

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



UCSC

Construcción de medidor de permitividad relativa y conductividad eléctrica

Héctor Sebastián Muñoz Aguilar

Informe de Habilitación Profesional para optar al título de:

Ingeniero Civil Eléctrico

Profesor Patrocinante:

Dr. Ricardo A. Bustos P.

Profesores Evaluadores:

Dra. Silvia E. Restrepo M.

Dr. Jaime A. Cariñe C.

Concepción, agosto de 2024

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Profesor Patrocinante:
Dr. Ricardo A. Bustos P.

Construcción de medidor de permitividad relativa y conductividad eléctrica

Héctor Sebastián Muñoz Aguilar

Informe de Habilitación Profesional
para optar al Título de

Ingeniero Civil Eléctrico

Agosto 2024

Resumen

Este proyecto se enfoca en el estudio de diferentes técnicas para medir la permitividad relativa y la conductividad eléctrica de los suelos. Se analiza la influencia del suelo en un sistema de antena con el objetivo de comprender cómo las propiedades de permitividad y conductividad del suelo afectan el funcionamiento y/o rendimiento de una antena. Por esta razón, se llevará a cabo la construcción de un medidor de permitividad y conductividad eléctrica, que consiste en una antena de tipo monopolo, utilizada para realizar mediciones de los parámetros S_{11} (coeficiente de reflexión) al estar en contacto la antena con distintos tipos de suelo o superficie de interés. Posteriormente, se compararán estas mediciones con simulaciones realizadas en el software FEKO, para así determinar los parámetros eléctricos del suelo, en este caso, se determinarán los valores de permitividad relativa y conductividad eléctrica. Para llevar a cabo la construcción de la antena monopolo, se realizaron una serie de modelaciones y simulaciones. Posterior a esto, se llevó a cabo la construcción física de la antena monopolo. Una vez construida, se realizan mediciones de prueba. En la primera etapa de medición, se realizaron mediciones en medios con permitividad y conductividad eléctrica conocidas (aire y agua), para verificar su correcto funcionamiento. Para finalizar, se realizaron mediciones en un suelo cuyas propiedades dieléctricas eran desconocidas, determinando estos valores a través del instrumento construido.

El proyecto busca profundizar en la comprensión de cómo las propiedades eléctricas del suelo influyen en la interacción con señales electromagnéticas, lo que es relevante en aplicaciones como la comunicación por radio, la detección remota o en este caso en aplicaciones como el radio telescopio MIST. Por otra parte, este proyecto tiene como objetivo entregar una nueva opción para el estudio de suelos en donde la combinación de mediciones y simulaciones permitirá obtener información valiosa sobre las características dieléctricas del suelo y su variación en diferentes condiciones. Esto puede tener importantes implicaciones en la optimización de sistemas de antenas y en la toma de decisiones en proyectos de ingeniería que involucran la interacción con los suelos.

A los alumnos del pasado, presente y futuro de la carrera de Ingeniería Civil Eléctrica de la U.C.S.C.

Agradecimientos

Agradecer infinitamente a mis familiares que siempre se sintieron orgulloso de mis decisiones, en especial a mi madre Rosa Aguilar en conjunto con mi hermana Karla Muñoz quien siempre me ayudaban a tener ánimo y fuerzas para poder seguir luchando en esta larga carrera universitaria, también agradecer a mi padre Hector Muñoz por cada noche y amaneceres navegando, pasando frio, sueño entre otras dificultades, para que yo tenga un buen pasar en esta etapa de mi vida. También agradezco a la señorita Andrea Barrientos que a pesar de todo ella siempre estuvo conmigo a la hora de querer botar la toalla, dándome aliento y a la vez sintiéndose orgullosa de mis logros.

También agradezco a la familia Cantillana junto a don Juan quienes me abrieron las puertas de su hogar para que yo pueda alojarme en esta última etapa Universitaria, teniendo siempre un plato de comida y una entretenida conversación.

Por ultimo y no menos importante, agradezco a la universidad que gracias al profesor Ricardo Bustos en conjunto con la señorita Cinthia Altamirano me ayudaron y apoyaron para el desarrollo de este trabajo de habilitación profesional.

Tabla de Contenidos

LISTA DE TABLAS	IX
LISTA DE FIGURAS	X
NOMENCLATURA.....	XII
ABREVIACIONES	XII
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	13
1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL	13
1.2. TRABAJOS PREVIOS	13
1.2.1 Antenas.	13
1.2.2 Conductividad eléctrica.....	14
1.2.3 Permitividad Relativa	15
1.2.4 Proyecto MIST.....	16
1.2.5 Discusión	16
1.3. HIPÓTESIS DE TRABAJO	16
1.4. OBJETIVOS	17
1.4.1 Objetivo General	17
1.4.2 Objetivos Específicos.....	17
1.5. ALCANCES Y LIMITACIONES	17
1.6. TEMARIO Y METODOLOGÍA	17
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	19
2.1. INTRODUCCIÓN	19
2.2. TEORÍA BÁSICA DE LAS ANTENAS	19
2.2.1 Parámetros de una antena.....	19
2.2.2 Tipos de Antenas.....	23
2.3. IMPORTANCIA DE LA CARACTERÍSTICA DEL SUELO PARA UNA ANTENA	24
2.4. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DEL SUELO	26
2.5. FORMAS DE MEDIR CONDUCTIVIDAD DEL SUELO	27
2.5.1 Método Schlumberger.....	28
2.5.2 Método Wenner.....	29
2.6. PERMITIVIDAD RELATIVA	30
2.7. TÉCNICAS PARA MEDIR PERMITIVIDAD RELATIVA.....	30
2.7.1 Línea de transmisión y reflexión.....	31
2.7.2 Líneas paralelas	31
2.7.3 Cavidad resonante.....	31
2.7.4 Espacio libre.....	32
2.7.5 Sonda coaxial	32
2.7.6 Resumen de los métodos de medición de permitividad	33
2.8. PROYECTO MIST.....	34
2.8.1 Mediciones de permitividad y conductividad eléctricas de suelos en el proyecto MIST.	35
CAPÍTULO 3. SIMULACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE MEDIDOR DE PERMITIVIDAD Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EN SOFTWARE FEKO.....	39
3.1. INTRODUCCIÓN	39
3.2. MODELACIÓN DE LA ANTENA MONOPOLO.....	39
3.2.1 Diseño y dimensiones generales de la antena monopolo.....	39
3.2.2 Modelación de antena monopolo en software FEKO.....	39
3.3. CONSTRUCCIÓN FÍSICA DE LA ANTENA MONOPOLO.....	40
3.3.1 Materiales utilizados para la construcción de la antena monopolo.....	40
CAPÍTULO 4. MEDICIONES DEL MEDIDOR DE PERMITIVIDAD Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EN MEDIOS CON ϵ_r Y σ CONOCIDAS.	45

4.1.	INTRODUCCIÓN	45
4.2.	MEDICIONES TOMADAS EN AIRE (ESPACIO LIBRE)	45
4.2.1	<i>Simulación de medición S11 en aire en FEKO</i>	46
4.2.2	<i>Medición de S11 en aire a través de antena monopolo</i>	47
4.2.3	<i>Análisis de resultados obtenidos</i>	49
4.3.	MEDICIONES TOMADAS EN AGUA	51
4.3.1	<i>Mediciones de S11 a través de antena monopolo</i>	51
4.3.2	<i>Simulación de medición en FEKO</i>	55
4.3.3	<i>Análisis de resultados obtenidos</i>	57
CAPÍTULO 5. MEDICIONES DEL MEDIDOR DE PERMITIVIDAD Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EN SUELO		62
5.1.	INTRODUCCIÓN	62
5.2.	MEDICIÓN DE S11 A TRAVÉS DE ANTENA MONOPOLO	62
5.3.	SIMULACIÓN DE MEDICIÓN DE SUELO EN FEKO	65
5.4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS	71
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES		75
6.1.	SUMARIO	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
6.2.	CONCLUSIONES	75
6.3.	TRABAJO FUTURO	76
BIBLIOGRAFÍA		77
ANEXO A. CALIBRACIÓN NANOVNA PARA MEDICIONES DE S11		78
ANEXO B. CÓDIGO UTILIZADO EN MATLAB		79

Lista de Tablas

Tabla 2.1. Conductividad de elementos típicos.....	26
Tabla 2.2. Resumen de métodos para medir Permitividad Relativa de un material.	34
Tabla 4.1. Error Cuadrático Medio de Medición en Aire	51
Tabla 4.2. Error Cuadrático Medio S_{11} en Agua sin contacto del Plano de Tierra	59
Tabla 4.3. Error Cuadrático Medio de Medición S_{11} en Agua Con Contacto de Plano de Tierra.....	61
Tabla 5.1. Designación de Nombres para las Leyendas de Cada Simulación Realizada.....	66
Tabla 5.2. Cálculo del Error Cuadrático Medio de la Biblioteca de Curvas.....	73

Lista de Figuras

Fig. 2.1. Ejemplo de patrón de radiación de una antena. Fuente: [1].....	20
Fig. 2.2. Lóbulos en el patrón de radiación de una antena. Fuente: [1]	20
Fig. 2.3. Comportamiento de los parámetros S en una red de 2 puertos. Fuente: [2]	22
Fig. 2.4. Antena Monopolo. Fuente: [1].....	24
Fig. 2.5. Antena tipo Dipolo. Fuente: [1].....	24
Fig. 2.6. Parámetro S_{11} de antena dipolo BLADE en tres suelos de tierra. Fuente: [3]	25
Fig. 2.7. Diagrama de radiación de una antena $\lambda/2$. Fuente: [1]	26
Fig. 2.8. Telurómetro marca FLUKE. Fuente: [5]	28
Fig. 2.9. Modelo de método Schlumberger para medir resistividad. Fuente: [4].....	28
Fig. 2.10. Modelo del método de Wenner para medir resistividad. Fuente: [4]	29
Fig. 2.11. Circuito equivalente de una línea de transmisión para medir parámetros dieléctricos. Fuente: [8]	31
Fig. 2.12. Esquemas funcionamiento de una sonda coaxial. Fuente: [7]	33
Fig. 2.13. Cable Coaxial desde una vista transversal. Fuente: [7]	33
Fig. 2.14. Antena radiotelescopio MIST. Fuente: [11]	35
Fig. 2.15. Medidor de permitividad y conductividad eléctrica. Fuente: [12].....	36
Fig. 2.16. Antena Dipolo enterrada en el suelo para realizar medición. Fuente: [12]	37
Fig. 2.17. Medición de la Antena en suelo con NanoVNA. Fuente: [12]	37
Fig. 2.18. Resultados obtenidos en mediciones realizadas en terreno con antena Dipolo. Fuente: [12]	38
Fig. 3.1. Antena Monopolo construida en software FEKO.....	40
Fig. 3.2. Elemento conductor vertical antena monopolo (tubo de cobre)	41
Fig. 3.3. Plano de tierra de antena Monopolo (plancha de aluminio)	41
Fig. 3.4. Prensa de cables	42
Fig. 3.5. Cable de transmisión utilizado entre la antena monopolo y el conector SMA.....	42
Fig. 3.6. Conector SMA hembra	42
Fig. 3.7. NanoVNA	43
Fig. 3.8. Bosquejo antena monopolo.....	43
Fig. 3.9. Medidor de permitividad y conductividad eléctrica en base a una antena monopolo	44
Fig. 4.1. Antena Monopolo simulada en espacio libre.....	46
Fig. 4.2. Resultados de simulación FEKO antena Monopolo en espacio libre	47
Fig. 4.3. Resultados de medición S_{11} en Aire	48
Fig. 4.4. Fotografías medición de S_{11} en Aire.....	48
Fig. 4.5. Parte real e imaginaria de la simulación y medición de S_{11} en Aire.....	49
Fig. 4.6. Magnitud y fase de la medición y simulación del S_{11} en Aire	50
Fig. 4.7. Fotografías de primera medición de S_{11} en Agua.	52
Fig. 4.8. Resultados obtenidos en mediciones sin contacto del plano de tierra con la superficie de Agua	53
Fig. 4.9. Fotografía de segunda medición de S_{11} en Agua.	53
Fig. 4.10. Resultados obtenidos en la medición con contacto del plano de tierra en la superficie de agua.	54
Fig. 4.11. Comparación de parte real e imaginaria de S_{11} de las mediciones en agua.	54
Fig. 4.12. Simulación de primera medición de S_{11} en Agua	56

Fig. 4.13. Resultados obtenidos en simulación de antena monopolo sin contacto del plano de tierra con la superficie de Agua.	56
Fig. 4.14. Simulación de segunda medición de S_{11} en Agua.	57
Fig. 4.15. Resultados obtenidos en simulación de antena monopolo con contacto del plano de tierra con la superficie de Agua.	57
Fig. 4.16. Comparación de parte real e imaginaria de S_{11} sin contacto del plano de tierra con la superficie de agua.	58
Fig. 4.17. Comparación de magnitud y fase de S_{11} sin contacto del plano de tierra con la superficie de agua.	58
Fig. 4.18. Comparación de parte real e imaginaria de S_{11} con contacto del plano de tierra con la superficie de agua.	60
Fig. 4.19. Comparación de magnitud y fase de S_{11} sin contacto del plano de tierra con la superficie de agua.	60
Fig. 5.1. Localización de lugar donde se realizó la medición de S_{11} en Suelo	63
Fig. 5.2. Fotografías de mediciones de nivel y de distancia entre el suelo y el plano de tierra.	63
Fig. 5.3. Vista aérea de la antena monopolo.	64
Fig. 5.4. Resultados obtenidos en medición con antena monopolo y NanoVNA en suelo.	64
Fig. 5.5. Antena Monopolo simulada en suelo.	65
Fig. 5.6. Resultados de Simulación 1 y 2 de medición de suelo con antena monopolo.	67
Fig. 5.7. Resultados de Simulación 3 y 4 de medición de suelo con antena monopolo.	67
Fig. 5.8. Resultados de Simulación 5 y 6 de medición de suelo con antena monopolo.	68
Fig. 5.9. Resultados de Simulación 7 y 8 de medición de suelo con antena monopolo.	68
Fig. 5.10. Resultados de Simulación 9 y 10 de medición de suelo con antena monopolo.	69
Fig. 5.11. Resultados de Simulación 11 y 12 de medición de suelo con antena monopolo.	69
Fig. 5.12. Resultados de Simulación 13 y 14 de medición de suelo con antena monopolo.	70
Fig. 5.13. Resultados de Simulación 15 y 16 de medición de suelo con antena monopolo.	70
Fig. 5.14. Parte real e imaginaria de simulaciones de suelo obtenidas en FEKO.	71
Fig. 5.15. Magnitud y fase de simulaciones de suelo obtenidos en FEKO.	72
Fig. 5.16. leyendas de la biblioteca de curvas.	72
Fig. 5.17. Resultado de simulación en Suelo con menor ECM.	74

Nomenclatura

MHz	: Mega Hertz
GHz	: Giga Hertz
G	: Ganancia
D	: Directividad
Z	: Impedancia
P	: Potencia.
db	: decibels.
ϵ	: Permitividad
σ	: Conductividad
ρ	: Resistividad
E	: Campo Eléctrico
Γ	: Coeficiente de reflexión
S_{11}	: Coeficiente de reflexión
S_{12}	: Coeficiente de transmisión inversa
ϵ_r	: Permitividad relativa
E_0	: Permitividad del vacío

Abreviaciones

Mayúsculas

MIST.	: Mapper of the IGM Spin Temperature.
S.	: Dispersión (scattering).
ECM.	: Error cuadrático medio.
VNA.	: Analizador de redes Vectoriales.
SMA	: SubMiniature versión A.
PVC	: Policloruro de vinílico.
T	: Temperatura.
SEV	: Sondeo eléctrico vertical.

