabhakar y Deshpande, 2014).

Otro parámetro principal es la permitividad relativa, que junto a la resistividad son clave para controlar las propiedades eléctricas del suelo. Es conocido que tales propiedades están sujetas a variaciones estacionales a medida que el suelo se humedece y se seca según la estación (Jensen, 1945).

Grcev (Grcev y Hristov, 1993) clasificó el suelo como húmedo o seco mediante valores constantes en función de su humedad. El suelo seco tiene alta resistividad (10 000 ohmios-metros) y baja permitividad relativa (9), mientras que el suelo húmedo tiene baja resistividad (100 ohmios-metros) y alta permitividad relativa (36). En el estudio (J. Montaña, Candelo, y Duarte, 2012), se observó que la magnitud de la impedancia era menor para la muestra con mayor contenido de humedad, para todo el rango de frecuencia analizado.

Otro factor que puede ocasionar cambios en la resistividad del suelo es la temperatura, pues con una disminución de la temperatura por debajo de 0°C, la resistividad aumenta bruscamente. Porque la humedad presente en el suelo se congelará haciendo que el suelo se seque por completo (Prabhakar y Deshpande, 2014).

Además, existen diversos estudios que han demostrado claramente el efecto no lineal de la magnitud y la frecuencia de la corriente inyectada sobre las propiedades de resistencia/impedancia de los electrodos de tierra (Djamel, Slaoui, y Georges, 2016), (Zhang, Wu, He, y Zeng, 2013) y (Moradi, 2019). La ionización del suelo es un efecto no lineal que surge cuando se inyecta corriente de gran magnitud en sistemas de puesta a tierra ubicados en un suelo poco conductivo. Cuando se inyecta una corriente de gran magnitud en

el sistema de puesta a tierra, se producirá la ionización del suelo si los campos eléctricos que rodean los segmentos superan el valor crítico de ruptura. La porción afectada del suelo se convertirá en un buen conductor, lo que disminuye la resistividad de la zona de ionización del suelo (Sekioka, Lorentzou, Philippakou, y Prousalidis, 2005), (Chen y Du, 2018).

Muchos factores son responsables de esta variación, algunos de ellos relacionados con el contenido de frecuencia de las corrientes energizadas y la magnitud y forma de onda de la corriente, y otros con el electrodo de puesta a tierra en sí, como los materiales y dimensiones, y otros factores relacionados con la naturaleza del suelo, como la humedad, el contenido de sal y el tamaño y los componentes del suelo (Hasan, Hamzehbahmani, Griffiths, Guo, y Haddad, 2017).

En algunos estudios (Silveira, Visacro, Herrera, y Torres, 2009), los parámetros eléctricos se suponen constantes ya que no varían con la frecuencia o la posición en el suelo. Mientras que, en otros estudios, han analizado la caracterización de los suelos del sitio usando frecuencia variable y voltajes de impulso (Hasan y cols., 2017).

Los suelos dependientes de la frecuencia se pueden caracterizar por: la resistividad del suelo $\rho_{(f)}$, la permitividad relativa $\varepsilon_{r(f)}$ y la permeabilidad $(\mu = \mu_0)$ (Alipio y Visacro, 2014). Sin embargo, $\rho_{(f)}$ y $\varepsilon_{r(f)}$ se ven significativamente afectados por la frecuencia, especialmente para suelos de alta resistividad, y también por factores ambientales.

La dependencia de la frecuencia de los parámetros del suelo está relacionada con los diferentes procesos de polarización y pérdidas durante la aplicación de un campo eléctrico variable.

Existen varios enfoques para suelos dependientes de la frecuencia, que se caracterizan por la conductividad del terreno en función de la frecuencia $(\sigma_g(f))$ y la permitividad relativa(ε_r). A continuación se presentan las ecuaciones de algunos de estos enfoques (Pascoalato, de Araújo, Colqui, Kurokawa, y Pissolato Filho, 2021).

A. Expresiones de Longmire y Smith

   Estas fórmulas se basaron en los datos experimentales de Scott (Scott, 1983) y Wilkenfeld.

$$\sigma_g(f) = \sigma_0 + 2\pi\varepsilon_0 \sum_{i=1}^{N} a_i \, \mathbf{F}_i \frac{(f/\mathbf{F}_i)^2}{1 + (f/\mathbf{F}_i)^2} \tag{2.1}$$

$$\varepsilon_r(f) = \varepsilon_\infty + \sum_{i=1}^{N} \frac{a_i}{1 + (f/\mathbf{F}_i)^2} \tag{2.2}$$

   Donde σ_0 es la conductividad a baja frecuencia, medida a 100 [Hz], ε_∞ = 5, N = 13, se especifican los coeficientes a_i la Tabla I de (Longmire, Smith, y CA, 1975) y el término $\mathbf{F}_i$ se expresa por:

$$F_i = F(\sigma_0) \times 10^{i-1} \quad ; \quad F(\sigma_0) = (125\sigma_0)^{0.8312} \tag{2.3}$$

   Las expresiones son validas para el rango de frecuencias de 1 [Hz] a 10^{12} [Hz].

B. Expresiones Visacro y Portela

   Visacro y Portela llevaron a cabo varios experimentos en diferentes suelos y propusieron las siguientes formulaciones empíricas (Visacro, Portela, y cols., 1987):

$$\sigma_g(f) = \sigma_0 (f - 100)^{0.072} \tag{2.4}$$

$$\varepsilon_r(f) = 2.34 \times 10^6 \left(\frac{1}{\sigma_0}\right)^{-0.535} f - 0.597 \tag{2.5}$$

El rango de frecuencia válido es desde 40 Hz hasta 2 [MHz].

C. Expresiones de Portela

Portela realizó una gran cantidad de mediciones obtenidas en diferentes áreas de Brasil cuyo rango de frecuencia varía desde 100 Hz hasta 2 MHz (Portela, 1999). Logrando obtener las siguientes formulaciones:

$$\sigma_g(f) = \sigma_0 + \Delta_i \left[cot\left(\frac{\pi}{2}\alpha\right)\right] \left(\frac{f}{10^6}^{\alpha}\right) \tag{2.6}$$

$$\varepsilon_r(f) = \Delta_i \left(\frac{f}{10^6}\right)^{\alpha} \frac{1}{2\pi f \varepsilon_0} \tag{2.7}$$

donde α es un parámetro ajustable del suelo y Δ_i es calculado a 1 MHz, el cual también depende del modelo de suelo.

D. Expresiones de Alípio y Visacro

Altípio y Visacro propusieron la siguiente ajuste de curva para los parámetros del suelo dependientes de la frecuencia (Alipio y Visacro, 2014):

$$\sigma_g(f) = \sigma_0 + \sigma_0 \times h(\sigma_0) \left(\frac{f}{1MHz}\right)^{\xi} \tag{2.8}$$

$$\varepsilon_r(f) = \varepsilon_\infty + \frac{tan(\pi\xi/2)10^{-3}}{2\pi\varepsilon_0(1MHz)^{\xi}} \sigma_0 \times h(\sigma_0) f^{\xi-1} \tag{2.9}$$

donde ε_∞=12, ξ=0.54 y $h(\sigma_0)$ es expresado como $h(\sigma_0) = 0.126(\sigma_0^{-0.73})$

E. CIGRE

Por parte de CIGRE (C4.33, 2019) se ha propuesto una formulación que expresa una relación causal y general para predecir la variación en la conductividad del suelo y la permitividad relativa con la frecuencia. Estas expresiones se dan como:

$$\sigma_g(f) = \sigma_0 + 4.7 \times 10^{-6} \sigma_0^{0.27} f^{0.54} \tag{2.10}$$

$$\varepsilon_r(f) = 12 + 9.5 \times 10^4 \sigma_0^{0.27} f^{-0.46} \tag{2.11}$$

La importancia en considerar el cambio de los parámetros del suelo con la frecuencia radica en que las impedancias de retorno a tierra son más altas para los suelos con parámetros constante a lo largo de la frecuencia que las calculadas para los suelos con parámetros dependientes de la frecuencia (Pascoalato y cols., 2021).

2.5. Tratamiento del suelo de puesta a tierra

En ocasiones el terreno de trabajo, donde se quiere implementar una puesta a tierra, no presenta una buena (baja) resistividad, por ejemplo, en las minas, donde el suelo suele ser de roca sólida, por lo cual se han desarrollado métodos para poder disminuir la resistividad del terreno de forma artificial.

Tradicionalmente para disminuir la impedancia de tierra, disminuyendo la resistividad del suelo en la vecindad del electrodo, se realizaba por tratamientos químico. Los elementos químicos más comunes fueron cloruro de sodio, sulfato de magnesio, sulfato de cobre, bicarbonato de sodio y cloruro de calcio. Estos elementos se esparcían en torno a los electrodos y se disolvían con agua antes del relleno. La mejora estaba sujeta principalmente a la resistividad original del terreno, a su estructura y al tamaño del sistema de electrodos. La elección de este tratamiento implica un mantenimiento regular y reabastecimiento de los elementos químicos diluidos, lo anterior se debe a que los elementos químicos usados son solubles, por lo tanto, seguirán diluyéndose por agua de lluvia o movimientos de agua a través del área, lo que ocasionara que la resistividad del terreno aumente hasta eventualmente obtener su valor original (Kusim, Abdullah, Hashim, y Kutty, 2013), (Jensen, 1945).

Además del costo del mantenimiento se debe considerar el impacto ambiental local del uso de estos químicos, pues se ha dado a conocer que causan una rápida corrosión a los electrodos, reduciendo la vida útil de la instalación.

Otro método más aceptable ambientalmente para acelerar la consolidación del suelo alrededor del electrodo debido al riego o lluvias es agregar un material de baja resistividad, cuando la barra se está enterrando. Con lo anterior el material es empujado hacia abajo por el electrodo, derramando continuamente la mezcla en el hoyo, rellenando la mayoría de los espacios entorno al electrodo y bajar su resistencia total. Los materiales utilizados para este método son de baja resistividad como la Bentonita, Marconita, yeso y otros materiales nuevos. En el pasado se usaban cenizas y escoria de las centrales, pero ocasionaban una corrosión acelerada del cobre y el aluminio en condiciones de humedad.

La bentonita es una arcilla de color pardo, de formación natural con un pH de 10,5. La principal razón de uso de la bentonita, se debe a que en terreno puede absorber humedad del suelo circundante, estabilizando la impedancia del electrodo a lo largo del año. Presenta una resistividad de 5 ohm-metro aproximadamente y no es corrosiva. La mezcla se resquebrajarse en condiciones extremadamente secas, ocasionando poco contacto con el electrodo. posee un carácter tixotrópico, por lo cual en estado inerte se presenta en forma de gel. Se compacta fácilmente y se adhiere fuertemente (Jones, 1980).

La marconita es en esencia un concreto conductivo en el cual se cambia el agregado normalmente usado en la mezcla del concreto por un agregado carbonáceo. Posee propiedades similares a la bentonita como provocar poca corrosión y tener una baja resistividad. La ventaja que posee frente a la bentonita es que mantiene su humedad bajo condiciones muy secas. Es una buena alterativa para lugares donde el robo de electrodos es un problema, o para encerrar electrodos en perforaciones o espacios en el interior de rocas. Recubriendo el electro con marconita, estando el electrodo instalado en roca, la resistencia de la barra se reducirá a medida que se aumente el volumen usado de marconita(Godoy González, 2016).

El yeso ocasionalmente es usado como material de relleno, ya sea solo o mezclado con bentonita o con el suelo natural del área, Posee baja solubilidad y resistividad. Tiene un pH entre 6,2 y 6,9. Se presenta en forma natural en la naturaleza, por lo cual su uso generalmente no provoca dificultades ambientales. A pesar de que se asegura que no

causa corrosión en el cobre, el So3 ha causado preocupación por su impacto en estructuras de concreto y fundaciones. (Procobre, 1998)

Actualmente, dentro del comercio chileno se encuentre disponible el material de refuerzo de tierra (GEM). Este será el gel que se utilizará en el desarrollo de este trabajo.

El material de refuerzo de tierra (GEM) fue inventado en 1992. Está hecho de cemento Portland y polvo de carbón, que se mezclan para formar un material conductivo. El GEM no requiere mantenimiento, ya que no se filtra ni se deslava. Esto permite que el sistema de puesta a tierra mantenga valores bajos de resistividad. El GEM también es no corrosivo, lo que lo hace ideal para su uso en áreas con suelos corrosivos. Otras ventajas del GEM son:

- Reduce dramáticamente la resistencia tierra y mediciones de impedancia.
- Mantiene una resistencia constante durante toda la vida útil del sistema.
- Mejora la puesta a tierra independiente del tipo suelo, incluso en periodos secos.
- No se disuelve ni se descompone con el paso del tiempo.
- No requiere tratamientos periódicos de carga ni reemplazos.
- Puede reducir el tamaño del sistema de tierra.
- Los electrodos de puesta a tierra embebidos en en el GEM son más difíciles de robar.

El Material de Refuerzo de Tierra (GEM) puede mezclarse con agua potable o usarse en seco. No necesita agua para mantener su conductividad y tiene una resistividad de 0.02 $[\Omega m]$ o menos, lo cual es mucho menor que la resistividad de la arcilla de bentonita ("nVent ERICO GEM", s.f.).

2.6. Transformada rápida de Fourier

De acuerdo con Fourier, cada señal con una forma de onda conocida puede descomponerse en oscilaciones parciales $u_{\omega t} = \hat{u}sin(\omega t + \phi)$ con amplitud $\hat{u}$, frecuencia angular ω y ángulo de fase ϕ. Una oscilación parcial $u_{1,i}$ a la entrada de un sistema lineal provoca en su salida una oscilación $u_{2,i}$ de la misma frecuencia, pero, en general, de distinta amplitud y diferente ángulo de fase (Schon, 2013). Con lo anterior, es posible obtener el espectro de frecuencias de una señal en el dominio del tiempo, permitiendo realizar un análisis frecuencial a dicha señal. En la práctica, las señales eléctricas se pueden obtener de forma discreta, por lo cual es necesario aplicar la Transformada de Fourier discreta (DFT), lo que corresponde a un cambio de coordenadas en C^N entre dos bases. La DFT se define formalmente como la transformación $\mathfrak{F}_{\mathfrak{N}} : \mathbb{C}^{\mathrm{N}} \longrightarrow \mathbb{C}^{\mathrm{N}}$ que a cada vector $f \in \mathbb{C}^{\mathrm{N}}$ le hace corresponder el vector $\hat{f} = (\hat{f}(0), \hat{f}(1), ...\hat{f}(N-1))$ donde

$$\hat{f}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n) e^{\frac{-2i\pi kn}{N}}$$

para $0 \leq n \leq N-1$ (Martínez, 2018).

La Transformada rápida de Fourier (Fast Fourier Transform) (FFT) es un algoritmo que permite calcular eficientemente la DFT y su inversa. La Transformada Rápida de Fourier es de suma importancia en el análisis, diseño y realización de algoritmos y sistemas de procesamiento de señales dado que brinda mayor eficiencia tanto en tiempo como en recursos (Schmidt, 2013). A continuación, se presenta una frase para poder dimensionar de mejor manera la importancia y la utilidad de la FFT " El algoritmo de la transformada rápida de Fourier puede reducir el tiempo necesario para encontrar la transformada discreta de Fourier de varios minutos a menos de un segundo, y puede reducir los costos de

varios dólares a varios centavos " (Bergland, 1969), es por esto que la FFT es uno de los algoritmos más famosos, pues permite reducir significativamente el número de cálculos.

El principio fundamental de la FFT es la descomposición del cálculo de la DFT de una secuencia de largo N en DFT sucesivas más pequeñas. La manera en que este principio es realizado establece una diversidad de algoritmos diferentes, todos con un mejoramiento en velocidad de cómputo comparable. Existen dos clases básicas de algoritmos FFT (De la Fraga, 2001):

1. La llamada *decimación en tiempo*, nombre que se deriva del hecho de que en el proceso de reordenar los cálculos en más pequeñas transformaciones, la secuencia x(n) (el índice n frecuentemente se asocia con el tiempo) se descompone sucesivamente en subsecuencias más pequeñas.

2. Algoritmos en *decimación en frecuencia*, en donde los coeficientes de la DFT, X(k), son descompuestos en subsecuencias más pequeñas.

2.7. Ecuaciones de Maxwell

Las ecuaciones de Maxwell son ecuaciones que relacionan las interacciones de los campos magnéticos con los campos eléctricos, representando la síntesis del electromagnetismo (Sears y cols., 1986). La importancia de las ecuaciones de Maxweel radica en el amplio uso de la tecnología contemporánea basada en la teoría del campo electromagnético como la radio, la televisión, el radar, el acceso inalámbrico a Internet y la tecnología Bluetooth (Fleisch, 2008).

Las 4 principales ecuaciones de maxwell corresponden a la ley de Gauss para campos eléctricos, la ley de Gauss para campos magnéticos, la ley de Farady y la ley de Ampere-Maxwell. Cada una posee su forma integral y diferencial.

2.7.1. Ecuaciones de Maxwell forma diferencial

Se elige una forma general que incluye cargas magnéticas q_m y corrientes magnéticas ficticias $\mathbf{J}_m$. Aunque estas cantidades no existen en sistemas físicos reales, su inclusión permite obtener importantes técnicas de solución. Además, esta formulación da lugar a una formulación dual en los campos eléctrico **E** y magnético **H**. Es necesario considerar tanto el dominio del tiempo como el de la frecuencia, y para ello se utilizan la variable transformada de Laplace $s = j\omega$ en el dominio de la frecuencia y la derivada temporal $\frac{\partial}{\partial t}$ en el dominio del tiempo. Así, las ecuaciones de Maxwell en su forma diferencial se pueden expresar de la siguiente manera (Ruehli, Antonini, y Jiang, 2017):

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mathbf{J}_{vm} - s\mathbf{B} \tag{2.12a}$$
$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_{ve} + s\mathbf{D} \tag{2.12b}$$
$$\nabla \cdot \mathbf{D} = q_{ve} \tag{2.12c}$$
$$\nabla \cdot \mathbf{B} = q_{vm} \tag{2.12d}$$

Las ecuaciones de 2.12a a 2.12d corresponden a la ley de Farady, a la ley circuital de Ampere, a la ley de Gauss para campos eléctricos y a la ley de Gauss para campos magnéticos. En estas ecuaciones q_{ve}, q_{vm}, $\mathbf{J}_{ve}$, $\mathbf{J}_{vm}$, **E**, **H**, **D** y **B** representan la densidad volumétrica de carga eléctrica, la densidad volumétrica de carga magnética, la densidad volumétrica de corriente eléctrica, la densidad volumétrica de corriente magnética, la

intensidad del campo eléctrico, la intensidad del campo magnético, la densidad de flujo de desplazamiento y la densidad de flujo magnético, respectivamente.

Se puede demostrar que de las cuatro ecuaciones mencionadas anteriormente, sólo dos son independientes. La ley de Gauss 2.12d y 2.12c pueden derivarse de 2.12b y 2.12a, respectivamente (Ruehli y cols., 2017).

Las siguientes relaciones constitutivas son satisfechas por **H**, **B**, **E** y **D** para un un medio isótropo.

$$\mathbf{B} = \mu\mathbf{H} \tag{2.13a}$$
$$\mathbf{D} = \varepsilon\mathbf{E} \tag{2.13b}$$
$$\mathbf{J}_v = \sigma\mathbf{E} \tag{2.13c}$$

Donde μ es la permeabilidad, ε es la permitividad y σ es la conductividad.