Capítulo 1. Introducción

1.1. Introducción General

El proyecto MIST es un experimento relacionado con el campo de la cosmología, que tiene como objetivo realizar mediciones de espectros de radio en el cielo a frecuencias inferiores a 200 MHz. Estas mediciones son esenciales para detectar señales de 21 cm, que proporciona información valiosa sobre la estructura y evolución del universo en sus inicios.

El radio telescopio MIST consta de una antena dipolo tipo BLADE. Esta antena se distingue por su patrón de radiación que alcanza su máxima ganancia en el cenit. Sin embargo, es fundamental tener en cuenta el entorno en que se desea instalar la antena, que influye en la señal recibida. La naturaleza del suelo circundante afecta al haz de la antena, junto al diagrama de radiación.

Por lo tanto, este informe se centrará en la importancia de la medición y la comprensión de los parámetros de permitividad relativa y conductividad eléctrica del suelo en el lugar de instalación de la antena, proporcionando los métodos necesarios para llevar a cabo las mediciones de los parámetros eléctricos del suelo o superficie.

1.2. Trabajos Previos

Este apartado tiene como finalidad mostrar información de la revisión bibliográfica que se realizó, para entender la importancia que tienen la existencia de parámetros de permitividad y conductividad eléctrica en el suelo y cómo estos afectan el desempeño de una antena. Además, se obtienen diversos métodos y antecedentes de mediciones sobre el análisis de proyectos de Astroingeniería y otros campos relacionados con las interacciones entre el suelo y la propagación de ondas electromagnéticas.

1.2.1 Antenas.

♣ C. A. Balanis “Antenna Theory: Analysis and Desing”, 3rd ed. Hoboken,NJ,USA, Wiley,2005 [1].

Libro que explica el funcionamiento de antenas y además muestra sus características y parámetros. Entrega información del efecto que tienen el suelo en una antena, mostrando algunos diagramas de radiación en suelos con diferentes valores dieléctricos.

- ♣ J. Amado, F. Bianco and G. Naldini, “Caracterización de amplificadores de microondas: de los Parámetros-S a los Parámetros-X”, FCECyN, vol. 3, no. 2, pp. 19-28, 2016 [2].

Este artículo describe los parámetros S en la creación de modelos de simulación que pueden prever con precisión el rendimiento de circuitos reales. En particular, este artículo entrega conocimientos acerca de los parámetros S.

1.2.2 Conductividad eléctrica.

- ♣ S. Rojas, “Estudio y caracterización de la conductividad eléctrica del suelo para ser aplicado en radio telescopio MIST”, Tesis de pregrado, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Concepción, Chile, 2021 [3].

Tesis que demuestra la importancia de la conductividad eléctrica en el suelo para poder instalar una antena de tipo BLADE. Además, muestra técnicas que se pueden realizar para mediciones de conductividad eléctrica en el suelo, estudiando distintos puntos de suelos en Concepción.

- ♣ IEEE Std 81-2012, Guía para medir la resistividad de la tierra, la impedancia de tierra y los potenciales de la superficie de la tierra de un sistema de puesta a tierra, IEEE, 2012. [4].

Guía técnica que proporciona métodos y procedimientos estándar para medir la resistividad del suelo, la impedancia de sistemas de puesta a tierra y los potenciales de superficie en sistemas de puesta a tierra. Esta norma abarca métodos de prueba como los arreglos de Wenner y Schlumberger, detallando cómo llevar a cabo estas mediciones en campo para obtener resultados precisos. La guía es utilizada en estudios de diseño de sistemas de puesta a tierra y en la evaluación de su efectividad, contribuyendo a mejorar la seguridad y la protección de instalaciones eléctricas.

- ♣ R. Bustos. M. Diaz “MIST Memo 2. Soil Conductivity Site Testing”, en línea: <https://sitios.ucsc.cl/mist/mist-memos/>, 2020 [5].

Reporte técnico de mediciones de conductividad de suelo a través de sondeo eléctrico vertical que se realizó en Llano Cerro Ventarrones, Salar de Pujsa y Arenal Laguna Tara.

- ♣ M. A. S “MIST Memo 8. Soil Resistivity”, en línea: <https://sitios.ucsc.cl/mist/mist-memos/> . 2020 [6].

Documento nos entrega información teórica de métodos de medición de resistividad de suelo, donde explica y fundamenta el método de medición de resistividad con 4 electrodos.

1.2.3 Permittividad Relativa

- ♣ E. A. Carreón Rebolledo, O. E. Muñoz Muñoz, y E. Ponce Morán, "Dispositivo para medir la permitividad relativa de 2.4 GHz," Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Profesional Adolfo López Mateos Zacatenco, Enero 2018 [7].

Reporte técnico que consiste en la construcción de un dispositivo formado por una cavidad y dos antenas acoplada a una frecuencia de resonancia de 2.4 GHz para caracterizar materiales laminados, el cual se conectan las antenas a un analizador de redes vectoriales, calibrándolo para los parámetros de dispersión (S).

- ♣ W. G. Fano, A. Razzitte, and P. Larocca, Eds., "Electromagnetic Field Radiation in Matter." IntechOpen, 2020 [8].

Libro que aborda diversas facetas de la interacción entre radiación de campos electromagnéticos y diferentes materiales. Es un recurso que cuenta con información sobre forma de medir permitividad a través de la técnica de líneas de transmisión. Además, cuenta con contenido importante de antenas.

- ♣ Rohde & Schwarz, "Measurement of Dielectric Material Properties," Application Note, Mar. 2012. Disponible en: www.rohde-schwarz.com [9]

Libro que nos entrega información sobre las mediciones de propiedades dieléctricas de materiales en radiofrecuencia a través de mediciones de coeficientes de reflexión en conjunto a simulaciones, además nos indica que la medición dieléctrica es importante porque puede proporcionar la información eléctrica o magnética que influyan en nuestro diseño.

- ♣ Agilent Technologies, "Measuring Dielectric Properties using Agilent's Materials Measurement Solutions," [Online]. Available: <https://www.agilent.com>. [Accessed: marzo. 12, 2024]. [10]

Este documento describe las soluciones de medición de propiedades dieléctricas de Agilent, destacando la importancia de entender las características dieléctricas de los materiales en diversas industrias para optimizar los ciclos de diseño, monitoreo de procesos y aseguramiento de la calidad.

1.2.4 Proyecto MIST.

- ♣ R. A. Monsalve, C. Altamirano, V. Bidula, R. Bustos, C. H. Bye, H. C. Chiang, M. Díaz, B. Fernández, X. Guo, I. Hendricksen, E. Hornecker, F. Lucero, H. Mani, F. McGee, F. P. Mena, M. Pessôa, G. Prabhakar, O. Restrepo, J. L. Sievers, and N. Thyagarajan, "Mapper of the IGM spin temperature: instrument overview," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 530, no. 4, pp. 4125–4147, Apr. 2024 [11].

Artículo científico que describe la finalidad del proyecto MIST, informando sobre el diseño del radiotelescopio MIST, además de mostrar simulaciones en software FEKO y metodologías para determinar los efectos del suelo en donde se realizan observaciones con el radiotelescopio MIST.

1.2.5 Discusión

En la literatura se muestran y enseñan conceptos básicos de antenas que son fundamentales para comprender su uso y comportamiento. Adicionalmente, se muestran algunos tipos de antenas y algunos efectos según las propiedades de permitividad relativa y conductividad eléctrica de la superficie en donde estén instaladas [1]. Por otro lado, se fundamenta que son los parámetros S [2], que es de gran importancia para el transcurso de este proyecto.

En cuanto a la investigación, sobre las diferentes formas de realizar mediciones de permitividad relativa, se analizaron en [7] [9] [8] [10]. En el caso de la conductividad eléctrica se estudiaron en [3] [4] [5] [6], así obteniendo y comprendiendo formas de realizar mediciones de permitividad y conductividad eléctrica.

Para finalizar se estudió en grandes rasgos el proyecto MIST, y con ello las formas que emplean para obtener los valores de parámetros eléctricos del suelo, obteniendo así las limitaciones del estudio de permitividad relativa y conductividad eléctrica del suelo [11].

1.3. Hipótesis de Trabajo

Un medidor de permitividad relativa y conductividad eléctrica del suelo permitirá determinar el comportamiento y característica de radiación de una antena. Además, se espera medir permitividad

relativa y conductividad eléctrica del suelo para adaptar la antena a las condiciones del suelo, mejorando su eficiencia.

1.4. Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Construir un medidor de permitividad relativa y conductividad eléctrica.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Realizar simulaciones y modelación del medidor en el software FEKO.
- Realizar mediciones del coeficiente de reflexión (s_{11}) con instrumento NanoVNA en medios con permitividad relativa y conductividad eléctrica conocidas.
- Comparar las simulaciones en el software FEKO con las mediciones del coeficiente de reflexión (s_{11}) para determinar la conductividad eléctrica y permitividad relativa de distintos medios de interés.

1.5. Alcances y Limitaciones

Con la presente investigación, modelación y construcción de un medidor de permitividad relativa y conductividad eléctrica se pretende apoyar en proyectos relacionados con la instalación y funcionamientos de antenas, como es el caso del Proyecto MIST. Se realizan mediciones en distintos tipos de suelo y/o superficies con el instrumento a construir, obteniendo el parámetro S_{11} , llegando al valor de permitividad relativa y conductividad eléctrica de las distintas muestras a través de comparaciones y análisis de resultados obtenidos con simulaciones en el software FEKO.

1.6. Temario y Metodología

La metodología se inicia con una investigación y revisión bibliográfica, relacionadas con métodos de mediciones de permitividad relativa y conductividad eléctrica. Posteriormente, se optó por la construcción de una antena monopolo que será utilizada para obtener el coeficiente de reflexión al tener contacto con el medio en interés y compararlos con simulaciones en el software FEKO. Gracias a la capacidad del software de modificar los valores de permitividad relativa y conductividad eléctrica de los suelos, se realiza una serie de simulaciones de coeficientes de reflexión hasta obtener resultados lo más similar posible del comportamiento del coeficiente de reflexión en frecuencia entre

la medición y la simulación. Así, se puede determinar el valor de conductividad eléctrica y permitividad relativa del suelo o medio en estudio.

El informe se estructura de diversos capítulos que describe distintos aspectos y etapas de este proyecto. El primer capítulo es introductorio, presentando la hipótesis del trabajo, los objetivos, alcances y limitaciones; el segundo capítulo informa sobre el marco teórico, e información relevante para el desarrollo de este proyecto; en el tercer capítulo, se muestra la modelación en FEKO de la antena monopolo a utilizar, con los materiales y sus respectivas medidas para su construcción física; en el cuarto capítulo, se muestran las mediciones con el medidor de permitividad y conductividad eléctrica en medios conocidos como el aire y el agua para confirmar su correcto funcionamiento; en el quinto capítulo se realizan mediciones en suelos; en el sexto se presentan la conclusión, en conjunto con los trabajos futuros de este proyecto.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1. Introducción

En este capítulo se busca contextualizar el trabajo a realizar a través de diferentes revisiones bibliográficas de métodos utilizados para realizar mediciones de permitividad relativa y conductividad eléctrica a través de mediciones de coeficiente de reflexión, que es de gran importancia para el desarrollo de este proyecto. Además, se incluirá información sobre la finalidad y propósito del proyecto MIST.

2.2. Teoría básica de las antenas

Una antena es un dispositivo utilizado para emitir o recibir ondas electromagnéticas, lo cual se puede considerar como un transductor capaz de convertir ondas electromagnéticas en ondas eléctricas en el caso de que la antena se comporte como receptor. En el caso de que se comporte como una antena de emisión, una antena transforma ondas eléctricas en ondas electromagnéticas [1].

2.2.1 Parámetros de una antena

Existen distintos tipos de antenas, las cuales se diferencian por sus propiedades, en donde podemos encontrar los Patrones de Radiación, Directividad, Ganancia, Ancho de Banda, Parámetros S, entre otros parámetros y/o propiedades [1].

2.2.1.1 Patrón de radiación

El patrón de radiación de una antena es la representación espacial de la energía que una antena puede radiar y se puede representar en dos o tres dimensiones. Al realizar el análisis del patrón de radiación en tres dimensiones, existen dos planos sobre los cuales se grafican los puntos correspondientes a la energía radiada de la antena: el plano Azimutal y el plano de elevación [1], como se observa en la figura 2.1.

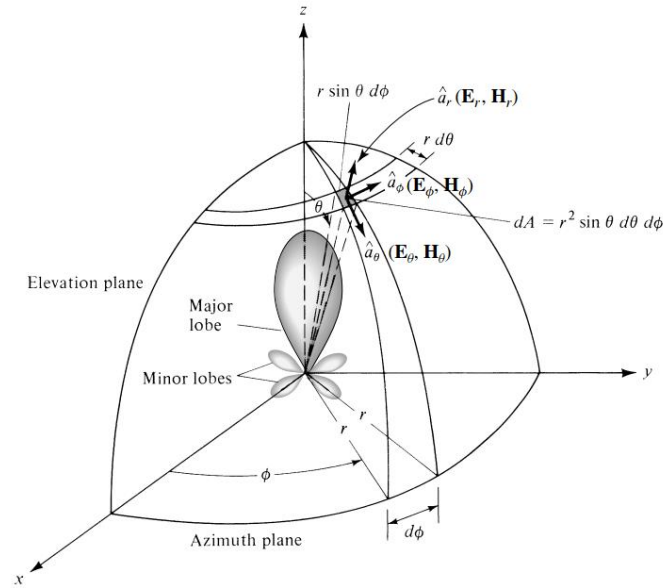


Fig. 2.1. Ejemplo de patrón de radiación de una antena. Fuente: [1]

En los patrones de radiación podemos encontrar los lóbulos de radiación, los cuales se califican en dos tipos, lóbulos principales y lóbulos secundario. Estos últimos contienen o integran a los lóbulos laterales, lóbulos posteriores traseros [1]. A continuación, se muestra un ejemplo de patrón de radiación con sus respectivos lóbulos.

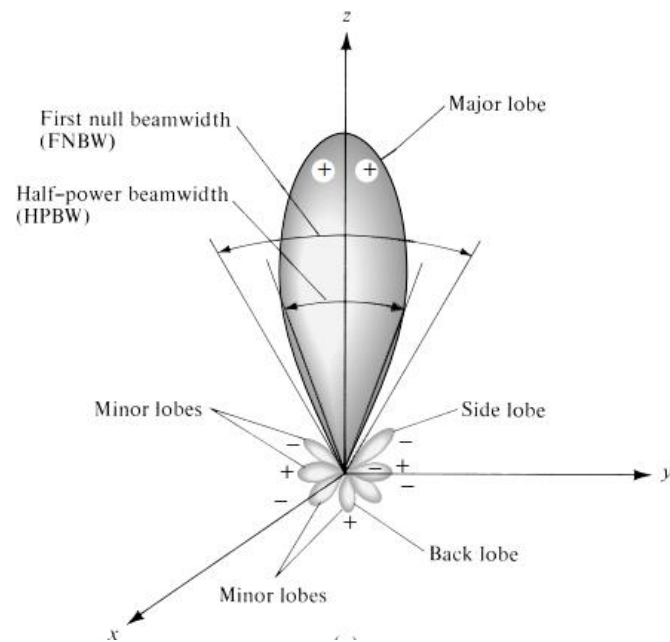


Fig. 2.2. Lóbulos en el patrón de radiación de una antena. Fuente: [1]

2.2.1.2 Directividad

La directividad de una antena se define como, la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección, a una distancia dada, y la densidad de potencia que radiaría a esta misma distancia una antena isotrópica que radiase la misma potencia que la antena transmisora. Entre más alta sea la directividad, el haz de radiación será más estrecho [1].

$$D = \frac{P_{ISO}}{P_{RAD}} \quad (2.1)$$

En donde:

D: Directividad de la antena.

P_{ISO}: Potencia de una antena Isotrópica.

P_{RAD}: Potencia de radiación de la antena.

2.2.1.3 Ganancia

La ganancia se define como la razón entre la potencia que hay que alimentar una antena isotrópica y la potencia de alimentación de la antena para producir el mismo campo de radiación a la misma distancia, en la dirección de la máxima radiación [1]. Matemáticamente se puede definir como:

$$G = \frac{P_{ISO}}{P_{Ant}} \quad (2.2)$$

En donde:

G: Ganancia.

P_{ISO}: Potencia de alimentación de una antena Isotrópica.

P_{ANT}: Potencia de alimentación de una antena real.

2.2.1.4 Ancho de banda

El ancho de banda de una antena es un valor subjetivo dependiendo de las características buscadas en el funcionamiento de una antena. El ancho de banda se describe como “el rango de frecuencias dentro del cual el desempeño de la antena, con respecto a alguna característica se ajusta a un estándar especificado” [1].

2.2.1.5 Parámetros S

Las antenas se pueden caracterizar como una red de dos puertos, en donde, este análisis se conoce como parámetros de dispersión o también llamados parámetros S.

Los parámetros S pueden ser utilizados para cualquier frecuencia debido a que no hacen consideraciones de ningún circuito abierto ni corto circuito, simplemente se basan en los niveles de potencia que se perciben en las terminales de la red de dos puertos [2]. Los parámetros S son cuatro, los cuales se muestran en la figura 2.3

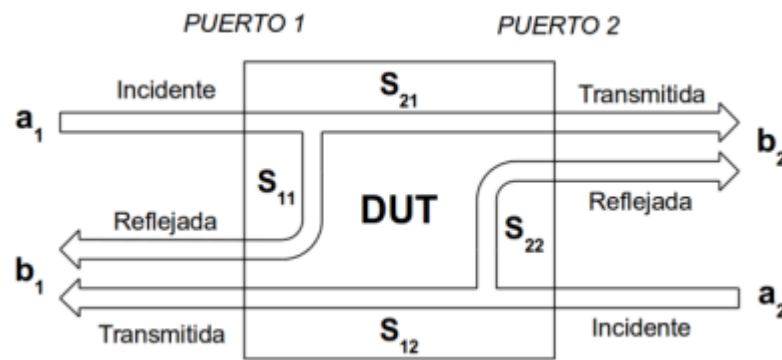


Fig. 2.3. Comportamiento de los parámetros S en una red de 2 puertos. Fuente: [2]

S₁₁. Este parámetro mide la cantidad de potencia que es reflejada en comparación con la cantidad de potencia que se está aplicando en el puerto 1. El parámetro S₁₁ también es conocido como “el coeficiente de reflexión de puerto de entrada” (Γ). Matemáticamente se define como:

$$\Gamma = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \quad (2.3)$$

En donde

Γ : coeficiente de reflexión.

Z: Impedancia de entrada de la antena.

Z₀: Impedancia de característica de línea de transmisión (generalmente 50ohms).

S₁₂. Este parámetro mide la potencia recibida en el puerto 1 en comparación con la enviada por el puerto 2. A este parámetro también se le conoce como “coeficiente de transmisión inversa” [2].

S₂₁. Este parámetro mide la potencia recibida en el puerto 2 en comparación con la enviada por el puerto 1. A este parámetro se le conoce como “coeficiente de transmisión directa” [2].

S₂₂. Este parámetro mide la potencia reflejada en el puerto 2 en comparación con la cantidad de potencia que se envía del puerto 2. A este parámetro también se le conoce como “coeficiente de reflexión del puerto de salida” [2].

2.2.2 Tipos de Antenas

Existen muchos tipos de antenas, pero para el análisis de este informe se estudiarán las antenas de tipo alambre, las cuales son más simples, económicas y en muchos casos, las más versátiles para muchas aplicaciones. Dentro de las antenas de alambre se encuentran las antenas Monopolos y Dipolos, las cuales se describen brevemente a continuación [1].

2.2.2.1 Monopolos

Las antenas monopolos, consisten en un solo conductor vertical extendido sobre un plano de tierra [1]. A continuación, se muestra en grandes rasgos en que consiste la antena monopolo.

Elemento vertical: consiste en el conductor vertical, que puede ser una varilla metálica que se eleva por encima del plano de tierra.

Plano de tierra: Elemento que se ubica en el extremo inferior del elemento vertical.

Alimentación: la antena monopolo se alimenta en la base del elemento vertical. La alimentación puede ser mediante un cable coaxial o una línea de transmisión que tenga contacto con el elemento vertical.

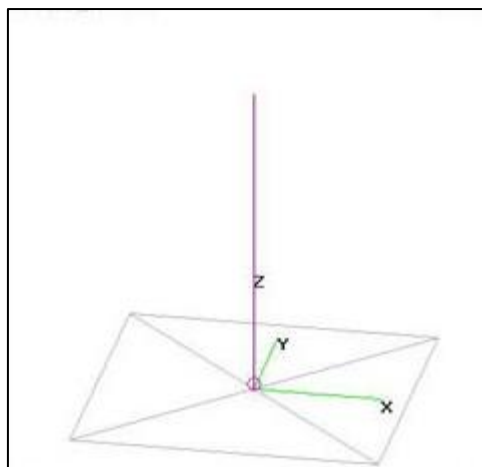


Fig. 2.4. Antena Monopolo. Fuente: [1]

2.2.2.2 Dipolos

Un dipolo es un tipo de antena utilizada en comunicaciones y radiodifusión que se compone de dos elementos conductores, por lo general, alambre o varillas metálicas, que se encuentran separadas y alimentadas en el centro. La longitud de estos elementos se diseña específicamente para resonar a una frecuencia de interés. Este tipo de antena tiene un patrón de radiación omnidireccional en el plano perpendicular a su eje, lo que significa que irradia o recibe señal de manera uniforme alrededor de ese plano. Los dipolos son una de las opciones más atractiva de usar debido a su simplicidad y eficiencia [1].

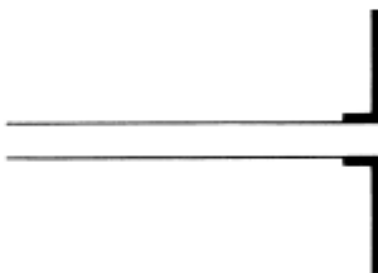


Fig. 2.5. Antena tipo Dipolo. Fuente: [1]

2.3. Importancia de la característica del suelo para una antena

Un obstáculo que no es conductor ideal y que siempre está presente en cualquier sistema de antena, es el terreno o suelo donde se instala. En general, las características de una antena en

frecuencias bajas y medias están influenciadas por las pérdidas que se puede producir por efectos del suelo. Esto es particularmente evidente en la resistencia de entrada. Cuando la antena está ubicada a una altura pequeña en comparación con la profundidad de la superficie de la tierra conductora, la resistencia de entrada puede ser incluso mayor que sus valores en el espacio libre. Es por lo que se pueden encontrar antenas con baja eficiencia [1]. Los parámetros S_{11} y los parámetros de radiación también se ven alterados según la naturaleza de la superficie que se instale la antena [3]. A continuación, se muestra una simulación realizada por [3], en el software FEKO, en donde se observa el comportamiento en frecuencia de parámetro S_{11} de una antena BLADE de tipo dipolo en distintas superficies. Comparando el comportamiento con 3 tipos de suelo diferentes, se puede apreciar que el ancho de banda en -10 dB varía dependiendo el tipo de suelo que se instala la antena.

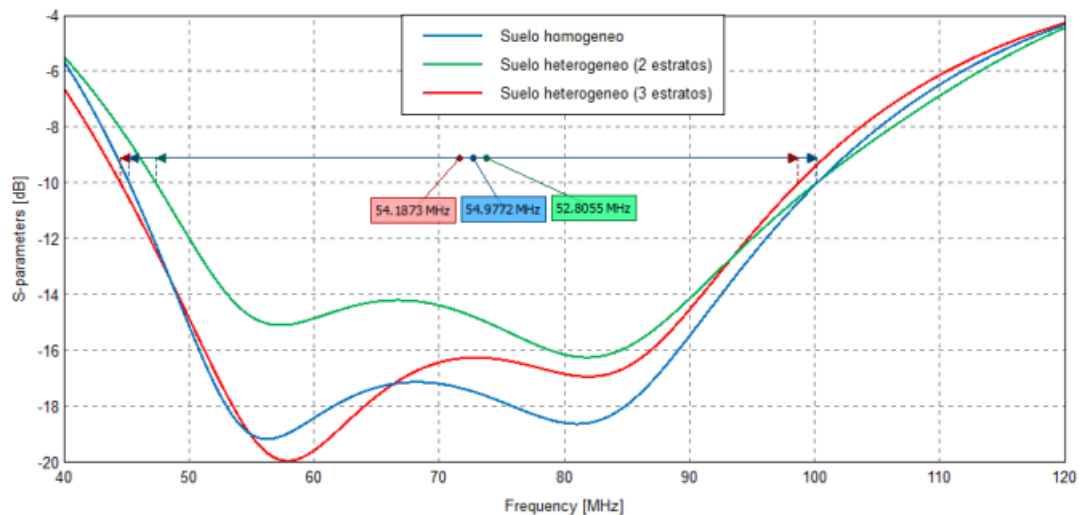


Fig. 2.6. Parámetro S_{11} de antena dipolo BLADE en tres suelos de tierra. Fuente: [3]

A grandes rasgos se puede concluir que el parámetro S_{11} de la antena Blade obtenido en un suelo de dos estratos aumenta hasta 4,9 dB en comparación a un suelo homogéneo, generando mayores pérdidas por reflexión. Por su parte, el parámetro S_{11} de la antena dipolo Blade obtenido en un suelo de tres estratos cambia hasta 1,7 dB en comparación a un suelo considerado como homogéneo. En cuanto al ancho de banda de la frecuencia, esta también se ve alterada según las condiciones del suelo [3].

Como se pudo observar, las características del suelo alteran o modifica el S_{11} de una antena. Además, influye en el diagrama de radiación, como se puede ver a continuación en la figura 2.7, que

nos muestra el diagrama de radiación de un Dipolo, donde se ilustra dos comportamientos de la antena. El primero representa cuando la antena está ubicada sobre un suelo con conductividad eléctrica infinita. El segundo comportamiento es el caso de tener instalada una antena sobre un suelo con una conductividad de 0.01 S/m y una permitividad de 5 a una frecuencia de 1GHz.

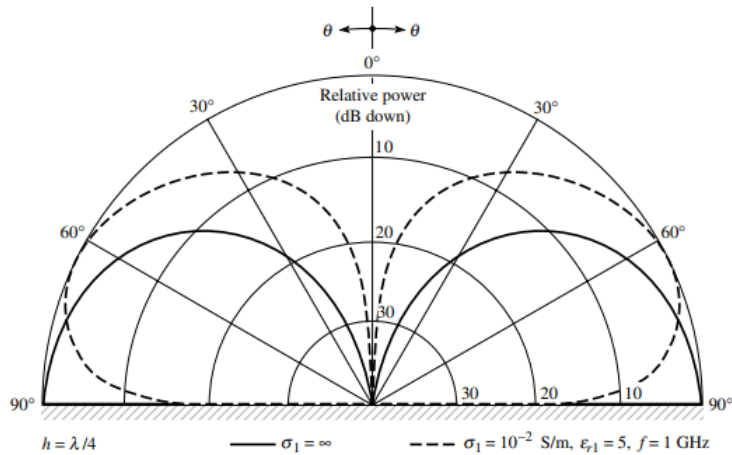


Fig. 2.7. Diagrama de radiación de una antena $\lambda/2$. Fuente: [1]

2.4. Conductividad eléctrica del suelo

La conductividad eléctrica es la capacidad de la materia para permitir el flujo de corriente eléctrica. Dicha capacidad depende directamente de la estructura atómica y molecular del material, así como de otros factores físicos como humedad y temperatura a la que se encuentre o el estado en el que esté (líquido, sólido, gaseoso).

La conductividad eléctrica es el inverso a la resistividad. El símbolo para representar la conductividad es la letra griega sigma (σ) y su unidad de medición es el siemens por metro (S/m). A continuación, en la tabla número 2.1 se muestra algunos valores típicos de conductividad en algunos materiales a temperatura ambiente ($T=293^\circ\text{K}$).

Tabla 2.1. Conductividad de elementos típicos.