Otras relaciones importantes son las ecuaciones de continuidad que están basadas en el principio de la conservación de la carga y consideran la variación de la densidad de carga dependiente del tiempo. La ecuación 2.14 es la relación entre la densidad de corriente eléctrica y la densidad de carga eléctrica mientras que la ecuación 2.15 es la relación entre la densidad de corriente magnética y la densidad de carga magnética (Ruehli y cols., 2017).

$$\nabla \cdot \mathbf{J}_{ve} + s\, q_{ve} = 0 \tag{2.14}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J}_{vm} + s\, q_{vm} = 0 \tag{2.15}$$

2.7.2. Ecuaciones de Maxwell forma integral

Como se menciono anteriormente, las ecuaciones aparte de su forma diferencial, mostradas anteriormente, también poseen formas integrales. A continuación, se presentaran las formas integrales de las ecuaciones de Maxwell en el dominio del tiempo.

$$\int_{\mathcal{S}} (\nabla \times \mathbf{E}) \cdot \hat{\mathbf{n}}\, d\mathcal{S} = \oint_{\mathcal{C}} \mathbf{E} \cdot dl = -\int_{\mathcal{S}} \mathbf{J}_{vm} \cdot \hat{\mathbf{n}}\, d\mathcal{S} - \frac{\partial}{\partial t} \int_{\mathcal{S}} \mathbf{B} \cdot \hat{\mathbf{n}}\, d\mathcal{S} \tag{2.16a}$$
$$\int_{\mathcal{S}} (\nabla \times \mathbf{H}) \cdot \hat{\mathbf{n}}\, d\mathcal{S} = \oint_{\mathcal{C}} \mathbf{H} \cdot dl = -\int_{\mathcal{S}} \mathbf{J}_{ve} \cdot \hat{\mathbf{n}}\, d\mathcal{S} - \frac{\partial}{\partial t} \int_{\mathcal{S}} \mathbf{D} \cdot \hat{\mathbf{n}}\, d\mathcal{S} \tag{2.16b}$$
$$\oint_{\mathcal{S}} \mathbf{D} \cdot \hat{\mathbf{n}}\, d\mathcal{S} = \int_{\mathcal{V}} q_{ve}\, d\mathcal{V} \tag{2.16c}$$
$$\oint_{\mathcal{S}} \mathbf{B} \cdot \hat{\mathbf{n}}\, d\mathcal{S} = \int_{\mathcal{V}} q_{vm}\, d\mathcal{V} \tag{2.16d}$$

También se presentan las formas integrales de las ecuaciones de continuidad.

$$\oint_{\mathcal{S}} \mathbf{J}_{ve} \cdot \hat{n}\, d\mathcal{S} + \frac{\partial}{\partial t} \int_{\mathcal{V}} q_{ve}\, d\mathcal{V} = 0 \tag{2.17}$$

$$\oint_{\mathcal{S}} \mathbf{J}_{vm} \cdot \hat{n}\, d\mathcal{S} + \frac{\partial}{\partial t} \int_{\mathcal{V}} q_{vm}\, d\mathcal{V} = 0 \tag{2.18}$$

2.7.3. Condiciones de borde

Las interfaces entre materiales con diferentes propiedades son comunes en muchos problemas electromagnéticos. Por lo cual, es importante saber cómo manejar estas condiciones de contorno al resolver estos problemas. Considerando una interfaz entre dos materiales como se muestra en la figura 2.4 donde el vector normal apunta desde el material 2 hacia el material 1. Esto conlleva a las siguientes condiciones de contorno para diferentes materiales.

$$-\hat{\mathbf{n}} \times (\mathbf{E}_1 - \mathbf{E}_2) = \mathbf{J}_{sm} \tag{2.19a}$$
$$\hat{\mathbf{n}} \times (\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2) = \mathbf{J}_{se} \tag{2.19b}$$
$$\hat{\mathbf{n}} \cdot (\mathbf{D}_1 - \mathbf{D}_2) = q_{se} \tag{2.19c}$$
$$\hat{\mathbf{n}} \cdot (\mathbf{B}_1 - \mathbf{B}_2) = q_{sm} \tag{2.19d}$$

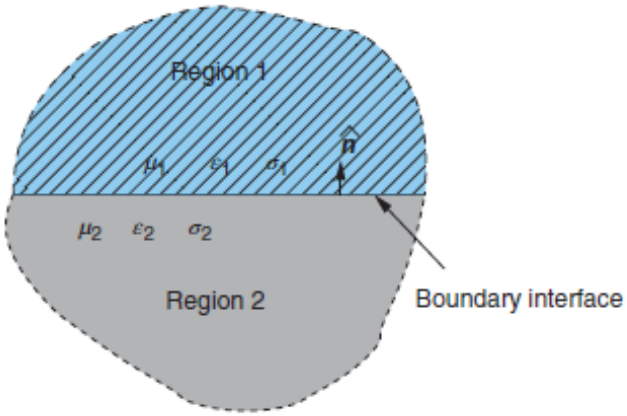


Figura 2.4: Ejemplo de interfaz entre dos materiales diferentes.(Ruehli y cols., 2017).

Estas ecuaciones establecen que las componentes tangenciales del campo eléctrico y magnético son discontinuas debido a corrientes magnéticas o eléctricas en la interfaz, y que las componentes normales de la densidad de flujo de desplazamiento y magnética son discontinuas debido a la presencia de una densidad de carga eléctrica o magnética en la interfaz (Ruehli y cols., 2017).

Si se considera que el material 2 es un conductor perfecto, es decir, posee una conductividad infinita, se tendrá que el campo eléctrico $\mathbf{E}_2$ es cero dentro del conductor. Para una solución en la que se establece la corriente magnética no física y la carga magnética en cero, la condición de contorno se reduce a:

$$-\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{E}_1 = 0 \tag{2.20a}$$
$$\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{H}_1 = \mathbf{J}_{se} \tag{2.20b}$$
$$\hat{\mathbf{n}} \cdot \mathbf{D}_1 = q_{se} \tag{2.20c}$$
$$\hat{\mathbf{n}} \cdot \mathbf{B}_1 = 0 \tag{2.20d}$$

2.7.4. Potenciales auxiliares

Un método indirecto importante para la solución de las ecuaciones de Maxwell se basa en la definición de potenciales vectoriales auxiliares. Considerando $\nabla \cdot B = 0$ se tiene la identidad vectorial

$$\nabla \cdot \nabla \times \mathbf{A} = 0. \tag{2.21}$$

Definiendo **A** de tal forma que obedezca la identidad anterior se puede tener

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} = \nabla \times \mathbf{A}. \tag{2.22}$$

Donde **B** se deriva del vector potencial **A**. Sustituyendo 2.22 en 2.12a, se obtiene para el caso armónico único sin fuente

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu s \mathbf{H} = -s \nabla \times \mathbf{A}. \tag{2.23}$$

Juntando los términos con el producto cruz, se llega a

$$\nabla \times (\mathbf{E} + s\mathbf{A}) = 0. \tag{2.24}$$

Ambos términos dentro del paréntesis deben ser campos eléctricos. Usando la identidad vectorial se tiene

$$\nabla \times \nabla \Phi = 0. \tag{2.25}$$

Comparando 2.24 y 2.25 se puede escribir

$$\mathbf{E} = -s\,\mathbf{A} - \nabla \Phi_e \tag{2.26}$$

donde **E** es el campo disperso debido a todas las fuentes y Φ_e es el potencial escalar eléctrico (Ruehli y cols., 2017).

2.8. Modelo de escala reducida

Los modelos de escala reducida se utilizan para implementar modelos experimentales con un menor costo de implementación (Caldecott y Kasten, 1983). Esto se debe a que las dimensiones espaciales del modelo se reducen, lo que lo hace más conveniente para el desplazamiento de la ubicación del experimento o la posibilidad de realizar el experimento dentro de un laboratorio cuando generalmente se realiza en la intemperie. Esto permite un mayor control de las condiciones en que se realiza el experimento.

Según la teoría de la escala reducida, no solo se reduce la escala espacial, sino que también la escala del tiempo, lo que implica que también habrá un escalamiento de la frecuencia, lo cual será de interés en los análisis de frecuencia, donde se estudia el comportamiento de la impedancia de las puestas a tierra, frente al impacto de rayos.

En el estudio del comportamiento de las puestas a tierra, son utilizados los modelos de escala reducida, pues como se mencionó anteriormente presenta ventajas de costos y prácticos. Al reducir el tamaño de los electrodos, permite abaratar el costo del estudio y la posibilidad de realizar pruebas dentro de un laboratorio, con lo cual se tiene un mayor control sobre las condiciones ambientales en el cual se realiza la prueba. Se dispone el suelo que representa el terreno junto a los electrodos reducidos en tamaño en un recipiente de acero galvanizado, el borde de este recipiente representa a la tierra remota.

Lo ideal es que la forma del recipiente fuera hemisférico, pero debido a las complicaciones de fabricación, las formas cilíndricas u ortogonales se usan más comúnmente

(Caldecott y Kasten, 1983). Se debe tener presente las siguientes relaciones entre el recipiente mismo y los electrodos. La dimensión máxima de la rejilla (la diagonal para una malla cuadrada) debe ser al menos dos o tres veces menor que la dimensión mínima del tanque (Ghoneim, Hirsch, Elmorshedy, y Amer, 2007), la mayor dimensión geométrica del modelo de electrodo de puesta a tierra no debe ser más de 1/4 del diámetro (He y Chen, 1995) y la profundidad del recipiente ortogonal no debe ser menor a la mitad de uno de los lados del recipiente (Gonos, 2006).

El documento Use of reduced scale models for evaluation of grounding systems in real scale (Montaña, Angulo, Torres, y Valenzuela, 2023) señala que el comportamiento de la puesta a tierra se ve afectado por las interacciones electromagnéticas de los conductores en un rango de frecuencias desde los hertz hasta los megahertz. Por lo tanto, las expresiones matemáticas deben ser revisadas incluyendo las características del modelo a escala reducida. Las ecuaciones de Maxwell en medio con pérdidas, sin fuente de inyección de corriente y considerando una excitación que tiene una frecuencia ω , se pueden escribir de la siguiente manera.

$$\nabla^2 E - \gamma^2 E = 0 \quad , \quad \nabla^2 H - \gamma^2 H = 0 \tag{2.27}$$

Donde $\gamma^2 = -\omega^2 \mu(\varepsilon - j\frac{\sigma}{\omega})$ y μ, ε y σ corresponde a la permeabilidad, permitividad y permeabilidad del medio respectivamente.

Para construir la versión a escala en las ecuaciones de Maxwell, se empleó barras para denotar variables adimensionales y normalizar las coordenadas espaciales a la longitud l.

$$(x, y, z) = (l\bar{x}, l\bar{y}, l\bar{z}) \tag{2.28}$$

Es posible ocupar una base arbitraria para escalar los campos eléctricos y magnéticos. Por lo anterior, se puede escribir la siguiente versión a escala de las ecuaciones de Maxwell.

$$\bar{\nabla}^2 \bar{E} - l^2\gamma^2 \bar{E} = 0 \ , \ \bar{\nabla}^2 \bar{H} - l^2\gamma^2 \bar{H} = 0 \tag{2.29}$$

Donde $\bar{\nabla}^2$ es el operador laplaciano expresado en términos de las coordenadas espaciales normalizadas. Con estas relaciones, es posible reconocer que si dos modelos tienen los mismo $l^2\gamma^2$ sus soluciones de campo normalizadas son idénticas. Esto ocurre cuando se utiliza un modelo a escala 1 de un sistema real 2 con fines experimentales. En este caso, forzar $l_1^2\gamma_1^2 = l_2^2\gamma_2^2$ permite definir las siguientes relaciones generales:

$$l^2\omega^2\mu\epsilon\left(1 - j\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right) = cte \tag{2.30}$$

$$l_1{}^2\omega_1{}^2\mu_1\epsilon_1\left(1 - j\frac{\sigma_1}{\omega_1\varepsilon_1}\right) = l_2{}^2\omega_2{}^2\mu_2\epsilon_2\left(1 - j\frac{\sigma_2}{\omega_2\varepsilon_2}\right) \tag{2.31}$$

Que crean soluciones de campo semejantes para ambos problemas. En base a la ecuación 2.31, existen diversas alternativas para satisfacer esta ecuación. La tabla 2.1 muestra la relación entre ambos sistemas cuando el factor de escalamiento es n

2.9. Modelo electromagnético Híbrido

El Modelo electromagnético híbrido (MEH) considera la teoría de la línea de transmisión, el circuito y el campo electromagnético combinados en un solo modelo. Los métodos híbridos son precisos y flexibles, permiten de manera fácil considerar parámetros

Parámetro	Escala reducida	Escala real
Tamaño	l / n	l
Resistividad	ρ / n	ρ
Permitividad	ε	ε
Tiempo de frente (T_1)	T_1 / n	T_1
Tiempo de cola (T_2)	T_2 / n	T_2
Frecuencia	$\omega \cdot n$	ω

Tabla 2.1: Relación entre valores a escala reducida y a escala real. (Montaña, Angulo, Torres, y Valenzuela, 2023)

externos como fuerzas electromotrices, corrientes e impedancias (Meppelink, Andolfato, y Cuccarollo, 2015).

La Figura 2.5 muestra una configuración física general de problemas típicos a los que se dirige una aplicación de MEH. Se trata de una ruta de corriente, que generalmente incluye un canal de descarga de rayo, conductores aéreos y enterrados, y tierra. Un camino distante complementa el circuito, permitiendo que se cierre un bucle de corriente. También se pueden incluir los componentes del sistema eléctrico cercano (Visacro y Soares, 2005).

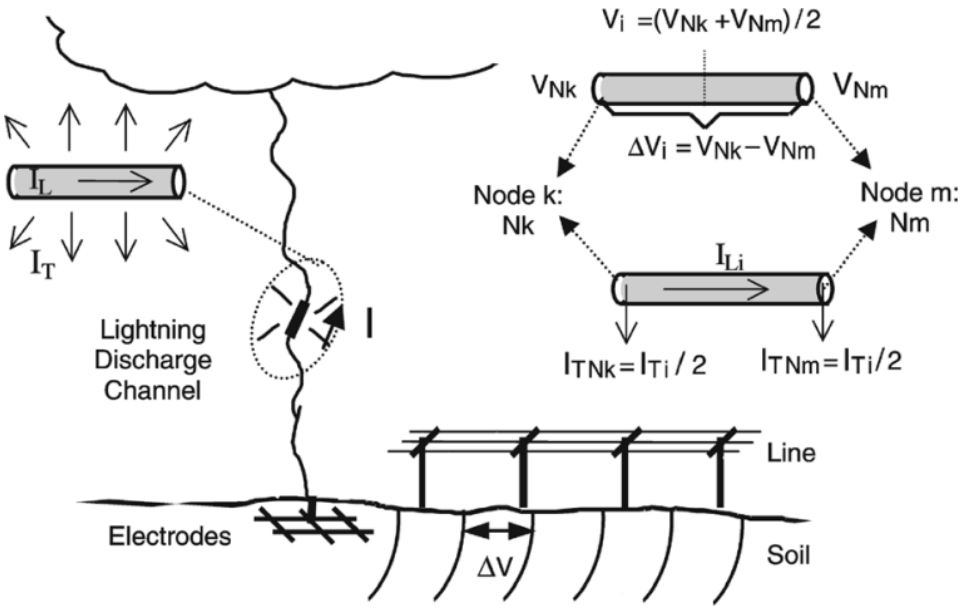


Figura 2.5: Configuración física de un problema típico tratado por MEH. (Visacro y Soares, 2005).

2.9.1. Simplificaciones realizadas

El problema generalmente se simplifica determinando un límite que encierra la región de interés. El camino fuera de esta región prácticamente no afecta la distribución del campo dentro de esta zona. En esta región, el volumen de la ruta de corriente se divide en una gran cantidad de pequeños elementos filamentosos (Visacro y Soares, 2005).

El modelo implementado en este trabajo considera ciertos aspectos del sistema y su entorno con el fin de simplificar el problema y facilitar su representación. Por lo tanto, solo se aplica a las configuraciones que cumplen con estas consideraciones, las cuales se detallan a continuación

- Los electrodos se consideran inmersos en el terreno y el efecto de la frontera se representa por medio del método de imágenes.
- Se asume que las susceptibilidades eléctrica (χ_e) y magnética (χ_m) son constantes e independientes de los campos aplicados, es decir, el medio es lineal respecto a los efectos de polarización eléctrica y magnética.
- Los valores de ρ, ε y μ se miden iguales en diferentes direcciones dentro del material, o lo que puede ser definido en término de las susceptibilidades como: χ_e y χ_m iguales para cualquier dirección dentro del material.
- Se considera que el medio es homogéneo, es decir, los parámetros de μ, σ y ε son independiente de su posición en el medio.
- Los conductores son cilíndricos, para obtener simetría de campo alrededor del elemento conductor.
- El radio del conductor debe ser menor a la longitud del mismo, una 10 veces menor, y con la distancia a la frontera.
- Los conductores deben ser rectilíneos para facilitar el manejo de vectores unitarios en el eje conductor.

En resumen, se asume que el terreno es lineal, isotrópico y homogéneo. Además se condiciona que los conductores deben estar inmersos en el terreno, deben ser cilíndricos, delgados y rectilíneos.

2.9.2. Fuentes de corriente

Para modelar el sistema de puesta a tierra, los conductores del sistema se dividen en varios segmentos utilizando la aproximación de cable delgado. Cada uno de ellos es considerado como una fuente de campo electromagnético producido por dos componentes de corriente: una corriente transversal (I_T) y una corriente longitudinal (I_L) que son constantes a lo largo de cada segmento (Vargas y cols., 2005).

2.9.3. Acoplamientos

Considerando cada par de segmentos, la corriente I_T promueve acoplamientos capacitivos y conductivos (uno mismo y mutuo). Esto permite asociar el potencial medio (V) establecido a lo largo de cada elemento de volumen a la corriente que circula entre sí (I_T). La corriente I_L promueve efectos de acoplamiento inductivo y resistivo (propio y mutuo) y esto permite que la caída de tensión (ΔV) a lo largo de cada elemento se asocie a la corriente longitudinal (I_L) de cada uno (Visacro y Soares, 2005).

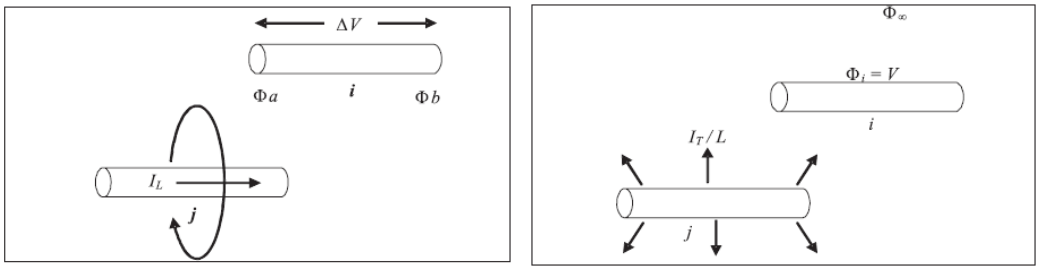
Los acoples son representados como impedancias Z_{Lij} y Z_{Tij} como se muestra a continuación (J. H. Montaña, Duarte, Sarmiento, Marín, y Torres, 2006):

$$Z_{Lij} = \frac{\Delta V_{ij}}{I_{Lj}} \tag{2.32}$$

$$Z_{Tij} = \frac{V_{ij}}{I_{Tj}} \tag{2.33}$$

donde Z_{Lij} corresponde a la impedancia longitudinal, Z_{Tij} corresponde a la impedancia transversal, ΔV_{ij} es la caída de voltaje a lo largo del elemento i debido a la corriente longitudinal que fluye a lo largo de j y V_{ij} al potencial promedio del elemento i debido a la corriente transversal dispersada por j.

La Figura 2.6 muestra el acoplamiento entre los segmentos emisor y receptor, así como la elevación de potencial ϕ en un punto sobre el conductor o en el infinito.



(a) Acople longitudinal entre segmento emisor j y receptor i. (Montaña, Duarte, Sarmiento, Marín, y Torres, 2006).

(b) Acople transversal entre segmento emisor j y receptor i. (Montaña, Duarte, Sarmiento, Marín, y Torres, 2006).

Figura 2.6: Acoples entre segmento emisor j y receptor i. (Montaña, Duarte, Sarmiento, Marín, y Torres, 2006).

El acople longitudinal está relacionado con la *fem* inducida y el acople transversal con el potencial escalar eléctrico Φ. Por lo tanto, son requeridas las ecuaciones de Maxwell mostradas a continuación (J. Montaña, 2006).

$$fem = \oint_l E \cdot dl = -j\omega \oint_l A \cdot dl \tag{2.34}$$

$$\Phi_{(x,y,z)} = \int_V \frac{\rho(x',y',z')}{4\pi\varepsilon_0 R} dV' \tag{2.35}$$

2.9.4. Cálculo de las impedancia de acoples

Una vez determinados los acoples entre los segmentos emisor j y receptor i, se pueden obtener las representaciones matemáticas del efecto que representa cada uno, expresadas en función de la impedancia longitudinal y la impedancia transversal. La impedancia longitudinal y la impedancia transversal quedan en función de la configuración, la frecuencia y los parámetros del medio μ, σ y ε, como se aprecia en las siguientes ecuaciones (J. H. Montaña y cols., 2006):

$$Z_{Lij} = -j\omega \frac{\mu}{4\pi} \int_{Li} \int_{Lj} \frac{e^{-\gamma R}}{R} \bar{d}l_j \bullet \bar{d}l_i \tag{2.36}$$

$$Z_{Tij} = \frac{1}{4\pi[\sigma(\omega) + j\omega\varepsilon(\omega)]L_i L_j} \int_{Li} \int_{Lj} \frac{e^{-\gamma R}}{R} dl_j dl_i \tag{2.37}$$

Donde:

$\bar{d}l_i$ y $\bar{d}l_j$ son vectores diferenciales de longitud.

dl_i y dl_j son elementos diferencias de longitud.

L_j y L_i son las longitudes de los segmentos.

γ es la constante de propagación del medio.

$\gamma = \sqrt{j\omega\mu[\sigma(\omega) + j\omega\varepsilon(w)]}$.

R es la distancia vectorial entre cada uno de los puntos diferenciales.

2.9.5. Eliminación de la frontera

El método de imágenes se puede usar para eliminar la frontera. Esto significa que se pueden crear imágenes de las dos fuentes de corriente en el suelo de modo que el campo eléctrico normal E_n sea cero en la frontera. Las imágenes de los segmentos se representan como una fuente adicional de corriente en las ecuaciones de impedancia longitudinal y transversal, como se muestran a continuación:

$$Z_{Lij} = -j\omega\frac{\mu}{4\pi}\left(\int_{Li}\int_{Lj}\frac{e^{-\gamma R}}{R}\bar{dl}_j \bullet \bar{dl}_i + \int_{Li}\int_{Lj'}\frac{e^{-\gamma R'}}{R'}\bar{dl}'_j \bullet \bar{dl}_i\right) \tag{2.38}$$

$$Z_{Tij} = \frac{1}{4\pi[\sigma(\omega)+j\omega\varepsilon(\omega)]L_iL_j}\left(\int_{Li}\int_{Lj}\frac{e^{-\gamma R}}{R}dl_j dl_i + \int_{Li}\int_{Lj'}\frac{e^{-\gamma R'}}{R'}dl_{j'}dl_i\right) \tag{2.39}$$

En la ecuación 2.38 las longitudes de los segmentos emisor e imagen son iguales $L_{j'} = L_j$ pero sus elementos diferenciales no lo son $dl_{j'} \neq dl_j$.

Para la ecuación 2.39 se tiene que L_j , L_i y $L_{j'}$ corresponden a las longitudes de los segmentos emisor, receptor e imagen respectivamente, y dl_j , dl_i y $dl_{j'}$ son los elementos diferenciales de estos mismos segmentos. También debe aclararse que las longitudes de los segmentos emisor e imagen son iguales $Lj = L_j$ (J. Montaña, 2006).

2.9.6. Sistema matricial

Se realiza un cálculo individual de acoples e impedancias para cada par de segmentos, dentro de los n segmentos en los que se divide la configuración de puesta a tierra bajo análisis. Como resultado de estos cálculos, se obtienen dos sistemas lineales:

$$I_{T[n\times 1]} = Y_{T[n\times n]} \cdot V_{[n\times 1]} \tag{2.40}$$

$$I_{L[n\times 1]} = Y_{L[n\times n]} \cdot \Delta V_{[n\times 1]} \tag{2.41}$$

Donde Y_L y Y_T son las matrices inversas de Z_L y Z_T respectivamente.

La teoría de circuitos se utiliza (dando el nombre de híbrido al modelo) para minimizar el número de incógnitas y resolver el sistema de ecuaciones. El análisis que se realiza consiste en sumar las corrientes en los nodos y establecer relaciones de tensión para cada segmento a partir de las tensiones nodales.

Al aplicar las consideraciones anteriores y realizar las operaciones aritméticas y matriciales correspondientes, se puede obtener un solo sistema de ecuaciones. La solución de este sistema de ecuaciones da las tensiones nodales a lo largo de la configuración:

$$V_{N[m\times 1]} = A_{[m\times m]} \cdot I_{y[m\times 1]} \tag{2.42}$$

2.9.7. Corriente de rayo

El procedimiento descrito proporciona solución para una sola frecuencia. Para aplicaciones que involucran corrientes de rayo, el modelo encuentra los componentes de frecuencia de la corriente inyectada por medio de la transformada de Fourier. Para cada componente de corriente (amplitud y fase), el modelo determina cantidades circuitales

$(V, \Delta V, I_L, I_T)$ para todos los elementos. Aplicando la transformada inversa de Fourier, todas las cantidades se encuentran en el dominio del tiempo (Visacro y Soares, 2005).

2.10. Método de elementos finitos

El Método de elementos finitos (MEF) es un método numérico utilizado para resolver problemas continuos con ecuaciones diferenciales o integrales a través de la discretización del volumen-espacio y aplicando las ecuaciones que gobiernan las superficies definidas por estos puntos antes de resolver las matrices resultantes. Debido a que este método implica mucho trabajo matemático, se ocupan programas computacionales, como FEMM (Brenna y cols., 2018), Comsol (Coelho y Almaguer, 2014) o Gmsh-Getdp (Díaz-Chacón, Cuevas-Ochoa, Amaro-Hernández, Navarro-Valle, y Brauer, 2019), para poder aplicar este método y resolver problemas prácticos asociados a la ingeniería.

Para poder aplicar el método de elementos finitos se suelen seguir los siguientes pasos (Siew, I, y Hanaffi, 2014):

- Definición del problema: Se establecen las condiciones de fronteras, las suposiciones y las limitaciones del problema
- Discretización del volumen-espacio: El dominio se divide en sub-dominios más pequeños que son finitos y tienen forma definida
- Representación matemática: Se describe matemáticamente el problema en cada elemento finito.
- Formulación de la matriz: se crea una matriz de coeficientes basada en lo hecho en el punto anterior.
- Resolución del problema: Se resuelven las matrices creadas.

La ecuación diferencial parcial que describe el campo electromagnético alrededor de un electrodo de puesta a tierra se puede derivar de las ecuaciones de Maxwell. Estas ecuaciones describen cómo se relacionan los campos eléctrico y magnético. En términos del potencial vectorial magnético $\mathbf{A}$ y el potencial escalar eléctrico ϕ, la ecuación se puede formular como (Habjanič, Jesenik, y Trlep, 2011):

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} - \nabla \frac{1}{\mu} \nabla \mathbf{A} + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \sigma \nabla \phi = 0 \tag{2.43}$$

donde μ es la permeabilidad y σ la conductividad eléctrica. (Habjanič y cols., 2011).

La desventaja que presenta el método de elementos finitos es que necesita un límite finito para simular, lo que complica realizar modelos de situaciones practicas con limites infinitos. Frente a estas situaciones se opta por incrementar el tamaño del límite, pero esto implica un mayor tiempo de cálculo y por lo tanto de simulación. Por lo anterior es necesario determinar el tamaño mínimo del límite, que permita obtener resultados aceptables de simulación y que no requiera mucho tiempo de cálculo (Siew y cols., 2014).

2.11. MATLAB

MATrix LABoratory (MATLAB) es una plataforma de programación y cálculo numérico utilizada por ingenieros y científicos para analizar datos, desarrollar algoritmos y crear modelos (MATLAB, 2010). MATLAB es un lenguaje de alto rendimiento para cálculos técnicos, además, presenta un entorno y un lenguaje de programación. Dentro de sus principales ventajas es que permite construir herramientas reutilizables propias, consiguiendo crear fácilmente funciones propias y programas especiales en código Matlab,

teniendo la posibilidad de agruparlos en Toolbox (librerías) (Fernández, s.f.). Esta plataforma de programación se distingue de otros sistemas de cálculo por su facilidad para trabajar con vectores y matrices. Las operaciones ordinarias como la suma, producto y potencia operan por defecto sobre matrices, sin más restricción que la compatibilidad de tamaños en cada caso, sumado a lo anterior se destaca la capacidad gráfica de MATLAB (Lopez. y Pagoaga, s.f.).

2.12. Gmsh + GetDp

El software Gmsh es un generador de mallas de elementos finitos 3D de código abierto con un motor CAD y un posprocesador integrados. Su objetivo de diseño es proporcionar una herramienta de mallado rápida, liviana y fácil de usar con entrada paramétrica y capacidades de visualización flexibles. Gmsh se basa en cuatro módulos (geometría, malla, solucionador y posprocesamiento), que se pueden controlar con la interfaz gráfica de usuario, desde la línea de comandos, utilizando archivos de texto escritos en el lenguaje de script propio de Gmsh (archivos .geo), o a través de la interfaz de programación de aplicaciones C++, C, Python, Julia y Fortran (Gmsh Development Team, 2021).

GetDP es un entorno multiplataforma altamente configurable para resolver problemas discretos con código abierto; se basa en los kits de herramientas para resolver matrices. Esto permite manejar los métodos matemáticos utilizados en la resolución de problemas numéricos para proporcionar los parámetros requeridos de la solución, como recursos de hardware, precisión de la solución, tiempo de solución y parámetros de convergencia (Shchuchkin, Khoroshev, y Pavlenko, 2017).

Capítulo 3

Marco metodológico

En el presente capítulo se explicará la metodología utilizada para conseguir los datos experimentales. Se señalará los instrumentos y materiales requeridos, detallando las características de algunos de estos, se describirá el circuito utilizado para conseguir las mediciones de interés y se indicará cómo se realizó la generación y medición de las variables importantes.

3.1. Instrumentación y materiales

Los instrumentos y materiales utilizados en la parte experimental se especifican a continuación. Las fotos de los instrumentos y materiales en su mayoría se encuentran en el Apéndice A.

3.1.1. Generador DC

El generador DC utilizado para alimentar el circuito de impulso fue el *KEITHLEY 247 High Voltage Supply* (Figura A.1), una fuente de tensión continua, que puede llegar hasta los 3 [KV] en polaridad positiva y negativa. Una de las ventajas que presenta este generador es que permite subir la tensión gradualmente.

3.1.2. Circuito de impulso.

El circuito de impulso (Figura 3.3) esta conformado por resistencia, capacitores y por los espinterómetros tipo esfera-esfera. Los valores de las resistencias y los capacitores permitirán variar los tiempos de frente y cola del impulso mientras que la distancia de los espinterómetros permitirá modificar la amplitud del impulso. Se ocuparon 4 resistencias en paralelo para la resistencia de frente, los valores fueron de 116.6 $[\Omega]$, 141.2 $[\Omega]$, 115.85 $[\Omega]$ y 158.16 $[\Omega]$. Se usaron dos resistencias de 15.58 $[\Omega]$ y 15.1 $[\Omega]$ en paralelo para la resistencia de cola. Además fue necesario una resistencia de carga de 6800 $[\Omega]$ para limitar la corriente del circuito. Los capacitores del circuito fueron de 1 y 0.0012 $[\mu F]$. En la figura 3.5 se presentan los valores equivalentes de los elementos mencionados.

3.1.3. Osciloscopio

Para visualizar las mediciones y poder grabarlas en una memoria externa se utilizó el osciloscopio (Figura A.2) Tetronix DPO3014 las características se encuentran en la tabla 3.1. El canal 2 del osciloscopio se le asigno la señal de corriente, es decir, la salida de la resistencia shunt, en cambio al canal 4 se le asigno la onda de tensión proveniente

de la pinza esta tensión, esta señal fue definida como el trigger. Las configuraciones del osciloscopio se muestran en la figura B.1.

Dato	Ancho de banda	Rango de muestreo	Límite de grabado	Tiempo de subida
Valor	100 [MHz]	2.5 [Gm/s]	5 Millones	3.5 [ns]

Tabla 3.1: Características del osciloscopio

3.1.4. Resistencia shunt de corriente

Para poder medir la corriente de retorno a tierra, se prensó una resistencia shunt de 180 $[m\Omega]$ en el borde del recipiente de acero (Figura A.5), pues este borde representa la tierra remota.

3.1.5. Pinza de tensión

Para medir la tensión correspondiente al sistema de puesta tierra, se utilizó una pinza de tensión *Tektronix P6015A* (Figura A.4 con las especificaciones indicadas en la tabla 3.2).

Dato	Resistencia	Max Voltaje de impulso	Ancho de banda	Atenuación	Capacitancia
Valor	100 [M Ω]	40 [kV]	75 [MHz]	1:1000	3 [pF]

Tabla 3.2: Características de la punta de tensión

3.1.6. Recipiente de acero galvanizado

El contenedor donde se dispondrá el agua de grifo que representará el terreno del sistema de puesta a tierra, es un recipiente cilíndrico de acero galvanizado. Sus dimensiones son 30 [cm] de alto, 60 [cm] de diámetro y 3 [mm] de grosor.

3.1.7. Electrodos reducidos

Los tres electrodos a escala reducida corresponden a alambres de cobre con 2 [mm] de diámetro. Un alambre es sin GEM (Figura A.10) y representará al sistema de puesta a tierra sin tratamientos de suelo. Los otros dos sí están con GEM (Figura A.11), pero con distintas dimensiones: uno cubre con GEM los 10 [cm] del alambre que estará bajo el agua, y el otro solo un tercio.

3.1.8. Conductivímetro

Para poder medir la resistividad del agua en DC, se utilizó el Conductivímetro portátil *WTW COND3110 IP67*, el cual también permitía medir la temperatura del fluido.

3.2. Resistividad del agua en continua

La medición de la resistividad del agua en corriente continua (DC) se realizó a través del conductivímetro. Las mediciones sobre el agua se efectuaron cuando se encontraba en el recipiente cilíndrico, el mismo día en que se llenó el recipiente con agua de grifo. La conductividad eléctrica del agua se midió a la mitad de la distancia entre la varilla y el borde del recipiente.

Para verificar que el impulso de tensión no alteraba la resistividad del agua, se realizó la medición antes y después de emitir el impulso de voltaje. Lo anterior se ejecutó tanto para la configuración del electrodo simple como para la configuración del electrodo concéntrico con el cilindro de gel, para comprobar que, al sumergir el Erico Gem solidificado en el agua, este no provocaba cambios en la resistividad del agua.

3.3. Construcción de las varillas con gel

Para implementar las varillas con el gel, fue necesario disponer de moldes para que el gel quedara concéntrico con el alambre de cobre. El diámetro se definió tomando como referencia las dimensiones utilizadas en la memoria (Abarca, 2016). Debido al factor de escalamiento, el diámetro interior de los moldes fue de 2 [cm] y la altura de los moldes fue de 3.333 [cm] y 10 [cm], pues también se tiene interés en realizar las mediciones cuando toda la longitud de la varilla sumergida estuviera cubierta con GEM.

Los moldes fueron construidos por una impresora 3D. Para cada molde se imprimió dos mitades de un cilindro hueco y las caras superiores e inferiores como tapas. Este diseño facilitó el proceso de colocar el gel en el molde, con el alambre centrado y una vez que el gel estuviera seco, fuera posible desmontar el molde sin dañar el gel.

Se perforaron las caras superiores de ambos moldes. Para el molde de 3.333 [cm], también se perforó la cara inferior para que el alambre de cobre pudiera atravesarlo. En cambio, para la cara inferior del molde de 10 [cm] de altura, solo se realizó una muesca para que el electrodo no se saliera del centro al momento de rellenar el molde con el gel recién preparado. Los moldes pueden visualizarse en la figura A.7. Para evitar que el gel se escape por los espacios vacíos de los moldes al momento de rellenarlos, se envolvió con cinta adhesiva los moldes, sellando los espacios vacíos. Se esperó durante dos días para asegurarse de que el gel estuviera completamente seco y sólido antes de desmontar el molde

Para preparar el material de refuerzo de puesta a tierra que llamamos gel, se aplicó regla de tres a las cantidades indicadas en (“nVent ERICO GEM”, s.f.) para conocer la proporción de agua y material de refuerzo necesarias en la fabricación.

3.4. Implementación del modelo de escala reducida

El modelo de escala reducida, que representará en escala real a un sistema de puesta a tierra correspondiente a una varilla de 150 [cm], se instaló en el laboratorio de alta tensión del departamento de ingeniería eléctrica de la Universidad Técnico Federico Santa María. El circuito armado en el laboratorio se muestra en la figura 3.1, donde se señalan los objetos relevantes.

Se empleo agua de grifo para representar el suelo, pues su resistividad es mucho menor al del suelo común, permitiendo escalar el parámetro de resistividad y los otros parámetros indicados en la tabla 2.1. El agua se dispuso en un recipiente cilíndrico de acero galvanizado, con 30 [cm] de radio y 30 [cm] de altura, estas dimensiones fueron determinadas según la documentación leída en (Ghoneim y cols., 2007), (He y Chen, 1995) y (Gonos, 2006). El recipiente fue dispuesto sobre listones de madera que cumplían la función de tierra remota. Sobre el recipiente se superpuso una base para situar la pinza de tensión y la regleta que fijara la varilla. El borde del recipiente representa la tierra remota, por lo cual se prensó la resistencia shunt de corriente y a esta última, se prensaron la tierra de la pinza de tensión y la conexión a la malla de tierra del laboratorio, permitiendo así medir la corriente de retorno a tierra.

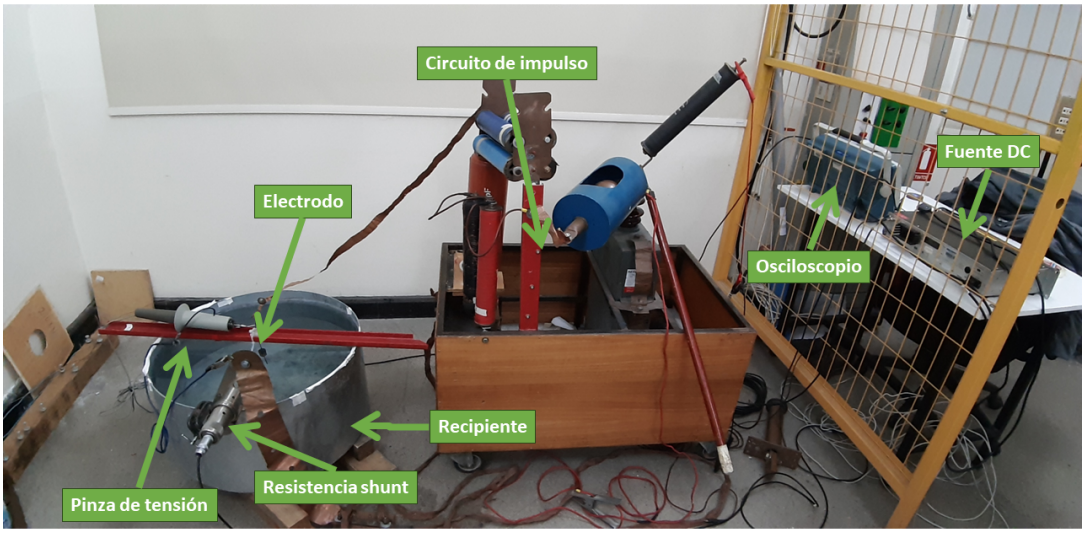


Figura 3.1: Circuito implementado en el laboratorio.

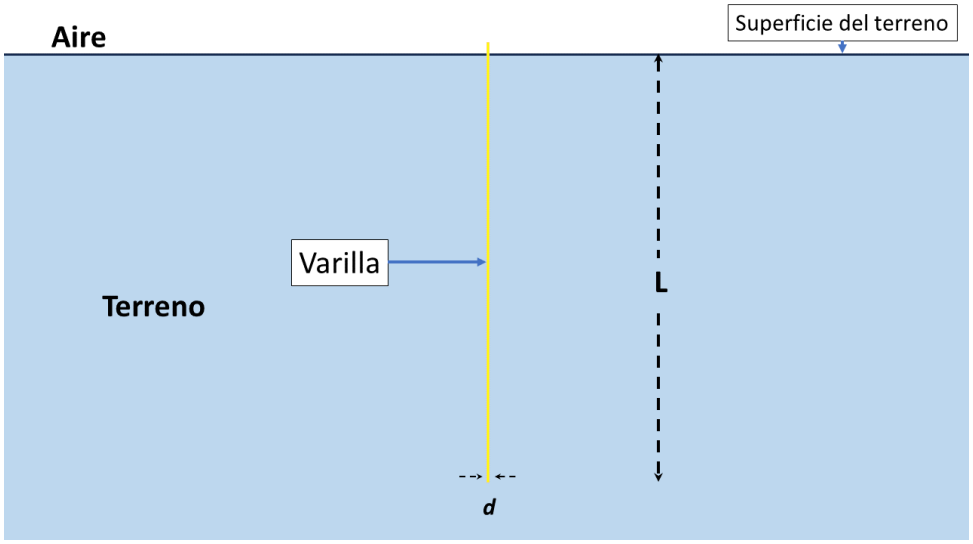
Como el factor de escalamiento utilizado fue de n=15, se requiere que 10 [cm] de alambre estén sumergido bajo el agua, la profundidad con a la cual se sumerge el alambre se controla mediante una regleta, además se requiere que el electrodo se encuentre centrado en el recipiente, lo cual se logró con ayuda de hilos de pescar que sirvieron como guía. En la parte superior del alambre, sobre la regleta, se realizó la conexión con el circuito de impulso y con la pinza de tensión, la pinza de tensión se montó en esta ubicación para que estuviera más cerca del electrodo y poder disminuir el ruido de medición relacionado con el efecto inductivo causado por el largo de los cables. El circuito de impulso de la figura 3.3 estaba conformado por resistencias, capacitancias y una configuración de espinterómetros tipo esfera-esfera.

La figura 3.2 muestra los esquemas transversales de los sistemas de puesta a tierra estudiados, donde las distancias L, d y D, corresponde al largo de la varilla sumergida, diámetro de la varilla y el diámetro del GEM respectivamente. En la figura 3.2a para la varilla simple sin gel, en la figura 3.2b, el escenario donde la altura del gel es de un tercio del largo sumergido en agua de la varilla mientras que en la figura 3.2c, toda la parte de la varilla sumergida se encuentra cubierta con gel. Para el escenario construido, en el laboratorio L, d y D son 10[cm], 2.2[mm] y 2 [cm] respectivamente.

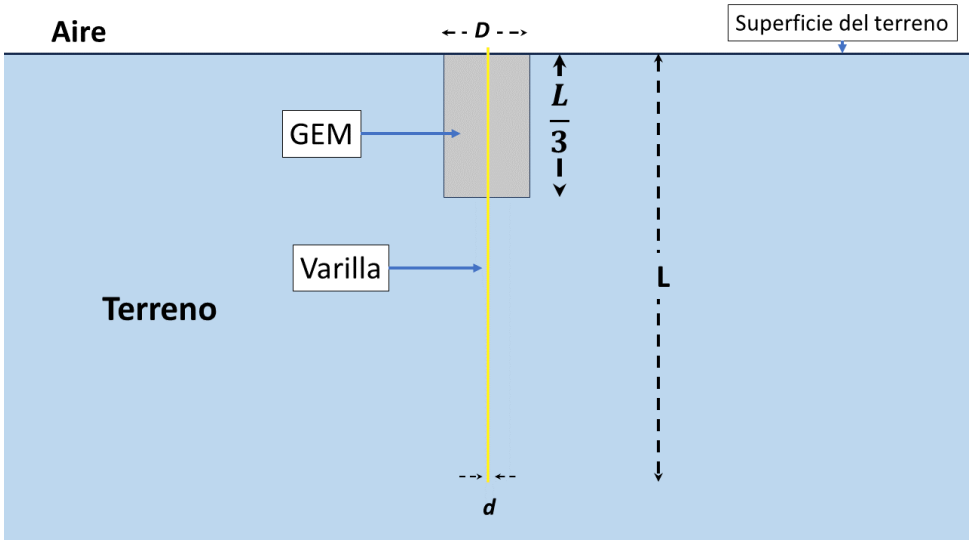
3.5. Generación y medición

El disparo del impulso está determinado por los espinterómetros tipo esfera-esfera (figura 3.4) principalmente por la distancia de separación entre las esferas, la separación se definió en 0.22[mm], pues a esta distancia se presentaba un nivel de tensión soportable por los instrumentos y cables utilizados en el circuito de prueba. El aumento de tensión se realizaba desde el generador de tensión KEIYHLEY (Instruments, 1992), el cual permitía generar tensión de 500-1000-1500-2000 [V] más un ajuste fino de una unidad de volt que iba desde 0 hasta los 1000 [V]. El voltaje seleccionado fue de polaridad negativa, debido a que con esta polaridad se han obtenido valores mayores de impedancia (Tshubwana, Shongwe, y Gomes, 2016), lo que representaría el escenario más desfavorable.