Material	Conductividad (S/m) $T= 293^\circ\text{K}$
Plata	$6,1 \times 10^7$
Cobre	$5,8 \times 10^7$
Oro	$4,1 \times 10^7$

Aluminio	$3,5 \times 10^7$
Latón	$1,5 \times 10^7$

Fuente: [7]

2.5. Formas de medir conductividad del suelo

Actualmente existen diversas formas de conocer la conductividad eléctrica de algún medio o superficie (suelo). Uno de los métodos más conocidos y conveniente para obtener la conductividad del suelo es la técnica de sondeo eléctrico vertical (SEV). Este método consiste en el uso de electrodos para inyectar corriente eléctrica en el suelo desde la superficie y medir la caída de potencial eléctrico en diferentes profundidades. Normalmente, se utilizan al menos cuatro electrodos, dos para inyectar la corriente (electrodo de corriente) y dos para medir el potencial (electrodo de potencial). Estos electrodos se insertan en el suelo según una disposición específica, realizando mediciones en distintas posiciones de los electrodos y así obteniendo las respuestas de resistividad eléctrica a diferentes profundidades a medida que los electrodos se desplazan. Estos datos se utilizan para construir un perfil de resistividad eléctrica en función de la profundidad. Existen diversos métodos de mediciones para obtener el corte geo-eléctrico del suelo en función a la resistividad o conductividad utilizando estos electrodos. Los más utilizados son los métodos de Wenner y Schlumberger en donde a través de un Telurómetro nos entrega la resistividad aparente del suelo (en la Figura 2.8 nos muestra un telurómetro). Teniendo en cuenta que la resistividad es el inverso de la conductividad, se puede concluir que a través del método de Wenner y Schlumberger que son técnicas para obtener resistividad, se puede obtener el parámetro de Conductividad eléctrica [4].

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (2.4)$$

En donde:

ρ : Resistividad en Ohms-metros (Ωm)

σ : Conductividad en siemens por metros (S/m)



Fig. 2.8. Telúrometro marca FLUKE. Fuente: [5]

Una vez realizada las mediciones en terreno, ya sea con el método de Schlumberger o Wenner, se realiza un estudio del comportamiento de las curvas de resistividad, obteniendo el número de estratos según la cantidad de cambio de pendiente que se observen en la gráfica construida. Posteriormente, se compara la curva obtenida en el gráfico con una biblioteca de curvas llamadas curvas patrón de Mooney y Orellana, buscando dentro la curva que más se asemeje a la gráfica obtenida en la medición. De esta manera, se obtiene la resistividad de cada estrato que tengamos presente en el suelo que realizamos el estudio. A continuación, se muestra con más detalle los métodos de medición de Schlumberger y Wenner [4].

2.5.1 Método Schlumberger

La configuración de Schlumberger se emplea para mediciones de la resistividad. En la configuración de Schlumberger el operador expande el espaciamiento de los electrodos aumentando la distancia entre los electrodos corrientes durante el transcurso de las mediciones. El aumento del espaciamiento se realiza típicamente a escala logarítmica. Se asume un espaciamiento infinitesimal para los electrodos de potencial [4].

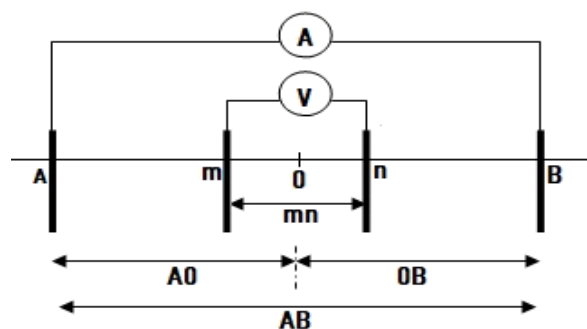


Fig. 2.9. Modelo de método Schlumberger para medir resistividad. Fuente: [4]

La ecuación que caracteriza la resistividad obtenida por el método de Schlumberger es:

$$\rho_s = \pi * mn * \left(\left(\frac{AO}{mn} \right)^2 - \frac{1}{4} \right) * R \quad (2.5)$$

En donde:

AO=BO: Distancia en metros entre el electrodo de corriente y el centro.

mn: Distancia en metros entre los electrodos de potencial.

R: Valor entregado por el Telurómetro en Ohm(Ω).

2.5.2 Método Wenner

La configuración de Wenner es un caso especial de la configuración de Schlumberger. La configuración de Wenner es una configuración común para las mediciones de la resistividad. Cada electrodo de potencial está separado del electrodo de corriente adyacente una distancia a igual a un tercio del espaciamiento de los electrodos de corriente.

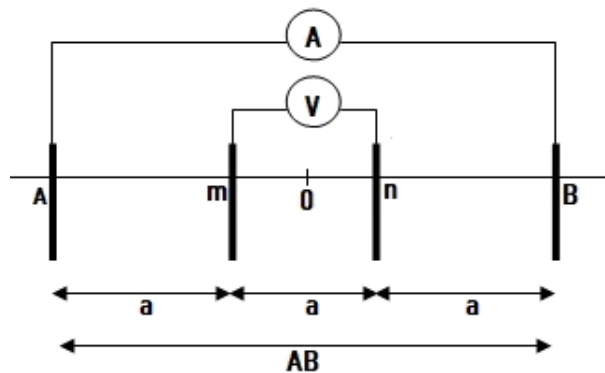


Fig. 2.10. Modelo del método de Wenner para medir resistividad. Fuente: [4]

La ecuación que caracteriza la resistividad obtenida por el método de Wenner es:

$$\rho_w = \frac{4 * \pi * a * R}{1 + \left(\frac{2A}{\sqrt{A^2 + (2B)^2}} \right) - \frac{2A}{\sqrt{((2A)^2 + (2B)^2)}}} \quad (2.6)$$

En donde:

A: Distancia entre electrodos en metros

B: Profundidad al que se entierra el electrodo en metros

R: Lectura entregada por el Telurómetro

En el caso de que A sea mayor a 20 veces B ($A > 20B$), se puede decir que la resistividad obtenida por el método de Wenner es [4]:

$$\rho_w = 2 * \pi * a * R \quad (2.7)$$

2.6. Permitividad relativa

La permitividad es el comportamiento de un material o medio en presencia de un campo eléctrico. Por teoría de electromagnetismo, el vector de densidad de flujo se expresa en función de la permitividad [7], como se muestra en la siguiente ecuación.

$$D = E\varepsilon \quad (2.8)$$

En donde:

D: Densidad de flujo eléctrico

E: Campo eléctrico

ε : Permitividad

La permitividad también puede estar definida en relación con la permitividad relativa (ε_r) y la permitividad en el vacío (ε_0) [7], como se muestra en la siguiente ecuación

$$\varepsilon = \varepsilon_r * \varepsilon_0 \quad (2.9)$$

La permitividad relativa consta de una componente real e imaginaria, en donde la parte real nos indica la cantidad de energía del campo eléctrico que se almacena en un material y la parte imaginaria nos indica el factor de pérdida.

2.7. Técnicas para medir permitividad relativa

En la práctica, la medición de permitividad se puede obtener a través de diversas técnicas, cada una de ellas contienen diferentes características y formas de realizar esta medición. A continuación, se describen algunas metodologías estudiadas para obtener la permitividad de materiales.

2.7.1 Línea de transmisión y reflexión

El método de la línea de transmisión es una técnica de banda ancha para materiales sólidos. Pone el material a prueba dentro de una porción de una línea de transmisión cerrada, en donde la constante de propagación depende directamente de los parámetros del circuito equivalente, que se muestra en la figura 2.11. Estos parámetros que caracterizan la constante de propagación de las ondas a lo largo de la línea, a su vez dependen directamente de la permitividad del medio y conductividad [8].

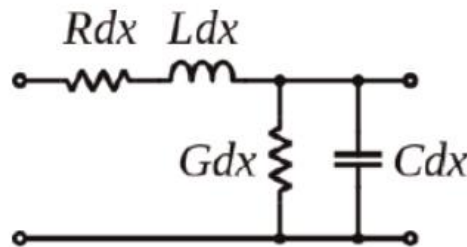


Fig. 2.11. Circuito equivalente de una línea de transmisión para medir parámetros dieléctricos. Fuente: [8]

La permitividad y la permeabilidad se calculan a partir de la medición de la señal reflejada (S_{11}) y la señal de transmisión (S_{21}). Hay que tener en cuenta que para poder realizar una medición de este tipo es necesario contar con un Analizador de Redes Vectoriales. También se debe tener en cuenta que, para realizar una medición de este tipo, se requiere que el campo eléctrico sea máximo, esto se puede lograr colocando un circuito abierto o en corto [8].

2.7.2 Líneas paralelas

Estos sistemas se basan básicamente en un analizador de impedancia y un accesorio de prueba dieléctrica para realizar las medidas. En este método se utilizan típicamente bajas frecuencias (menos de 1 GHz), los parámetros de la prueba de placas paralelas se derivan considerando las dimensiones del material y mediante la medición de su factor de capacitancia y de la disipación [8].

2.7.3 Cavidad resonante

Esta técnica es de las más exactas para encontrar los valores de permitividad y permeabilidad. Consiste en utilizar estructuras con alto factor de calidad, las cuales tienen una frecuencia de resonancia determinada. Al introducir un fragmento de material de muestra afecta a la frecuencia de resonancia y al factor de calidad, a partir de estas variaciones en los parámetros mencionados se puede

calcular la permitividad del material a estudiar. Un aspecto muy importante para considerar de esta técnica es que el analizador de redes vectoriales debe tener una alta resolución de frecuencia, ya que estas estructuras resuenan en altos rangos de frecuencias [7].

2.7.4 Espacio libre

Este método consiste en la utilización de antenas con alta directividad para enfocar las microondas a través de una muestra en forma de losa o lámina. No requiere contacto físico con el material, por lo que es aplicable a altas temperaturas y ambientes hostiles. El sistema está compuesto por un analizador de redes vectorial (VNA), antenas de transmisión y recepción, y accesorios de montaje (soportes ajustables y guías de alineación) que aseguran la correcta orientación y distancia entre las antenas y la muestra. Además, se requiere de un software especializado en el análisis de comportamientos de ondas electromagnéticas [8].

2.7.5 Sonda coaxial

El método de sonda coaxial es un cable coaxial que está abierto en un extremo para que tenga contacto con el material a estudiar. El material se mide mediante la inmersión de la sonda en un líquido o tocando a la cara plana de un material en estado sólido. Es importante destacar que la profundidad efectiva de la medición depende de la frecuencia de la señal, a frecuencias más altas penetran menos profundamente, esto significa que el método mide principalmente las propiedades del material cercano a la superficie. Esta técnica consiste en que la sonda tenga contacto con el material que se va a analizar o estudiar, con este procedimiento se detectará una señal reflejada, en fase y magnitud. Al igual que la técnica de línea de transmisión es necesario tener un analizador de redes vectoriales y así obtener el coeficiente de reflexión [7]. En la figura 2.12, se ilustra como realizar mediciones para superficies sólidas y líquidas.

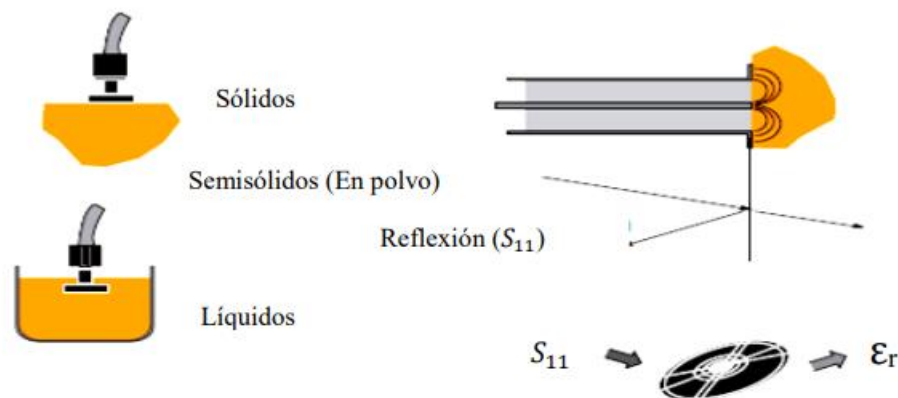


Fig. 2.12. Esquemas funcionamiento de una sonda coaxial. Fuente: [7]

Una de las grandes ventajas de este método es que permite realizar mediciones de superficies que no se pueden cortar ni sumergir. Esto es especialmente útil en materiales grandes, frágiles, o en condiciones donde el contacto directo con un sensor podría alterar las propiedades del material. Con el método de sondeo coaxial, la muestra puede colocarse en estrecho contacto con la sonda sin modificar sus características, lo que asegura mediciones precisas [8].

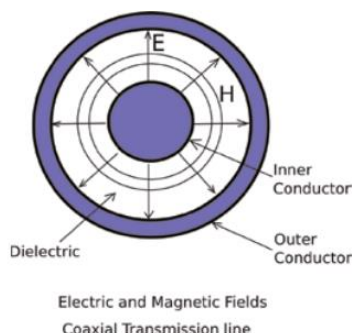


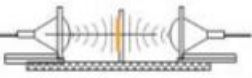
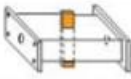
Fig. 2.13. Cable Coaxial desde una vista transversal. Fuente: [7]

En la figura 2.13, se puede observar el comportamiento del campo eléctrico y magnético en un cable coaxial considerando un flujo de corriente eléctrica.

2.7.6 Resumen de los métodos de medición de permitividad

A continuación, se muestra una tabla resumen de las distintas formas que se puede realizar la medición de la permitividad relativa.

Tabla 2.2. Resumen de métodos para medir Permitividad Relativa de un material.

Coaxial Probe ϵ_r		Broadband, convenient, non-destructive Best for lossy MUTs; liquids and semi-solids
Transmission Line ϵ_r and μ_r		Broadband Best for lossy to low loss MUTs; machineable solids
Free Space ϵ_r and μ_r		Broadband; Non-contacting Best for flat sheets, powders, high temperatures
Resonant Cavity ϵ_r		Single frequency; Accurate Best for low loss MUTs; small samples
Parallel Plate ϵ_r		Accurate Best for low frequencies; thin, flat sheets

Fuente: [10]

2.8. Proyecto MIST

La medición de la línea de 21 cm del hidrógeno neutro en el medio intergaláctico (IGM) ha sido reconocida como una forma prometedora de cartografiar la evolución del universo durante sus primeros mil millones de años y como la única forma de observar la edad oscura. En contexto a esto la antena radiotelescopio de MIST, representa una contribución significativa a los instrumentos globales de 21cm [11].

El instrumento MIST es un radiómetro de potencia total y polarización única. El diseño del instrumento está motivado por los objetivos de tener un patrón de haz de antena sobre el suelo que alcance su punto máximo en el cenit y disminuya hacia el horizonte. Otro objetivo es evitar el uso de plano de tierra de metal. Esta elección eliminaría los posibles reflejos de señales producida entre el borde de plano de tierra. Operar sin un plano de tierra aumenta las pérdidas de tierra, sin embargo, las pérdidas producidas por el suelo o tierra se pueden estimar a través de simulaciones y luego anularlas durante el análisis de datos [11].

En cuanto a las características del diseño del radio telescopio, se basa en una antena dipolo de tipo Blade horizontal de 2,42 m de longitud y 60 cm de ancho, hecha de paneles de aluminio macizo. La antena funciona a una altura de 52 cm del suelo. El instrumento opera con cuatro baterías de 12 V, 18 Ah y tiene un consumo máximo de energía de 17 wh. En la figura 2.14 se muestra la antena del proyecto MIST.



Fig. 2.14. Antena radiotelescopio MIST. Fuente: [11]

El proyecto MIST utiliza simulaciones electromagnéticas con el software FEKO, realizando estimaciones de parámetros de la antena MIST, como por ejemplo eficiencia de radiación, directividad del haz, eficiencia del haz y coeficiente de reflexión [11].

Una etapa de gran interés para el desarrollo de este informe o bien del proyecto MIST, es la modelación de los parámetros eléctricos del suelo. El rendimiento de la antena depende en gran medida de la conductividad eléctrica (σ) y la permitividad relativa (ϵ_r). En suelos reales, σ y ϵ_r son espacialmente no homogéneos. Sin embargo, en FEKO sólo es posible diseñar infinitos modelos de suelo con variaciones en función de la profundidad. Por esta razón para simplificar el modelado y el trabajo dentro de las capacidades de FEKO, para MIST se eligen sitios de observación donde el suelo sea muy plano y en donde cualquier variación ocurra principalmente en función de la profundidad [11].

Para explorar el efecto del suelo en el rendimiento de la antena MIST, se realizan diversas simulaciones FEKO, con distintos modelos en donde se tienen diferentes propiedades de σ , ϵ_r y cantidad de estratos o capas del suelo [11].

2.8.1 Mediciones de permitividad y conductividad eléctricas de suelos en el

proyecto MIST.

Según información encontrada en Memo 55 [12], la medición de permitividad relativa y conductividad eléctrica de suelos ya se ha intentado a través de un medidor de permitividad y conductividad eléctrica. Su principio de funcionamiento es medir los parámetros S_{11} que se obtienen al tener en contacto una antena de tipo dipolo que se observa en la figura 2.15, con el suelo o el medio de interés. El comportamiento en frecuencia del S_{11} es obtenido a través de un analizador de redes vectoriales (VNA). Posteriormente se modela y simula la antena en el software FEKO, obteniendo así la curva de S_{11} en frecuencia según los parámetros de permitividad y conductividad eléctrica aproximados que se le entregan a la modelación. Luego se modifican los valores de permitividad relativa y conductividad eléctrica, hasta que las curvas del S_{11} en frecuencia de las mediciones y las simulaciones sean lo más similares posible, para así obtener valores estimados de permitividad y conductividad eléctrica de la superficie a estudiar [12].



Fig. 2.15. Medidor de permitividad y conductividad eléctrica. Fuente: [12]

Las dimensiones de la antena mostrada en la figura anterior son:

- Longitud de las varillas, $L = 29$ cm.
- Separación entre varillas, $s = 3$ cm.
- Diámetro de la varilla, $d = 0,4$ cm.

A continuación, se muestran algunas imágenes durante mediciones tomadas en suelo con la antena y el analizador de redes vectoriales (NanoVNA).



Fig. 2.16. Antena Dipolo enterrada en el suelo para realizar medición. Fuente: [12]

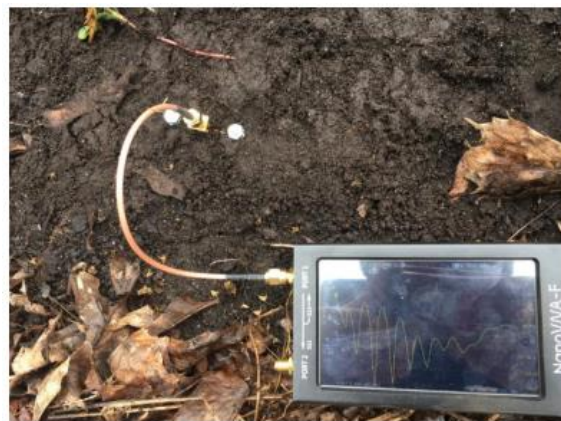


Fig. 2.17. Medición de la Antena en suelo con NanoVNA. Fuente: [12]

Los pasos para medir las propiedades del suelo y probar la repetibilidad en un lugar determinado fueron:

- Introducir las varillas roscadas con cuidado, sin conexión con el VNA, como se muestra en la figura número 2.16.
- Conectar las varillas al VNA.
- Registro de la medición, representado en la figura 2.17.
- Desconexión del cable SMA y de las varillas.
- Retirada de las varillas roscadas del suelo.

Al obtener los datos de la medición realizada en terreno, se analizó y también se simuló en el software FEKO, obteniendo los siguientes resultados:

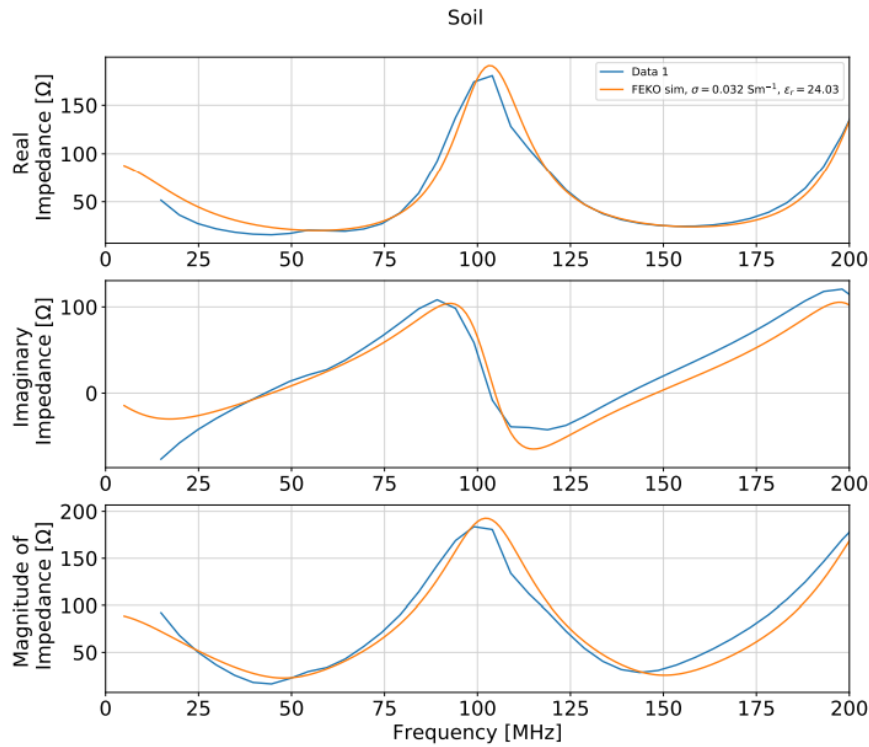


Fig. 2.18. Resultados obtenidos en mediciones realizadas en terreno con antena Dipolo. Fuente: [12]

Como se puede observar en la figura 2.18, se realizó la gráfica comparativa de las simulaciones obtenidas a través del software FEKO y las mediciones tomadas en terreno en un rango de frecuencia entre los 0 y 200 MHz. Debido a la similitud del comportamiento de las curvas en frecuencias, se pudo llegar a obtener que los valores del suelo estudiados en este caso fueron de aproximadamente 0.032 S/m de conductividad y 24.03 de permitividad relativa [12].

Capítulo 3. Simulación y construcción de medidor de permitividad y conductividad eléctrica en software FEKO

3.1. Introducción

En este capítulo se mostrará la modelación y simulación en el software FEKO y de la construcción física de una antena monopolo, con la finalidad de realizar mediciones parámetros S_{11} en frecuencia de distintos suelos o superficies de interés. Así, en conjunto con las simulaciones y mediciones reales de S_{11} se determinarán los valores de ϵ_r y σ del suelo o superficie en estudio.

3.2. Modelación de la antena monopolo

Como se mencionó en capítulos anteriores, una antena monopolo es una antena de un solo elemento conductor que se extiende verticalmente desde una superficie conductora, a menudo esta superficie se denomina como plano de tierra. A continuación, se mostrarán los materiales y la forma de construir esta antena.

3.2.1 Diseño y dimensiones generales de la antena monopolo

En la construcción de la antena monopolo se utilizará un tubo de cobre de 12 mm de diámetro, cortado a una longitud de 25,5 cm. También se necesita un plano de tierra para la antena monopolo, el cual será una plancha de aluminio de 1mm de espesor con dimensiones de 15 por 14 cm, que cuenta con una perforación de 21 mm de diámetro en el centro de la plancha. Para la conexión del SMA hembra, se utilizarán cables de cobre 1mm de diámetro. También se utilizarán otros tipos de materiales en la construcción física de la antena, pero estos son despreciables a la hora de simular ya que no poseen conductividad eléctrica, es decir son aislantes (Plásticos o nylon).

3.2.2 Modelación de antena monopolo en software FEKO

Considerando los materiales y dimensionamientos mencionados, se construyó y modeló la antena en el software FEKO como se muestra en la figura 3.1.

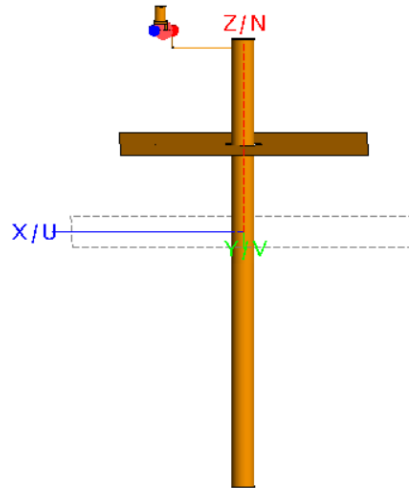


Fig. 3.1. Antena Monopolo construida en software FEKO.

3.3. Construcción física de la antena monopolo

Como se mencionó anteriormente, los materiales a utilizar serán principalmente una plancha de aluminio y un tubo de cobre. A continuación, se mostrará en más detalles las partes y materiales. Al final de este apartado, se ilustrará como queda construido la antena Monopolo para poder realizar mediciones del S_{11} .

3.3.1 Materiales utilizados para la construcción de la antena monopolo

Tubo de cobre (elemento vertical)

Para el conductor vertical se utilizó un tubo de cobre que se cortó, llegando a tener una longitud de 25.5 cm y un diámetro de 12 mm. El conductor vertical tiene una perforación en un extremo de 4 mm de diámetro para poder conectar los cables que transmiten y emiten informacion del analizador de redes vectoriales.



Fig. 3.2. Elemento conductor vertical antena monopolo (tubo de cobre)

Plancha de aluminio

Para el plano de tierra de la antena Monopolo se utilizó una plancha de aluminio 14 cm de largo y 15 cm de ancho con una perforación en el centro de 21 mm de diámetro para así poder tener la facilidad de poder colocar el conductor vertical de la antena y sin tener contacto eléctrico entre el plano de tierra y el elemento conductor. También tiene una perforación de 4 mm de diámetro en una de las esquinas de la plancha que se utiliza para conectar el cable negativo del conector SMA.



Fig. 3.3. Plano de tierra de antena Monopolo (plancha de aluminio)

Prensa de cables

La prensa de cables se utilizará para poder fijar y separar el conductor vertical del plano de tierra, ya que este está hecho de plástico no generaría conductividad entre el plano de tierra y el conductor vertical (no genera contacto eléctrico entre el plano de tierra y el conductor vertical), por estas razones no se modeló en la simulación en FEKO.



Fig. 3.4. Prensa de cables

Cables de transmisión

Se utilizaron cables de 1 mm de diámetro en el conductor vivo para poder realizar la conexión de la antena hacia el conector SMA hembra. Los extremos del cable cuentan con terminales de ojos que son de gran ayuda para poder conectar el SMA en el elemento vertical y el plano de tierra.



Fig. 3.5. Cable de transmisión utilizado entre la antena monopolo y el conector SMA

Conector SMA Hembra

El SMA Hembra es el conector que nos sirve para poder transmitir la información desde la antena hacia el analizador de redes vectoriales.



Fig. 3.6. Conector SMA hembra

NanoVNA

El analizador de redes vectoriales que se utiliza es un NanoVNA, el cual nos entrega el comportamiento del parámetro S_{11} en frecuencia del medio en que está en contacto con la antena

Monopolo. Es importante mencionar que este dispositivo cuenta con más funciones de mediciones de parámetros S, pero para el análisis de este proyecto sólo se usará el S_{11} .



Fig. 3.7. NanoVNA

Dimensiones de posición de los elementos principales de la antena monopolo

En el diseño se decidió colocar el plano a tierra 6 cm de un extremo del elemento conductor vertical de la antena, los cuales tienen diferentes dimensiones. Es importante destacar que cada modificación que se realice en el diseño físico de la antena se tiene que considerar en el momento de realizar la simulación en FEKO. En la siguiente ilustración se muestran las medidas de la posición de los elementos principales de la antena monopolo con un tubo de cobre. Es importante aclarar que entre el plano de tierra y elemento vertical de la antena existe contacto físico, pero no eléctrico, ya que estos están unidos por la prensa de cable que es un elemento aislante.

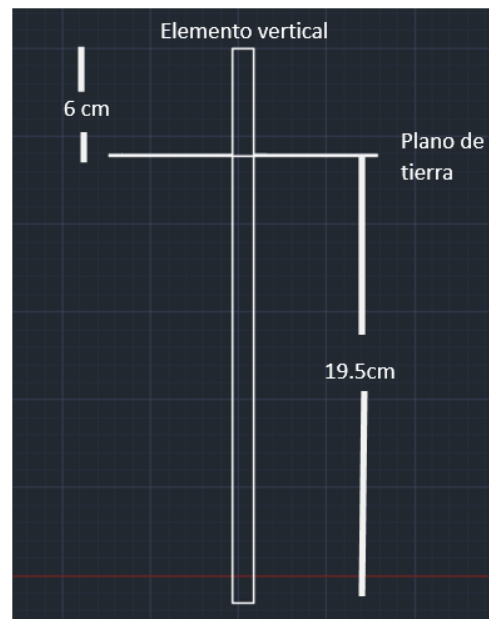


Fig. 3.8. Bosquejo antena monopolo

Medidor de permitividad relativa y conductividad eléctrica con antena Monopolo

Finalmente, construyendo y conectando todos los elementos que se mencionaron anteriormente, el medidor de permitividad relativa y conductividad eléctrica en base a una antena monopolo queda como se observa en la siguiente figura, en donde se puede ver de forma transversal y vertical del medidor.