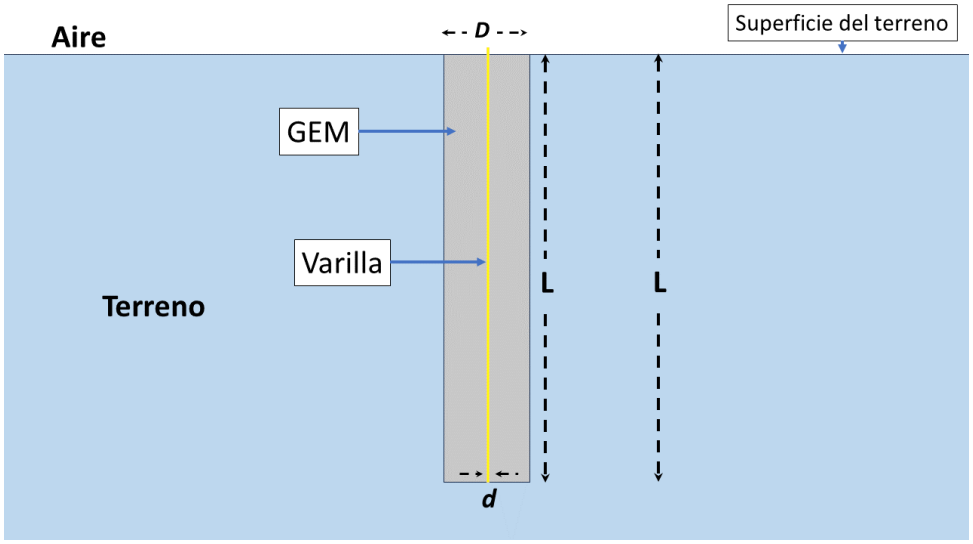
Las señales medidas por la resistencia shunt y la pinza de tensión se visualizaban en el osciloscopio. El osciloscopio permitía guardar las señales en una memoria externa



(a) Esquema Varilla simple



(b) Esquema Varilla con un tercio de gel



(c) Esquema Varilla completamente con gel

Figura 3.2: Esquemas de las varillas

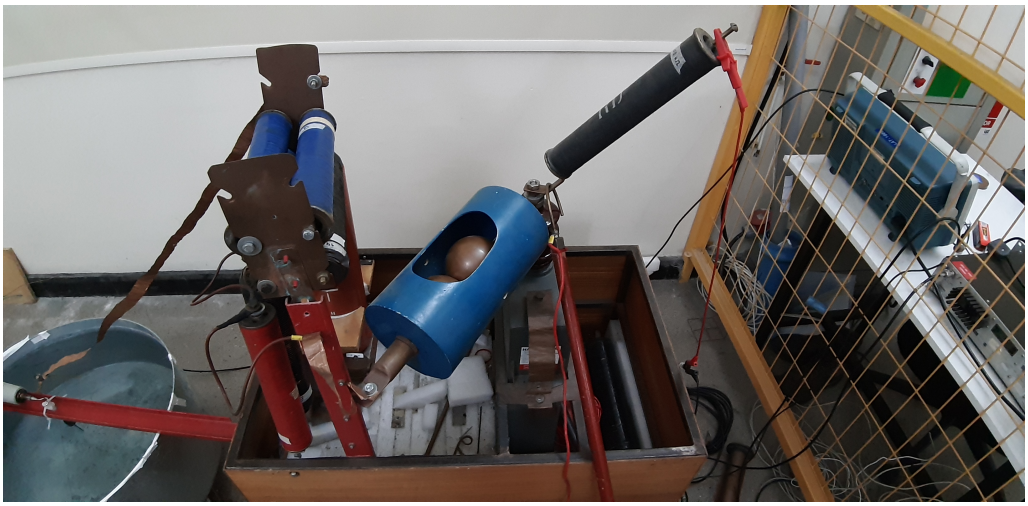


Figura 3.3: Circuito de impulso

USB para ser posteriormente procesadas a través del programa MATLAB, obteniendo así la impedancia de puesta a tierra en función de la frecuencia. Las configuraciones del osciloscopio se muestran en fotos en el Apéndice B.

Se debe tener presente que la pinza de tensión atenúa el voltaje medido en una razón de 1000:1. Por lo tanto, en el osciloscopio se debe amplificar la señal mostrada por 1000 para visualizar la señal con las magnitudes adecuadas. Además, el cable coaxial que sale de la shunt de corriente no llega directamente al osciloscopio. En su lugar, pasa primero por una pinza donde se divide la magnitud por 10. En la figura 3.5 se presenta un esquema del circuito descrito anteriormente.



Figura 3.4: Espinterómetros.

Donde V1 representa a la fuente DC, R_S a la resistencia de frente, R_P a la resistencia de cola, SW2 a los espinterómetros, el símbolo A corresponde a la resistencia shunt, V a la pinza de tensión y Z_P al sistema de puesta a tierra escalado, es decir, al alambre de cobre con 10 [cm] sumergido en agua, que puede estar con gel.

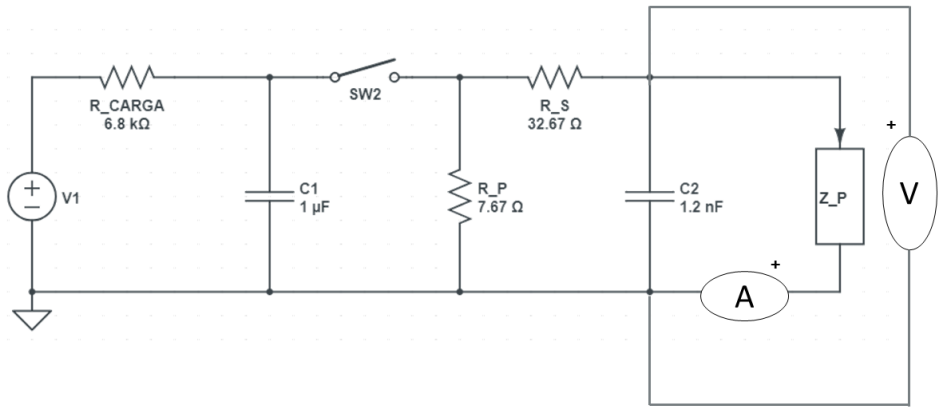


Figura 3.5: Esquema del circuito implementado en el laboratorio.

3.6. Procesamiento de los datos medidos

Las señales se guardaron en una memoria USB en formato CSV para su posterior procesamiento en un archivo de MATLAB. Estos archivos contienen información sobre el tiempo y el voltaje. Es importante tener en cuenta que la señal medida por la resistencia shunt corresponde a una señal de tensión. Por lo tanto, para obtener la señal de corriente de retorno, es necesario dividir la señal por el valor de la resistencia shunt utilizada, que en este caso fue de 180 [mΩ].

También se debe considerar que el voltaje medido por la pinza de tensión incluye la caída de tensión en la resistencia shunt. Por lo tanto, para obtener una medición más precisa del voltaje en el sistema de puesta a tierra, es necesario restar el voltaje registrado por la resistencia shunt a la medición de la pinza de tensión. Aunque esta diferencia no es significativa debido al bajo valor de la resistencia shunt.

Una vez obtenidos los datos de tensión y corriente, se les aplica el comando FFT de MATLAB para disponer de la transformada de Fourier de los datos obtenidos en el laboratorio y posteriormente calcular su magnitud y ángulo. A partir de estas operaciones, se logra obtener la impedancia de puesta a tierra en el dominio de la frecuencia. El código de MATLAB utilizado para obtener la impedancia de puesta a tierra a partir de las mediciones en el laboratorio, se encuentra en el Apéndice C.

Capítulo 4

Simulación

En el presente capitulo se presentan los planteamientos para realizar las simulaciones obtenidas tanto para la varilla sin gel, a través del método híbrido implementado en MATLAB, como para las varillas con gel, cuya simulación se basó en el MEF y se ocuparon los softwares gmsh-getdp. Para ambos escenarios se considera la resistividad y permitividad del agua variables con la frecuencia, por lo tanto, primero fue necesario determinar estos valores.

4.1. Determinación de los parámetros del agua

Para poder realizar la simulación de las pruebas de impedancia de puesta a tierra frente a impulso, fue necesario obtener los parámetros de resistividad y permitividad del agua en el rango de frecuencia de 5[kHz] a 1[MHz] (Montaña y cols., 2023). Para realizar lo anterior, fue necesario utilizar una función base $\{\phi_i\ (\omega)\}_{i\in N}$ donde N corresponde a los nodos de sustento de la aproximación, para poder modelar su comportamiento según

$$\rho(\omega) = \sum_{i\in N} \rho_i \phi_i(\omega) \tag{4.1}$$

$$\varepsilon_r(\omega) = \sum_{i\in N} \varepsilon_{r,i} \phi_i(\omega) \tag{4.2}$$

Donde ρ corresponde a la resistividad, ε_r a la permitividad, ω a la frecuencia angular, y $\{\rho_i, \varepsilon_{ri}\}$ son los parámetros que se desconocen del modelo. Para cuantificar estas distribuciones, se requiere definir el vector x de incógnitas de la siguiente manera:

$$x = [\rho_1, ..., \rho_N, \varepsilon_{r,i}, ..., \varepsilon_{r,N}]^T \tag{4.3}$$

Al usar esta definición y considerar una formulación estándar de error en variables que busca minimizar el error cuadrático integral medio entre la impedancia de puesta a tierra medida Z_{MED} y predichas por el modelo MEH Z_{MEH}, entonces podemos expresar el problema de programación matemática que permite identificar x de la siguiente manera:

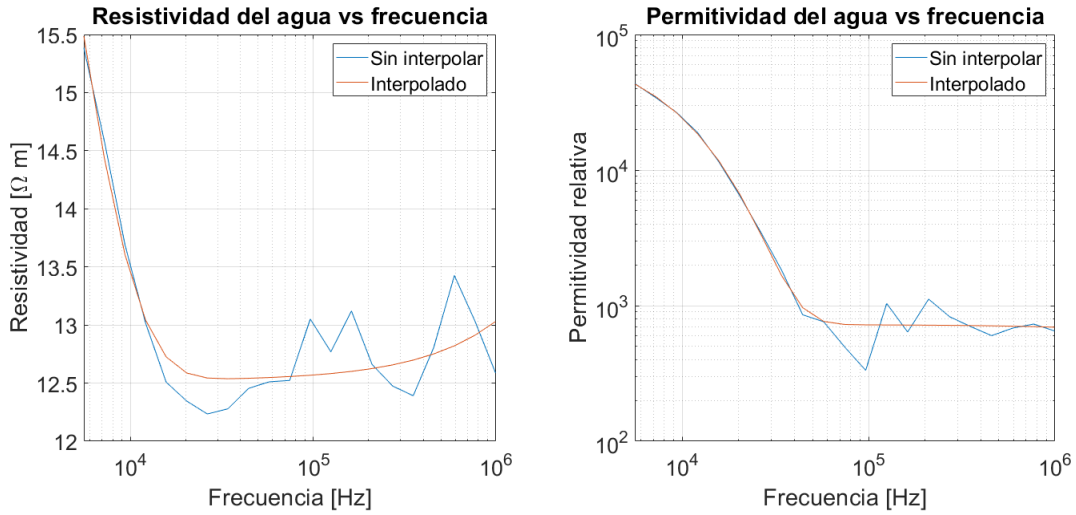
$$\min_x \mathbb{E}_C \left[\int_{\mathcal{W}} \left(Z_{MED}\left(\omega, C\right) - Z_{MHE}\left(\omega, C, x\right) \right)^2 d\omega \right] \tag{4.4}$$

donde C es el conjunto de condiciones ocupadas en el proceso de identificación. Las mediciones de impedancia de puesta a tierra corresponden a la varilla simple sin considerar el gel.

Para resolver este problema, se utilizó un código incorporado en Matlab, que usa la función lscurvefit para resolver el problema de mínimos cuadrados incrustados. El algoritmo fue trust-region-reflective y todas las tolerancias se establecieron en 10^{-6}.

Al apreciar que la curva de resistividad del agua presentaba evidentes oscilaciones, se optó por realizar una interpolación del tipo doble exponencial, con la aplicación Curve Fitter en MATLAB, obteniendo una curva más suave de la resistividad del agua y de la magnitud de impedancia de puesta a tierra. La acción anterior no fue necesaria para la permitividad del agua, pues las oscilaciones de la permitividad no influyen en gran medida sobre la magnitud de impedancia de puesta a tierra.

Los valores de resistividad y permitividad utilizados en las simulaciones corresponden a los valores de la figura 4.1. Siendo en el caso de la resistividad (Figura 4.1a) los valores interpolados y en el caso de la permitividad (Figura 4.1b) los valores sin interpolar.



(a) Resistividad del agua

(b) Permitividad relativa del agua

Figura 4.1: Resultados de los parámetros del agua

4.2. Simulación de la varilla sin gel

Se baso en el modelo electromagnético híbrido, para poder implementar un modelo en el dominio de la frecuencia para el caso de la varilla sin gel.

La simulación a escala reducida consistió en simular el modelo implementado en el laboratorio de alta tensión del departamento de ingeniería eléctrica de la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM), es decir, una varilla con 10 [cm] sumergida en agua.

El escenario de escala real corresponde a un terreno con una resistividad en DC de 15 veces mayor al de agua, es decir a un terreno de 240[ohm-metro], en el cual se instala una varilla de un metro y medio de largo con un radio de 1.5 [cm], además en el escenario de escala real se contempla que el sistema de puesta a tierra recibe un impulso de tensión con un tiempo de frente de 15.9 [us] y un tiempo de cola de 112.2[us]. Para poder comparar los resultados de las simulaciones es importante considerar el factor de escala en las frecuencias.

En la tabla 4.1 se muestran los valores utilizados para ambas escalas, donde ρ_{agua} corresponde a la resistividad del agua obtenida en la sección 4.1 y $[f_1 \ldots . f_{21}]$ a las fre-

cuencias utilizadas en la misma sección.

Escala	**Parámetro**			
	Radio de la varilla [m]	Largo de la varilla [m]	Resistividad del terreno [Ω m]	Frecuencia [Hz]
Reducida	0.0011	0.1	ρ_{agua}	$[f_1 \ldots . f_{21}]$
Real	0.0165	1.5	$15 \cdot \rho_{agua}$	$[f_1 \ldots . f_{21}]$ / 15

Tabla 4.1: Valores de los parámetros para la simulación de la varilla simple

El código en MATLAB fue propuesto por Silverio Visacro (Visacro, 1992) y las bases teóricas se presentaron en la sección 2.9. A continuación se presentan los pasos de la simulación.

4.2.1. Definición de constantes

El primer paso es definir las constantes de interés para el modelo, estas incluyen el radio del conductor, la conductividad del conductor, la permeabilidad del vació, la permitividad del vació, la permitividad relativa del terreno, la conductividad del terreno y la amplitud de la corriente. Los valores de conductividad y permitividad en este paso corresponde a los valores en DC. Al cambiar de escala se debe modificar los valores del radio de la varilla, la conductividad del terreno y permitividad relativa del terreno.

4.2.2. Definición espacial de la varilla

Se establece una matriz *mc* para definir espacialmente la ubicación de las barras conductoras. La dimensión de la matriz es de 7x1 donde los tres primeros elementos corresponde a las coordenadas x,y,z de un extremo de la varilla, los elementos de la posición 4, 5 y 6 corresponde a las coordenadas x,y,z del otro extremo de la varilla y el ultimo elemento es el numero de particiones de la varilla.

$$mc = [x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, Numero\ de\ particiones] \tag{4.5}$$

En la matriz *ma* debe considerarse los cambios en las dimensiones del electrodo cuando se simula la escala real y la escala reducida.

4.2.3. Inyección de corriente

El nodo de inyección de corriente debe coincidir con algún nodo definido en la sección 4.2.2. Se define el nodo superior de la varilla como punto de inyección de corriente, debido a que experimentalmente desde de este nodo se realizarán las mediciones de tensión.

4.2.4. Matriz de segmentos

A partir de la matriz *mc* creada en la sección 4.2.2, se construye la matriz de segmentos *ma*. Se procede a calcula la longitud de cada segmento y a enumerar los nodos.

4.2.5. Relaciones circuitales de tensión y corriente

De la matriz *ma* se genera una matriz *mco* que almacena los números de nodo asociados a cada conductor. Esta última matriz posee dos columnas que indicaban el nodo inicial y final de cada segmento. Se crearon las matrices M1 y M2 para poder establecer las relaciones de tensión y corriente a través de la numeración de nodos de los conductores

mco. En la matriz M1, se asignaron coeficientes de 0.5 en las columnas correspondientes a los nodos inicial y final de cada conductor. En cambio, para la matriz M2 se asignaron coeficientes de -1 y 1 en las columnas del nodo inicial y final, respectivamente. Los valores no especificados en las matrices se completaron con ceros

4.2.6. Vector de inyección de corriente y frecuencia

Se define un vector de corrientes inyectadas en el circuito. Este vector se basó en la coincidencia de coordenadas entre el punto de inyección propuesto y los nodos definidos en la matriz *ma*.

A partir de la frecuencia, resistividad y permitividad de la sección 4.1 se puede calcular la frecuencia angular, permitividad compleja, constante de propagación, constante del potencial escalar y la constante del potencial vectorial.

4.2.7. Matrices longitudinales y transversales

De los parámetros obtenidos en la sección 4.2.6 se puede obtener las matrices de impedancia longitudinal y transversal para cada valor de frecuencia, las que permitirán calcular la admitancia transversal modificada y la admitancia longitudinal modificada. Estas últimas matrices se ocuparán para calcular las corrientes transversales y longitudinales en cada conductor segmentado de la puesta a tierra, así como las tensiones nodales.

4.3. Simulación de la varilla con gel

La simulación de la varilla con gel se realizó en base al MEF. Gmsh y GetDP fueron los softwares computacionales seleccionados para generar y realizar los cálculos del mallado.

4.3.1. Supuesto sobre el gel

Como la resistividad del gel es muy reducido en comparación a la resistividad del terreno, se trabajó bajo el supuesto en que el GEM se encuentra a equipotencial con el electrodo, por lo cual es posible considerar el cilindro del GEM como una extensión de la varilla de cobre. Por lo anterior, al GEM se le asigna las mismas características eléctricas que el cobre.

4.3.2. Geometría y características

Debido a la simetría axial que se presenta, no es necesario replicar la geométrica completa del sistema de puesta a tierra. Por lo anterior solo se dibujó una sección de la geometría total, como se muestra en la figura 4.2. La información sobre la geometría a mallar, junto a las especificaciones de cada región (aire, terreno, varilla y gel) y sus fronteras, se guardo en un archivo.geo para que fuera posible ser leída por el programa Gmsh. El tamaño del mallado se definió como 20 veces menor de la distancia hacia el borde definido como infinito.

Una vez definidas las geometrías de las regiones y el tamaño del mallado, se implementaron las funciones de reluctancia, permitividad y corriente.

4.3.3. Restricciones

Además, se restringieron los valores del vector de potencial magnético en la región del borde superior del aire, la corriente inyectada en la superficie común del gel con el

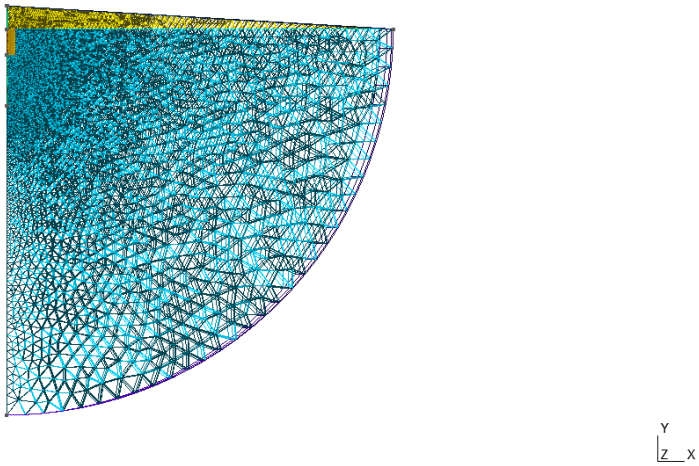


Figura 4.2: Mallado de la simulación para la varilla con gel.

aire y la tensión en la región correspondiente al contorno infinito del terreno en 0, -1/20 y 0 respectivamente.

4.3.4. Del dominio fisco al dominio computacional

Posteriormente se definen los métodos Jacobiano y el método de integración. Los métodos Jacobiano se utilizan para calcular el Jacobiano de la transformación del dominio físico al dominio computacional. El método de integración se utiliza para integrar las ecuaciones sobre el dominio computacional.

El dominio computacional es una representación matemática del dominio físico en el que se aplican las ecuaciones de Maxwell. Debe ser consistente con el dominio físico y lo suficientemente pequeño como para resolverse rápidamente, pero lo suficientemente grande como para representar con precisión el dominio físico.

4.3.5. Espacios de funciones

Luego se define los espacios de funciones para el potencial vectorial magnético **A** y el potencial escalar eléctrico ϕ.

Los espacios de funciones se definen utilizando funciones base, que son funciones simples que se combinan para formar funciones más complejas. Las funciones base utilizadas fueron BF_Edge y BF_Node.

Las funciones base BF_Edge son funciones que se definen a lo largo de los bordes de una malla, mientras que las funciones base BF_Node son funciones que se definen en los nodos de una malla. Al utilizar estas funciones base el código de simulación puede representar soluciones a EDP que son continuas a lo largo de los bordes y en los nodos de una malla. Esto es importante para asegurar que las soluciones sean precisas y estables

Después, se define la formulación para las ecuaciones de Maxwell en el dominio del tiempo 3D. La formulación consiste en un conjunto de ecuaciones que se utilizan para calcular los valores de **A** y ϕ. Las ecuaciones están escritas utilizando el método Galerkin, que es un método para discretizar las ecuaciones. Las dos principales ecuaciones a tener en cuenta son las siguientes:

Dimensiones simuladas	Escala real	Escala reducida
Radio del gel [m]	0.15	0.01
Altura del gel [m]	0.5 & 1.5	0.0333 & 0.1
Altura aire [m]	0.45	0.03
Radio infinito [m]	7.5	0.5

Tabla 4.2: Datos simulados de la varilla con gel

$$-\nabla^2\phi - \frac{\partial(\nabla \cdot \mathbf{A})}{\partial t} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \tag{4.6}$$

$$\nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2\mathbf{A} = \mu_0\mathbf{J} - \mu_0\varepsilon_0\frac{\partial(\nabla\phi + \frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t})}{\partial t} \tag{4.7}$$

donde ρ es la densidad de carga, $\mathbf{J}$ la densidad de corriente, ε_0 la permitividad del vació y μ_0 la permeabilidad del vació.

4.3.6. Resolución

Posteriormente se define la resolución para la formulación. La resolución consiste en un sistema de ecuaciones que se resuelve para encontrar los valores de $\mathbf{A}$ y ϕ. El sistema de ecuaciones se resuelve utilizando el método GMRES.

Finalmente se define el postprocesamiento para la formulación. El postprocesamiento consiste en un conjunto de cantidades que se calculan a partir de los valores de $\mathbf{A}$ y ϕ. Las cantidades se calculan utilizando las funciones Term e Integral.

4.3.7. Ionización

Las dimensiones utilizadas en las simulaciones iniciales de la varilla con GEM se presentan en la Tabla 4.2. Sin embargo, se encontró una mayor diferencia entre la magnitud de impedancia de puesta a tierra ($|Z|$) experimental y simulada en comparación con el caso de la varilla sin gel.

Esta diferencia se le asocio a un mayor efecto de ionización en los casos de las varillas con gel, el cual puede ser causado por una mayor superficie de contacto con el agua o por los minerales que contiene el gel. Como resultado, la $|Z|$ experimental fue mucho menor que la $|Z|$ simulada.

Para poder considerar este efecto en la simulación, se optó por duplicar el diámetro del gel. Obteniendo resultados de simulación más cercano a las mediciones.

El efecto de ionización se debe a la creación de iones en el aire, o en este caso en el agua. Estos iones pueden conducir electricidad, lo que reduce la impedancia de puesta a tierra. Al duplicar el diámetro del gel en la simulación, se aumenta el área que está en contacto con el agua, lo que aumenta el efecto de ionización y reduce aún más la impedancia de puesta a tierra en la simulación, haciéndola más cercana a la magnitud experimental.

Capítulo 5

Resultados y análisis

El presente capítulo muestra los resultados obtenidos de las mediciones en el laboratorio y de las simulaciones. Los resultados en general se presentan en forma de gráficas, en las que el eje de las abscisas corresponde a la frecuencia. Debido al amplio rango de frecuencias, se utiliza una escala logarítmica en el eje de las frecuencias. Tanto los resultados experimentales como los de las simulaciones se muestran hasta la frecuencia de 1 [MHz], con la excepción de los resultados de la simulación en escala real, que se muestran hasta una frecuencia menor debido al escalamiento de la frecuencia.

5.1. Resultados de las mediciones

5.1.1. Mediciones de la resistividad del agua en DC

Como se mencionó en la sección 3.2, se realizaron mediciones de la conductividad del agua en DC, para verificar que el comportamiento en DC del agua no se viera afectado por el impulso ni por el gel, los resultados se muestran como resistividad en [Ωm] en la tabla 5.1, en la cual se puede apreciar que no existe variación de la resistividad del agua en DC, debido al contacto con el gel solidificado. Recién a la semana siguiente, se observó una leve alteración en la resistividad del agua en contacto con el gel, que pasó de 17.5 [Ωm] a 17.3 [Ωm], lo que equivale a una reducción de tan solo un 1.14 %. Debido a este porcentaje tan reducido, no se le puede atribuir de forma certera el cambio de la resistividad del agua a su contacto con el gel, pues también pueden influir las condiciones ambientales.

Caso	Resistividad [Ωm]
Sin gel antes del impulso	17.5
Con gel antes del impulso	17.5
Con gel después del impulso	17.5

Tabla 5.1: Resultados de la resistividad del agua en DC

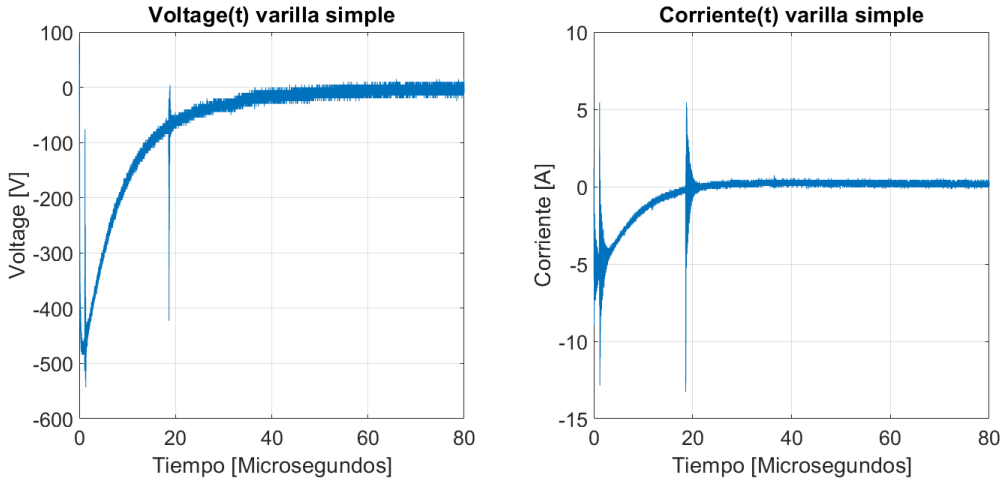
5.1.2. Resultados de las mediciones de tensión y corriente

Es importante tener en cuenta que las mediciones realizadas en el laboratorio no son de impedancia en la frecuencia, sino de la tensión de puesta a tierra y la corriente de retorno, ambas en el tiempo. Para las tres configuraciones se utilizó el mismo circuito

de impulso, sin modificarse ninguna resistencia ni condensador. Sin embargo, como la probeta era diferente en cada escenario, se presentaron diferentes formas de tensión y corriente, aunque todas muy similares. Estas formas de tensión y corriente se muestran en las figuras 5.1, 5.2 y 5.3.

El mayor ruido proviene de la medición de corriente, debido al contacto entre la resistencia shunt de corriente y el recipiente de acero galvanizado. Esto se debe a que la resistencia shunt, al ser plana, no puede hacer contacto completo con la superficie del recipiente cilíndrico. Otras fuentes de ruido son la inductancia debido al largo de los cables, y el efecto capacitivo que se genera entre el electrodo y la resistencia shunt de corriente debido a la cercanía entre ellos.

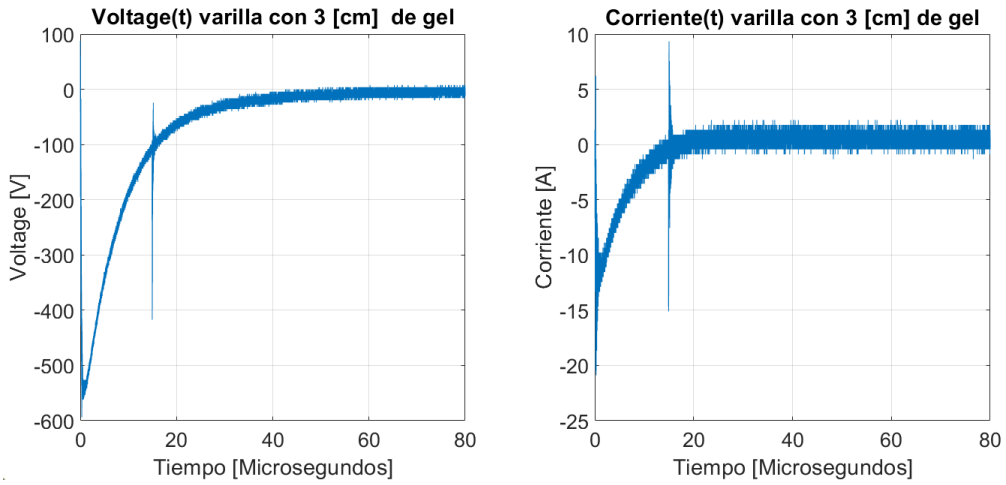
La señal de corriente con menor cantidad de ruido corresponde a la varilla cubierta completamente con GEM. Se deduce que esto se debe a que el gel se comporta como una extensión del alambre, aumentando su área transversal.



(a) Tensión para la varilla con simple.

(b) Corriente para la varilla simple.

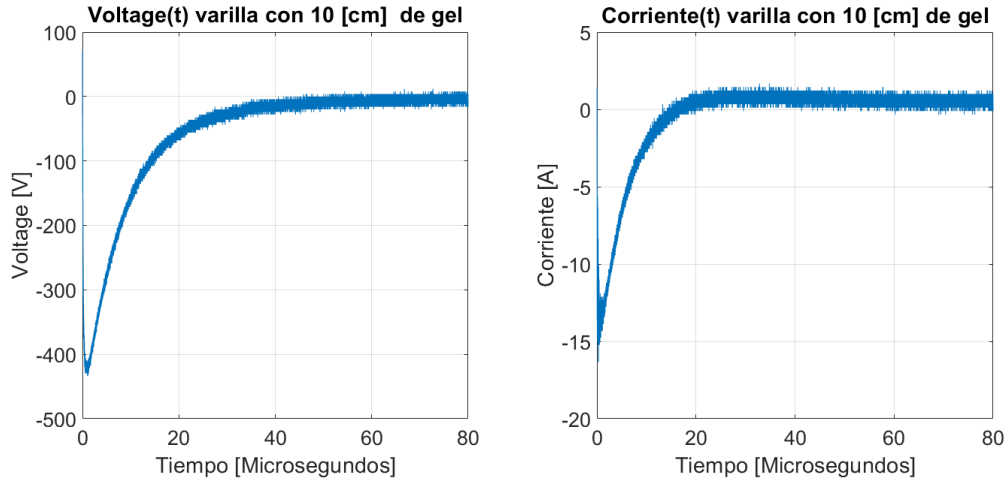
Figura 5.1: Tensión y corriente para la varilla simple.



(a) Tensión para la varilla con 3 centímetros de gel.

(b) Corriente para la varilla con 3 centímetros de gel.

Figura 5.2: Tensión y corriente para la varilla con 3 [cm] de gel.



(a) Tensión para la varilla con 10 centímetros de gel.

(b) Corriente para la varilla con 10 centímetros de gel.

Figura 5.3: Tensión y corriente para la varilla con 10 [cm] de gel.

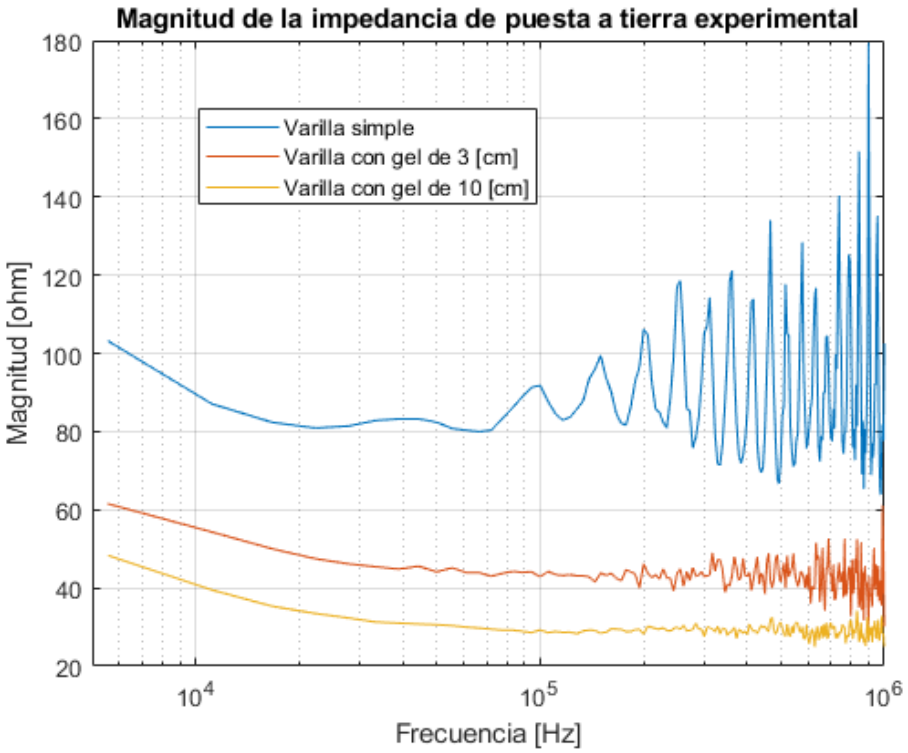
5.1.3. Resultados experimentales de la impedancia de puesta a tierra

Los resultados sobre las mediciones de la impedancia de puesta a tierra en función de la frecuencia se muestran hasta 1[MHz] en la figura 5.4, ya que para frecuencias superiores no es posible discernir claramente la tendencia de las mediciones, debido al ruido causado por el efecto capacitivo entre los instrumentos de medición.

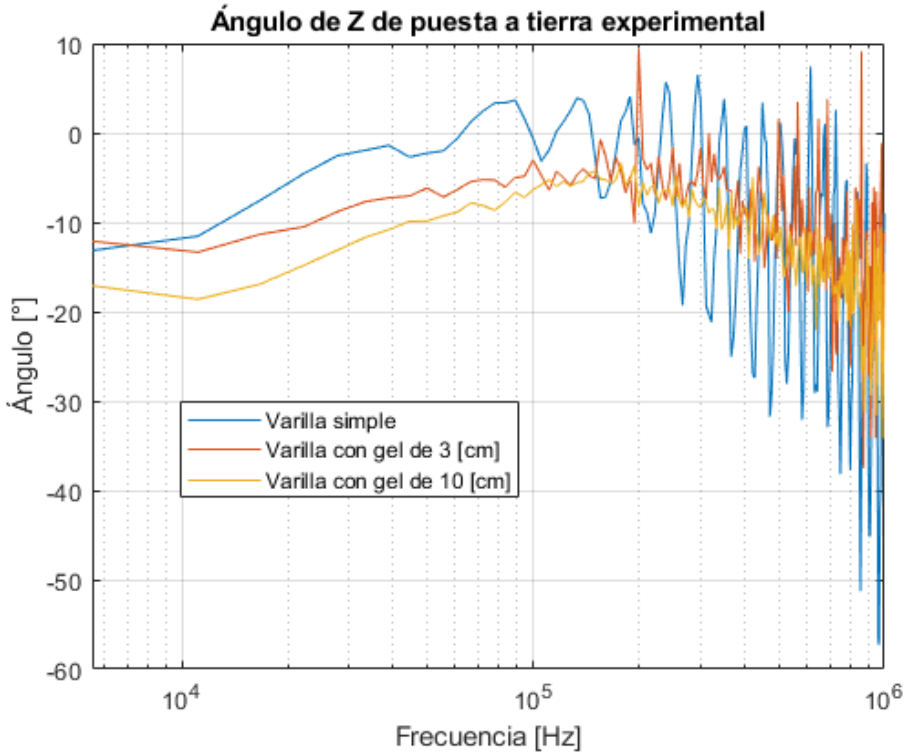
La figura 5.4a presenta las magnitudes de la impedancia de puesta a tierra obtenidas en el laboratorio, en la cual se puede apreciar que para la varilla simple los valores parten en 104 [Ω] y va en decaimiento hasta la frecuencia de 20[KHz], en la cual toma el valor de 84 [Ω], posterior a esta frecuencia se empiezan a observar oscilaciones asociadas al ruido de la medición, resultando en que la impedancia toma valores desde los 63 [Ω] hasta los 180[Ω] en el rango analizado. Para las otras dos configuraciones vistas, se aprecia comportamientos similares, pero con una menor magnitud y en otros rangos de frecuencia. En la varilla con 3[cm] de gel el decaimiento antes de las oscilaciones, que comienzan en la frecuencia de 40[Khz], es desde los 62 [Ω] hasta los 45 [Ω], en cambio para la varilla con 10 [cm] de gel las oscilaciones comienza a la frecuencia de 95[KHz] y antes de estas la magnitud de impedancia cae desde los 50 [Ω] hasta los 29 [Ω].

Los ángulos medidos en el laboratorio se logran ver en la figura 5.4b. Se puede apreciar que en todo el rango de frecuencia mostrado los ángulos de las configuraciones poseen valores cercanos entre sí, pero los ángulos medidos para la varilla simple presentan mayores magnitudes en las oscilaciones (lo cual también se observó para la magnitud de impedancia experimental). El comportamiento que se logra apreciar para los ángulos de las tres configuraciones es que parten de un valor negativo, entre -10° y -20° van subiendo su valor hasta la frecuencia de 145[KHz], donde ya se presentan oscilaciones, pero se logra apreciar una tendencia a disminuir el valor del ángulo después de esta frecuencia. Al presentarse ángulos negativos en la impedancia, demuestra que la puesta a tierra posee un comportamiento capacitivo frente a un impulso.

Los resultados obtenidos son los esperados, pues el propósito del gel es disminuir la resistividad del terreno donde es aplicado, lo cual disminuye la impedancia de puesta a tierra. Esto se ve reflejado en todo el rango de frecuencia analizado. Además, es previsible que entre más gel se aplique se tenga una menor magnitud de impedancia, pues entre más material se ocupe más se reducirá la resistividad del terreno en su conjunto. Con



(a) |Z| Experimental.



(b) Ángulo experimental.

Figura 5.4: Mediciones experimentales.

respecto a los ángulos obtenidos en el laboratorio, no se observan grandes discrepancias en el comportamiento entre las tres configuraciones probadas, en los tres escenarios se observa en general un comportamiento capacitivo.

5.2. Resultados de las simulaciones

Las simulaciones se realizaron considerando la dependencia de la resistividad y permitividad del agua en función de la frecuencia, los cuales se pueden observar en la figura 4.1. Al igual que los resultados experimentales, todos los resultados de la simulación se presentan hasta la frecuencia de 1[MHz] a excepción de los resultados de la simulación en escala real, ya que debido al escalamiento de la frecuencia los resultados se presentan en un menor rango, es decir, a frecuencias más bajas.

5.2.1. Resultados de los parámetros del agua

Como se mencionó en capítulos anteriores para poder realizar las simulaciones de puesta a tierra, primero fue necesario obtener los parámetros del agua. Los resultados al seguir el procedimiento indicado en la sección 4.1, se mostraron en la figura 4.1, donde además se puede apreciar las curvas resultantes al interpolar los datos obtenidos.

La interpolación realizada fue del tipo doble exponencial, ya que así, se define a la función tipo impulso (Jaiswal y Singh, 2018). En la figura 4.1a, se puede apreciar que al interpolar los valores de resistividad del agua se obtiene una curva más suave, si bien las oscilaciones también se presentan en la permitividad del agua como se puede ver en la figura 4.1b, al ocupar los valores interpolados de la permitividad, no se presentan mayores diferencias en los resultados de la magnitud de impedancia de puesta a tierra entregados por la simulación, como se aprecia en la figura 5.5, son los valores interpolados de la resistividad lo que conllevan a una curva más suave de la impedancia de puesta a tierra simulada. Las gráficas de impedancia de puesta a tierra mostradas en adelante serán considerando la interpolación de la resistividad del agua.

Se observa que los valores de resistividad no presentan diferencias significativas en el rango de frecuencia analizado. La resistividad del agua en DC se midió con un conductivímetro, y el valor fue de 17.5 Ωm, lo cual guarda sentido con los resultados visualizados en la figura 4.1a. Por otro lado, los valores de permitividad relativa presentan una variación considerable en el rango de frecuencia bajo análisis, siendo el valor más bajo 300 y el más alto 40 000.

5.2.2. Resultados de las simulaciones de impedancia de puesta a tierra a escala reducida

Se procede a presentar los resultados obtenidos en las simulaciones para las tres configuraciones, tanto para la escala reducida como para la escala real. En los casos de escala reducida, se mostrará más de un resultado de simulación por configuración para poder apreciar las similitudes y diferencias al cambiar ya sea el método o un parámetro de la simulación.

5.2.2.1. Comparación MEH y MEF para la varilla simple

Para poder contrastar los resultados de la simulación para la varilla simple, se presentan en la figura 5.6 la impedancia de puesta a tierra obtenidas a través de MEH y MEF, las magnitudes se muestran en la figura 5.6a mientras que los ángulos en la figura 5.6b.

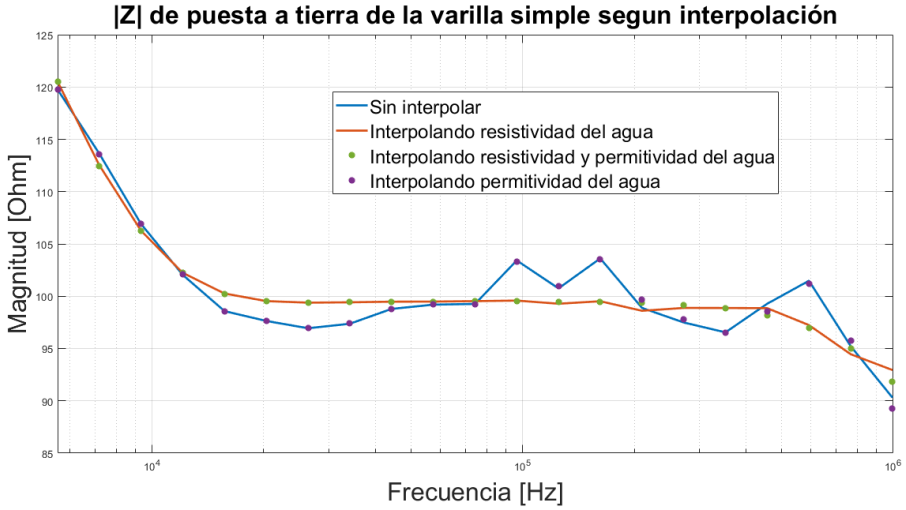
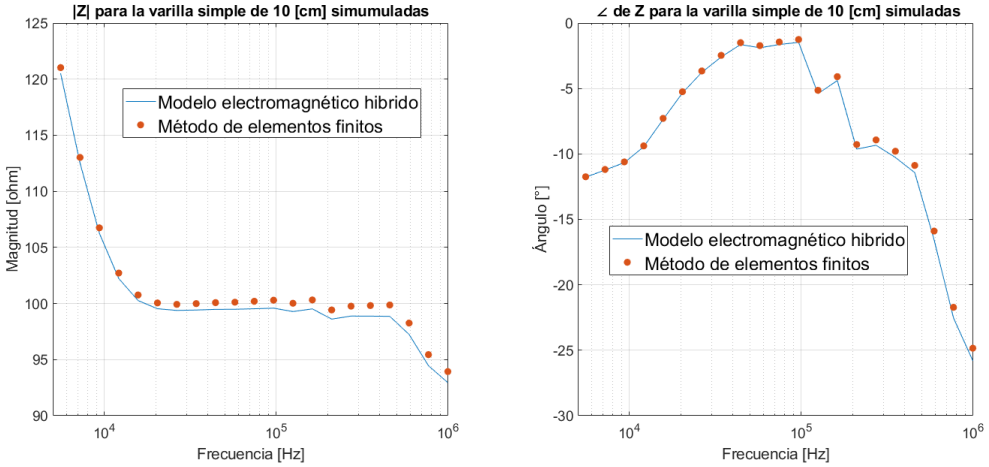


Figura 5.5: $|Z|$ según interpolación.