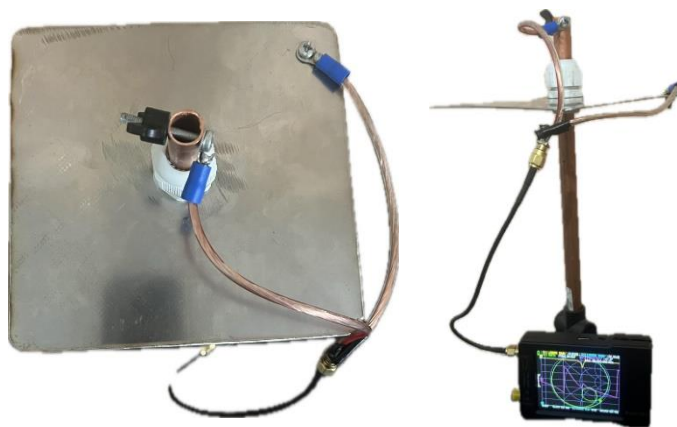


Fig. 3.9. Medidor de permitividad y conductividad eléctrica en base a una antena monopolo

Capítulo 4. Mediciones del medidor de permitividad y conductividad eléctrica en medios con ϵ_r y σ conocidas.

4.1. Introducción

En el presente capítulo, se mostrarán las mediciones del parámetro S_{11} realizadas con la antena Monopolo en medios con valores de permitividad relativa y conductividad eléctrica conocidas. Posteriormente se simulará en FEKO para corroborar el correcto funcionamiento del medidor de permitividad y conductividad eléctrica. Además, se realizará un análisis estadístico calculando el error cuadrático medio (ECM) que existe entre las simulaciones obtenidas en FEKO y las mediciones realizadas con la antena monopolo por el NanoVNA. El ECM permite cuantificar de manera sistemática el grado de error que puede llegar a existir entre las mediciones y las simulaciones. Debido que el parámetro S_{11} contiene parte real e imaginaria, se considerarán ambas partes para el análisis, para esto se realizará la suma de ECM de la parte real e imaginaria, lo que se definirá como ECM equivalente. El ECM se define como:

$$ECM = \sum_{i=1}^n \frac{(\hat{x}_i - x_i)^2}{n} \quad (5.1)$$

Donde $\hat{x}_i$: Vector a estudiar

x_i : Vector base a comparar

n : Tamaño de los vectores a comparar

4.2. Mediciones tomadas en aire (Espacio libre)

Considerando que en espacio libre no existe conductividad eléctrica ($\sigma = 0$ S/m) y con una permitividad relativa unitaria ($\epsilon_r = 1$), se puede simular el comportamiento del parámetro S_{11} de la antena monopolo en el software FEKO, exportando los datos a Matlab. En cuanto a las mediciones realizadas con la antena monopolo por el NanoVNA, se realizó conectándolo con la antena a través de un cable coaxial de 10 metros para reducir la influencia de la persona que manipula el NanoVNA. Además, en este caso en particular, se realiza una elevación de la antena monopolo para reducir los posibles efectos del suelo al momento de tomar la medición del parámetro S_{11} . Es importante tratar de aislar lo más posible de cualquier elemento conductor que pueda llegar a encontrarse en el momento de tomar la medición en aire. Hay que considerar que para el uso del NanoVNA, se necesita realizar la calibración del instrumento para cada medición que se realice. Para ello se utilizan tres elementos que están incluidos en la caja del equipo, los cuales son: un

circuito abierto, cerrado y una carga de 50 Ohm. En el capítulo de anexos, se detallan como realizar la calibración del equipo para poder efectuar mediciones de coeficiente de reflexión (el proceso de calibración es el mismo para cualquier medida de S_{11} , es importante calibrar cada vez que se realiza una nueva medición).

4.2.1 Simulación de medición S_{11} en aire en FEKO

Utilizando la antena y modelada en FEKO, se analiza en espacio libre como se muestra en la figura 4.1. Se obtuvieron como resultado los parámetros S_{11} en parte real e imaginaria que se ilustran en la figura 4.2, junto a la magnitud y fase. Es importante considerar que la simulación se realiza en espacio libre pero la medición se realizará en aire, ya que no es posible posicionar la antena monopolo en un espacio totalmente libre, teniendo así una leve diferencia en el valor de permitividad relativa y conductividad eléctrica de estos medios.

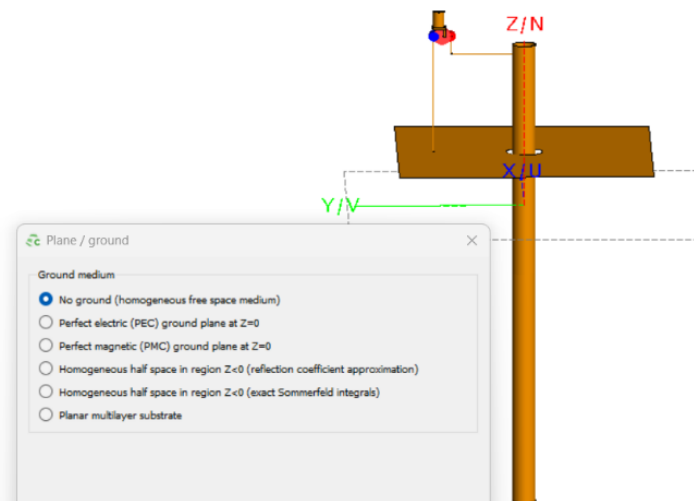


Fig. 4.1. Antena Monopolo simulada en espacio libre

Resultados Obtenidos en FEKO de Antena Monopolo en Aire

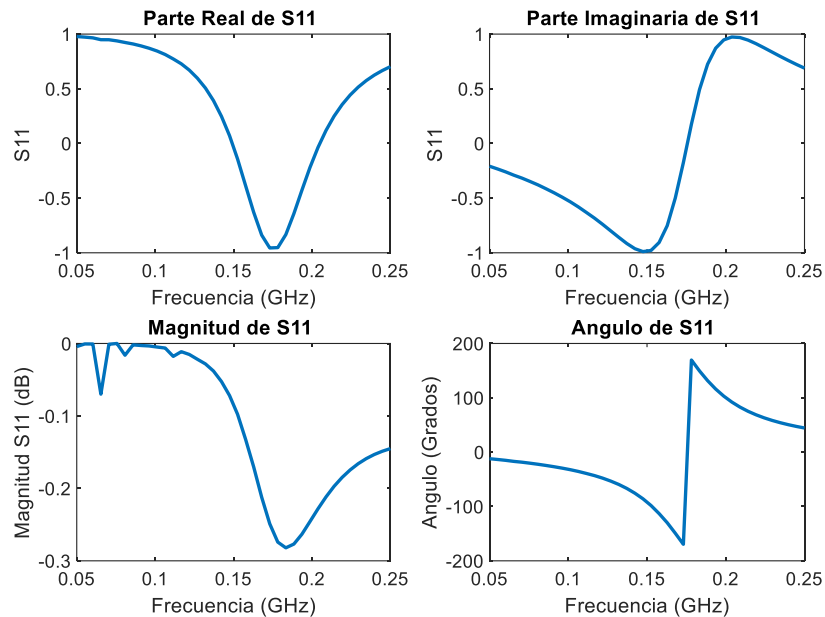


Fig. 4.2. Resultados de simulación FEKO antena Monopolo en espacio libre

Al analizar los resultados de la simulación de la antena monopolo en espacio libre, se observa que las componentes real e imaginaria del comportamiento del S_{11} de la antena son aparentemente estables y sin perturbaciones a simple vista. Sin embargo, al examinar la parte real de la curva a frecuencias inferiores a 150 MHz, se detectan leves alteraciones en la señal. Esto explica la presencia de ruido en la magnitud de la respuesta a frecuencias por debajo de 150 MHz. En este caso, el ruido es más pronunciado que en la parte real debido a que la magnitud está expresada en dB.

4.2.2 Medición de S_{11} en aire a través de antena monopolo

Una vez ya obtenidos los resultados de la simulación de la medición de S_{11} en espacio libre, se realizaron las mediciones con la antena monopolo y el NanoVNA en aire, obteniendo los siguientes resultados de comportamiento de parámetro S_{11} en frecuencia. Estos resultados se graficaron a través de Matlab al igual que en el caso anterior. Realizando la exportación de datos a Matlab del comportamiento de la parte real, imaginaria, magnitud y fase del parámetro S_{11} en frecuencia, se obtuvo la figura 4.3.

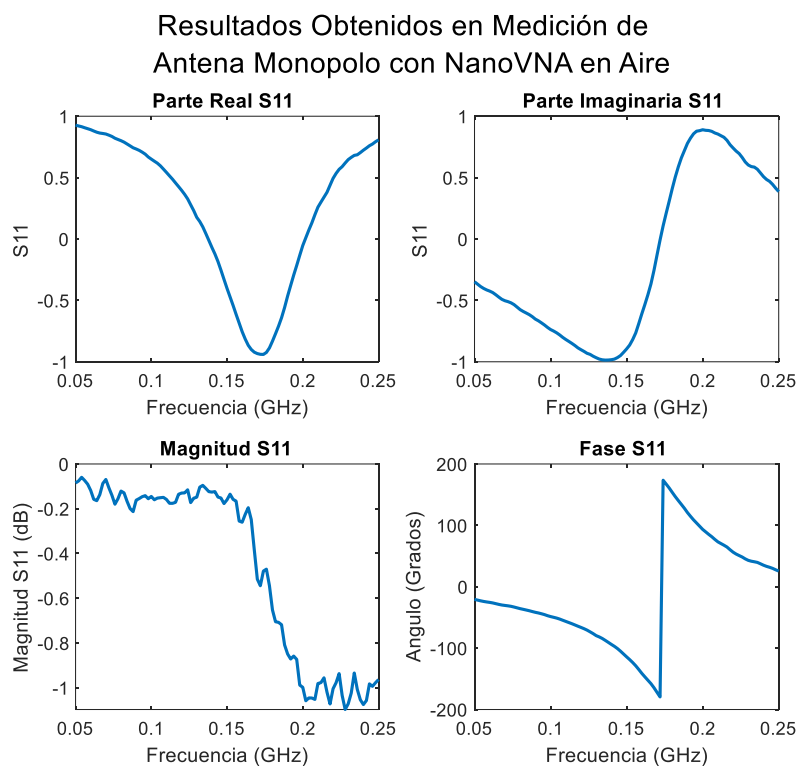


Fig. 4.3. Resultados de medición S11 en Aire

Es importante destacar que la medición se realizó elevando la antena a una altura de 1.75 metros con unos tubos de PVC (elementos no conductores), para así reducir lo más posible el efecto del suelo en la medición de S_{11} en aire, como se mencionó anteriormente. En la figura 4.4 se ilustra como se realizaron estas mediciones. Es importante mencionar que estas mediciones se realizaron en el parque Notuco de la ciudad de Chonchi, Provincia de Chiloé.



Fig. 4.4. Fotografías medición de S11 en Aire

4.2.3 Análisis de resultados obtenidos

Realizando un análisis más detallado de los resultados obtenidos en la medición del parámetro S_{11} , se realizaron gráficas comparativas entre las mediciones y las simulaciones obtenidas. Estos resultados se pueden observar en las figuras 4.5 y 4.6.

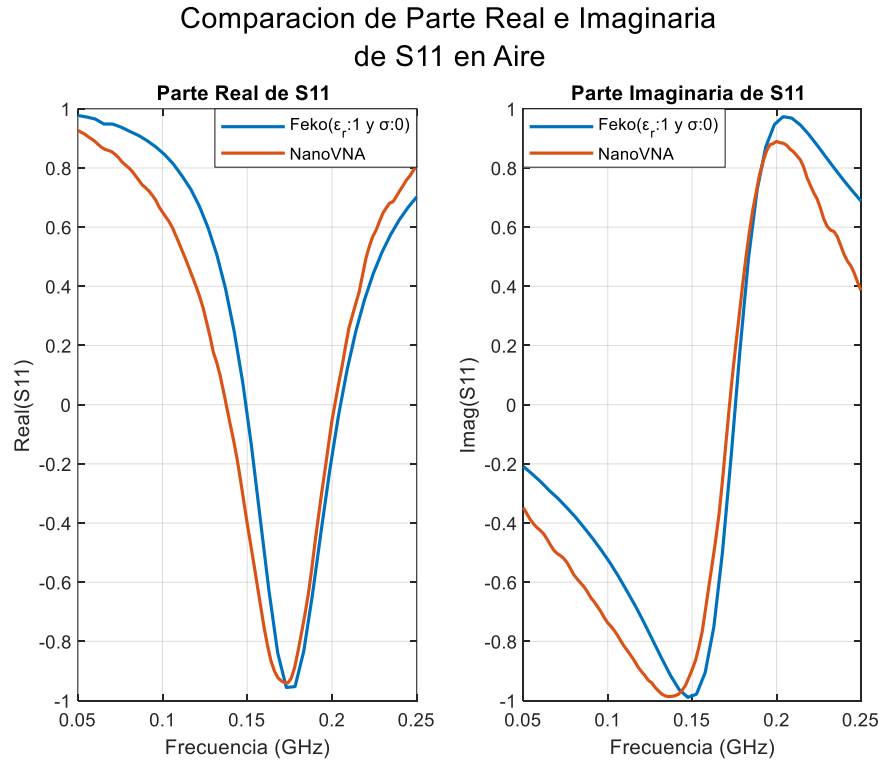


Fig. 4.5. Parte real e imaginaria de la simulación y medición de S_{11} en Aire

En la figura 4.5, se observa los comportamientos de la parte real e imaginaria del S_{11} , en donde se tiene el comportamiento en frecuencia de estos parámetros. En color azul la simulación en el software FEKO y en color naranja lo obtenido a través de mediciones. Un análisis visual revela que el comportamiento de las variables anteriormente mencionadas en frecuencia es muy similar, pero no idénticos. Esta diferencia en los resultados se debe a que la simulación se realiza en un entorno de espacio libre, donde no se considera la presencia de un suelo con propiedades de permitividad relativa o conductividad eléctrica. En la simulación, no hay ningún otro elemento conductor presente, exceptuando la propia antena monopolo, que sí se incluye en la simulación. Esto significa que el comportamiento simulado, describe las características de la antena en un ambiente ideal, sin interferencias externas.