(a) Magnitudes simuladas

(b) Ángulos simulados

Figura 5.6: Comparación de las simulaciones con MEH Y MEF para la varilla simple.

Se puede ver claramente que, a pesar de que los métodos utilizados en la simulación fueron diferentes, los resultados son muy similares, tanto para la magnitud como para el ángulo de la impedancia de puesta a tierra. Para el caso de la magnitud de impedancia, solo se puede notar que los resultados obtenidos con el MEF son ligeramente superiores a los obtenidos con el MEH. Esto sugiere que ambos procedimientos son correctos.

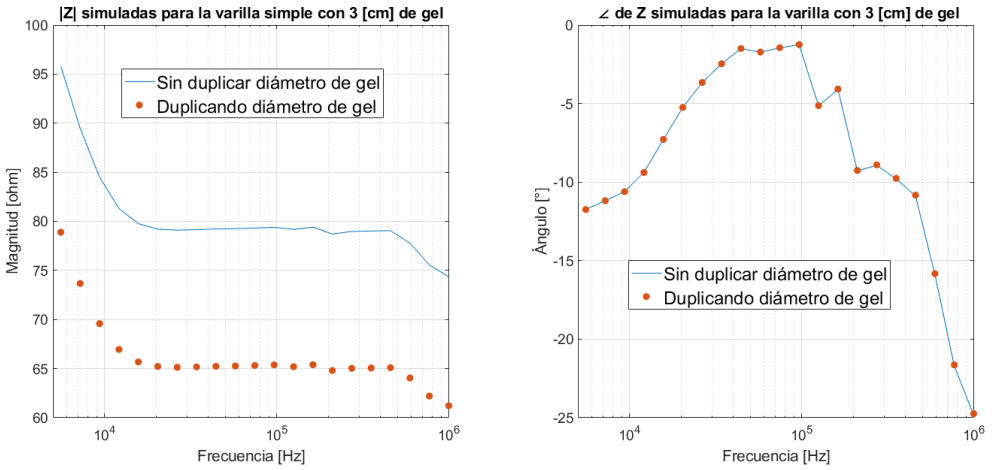
En la figura 5.6a, se observa que la magnitud de impedancia comienza en 120 $[\Omega]$ y decae notoriamente hasta los 100 $[\Omega]$ a la frecuencia de 20[KHz]. Debido a la interpolación realizada sobre la resistividad del agua, no se observan grandes oscilaciones en altas frecuencias. Con lo anterior se visualiza que en el rango de frecuencias de 20 [KHz] a 400 [KHz], la magnitud de impedancia de puesta a tierra de la varilla simple se mantiene cerca de los 100 $[\Omega]$. Para las frecuencias superiores a 400 [Khz], se observa un cambio en la pendiente de $|Z|$, ocurriendo un nuevo decaimiento.

El comportamiento del ángulo de la impedancia de puesta a tierra simulado de la varilla simple es idéntico para ambas simulaciones. En todo el rango de frecuencia estudiado se aprecia que el ángulo siempre toma valores negativos demostrando un comportamiento capacitivo de la puesta a tierra simulada. Para frecuencias menores a 100[kHz],

se aprecia que el ángulo asciende desde los -12[°] hasta el -1[°], por lo contrario, para frecuencias superiores a 100[kHz] se advierte un decaimiento del ángulo hasta los -25[°], dentro del rango de frecuencia analizados.

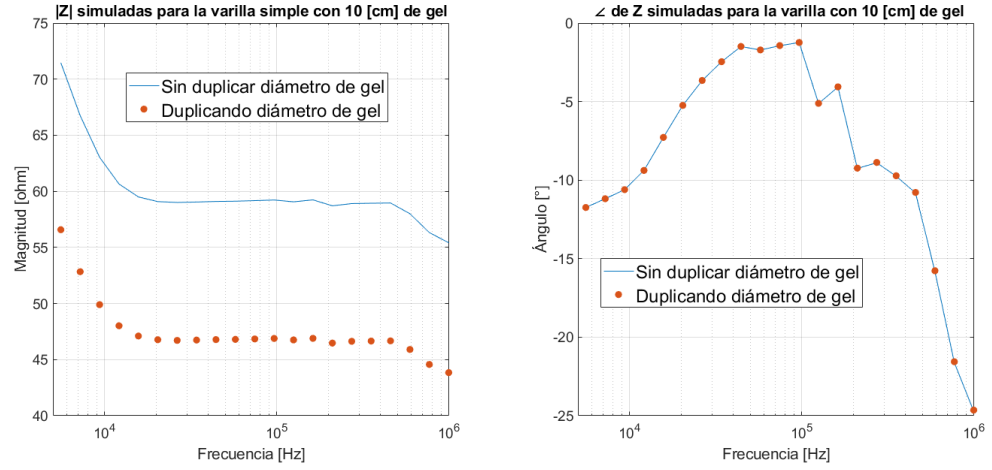
5.2.2.2. Comparación de las simulaciones de las varillas con gel

Las simulaciones iniciales de las varillas con gel diferían de los resultados experimentales en una diferencia mayor que la presentada en el caso de la varilla sin gel, lo cual se hablara con mayor detalle en la sección 5.4. Esta distinción se atribuyó al efecto de ionización, que es mayor en los escenarios con gel. Por lo tanto, se duplicó el diámetro del gel en la simulación para poder representar este fenómeno. En las figuras 5.7 y 5.8, se presentan los resultados de las simulaciones iniciales y considerando el doble del diámetro del gel.



(a) Magnitudes simuladas. (b) Ángulos simulados.

Figura 5.7: Comparación de las simulaciones de la varilla con 3 [cm] de gel.



(a) Magnitudes simuladas. (b) Ángulos simulados.

Figura 5.8: Comparación de las simulaciones de la varilla con 10 [cm] de gel.

Como se mencionó anteriormente, al duplicar el radio del gel se consigue una menor |Z| de la puesta a tierra, como se muestra en las figuras 5.7a Y 5.8a, acercándose más al valor experimental. Además, se aprecia que, al modificar las dimensiones del gel, ya sea el diámetro, la altura o ambas, no se altera el comportamiento de |Z|, pues para todos los

casos estudiados se observa un decaimiento en bajas frecuencias, luego entre los 20[KhZ] y 400[KHz] toma un valor constante y sobre los 400[KHz], se vuelve a presentar otro decaimiento.

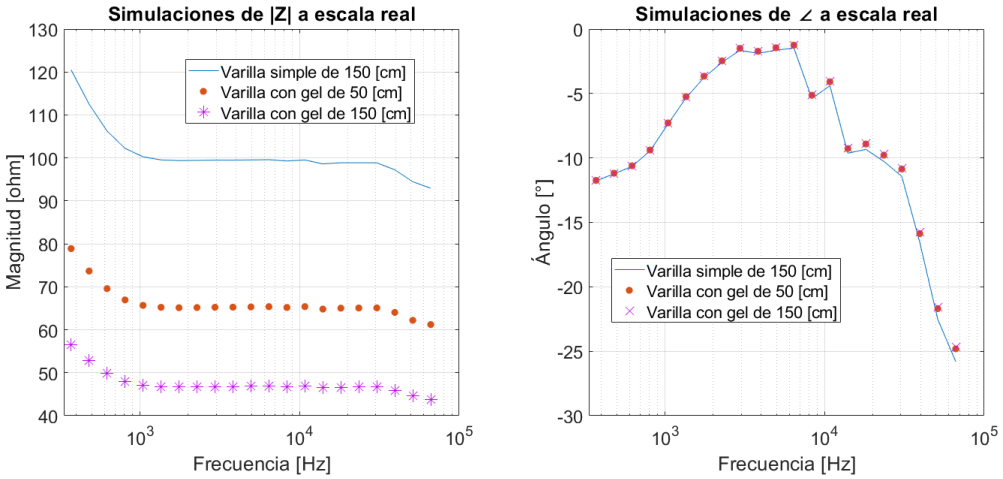
Para el caso de la varilla con 3 [cm] de gel, sí no se duplica el diámetro del gel en la simulación, se tiene una impedancia inicial de 95 [Ω] la cual disminuye hasta los 80 [Ω] el cual se mantiene constante hasta decaer de nuevo a un valor de 75 [Ω], en cambio sí se amplifica por dos el diámetro, los valores de |Z| cambian a 80, 65 y 60 [Ω] respectivamente. Por otro lado, para la varilla con 10 [cm] de gel, los numero de |Z| son 70, 60 y 55 [Ω], al no considerar dos veces el diámetro, en caso contrario las magnitudes serian 58, 48 y 45 [Ω].

Con respecto a los ángulos de las simulaciones de las varillas con gel, no presentan alteraciones en sus comportamiento al cambiar las dimensiones del gel, lo cual se ve representado en las figuras 5.7b y 5.8b.

5.2.3. Resultados de las simulaciones de impedancia de puesta a tierra a escala real

Debido al escalamiento de la frecuencia, los resultados se presentan hasta la frecuencia de 10^5 [Hz]. Las simulaciones con gel mostradas en escala real son considerando el doble del diámetro del gel en las simulaciones.

La Figura 5.9 muestra los resultados de las simulaciones del escenario real. Se aplicaron factores de escala a los parámetros, como se indicó en la Tabla2.1. Por lo tanto, este escenario real consideró los valores de los parámetros en la escala real modificados en la simulación. Los valores se especificaron en las Tablas 4.1 y 4.2.



(a) Magnitudes a escala real.

(b) Ángulos a escala real.

Figura 5.9: Impedancia de puesta a tierra a escala real.

Los resultados de las simulaciones en escala real de magnitud (Figura 5.9a) y ángulo (Figura 5.9b) mostraron formas de curvas idénticas a las obtenidas en las simulaciones en escala reducida. Las curvas se encuentran escalas con respecto al eje horizontal debido al escalamiento en la frecuencia. Esto era de esperarse, ya que la teoría de la escala reducida fue una de las ideas base en este trabajo y permitió realizar la parte experimental en un espacio de menor tamaño dentro del laboratorio.

Con los resultados de las simulaciones, se espera que los resultados experimentales en escala real presenten el mismo escalamiento frecuencial con los resultados experimen-

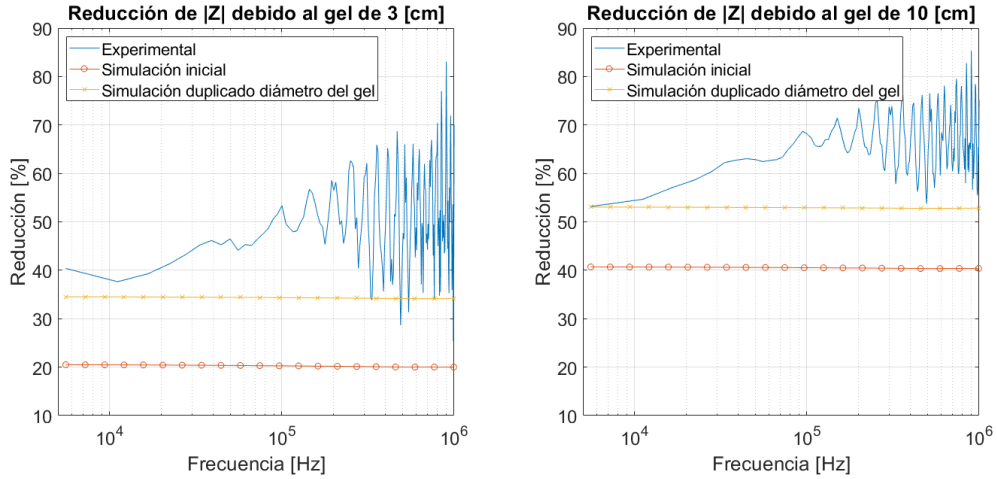
tales en escala reducida de las mediciones realizadas en el laboratorio. Por lo tanto, se presentarían los valores de impedancia a una frecuencia previa a la obtenido en el laboratorio.

5.3. Porcentaje de reducción de puesta a tierra

Para poder apreciar la eficacia de las varillas con gel en la disminución de la magnitud de impedancia de puesta a tierra, se optó por graficar el porcentaje de reducción con respecto a la varilla simple, es decir, el escenario en que no se utilizó Erico Gem. Cómo se expresa en la ecuación. 5.1.

$$Reducción[\,\%] = \frac{|Z|_{Sin\_gel} - |Z|_{Con\_gel}}{|Z|_{Sin\_gel}} \cdot 100\,\% \tag{5.1}$$

En la figura 5.10 se presentan las reducciones obtenidas en las simulaciones de escala reducida para las dos dimensiones de gel estudiadas, la figura 5.10a, muestra la reducción para la varilla con el gel cilindro de 3 [cm] de altura y en la figura 5.10b, para la varilla con el gel cilíndrico de 10 [cm] de altura.



(a) Varilla con 3 centímetros de gel.

(b) Varilla con 10 centímetros de gel.

Figura 5.10: Reducciones de |Z| de puesta a tierra debido al gel en escala reducida.

Para ambas configuraciones de las varillas con gel, se observa claramente que la reducción de |Z| es constante en todo el rango de frecuencia analizado en la simulación. En cambio, para la reducción de |Z| experimental se ve una tendencia a aumentar el porcentaje de reducción con la frecuencia, aumentando las oscilaciones sobre los 120[KHz].

Además, en las gráficas se puede apreciar los cambios que surgen al duplicar el diámetro del gel en la simulación. Como era de esperarse, se logran mayores porcentajes de reducción al duplicar el radio del gel en la simulación, pero también, se logra que la curva de la simulación de reducción se acerque más a la curva experimental de reducción de |Z|, alcanzando valores muy similares en bajas frecuencias.

Otra observación a destacar es que al cubrir por completo la varilla con gel se logra aumentar de reducción de la |Z| en aproximadamente en un 20 % más que en el caso en que solo un tercio de la varilla se encuentre con gel. En la tabla 5.2 se expresan visualmente de otra forma las reducciones de |Z| conseguidas en bajas frecuencias, ya que en altas frecuencias debido a las oscilaciones es más incierto definir un porcentaje de reducción.

Altura del gel	Experimental	Simulación inicial	Simulación duplicando diámetro del gel
3 [cm]	40 [%]	20 [%]	34 [%]
10 [cm]	53 [%]	40 [%]	53 [%]

Tabla 5.2: Reducción de $|Z|$ en bajas frecuencias debido al gel.

Los porcentajes de reducción obtenidos experimentalmente y por la simulación duplicando el diámetro del gel son consistentes con los resultados obtenidos en la memoria de Ignacio Abarca (Abarca, 2016). La varilla con un tercio de gel presentó una reducción de la resistencia de puesta a tierra de 31.12 % en la simulación hecha por Abarca, lo cual es bastante cercano al 34 % obtenido en la presente memoria. Debido a la ventana de tiempo en que se realizaron las mediciones (Abarca, 2016), se presentó una variación de la resistencia de puesta a tierra entre un 35 % al 55 %, lo cual es semejante a lo obtenido en el rango de frecuencias analizado. La similitud en los porcentajes de reducción demuestra que fue acertado duplicar el diámetro del gel en la simulación

5.4. Comparación entre los resultados de la simulación y los experimentos

En esta sección se contrastan los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio con los resultados entregados por la simulación. Para ello, se emplean las gráficas de las figuras 5.11, 5.12 y 5.13, que muestran los resultados para las tres configuraciones estudiadas. Debido a que solo se realizaron mediciones experimentales para el modelo en escala reducida, no se presentan comparaciones para el modelo en escala real.

5.4.1. Comparación para la Varilla simple

La principal diferencia que se puede visualizar en las gráficas de la Figura 5.11 es que las curvas experimentales se distinguen fácilmente de las curvas simuladas debido a la fluctuación que presentan en sus valores, especialmente en altas frecuencias.

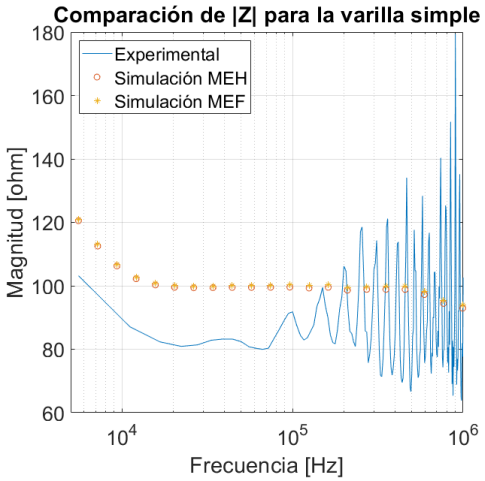
Los ángulos poseen valores muy similares entre sí en todo el rango de frecuencia estudiado, como se puede observar en la gráfica de la figura 5.11b.

En cambio, en la figura 5.11a, se aprecia claramente que los valores experimentales son menores a los simulados. Anteriormente se comentó que esta discrepancia se puede deber al fenómeno de ionización, que apareció en las mediciones en el laboratorio, disminuyendo el valor de la magnitud de impedancia de puesta a tierra experimental. Para ambos tipos de resultados de la $|Z|$ se presente un comportamiento descendiente a bajas frecuencias, pero en el caso experimental este comportamiento se extiende hasta una frecuencia un poco mayor.

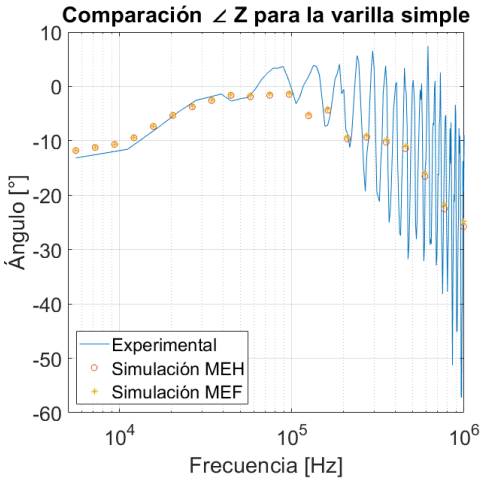
5.4.2. Comparación para la varilla con 3 [cm] de gel

Las gráficas de impedancia de puesta a tierra para la varilla con 3 [cm] de gel se encuentran en la figura 5.12. Nuevamente las curvas experimentales se destacan por sus oscilaciones, aunque en menor amplitud que en el caso de la varilla simple.

En la figura 5.12a se logra visualizar que ambas tipos de curvas presentan comportamientos similares. Las curvas comienzan a descender con el aumento de la frecuencia. Luego, las curvas de las simulaciones presentan un comportamiento constante, pero en el último tramo se aprecia un nuevo decaimiento. Para la curva experimental, no se ob-



(a) |Z| de la varilla simple.



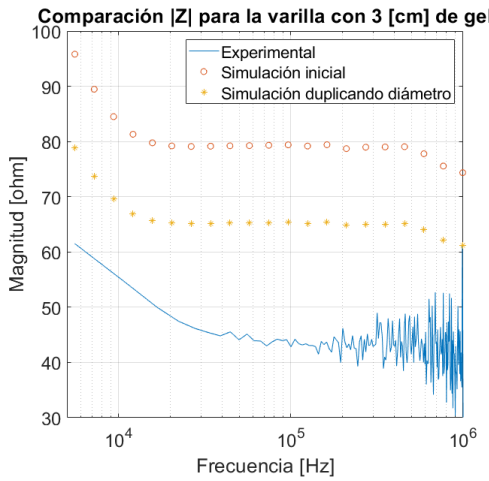
(b) Ángulo de Z de la varilla simple.

Figura 5.11: Comparación entre experimental y simulación para la varilla simple.

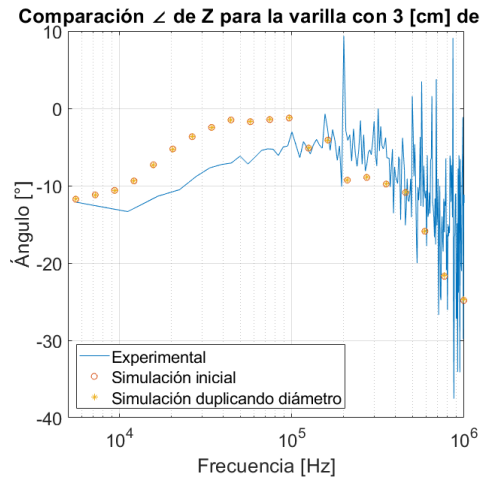
serva claramente el comportamiento en altas frecuencias debido a las oscilaciones, pero se aprecia que la curva experimental tiende al mismo comportamiento que las curvas de la simulación

Además, se debe destacar que el comportamiento decadente a bajas frecuencias de la |Z| es más prolongado para la curva experimental que para las curvas entregadas por la simulación. En la misma gráfica se puede percibir claramente que al duplicar el diámetro del gel en la simulación, se logra una curva más cercana a la experimental.

Si bien, los ángulos presentan valores similares entre los simulados y lo obtenido del laboratorio, se nota una discrepancia mayor que para la varilla simple. Esto se puede deber a que los valores utilizados de la resistividad del agua en la simulación fueron obtenidos a través de las mediciones de las varilla simple, es por esto que guarda sentido que los valores de los ángulos simulados se parezcan más a los valores experimentales de la varilla simple, pero aun así los valores son consistentes, pues tanto los ángulos simulados como los experimentales indican un comportamiento capacitivo de la impedancia de puesta a tierra de la varilla con 3 [cm] de gel.



(a) |Z| de la varilla con 3 centímetros de gel.



(b) Ángulo de Z de la varilla con 3 centímetros de gel.

Figura 5.12: Comparación entre experimental y simulación de la varilla con 3 [cm] de gel.

5.4.3. Comparación para la varilla con 10 [cm] de gel

Las gráficas que ayudaran a contrastar los valores obtenidos en el laboratorio con los entregados por la simulación para la varilla con la parte sumergida recubierta completamente con gel, se encuentran en la figura 5.13.

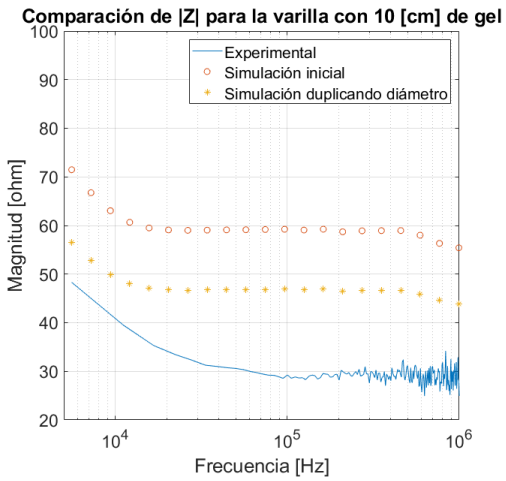
La figura 5.13a indica que se mantienen los comportamientos indicados hasta el momento pero el decaimiento en bajas frecuencias, se presentan en un rango levemente más amplio en el caso experimental. Además, al presentarse menores amplitudes en las oscilaciones que, en los casos anteriores, se percata de mejor manera la similitud de forma entre la curva experimental y las entregadas por la simulación.

Como se señaló anteriormente, al considerar el doble del diámetro del gel en la simulación se obtienen valores simulados más cercanos a los valores experimentales, pero para la varilla cubierta con el gel estos valores son más cercanos en baja frecuencia que para las otras configuraciones estudiadas.

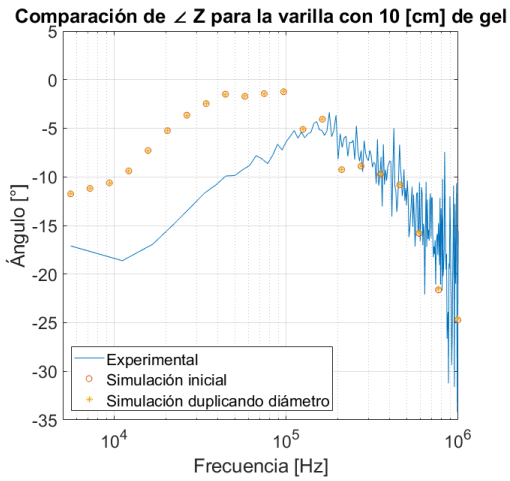
Los resultados de la varilla cubierta completamente con GEM y la varilla simple son los que presentan mayores diferencias entre sí. Esto se debe a que físicamente son las que más difieren. En un caso, el electrodo no está en contacto con el suelo, sino que solo con el material de refuerzo. En el otro caso, no está aplicado el suelo artificial y toda la varilla sumergida está en contacto con el terreno, es decir, con el agua.

Los parámetros del agua se determinaron a partir de las mediciones realizadas con la varilla simple instalada, por lo tanto, no se ha considerado que hay un volumen de agua que ha sido reemplazado por un volumen de gel. Este cambio de volumen del terreno es mayor para el escenario de la varilla cubierta con gel, por lo que hace sentido que la varilla con un tercio de gel, presente valores del ángulo cercanos entre lo experimental y lo simulado.

Por lo tanto, tiene sentido que los valores de los ángulos discrepen en una mayor medida, resultando en ángulos experimentales inferiores como se observa en la figura 5.13b. Al presentarse ángulos experimentales más negativos, se deduce que el escenario de la varilla con 10 [cm] de gel, tendrá la impedancia de puesta a tierra más capacitiva, lo que conlleva a que exista un mayor retraso de la tensión con respecto a la corriente en el dominio del tiempo.



(a) |Z| de la varilla con 10 centímetros de gel.



(b) Ángulo de Z de la varilla con 10 centímetros de gel.

Figura 5.13: Comparación entre experimental y simulación de la varilla con 10 [cm] de gel.

5.5. Limitaciones presentadas

Inicialmente se planeó escalar la forma de onda de impulso de las normas 62305-1(Commission, 2010b) y la IEC 60060-1 (Commission, 2010a), pero esto no fue posible debido a que el escalamiento requirió valores de resistencia muy pequeños, lo que provocaba un cortocircuito al generar el impulso.

Se seleccionó agua como terreno de puesta a tierra en lugar de arena u otros materiales debido a su fácil disponibilidad. Las propiedades del agua como terreno de puesta a tierra no han sido ampliamente estudiadas, ya que generalmente se utiliza para modificar el porcentaje de humedad en un material. En este trabajo no se profundizó en la ionización del agua, ya que esto implicaría una extensión del tema, pero el comportamiento del agua frente a los impulsos sigue siendo un tema de interés.

Además, como el agua se utilizó para representar el suelo, fue imposible realizar pruebas con otros materiales de suelo artificial, ya que no solidifican de la misma manera que el GEM. Sumado a lo anterior, tampoco se puede modificar la humedad del terreno. Sin embargo, se puede aumentar su conductividad añadiendo sal al agua.

En este trabajo, solo se analizó la variación de $|Z|$ de puesta a tierra con suelo artificial para el electrodo vertical en altas frecuencias. Se dejan como temas de investigación de continuación la eficacia del GEM en otras configuraciones de electrodos de puesta a tierra.

Capítulo 6

Conclusión

Este capítulo final concluirá el trabajo con un resumen de los hallazgos, presentando en tablas, el cumplimiento de los objetivos y posibles temas de investigación de continuación.

Como se esperaba, al aplicar un tratamiento artificial de suelos con el material de refuerzo de puesta a tierra Erico Gem, se observa una reducción notable en la magnitud de la impedancia de puesta a tierra. Si bien la reducción ya había sido observado en una memoria anterior (Abarca, 2016) para excitaciones tipo DC, es decir, para la resistencia de puesta a tierra, no se había verificado su eficacia ante excitaciones de tipo impulso. En este estudio, se pudo apreciar una mejora en la impedancia de puesta a tierra en todo el rango de frecuencia estudiado, tanto en la parte experimental como en la simulación.

Se observó que se presentaba un menor ruido en las mediciones de corriente y tensión en el laboratorio para la configuración donde la varilla estaba cubierta completamente con gel, lo que se vio reflejado en la disminución de la amplitud de las oscilaciones en altas frecuencias de la magnitud de impedancia.

Con respecto a los ángulos experimentales, se identificó que la varilla con mayor volumen de material de refuerzo revelaba valores inferiores, indicando que la puesta a tierra de la varilla cubierta completamente con gel posee un comportamiento más capacitivo que las otras dos configuraciones estudiadas.

La resistividad del agua mostró un comportamiento decreciente hasta la frecuencia de 25 [kHz], llegando a un valor de 12.5 $[\Omega m]$. Esto es coherente con el valor de resistividad en CC de 17.5 $[\Omega m]$, medido con el condutivímetro. La permitividad disminuyó rápidamente desde el valor de 43000 a la frecuencia de 5 [kHz] hasta el valor de 333 a la frecuencia de 96 [kHz]. El valor de la permitividad en altas frecuencias se estabiliza en 700.

Los resultados de la simulación para la varilla simple fueron consistentes al contrastar los resultados del modelo electromagnético híbrido y con los del método de elementos finitos. Modelar el efecto de ionización, a través, de un aumento en el diámetro del gel en la simulación, entrego resultados más cercanos a los experimentales, indicando que fue un buen procedimiento para considerar la ionización en la simulación. El comportamiento observado en la $|Z|$ simuladas fue idéntico para las tres configuraciones.

Las simulaciones en escala real para el electrodo vertical indicaron que se tendrá la misma forma de curva, pero con un escalamiento horizontal, asociado al escalamiento de la frecuencia.

Se determinaron tres rangos de frecuencias relevantes en el desarrollo de la memoria. El primer rango, corresponde al primer tramo mostrados en las gráficas de $|Z|$, carac-

terizado por un visible decaimiento de |Z| con el aumento de la frecuencia. El segundo tramo, se identifica por poseer un valor constante en las simulaciones y una tendencia a un valor en las mediciones. El tercer tramo se caracteriza por presentar nuevamente un decaimiento en el valor de |Z|, para los resultados entregados por la simulación, en cambio para los resultados experimentales, este tramo se ve caracterizado por un aumento en el ruido de la medición reflejado en el aumento de las oscilaciones. Además, las simulaciones mostraron que la longitud del segundo tramo es más extensa que en los resultados experimentales. En la tabla 6.1 se especifican los rangos identificados para cada tramo.

Tramo	*Primero*	*Segundo*	*Tercero*
Experimental	5 - 20 [KHz]	20 - 120 [KHz]	120 - 1000 [KHz]
Simulación	5 - 15 [KHz]	15 - 450 [KHz]	450 - 1000 [KHz]

Tabla 6.1: Rangos de frecuencias de los tramos

Los valores de |Z| para las frecuencias relevantes se encuentra en la tabla 6.2 para los datos experimentales y en la tabla 6.3 para las entregadas por la simulación.

Configuración	5 [KHz]	20 [KHz]	1000 [KHz]
Varilla simple	103 [Ω]	80 [Ω]	65 [Ω]
Con gel 3 [cm]	60 [Ω]	45 [Ω]	30 [Ω]
Con gel 10 [cm]	48 [Ω]	30 [Ω]	25 [Ω]

Tabla 6.2: |Z| experimental

Configuración	5 [KHz]	20 [KHz]	1000 [KHz]
Varilla simple	120 [Ω]	78 [Ω]	65 [Ω]
Con gel 3 [cm]	78 [Ω]	65 [Ω]	61 [Ω]
Con gel 10 [cm]	56 [Ω]	46 [Ω]	43 [Ω]

Tabla 6.3: |Z| simulación

Como se enunció al principio del capítulo, se verifico que efectivamente el producto Erico GEM, disminuye la |Z| de puesta a tierra, en todo el rango de frecuencia estudiado. En la tabla 6.4 se muestra los porcentajes de reducción mínima entre tramo 1 y 2 de los casos experimentales y los valores constantes conseguidos por la simulación en los tres tramos. No se consideró el porcentaje mínimo del tramo 3 experimental debido a las oscilaciones que presenta.

Altura del gel	*Experimental*	*Simulación*
Gel 3 [cm]	37 [%]	34 [%]
Gel 10 [cm]	53 [%]	53 [%]

Tabla 6.4: Porcentajes de reducción de |Z| de puesta a tierra

Las simulaciones fueron un buen indicador de la |Z|, a pesar de que los valores simulados fueron superiores a los experimentales en todo el rango de frecuencia para las tres configuraciones. Esto sugiere que las simulaciones pueden ser utilizadas como una buena referencia para estimar la impedancia de puesta a tierra del terreno, conociendo las dimensiones del material de refuerzo aplicado, la dimensión de la varilla y las propiedades del terreno. Es importante considerar que los resultados de las mediciones en la realidad pueden verse influenciados por factores circunstanciales, como las condiciones ambientales, los cambios topológicos del terreno, la calibración de los instrumentos o los errores aleatorios que ocurren durante el proceso de medición.

En la tabla 6.5 se indica la diferencia en ohm entre los datos experimentales y simulados, para las tres configuraciones estudiadas.

Configuración	5 [KHz]	20 [KHz]	1000 [KHz]
Varilla simple	17 [Ω]	20 [Ω]	0 [Ω]
Con gel 3 [cm]	18 [Ω]	20 [Ω]	31 [Ω]
Con gel 10 [cm]	8 [Ω]	16 [Ω]	8 [Ω]

Tabla 6.5: Diferencias Simulación-Experimental

Los objetivos de este estudio se cumplieron con éxito. En primer lugar, se revisó la literatura existente sobre los modelos de puesta a tierra en el dominio de la frecuencia, incluyendo las técnicas de simulación computacional comúnmente utilizadas en esta área. En segundo lugar, se evaluó el comportamiento de la impedancia transitoria de un sistema de puesta a tierra que consideró un electrodo vertical, con y sin suelo artificial, utilizando herramientas computacionales para su modelación. En tercer lugar, se registraron experimentalmente los valores de impedancia transitoria de puesta a tierra de un electrodo vertical, con y sin suelo artificial, a través de un modelo de escala reducida implementado en el laboratorio de alta tensión. Finalmente, los resultados de la simulación se compararon con los obtenidos experimentalmente, con el fin de ajustar el modelo computacional y realizar análisis paramétricos de distintas configuraciones de sistemas de puesta a tierra que consideren suelo artificial.

Esta memoria analizó la eficacia del producto Erico Gem para el electrodo vertical en un rango de frecuencia determinado. Sin embargo, otras configuraciones, como el electrodo horizontal, triangular, cuadrado y de malla, se dejan como propuestas de futuras investigaciones.

Referencias

Abarca, I. A. (2016). *Evaluación del porcentaje de reducción en el valor de resistencia de puesta a tierra para configuraciones básicas de electrodos, al aplicar productos artificiales de tratamiento del terreno*. Universidad Técnica Federico Santa María.

Alipio, R., y Visacro, S. (2014). Modeling the frequency dependence of electrical parameters of soil. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, *56*(5), 1163-1171. doi: 10.1109/TEMC.2014.2313977

Androvitsaneas, V. P., Gonos, I. F., y Stathopulos, I. A. (2014). Transient impedance of grounding rods encased in ground enhancing compounds. En *2014 international conference on lightning protection (iclp)* (pp. 359–363).

Bergland, G. D. (1969). A guided tour of the fast fourier transform. *IEEE Spectrum*, *6*(7), 41-52. doi: 10.1109/MSPEC.1969.5213896

Brenna, M., Foiadelli, F., Longo, M., y Zaninelli, D. (2018). Particular grounding systems analysis using fem models. En *2018 18th international conference on harmonics and quality of power (ichqp)* (pp. 1–6).

C4.33, W. G. C. (2019). *Impact of soil-parameter frequency dependence on the response of grounding electrodes and on the lightning performance of electrical systems* (Inf. Téc. n.º 781). CIGRE.

Caldecott, R., y Kasten, D. G. (1983). Scale model studies of station grounding grids. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*(3), 558–566.

Chen, H., y Du, Y. (2018). Lightning grounding grid model considering both the frequency-dependent behavior and ionization phenomenon. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, *61*(1), 157–165.

Coelho, R. A., y Almaguer, H. A. (2014). Modeling of grounding systems considering the soil ionization effect using comsol multiphysics® software. En *Comsol conference* (p. 49).

Commission, I. E. (2010a). *High-voltage test techniques. part 1: General definitions and requirements* (Inf. Téc. n.º 60060-1). Geneva, Switzerland: IEC.

Commission, I. E. (2010b). *Protection against lightning. part 1: General principles* (Inf. Téc. n.º 62305-1). Geneva, Switzerland: IEC.

Committee, I. I. A. S. P. S. T. (1982). *Ieee recommended practice for grounding of industrial and commercial power systems* (Vol. 142) (n.º 1982). Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE).

da Silva Ferraz, R., Oliveira, S. G., de Oliveira, S. B., y Calixto, W. P. (2016). Analysis of the soil impedance in high frequencies using an electric impulse generator prototype. En *2016 ieee 16th international conference on environment and electrical engineering (eeeic)* (pp. 1–4).

De la Fraga, L. (2001). La transformada discreta de fourier y la transformada rápida de fourier. *Cinvestav*.

Díaz-Chacón, J., Cuevas-Ochoa, G., Amaro-Hernández, C., Navarro-Valle, A., y Brauer, V. M. (2019). Simulación transitoria de un modelo electromagnético didáctico de elemento finito en 2d usando software libre. *Revista Ciencia*, *1*.

Djamel, I., Slaoui, F. H., y Georges, S. (2016). Transient response of grounding systems under impulse lightning current. En *2016 electric power quality and supply reliability (pq)* (pp. 71–75).

Fernández, M. C. C. (s.f.). Manual básico de matlab [Manual de software informático].

Fleisch, D. (2008). *A student's guide to maxwell's equations*. Cambridge University Press.

Ghoneim, S., Hirsch, H., Elmorshedy, A., y Amer, R. (2007). Measurement of earth surface potential using scale model. En *2007 42nd international universities power engineering conference* (pp. 965–970).

Gmsh Development Team. (2021). *Gmsh.* https://gmsh.info/.

Godoy González, E. E. (2016). *Análisis de la red de puesta a tierra en base a la norma ieee std 80-2000 y coordinación y mantenimiento de la subestación guatemala sur* (Tesis Doctoral no publicada). Universidad de San Carlos de Guatemala.

Gonos, I. (2006). Experimental study of transient behaviour of grounding grids using scale models. *Measurement science and Technology*, *17*(7), 2022.

Gonos, I., Topalis, F., y Stathopulos, I. (1999). Transient impedance of grounding rods. En *1999 eleventh international symposium on high voltage engineering* (Vol. 2, pp. 272–275).

Grcev, L., y Hristov, D. (1993). More accurate modelling of earthing systems transient behaviour. En *Proceedings of intelec 93: 15th international telecommunications energy conference* (Vol. 2, pp. 167–173).

Habjanič, A., Jesenik, M., y Trlep, M. (2011). The advantages of the finite line elements application for the analysis of the grounding systems. *Przegląd Elektrotechniczny*, *87*(3), 57–60.

Hamzehbahmani, H., Haddad, A., Griffiths, H., Harid, N., y Guo, D. (2016). Application of an analysis technique to characterise impulse response of grounding systems. En *2016 33rd international conference on lightning protection (iclp)* (pp. 1–6).

Hao, H., Minfang, P., Zhipeng, Y., Xianfeng, L., y Yunyan, H. (2012). Grounding grid transient simulation and its application based on the atp-emtp. En *2012 third international conference on digital manufacturing & automation* (pp. 454–457).

Hasan, H., Hamzehbahmani, H., Griffiths, H., Guo, D., y Haddad, A. (2017). Characterization of site soils using variable frequency and impulse voltages. En *Proc. 10th asia-pacific int. conf. lightning* (pp. 1–4).

He, J., y Chen, X. (1995). The simulation theory of impusle characteristics of transmission-line tower. En *Chinese science abstracts series a* (Vol. 2, p. 41).

Ieee guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potentials of a grounding system. (2012). *IEEE Std 81-2012 (Revision of IEEE Std 81-1983)*, 1-86. doi: 10.1109/IEEESTD.2012.6392181

Ieee guide for safety in substation grounding. (1976). *IEEE Std 80-1976*, 1-78. doi: 10.1109/IEEESTD.1976.7185311

Instruments, K. (1992, December). Model 247 high voltage supply [Manual de software informático]. Cleveland, Ohio, USA.

Jaiswal, A., y Singh, A. (2018). Double-exponential expression of lightning current waveforms. *IEEE Transactions on Power Delivery*, *33*(4), 1706-1717. doi: 10.1109/TPWRD.2017.2783205

Jensen, C. (1945). Grounding principles and practice ii — establishing grounds. *Electrical Engineering*, *64*(2), 68-74. doi: 10.1109/EE.1945.6440858

Jones, W. R. (1980). Bentonite rods assure ground rod installation in problem soils. *IEEE Transactions on power Apparatus and Systems*(4), 1343–1346.

Kusim, A., Abdullah, N., Hashim, H., y Kutty, S. B. (2013). Effects of salt content on measurement of soil resistivity. En *2013 ieee 7th international power engineering and optimization conference (peoco)* (pp. 124–128).

Liu, J., Ye, L., Zhang, X., y Xia, G. (1981). The impulse property of grounding device covered with long-term chemical low resistivity material under high impulse current. *High Voltage Technique*(4), 1–8.

Longmire, C. L., Smith, K. S., y CA, M. R. C. S. B. (1975). A universal impedance for soils.

Lopez., J. B., y Pagoaga, J. L. H. (s.f.). Introducción a matlab [Manual de software informático].

Martínez, A. (2018). *Transformada rápida de fourier implementación y algunas aplicaciones* (Tesis Doctoral no publicada). UNIVERSIDAD DE MURCIA.

MATLAB. (2010). *version 7.10.0 (r2010a)*. Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc.

Meppelink, J., Andolfato, R., y Cuccarollo, D. (2015). Calculation models for grounding

systems based on hybrid methods. *SINT Ingegneria Srl*(1), 1–9.

Montaña, J. (2006). Puestas a tierra. variación de los parámetros eléctricos del terreno con la frecuencia y software para el cálculo de potenciales transitorios. *Universidad Nacional de Colombia*.

Montaña, J., Candelo, J., y Duarte, O. (2012). Sand s electrical parameters vary with frequency. *Ingeniería e Investigación*, *32*(2), 34–39.

Montaña, J. H., Duarte, Ó. G., Sarmiento, Á. M., Marín, M. A., y Torres, H. (2006). Un_pat: Programa para el cálculo de potenciales transitorios en puestas a tierra. *Ingeniería e Investigación*, *26*(3), 143–148.