Comparacion de Magnitud y Fase de S11 en Aire

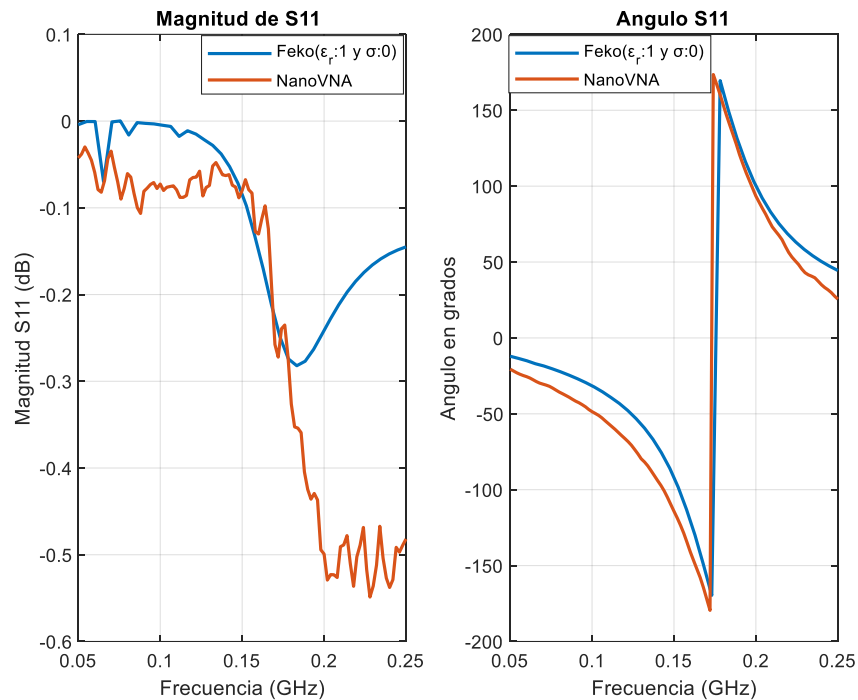


Fig. 4.6. Magnitud y fase de la medición y simulación del S11 en Aire

En la figura 4.6 se observa el comportamiento de la magnitud y fase del parámetro S_{11} en donde al igual que en el caso de real e imaginario se tiene en color azul la simulación en FEKO y en color naranja lo proporcionado por las mediciones.

Analizando de forma más detallada, se puede observar que, a frecuencias menores de los 180 MHz, el comportamiento de la magnitud del S_{11} en dB tiende a ser muy parecido pero la señal contiene mucho ruido. Sin embargo, esto se puede ver en todo el espectro en frecuencia en el que se analiza la magnitud. Esto puede explicarse debido a la influencia de la forma en que se realizó esta medición, ya que la simulación se realiza en base a un espacio totalmente libre, sin interferencia del suelo.

En cuanto, al comportamiento de la magnitud para frecuencias mayores a 180 MHz, se observa que la diferencia entre las curvas de la simulación y la medición es mayor. Esto se puede deber a lo mencionado anteriormente (influencia del suelo u objeto conductor en la medición). En cuanto a las fases se puede decir que tienden a ser iguales o tiene comportamientos muy similares en frecuencia.

Ante la necesidad de una evaluación más rigurosa y precisa, se reconoce la limitación del análisis visual y se opta por llevar a cabo un análisis estadístico más preciso. En este sentido, se ha

decidido realizar el cálculo ECM de la parte real e imaginaria como medida de discrepancia entre los parámetros en estudio. Se realiza el cálculo del ECM equivalente realizando la suma de ECM de la parte real con la parte imaginaria, ya que, al sumar ambas partes, se obtiene un único valor que facilita el análisis.

Tabla 4.1. Error Cuadrático Medio de Medición en Aire

Permitividad Relativa (ϵ_r)	Conductividad Eléctrica (σ)	ECM Parte Real	ECM Parte Imaginaria	ECM Equivalente
1	0	0,0396	0,0307	0,0703

En la tabla número 4.1, se puede observar el ECM que existe entre la medición y simulación del parámetro S_{11} de la parte real e imaginaria. Es importante mencionar que este índice solo nos sirve de referencia para poder cuantificar la diferencia que existe entre la medición y simulación del parámetro S_{11} con la Antena Monopolo.

4.3. Mediciones tomadas en agua

El procedimiento de llevar a cabo esta medición, en comparación con la medición en aire, se vuelve algo más complejo, debido a que en este caso el agua no tiene sus valores de permitividad relativa y conductividad eléctrica bien definidas. Se sabe que la permitividad relativa del agua toma un valor cercano a 80 y la conductividad eléctrica depende de su pureza. Por lo general, la conductividad eléctrica del agua de la llave está en un rango entre los 0.0002 y 0.001 S/m.

4.3.1 Mediciones de S_{11} a través de antena monopolo

Para realizar esta medición, se utilizó un bidón de material no conductor (plástico) de 200 litros que fue cortado, en donde finalmente el bidón quedo definido como un cilindro con un diámetro de 0.60 metros y una altura de 0.61 metros. Esta información se utilizó para realizar la simulación en FEKO.

Al igual que en el caso de la medición en aire, la antena monopolo se conecta con el NanoVNA a través de un cable coaxial de 10 metros para reducir la influencia de la persona que está realizando la medición. En cuanto a la posición de la antena monopolo, se decidió realizar dos tipos de pruebas. La primera prueba consistía en obtener los parámetros S_{11} con la antena a 5 cm de distancia a la

superficie de agua, con respecto al plano de tierra de la antena monopolo. La segunda prueba consistió en realizar la misma medición, pero sumergiendo la antena hasta que el plano de tierra tenga contacto con la superficie de agua. Esto permite determinar el método o forma a seguir para realizar futuras mediciones en suelos o superficies de interés.

En la figura 4.7 se muestra algunas fotografías de cómo se realizó la primera medición de prueba.



Fig. 4.7. Fotografías de primera medición de S_{11} en Agua.

Los resultados de la primera medición en donde la antena monopolo se sumerge a 14.5 centímetros del elemento conductor (obteniendo así 5 cm de separación entre la superficie del agua y el plano de tierra de la antena) se observa en la figura 4.8.

Resultados Obtenidos en Medicion de Antena Monopolo
Sin Contacto del Plano de Tierra con la Superficie
(Agua)

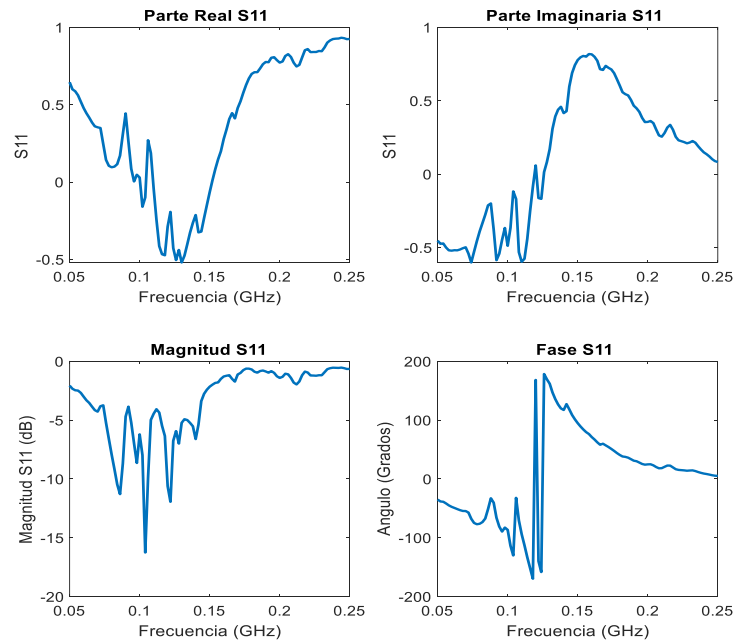


Fig. 4.8. Resultados obtenidos en mediciones sin contacto del plano de tierra con la superficie de Agua

En la figura 4.9 se puede observar una fotografía del estado de la antena en el momento de realizar la segunda medición del parámetro S_{11} del agua. Los resultados de esta medición se observan en la figura 4.10.



Fig. 4.9. Fotografía de segunda medición de S_{11} en Agua.

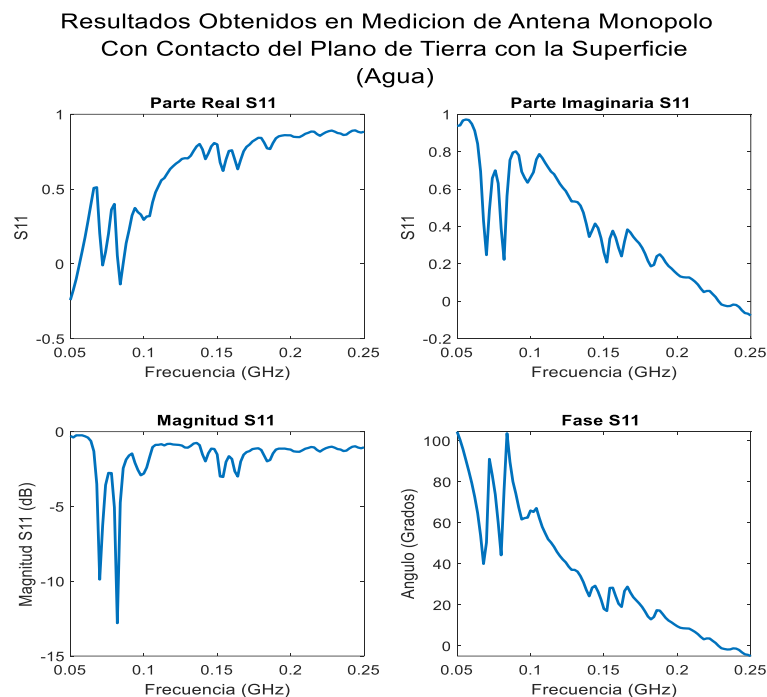


Fig. 4.10. Resultados obtenidos en la medición con contacto del plano de tierra en la superficie de agua.

Realizando un “hold on” entre los resultados obtenidos de las mediciones de la antena monopolo con contacto y sin contacto del plano a tierra de la antena en la superficie de agua, se obtuvo la figura número 4.11.

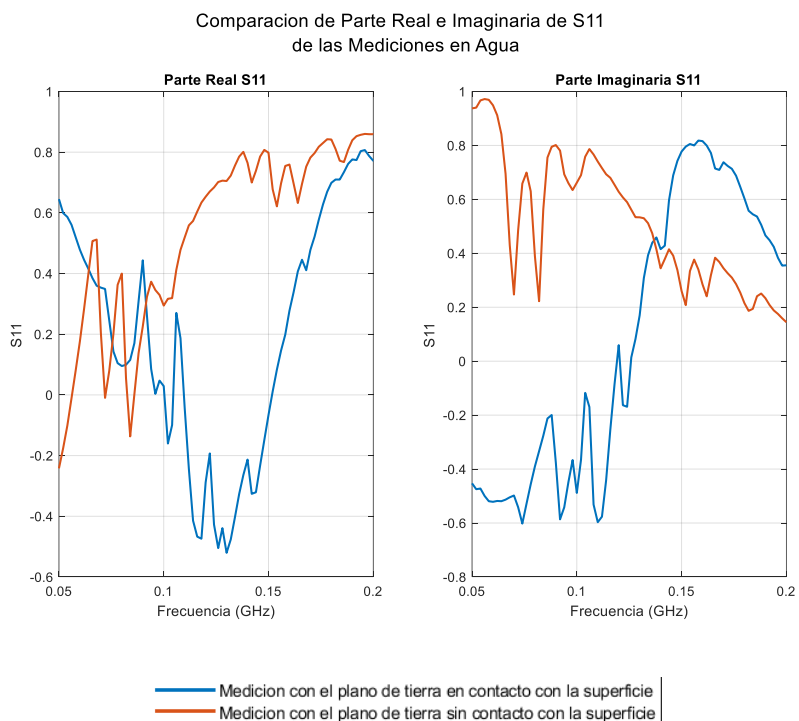


Fig. 4.11. Comparación de parte real e imaginaria de S_{11} de las mediciones en agua.

A simple vista, con la figura 4.11, se puede concluir que es importante tener en cuenta la forma en que la antena tiene contacto con la superficie a estudiar. Al comparar las mediciones de la antena monopolo teniendo diferentes niveles de profundidad de inmersión del elemento conductor en este líquido, se obtuvieron discrepancia entre el comportamiento del parámetro S_{11} en frecuencia entre las dos pruebas realizadas. Es decir, los resultados de las curvas no son iguales, a pesar de que las mediciones se realizan en el mismo medio. Por lo tanto, se concluye que es muy importante considerar los detalles de la forma y condiciones en que se efectúa la medición para realizar la simulación en el software FEKO.

4.3.2 Simulación de medición en FEKO

Para llevar a cabo la simulación de la medición de la antena monopolo en agua, como se mencionó anteriormente, se utilizó un bidón de 0.60 metros de diámetro y 0.61 metros de alto. Cabe destacar que, para la modelación de esta prueba se construyó un cilindro dieléctrico con las propiedades del agua, como se observa en la figura 4.12. Esto se hizo por dos razones: la primera es la dificultad de encontrar y tener a disposición un contenedor de mayor tamaño; la segunda razón es que en el software FEKO, al momento de construir una superficie o suelo, no se puede limitar el tamaño en las coordenadas de plano X e Y, solo se puede determinar la profundidad en el eje Z. Es decir, al no implantar este cilindro, la simulación se realizará en un espacio infinito de agua, lo cual no es lo adecuado debido a que las condiciones de nuestra medición no se realizaron en un plano infinito. Esta medición se realizó entre los 50 a 200 MHz para así ahorrar tiempo en el proceso de carga de la simulación, ya que debido a la presencia de este cilindro dieléctrico la simulación se vuelve algo lenta. Otro punto por considerar es, en la medición con el nanoVNA se extrajo la información con 101 puntos de muestro, pero la simulación se realizó con 40 puntos con la finalidad de poder reducir el tiempo de simulación. Debido a esta diferencia, surgen dificultades al estudiar los vectores extraídos de la medición y simulación, ya que para el análisis del ECM se necesita analizar punto a punto el coeficiente de reflexión en la misma frecuencia. Para solucionar esta problemática, se decidió hacer una interpolación en el vector de la simulación, obteniendo los 101 puntos necesarios para poder comparar y tener resultados del ECM entre la medición y la simulación.

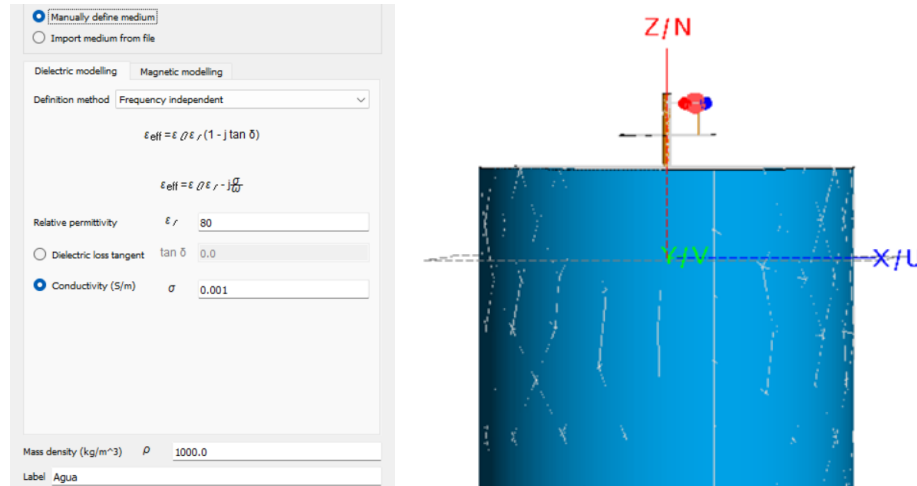


Fig. 4.12. Simulación de primera medición de S_{11} en Agua

Los resultados obtenidos en esta simulación fueron los ilustrados en la figura 4.13. Se optó que el valor de la conductividad eléctrica, en este caso será de 0.001 S/m.