Montaña, J., Angulo, A., Torres, D., y Valenzuela, R. (2023). Use of reduced scale models for evaluation of grounding systems in real scale. En *International conference on grounding and lightning physics and effects.*

Moradi, M. (2019). Analysis of transient performance of grounding system considering frequency-dependent soil parameters and ionization. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, *62*(3), 785–797.

Nor, N. M. (2006). Effect of enhancement materials when mixed with sand under high impulse conditions. En *2006 ieee 8th international conference on properties & applications of dielectric materials* (pp. 916–919).

nvent erico gem [Manual de software informático]. (s.f.).

Pascoalato, T. F., de Araújo, A. R., Colqui, J. S., Kurokawa, S., y Pissolato Filho, J. (2021). An analysis of frequency-dependent soil models: Influence on the transient responses. En *2021 14th ieee international conference on industry applications (induscon)* (pp. 1–8).

Portela, C. (1999). Measurement and modeling of soil electromagnetic behavior. En *1999 ieee international symposium on electromagnetic compatability. symposium record (cat. no. 99ch36261)* (Vol. 2, pp. 1004–1009).

Prabhakar, C., y Deshpande, R. (2014). Evaluation of soil resistivity and design of grounding system for hydroelectric generating station in a hilly terrain—a case study. En *2014 international conference on advances in energy conversion technologies (icaect)* (pp. 104–107).

Procobre. (1998). *Sistemas de puesta a tierra*. Copper Development Association, Inglaterra Earthing Practice.

Quiuchaca Cuentas, C. E., y Ticona Chambi, J. J. (2018). *Instalación de radio bases y sistemas de puesta a tierra* (Tesis Doctoral no publicada). Universidad Mayor De Sas Andres.

Rahman Noor, Z. I., Anggoro Soedjarno P, B., y Hadi, P. O. (2021). Analysis of bentonite ac and dc performance under water content and chemical content variation for grounding applications. En *2021 3rd international conference on high voltage engineering and power systems (ichveps)* (p. 247-252). doi: 10.1109/ICHVEPS53178.2021.9600940

Ramezani, N., y Shahrtash, S. M. (2011). Calculating the transient behavior of grounding systems using inverse laplace transform. *Journal of Zhejiang University SCIENCE C*, *12*, 250–262.

Rio, H. D., y Bambang, A. S. (2014). Characteristic study of vertical configuration grounding system with two layer modified using type of different soil for variation of diameter and frequency injection. En *The 2nd ieee conference on power engineering and renewable energy (icpere) 2014* (p. 214-219). doi: 10.1109/ICPERE.2014.7067203

Ruehli, A., Antonini, G., y Jiang, L. (2017). *Circuit oriented electromagnetic modeling using the peec techniques*. John Wiley & Sons.

Schmidt, A. L. (2013). Fft: Transformada rápida de fourier. *Estudiante de Ingenieria en Sistemas de Computación. Universidad Nacional de Sur. Bahia Blanca, Argentina. Marzo 2013*.

Schon, K. (2013). *High impulse voltage and current measurement techniques*. Springer.

Scott, J. H. (1983). *Electrical and magnetic properties of rock and soil* (Inf. Téc.). US Geological Survey,.

Sears, F. W., Zemansky, M. W., Young, H. D., Vara, R. H., García, M. G., Gümes, E. R., ... Benites, F. G. (1986). *Física universitaria* (n.º 530.076 530.076 S4F5 1986 S43F5 1986 QC23 S45 1986). Fondo Educativo Interamericano.

(S.E.C.), S. D. E. Y. C. (2003). *Nch4 elec.4/2003. electricidad, instalaciones de consumo en baja tensión* (Vol. 4). SUPERINTENDENCIA DE ELECTRICIDAD Y COMBUSTIBLES S.E.C.

Sekioka, S., Lorentzou, M. I., Philippakou, M. P., y Prousalidis, J. M. (2005). Current-dependent grounding resistance model based on energy balance of soil ionization. *IEEE Transactions on Power Delivery*, *21*(1), 194–201.

Shchuchkin, D., Khoroshev, A., y Pavlenko, A. (2017). Application of gmsh+ getdp software suite for calculation of non-stationary electromagnetic fields of electrical devices. En *2017 international conference on industrial engineering, applications and manufacturing (icieam)* (pp. 1–4).

Siew, W., I, T., y Hanaffi, F. (2014, 05). Transient grounding modelling using fem: infinite boundary condition..

Silveira, F. H., Visacro, S., Herrera, J., y Torres, H. (2009). Evaluation of lightning-induced voltages over a lossy ground by the hybrid electromagnetic model. *IEEE transactions on electromagnetic compatibility*, *51*(1), 156–160.

Tshubwana, R. P., Shongwe, T., y Gomes, C. (2016). Characteristics and performance of soil, bentonite and conductive cement during impulse tests in swaziland. En *2016 international conference on emerging technological trends (icett)* (pp. 1–6).

Tu, Y., He, J., y Zeng, R. (2006). Lightning impulse performances of grounding devices covered with low-resistivity materials. *IEEE Transactions on Power Delivery*, *21*(3), 1706–1713.

Uman, M. A. (2012). *Lightning*. Courier Corporation.

Vargas, M., Rondon, D., Herrera, J., Montana, J., Jimenez, D., Camargo, M., ... Duarte, O. (2005). Grounding system modeling in emtp/atp based on its frequency response. En *2005 ieee russia power tech* (p. 1-5). doi: 10.1109/PTC.2005.4524514

Visacro, S. (1992). *Programa para simulacion en el dominio de la frecuencia de sistemas de puesta a tierra.*

Visacro, S., Portela, C., y cols. (1987). Soil permittivity and conductivity behavior on frequency range of transient phenomena in electric power systems. En *Symp. high voltage eng.*

Visacro, S., y Rosado, G. (2009). Response of grounding electrodes to impulsive currents: An experimental evaluation. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, *51*(1), 161–164.

Visacro, S., y Soares, A. (2005). Hem: a model for simulation of lightning-related engineering problems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, *20*(2), 1206-1208. doi: 10.1109/TPWRD.2004.839743

Zhang, B., Wu, J., He, J., y Zeng, R. (2013). Analysis of transient performance of grounding system considering soil ionization by time domain method. *IEEE Transactions on Magnetics*, *49*(5), 1837–1840.

Apéndice A

Fotografías

A.1. Fotografías de la instrumentación y materiales



Figura A.1: Fuente Continua de alta tensión



Figura A.2: Osciloscopio



Figura A.3: Circuito de impulso



Figura A.4: Pinza de voltaje

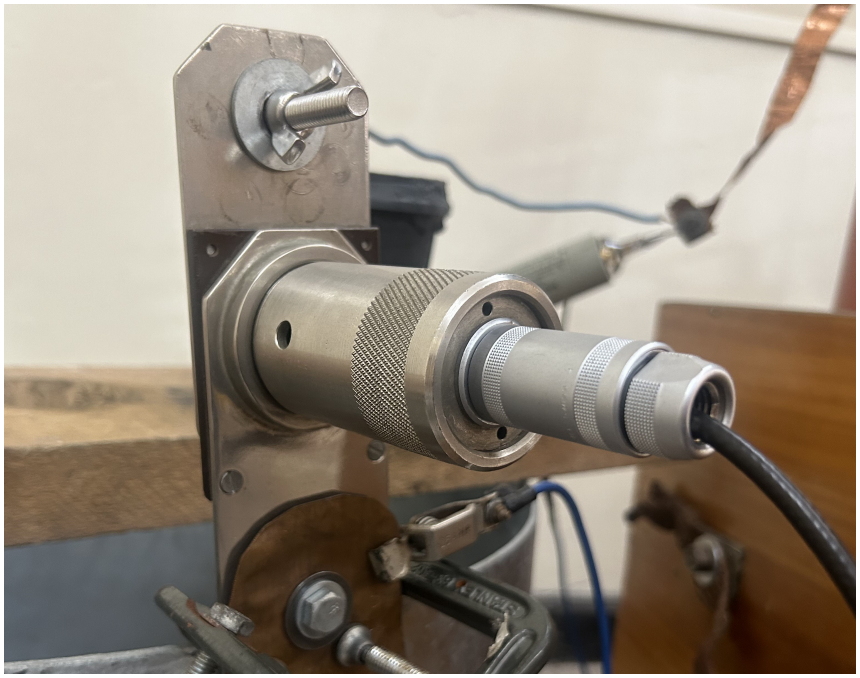


Figura A.5: Resistencia shunt de corriente



Figura A.6: Recipiente cilíndrico



Figura A.7: Moldes para las varillas con gel



Figura A.8: Conductímetro

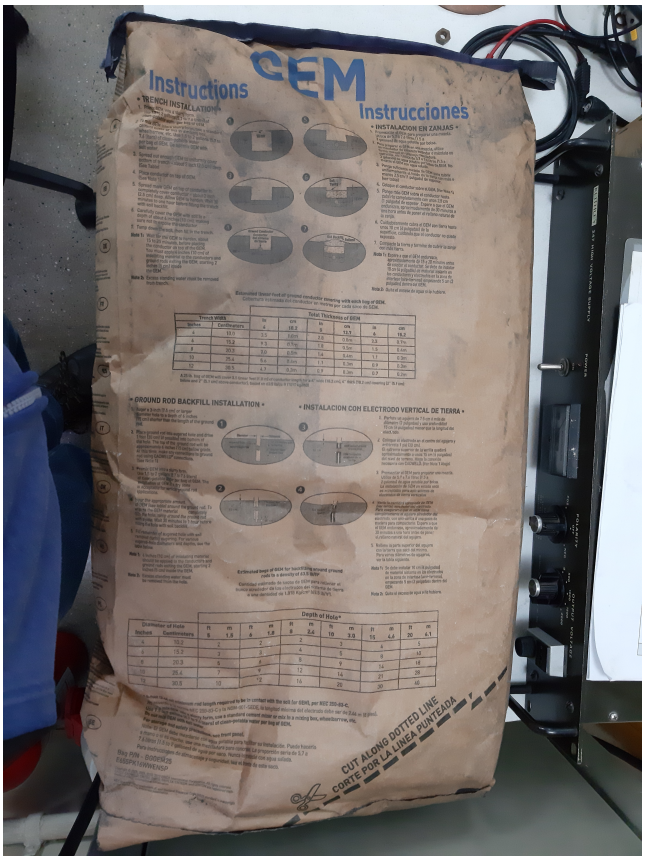


Figura A.9: Producto Erico GEM

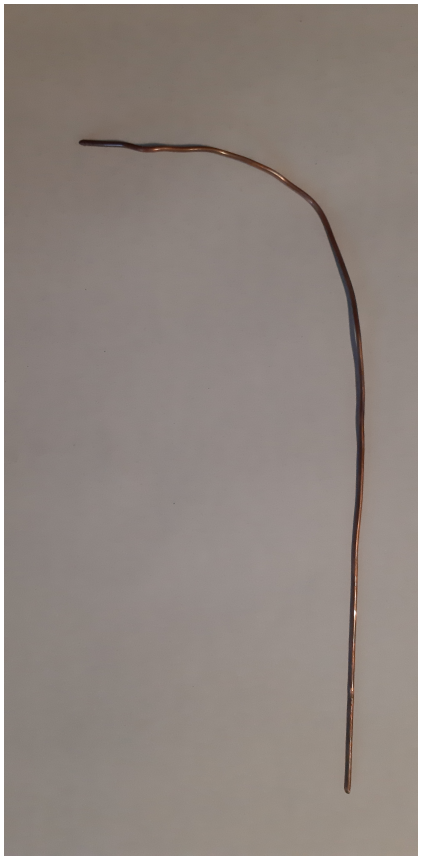
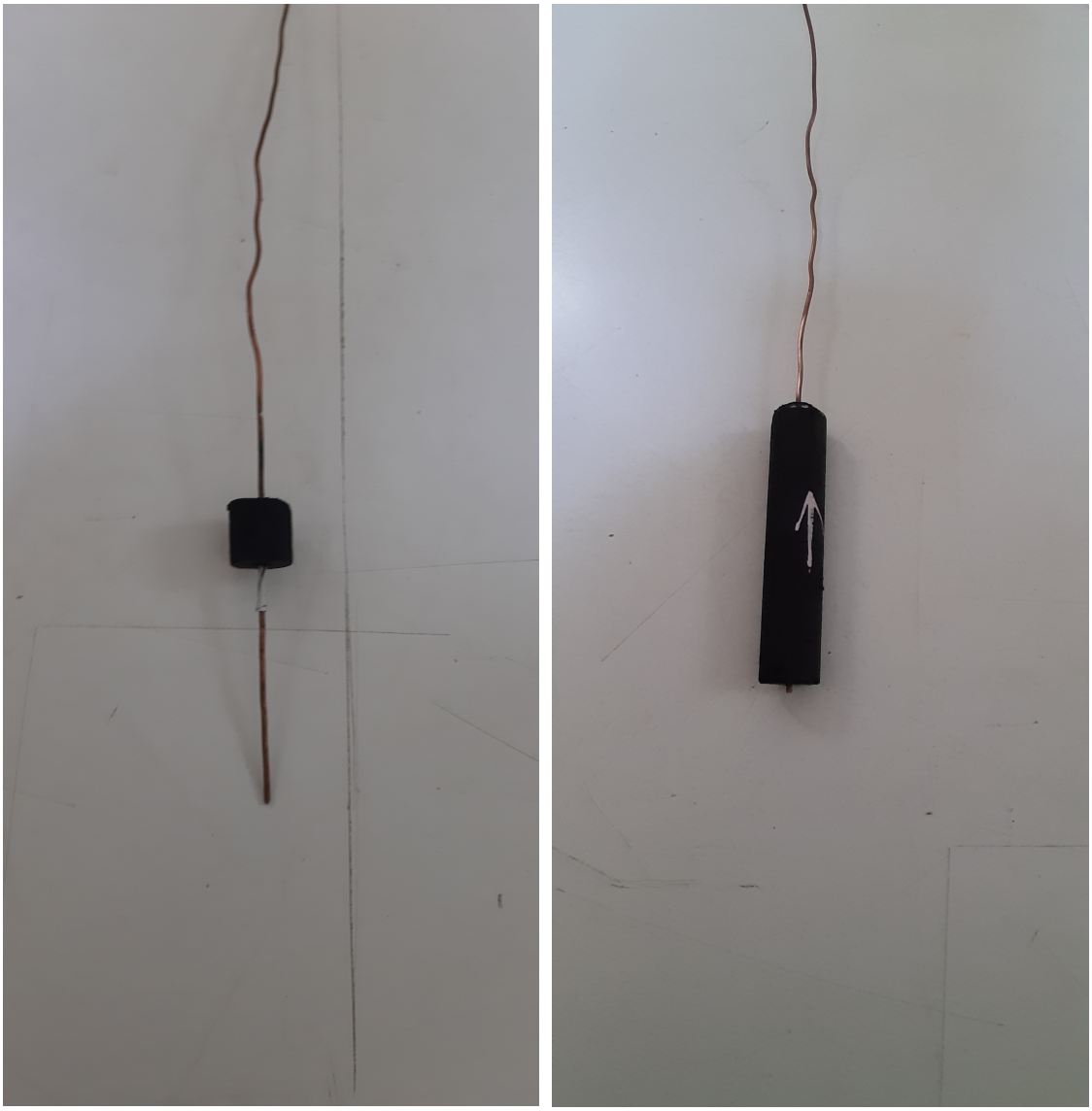


Figura A.10: Electrodo vertical



(a) Varilla con 3 centímetros de gel (b) Varilla con 10 centímetros de gel

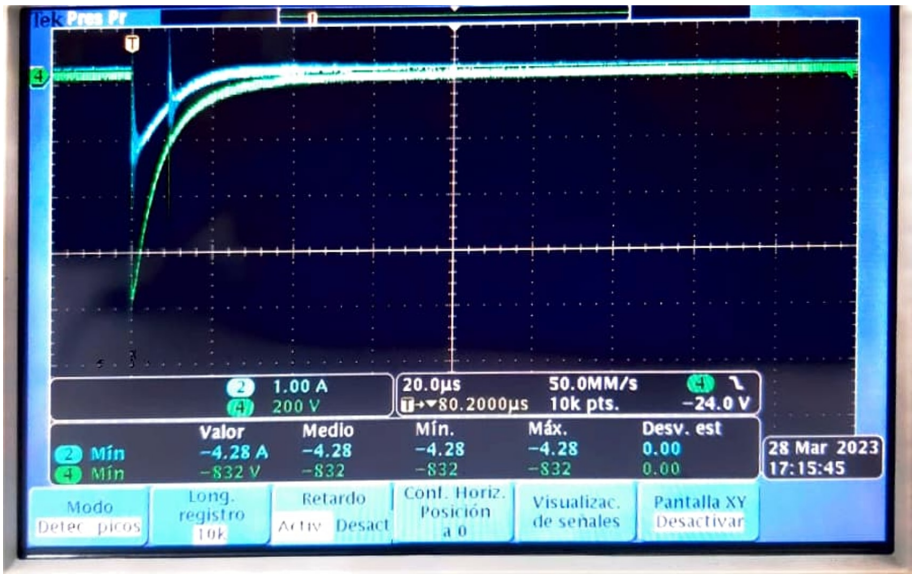
Figura A.11: Electrodos con gel



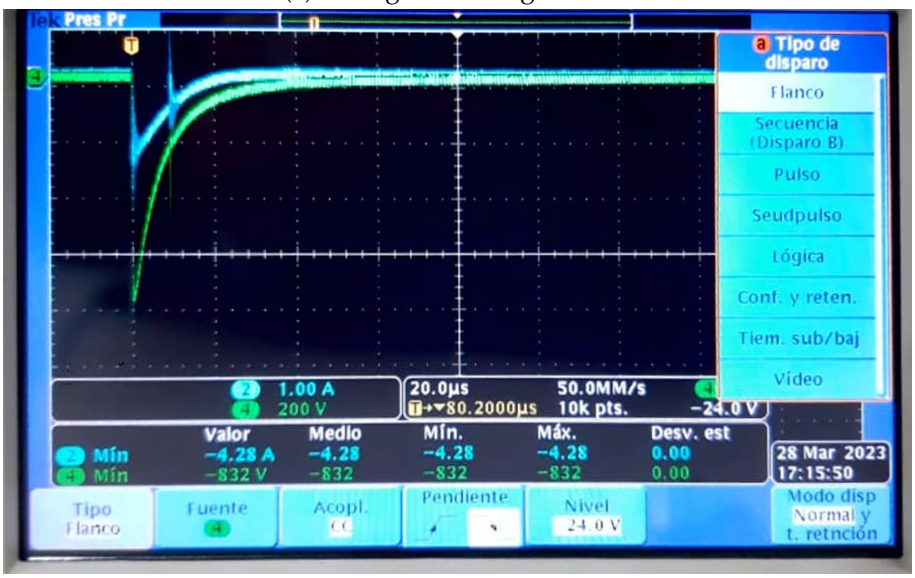
Figura A.12: Sistema de puesta a tierra a escala reducida

Apéndice B

Configuraciones del Osciloscopio



(a) Configuraciones generales



(b) Configuraciones del trigger

Figura B.1: Configuraciones del Osciloscopio

Apéndice C

Código MATLAB

C.1. Código de MATLAB para la impedancia experimental

```
clear
clc
%Extraccion de datos
tiv=table2array(readtable("Archivo.csv"));
t0=tiv(12:end,1)';%Datos de tiempos
TS=t0(2)-t0(1);%Periodo de muestreo
Vsh=tiv(12:end,2)';%Tension en la resistencia Shunt
I0=Vsh/(180e-3);%Corriente de retorno
V0=tiv(12:end,3)';%Voltaje medido por la pinza de voltaje
lx=length(V0);%Cantidad de datos
Ve=V0-Vsh;%%voltaje del sistema de puesta a tierra

%%valores para un tiempo mayor a 0 segundos
for nt=1:1:length(t0)
    t0x=t0(nt)
    if t0x>0
        break
    end
end
t0=t0(nt:end);
Ve=Ve(nt:end);
I0=I0(nt:end);
lx=length(Ve);

%GRAFICAS VS EL TIEMPO
%%Grafica de V_t
figure(3)
plot(1e6*t0,Ve),xlabel("Tiempo [Microsegundos]"),ylabel("
   Voltage [V]"),
title("Voltage(t)"),
xlim([0 80]), grid on, set(gca, 'FontSize', 20)

%%Grafica de I_t
figure(4)
plot(1e6*t0,I0),xlabel("Tiempo [Microsegundos]"),ylabel("
```

```
   Corriente [A]"),
title("Corriente(t)"),
xlim([0 80]), grid on, set(gca, 'FontSize', 20)


%FOURIER
Y=fft(I0);
U=fft(Ve);

%%magnitud y angulo de V e I en funcion de f
%%%magnitud de V_f
P2 = abs(U/lx);
P1 = P2(1:lx/2+1);
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
%%%magnitud de I_f
P4 = abs(Y/lx);
P3 = P4(1:lx/2+1);
P3(2:end-1) = 2*P3(2:end-1);

%%%Magnitud de Z_f
magZ=P1./P3

%%%%Angulo V_f
H2 = angle(U/lx);
H1 = H2(1:lx/2+1);
%%%%Angulo I_f
H4 = angle(Y/lx);
H3 = H4(1:lx/2+1);

%%%angulo de Z_f
angZ=(H1-H3)*180/pi


%Definicion del vector de frecuencia para graficar
FS=1/TS;
f = FS/lx*(0:(lx/2));

%GRAFIAS DE MAGNITUD FFT
figure(1)
semilogx(f,magZ),title("|Z(f)| de puesta a tierra"),xlabel("
   Frecuencia [Hz]"),ylabel("|Z(f)| [ohm]"),
xlim([0 1e6]), grid on,
hold on

%GRAFICAS DE ANGULO FFT
figure(2)
semilogx(f,angZ),title("Angulo de Z de puesta a tierra"),
   xlabel("Frecuencia [Hz]"),ylabel("Angulo"),
xlim([0 1e6]), grid on,
hold on
```