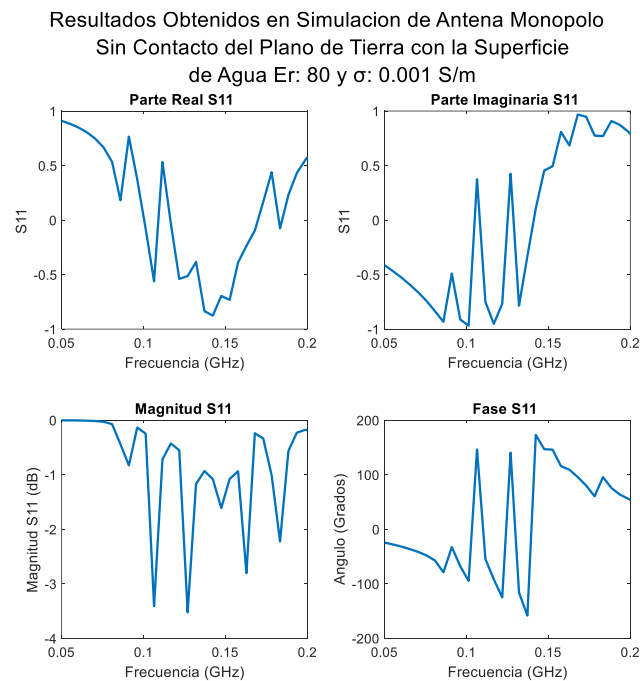


Fig. 4.13. Resultados obtenidos en simulación de antena monopolo sin contacto del plano de tierra con la superficie de Agua.

Ahora se realiza la simulación de la medición en la superficie del agua con contacto del plano de tierra de la antena a la superficie. La simulación de este método se desarrolló como se ilustra en la figura 4.14.

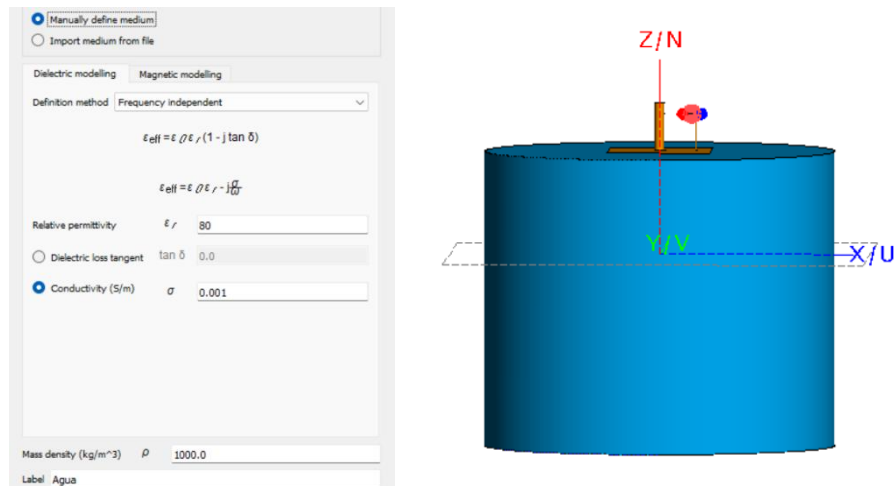


Fig. 4.14. Simulación de segunda medición de S_{11} en Agua.

Resultados Obtenidos en Simulación de Antena Monopolo
Con Contacto del Plano de Tierra con la Superficie
de Agua ϵ_r : 80 y σ : 0.001 S/m

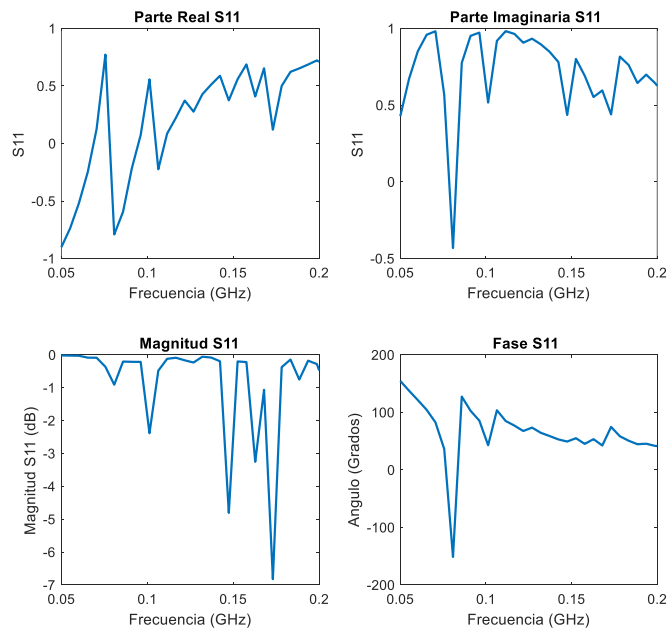


Fig. 4.15. Resultados obtenidos en simulación de antena monopolo con contacto del plano de tierra con la superficie de Agua.

4.3.3 Análisis de resultados obtenidos

Para el análisis de estas dos mediciones, se superpusieron los resultados obtenidos de la simulación en FEKO con las mediciones, facilitando así el análisis visual.

Comparación de resultados obtenidos con Antena Monopolo sin contacto del plano de tierra

En las 4.16 y 4.17, se muestra el comportamiento de las curvas de S_{11} de la medición obtenida a través de la Antena monopolo y a través del software FEKO, en donde con color azul se encuentra los resultados de la medición y de color naranja lo obtenido en la simulación con una permitividad relativa de 80 y una conductividad eléctrica de 0.001 S/m.

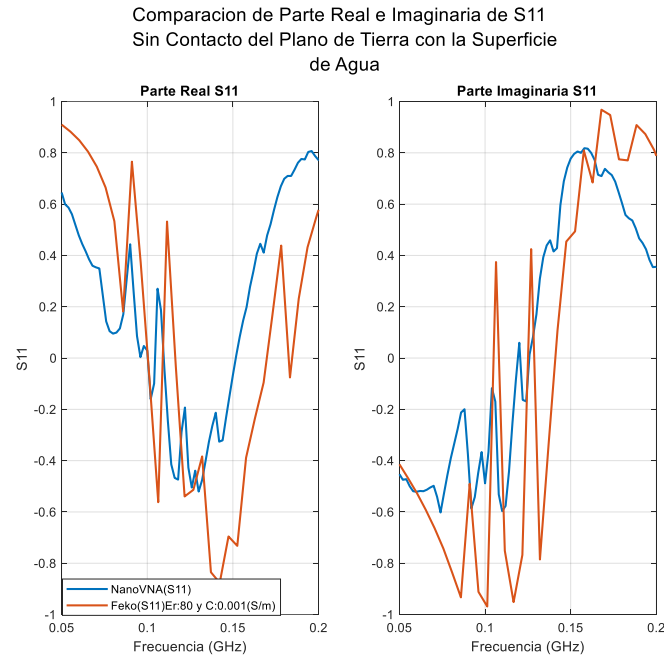


Fig. 4.16. Comparación de parte real e imaginaria de S_{11} sin contacto del plano de tierra con la superficie de agua.

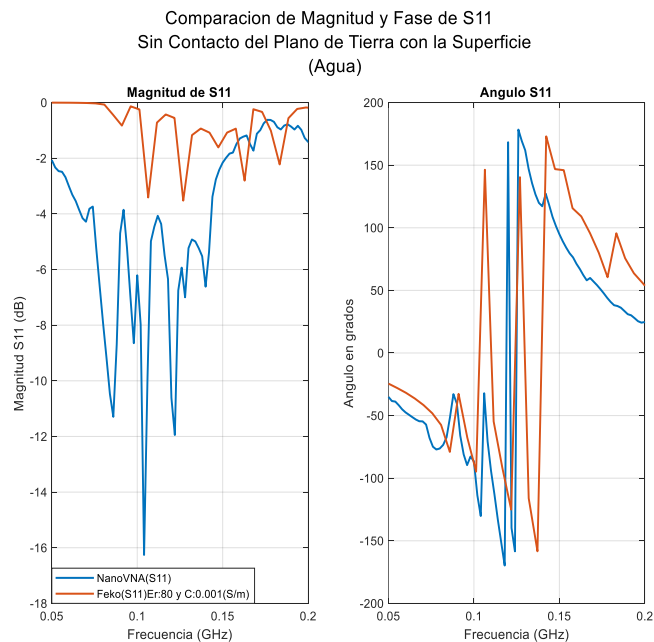


Fig. 4.17. Comparación de magnitud y fase de S_{11} sin contacto del plano de tierra con la superficie de agua.

En cuanto a su comportamiento en frecuencia, tanto la parte real e imaginaria como la magnitud y fase obtenidas en la simulación, se observa que tienden a ser similares. Ambas presentan similares peak de alteración de la señal en las mismas frecuencias, pero con diferentes amplitudes. En términos generales se puede concluir que esta medición cumple con lo esperado. Es importante considerar que, en este caso particular, la forma de realizar esta prueba fue bastante precaria. Lo ideal para realizar esta medición, es realizarla en un depósito o bidón más amplio de agua (con mayor radio), como una piscina. Además, es necesario mejorar y tratar de igualar el tamaño del vector de la simulación con la medición. La diferencia de amplitudes en los peak que existe entre las señales es información perdida, debido al menor número de muestras en frecuencia generados en la simulación con respecto a la medición.

Tabla 4.2. Error Cuadrático Medio S_{11} en Agua sin contacto del Plano de Tierra

Permitividad	Conductividad	ECM	ECM Parte	ECM
Relativa (ϵ_r)	Eléctrica (σ)	Parte Real	Imaginaria	Equivalente
80	0,001	0,13949	0,16561	0,3051

Comparación de resultados obtenidos con Antena Monopolo con contacto del plano de tierra

Al igual que en el caso anterior, en las figuras 4.18 y 4.19 se muestra el comportamiento de las curvas de S_{11} de la medición obtenida a través de la Antena monopolo y a través del software FEKO. En color azul se encuentra la medición de S_{11} del agua con contacto del plano de tierra y de color naranja la simulación con una permitividad relativa de 80 y una conductividad eléctrica de 0.001 S/m.

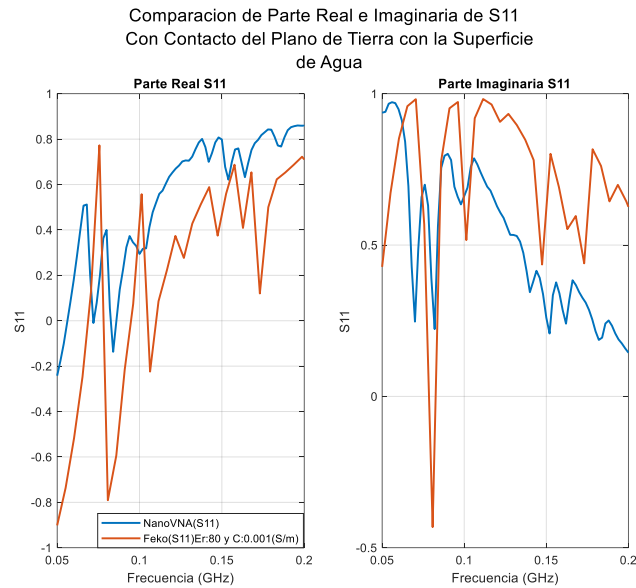


Fig. 4.18. Comparación de parte real e imaginaria de S11 con contacto del plano de tierra con la superficie de agua.

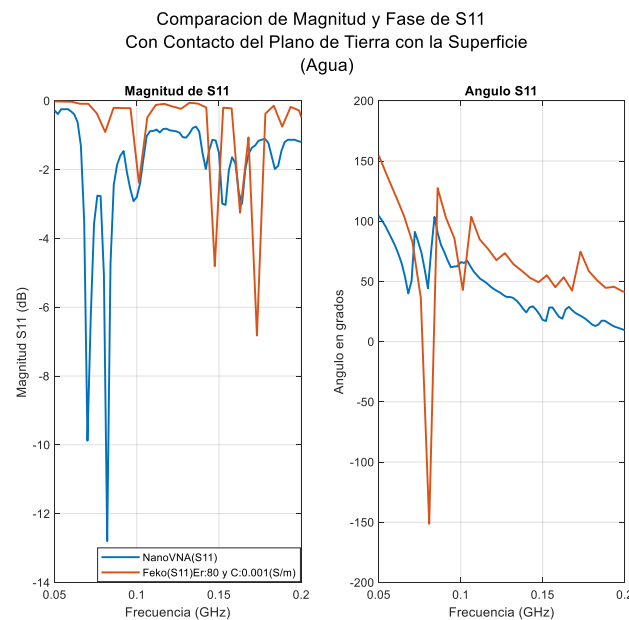


Fig. 4.19. Comparación de magnitud y fase de S11 sin contacto del plano de tierra con la superficie de agua.

Debido a que en esta prueba se encuentran similares discrepancias que en el caso anterior, se llega a la conclusión que la forma de hacer la medición se debe considerar al momento de realizar la simulación en FEKO. Al comparar estas dos pruebas en agua, se tienen que el valor determinado de permitividad relativa y conductividad eléctrica es el mismo para los dos casos, pero con diferentes comportamientos del parámetro S_{11} en frecuencia. Es decir, se están obteniendo los mismos resultados

de permitividad y conductividad eléctrica, pero con diferentes curvas del coeficiente de reflexión. Realizando el cálculo del ECM para esta prueba se obtuvo la tabla 4.3.

Tabla 4.3. Error Cuadrático Medio de Medición S_{11} en Agua Con Contacto de Plano de Tierra.

Permitividad Relativa (ϵ_r)	Conductividad Eléctrica (σ)	ECM Parte Real	ECM Parte Imaginaria	ECM Equivalente
80	0,01	0,17197	0,16214	0,33411

Con estas pruebas, se determina que el método para poder realizar las mediciones de superficie será enterrar el elemento conductor hasta llegar a los 5 cm de distancia, sin contacto, entre la superficie a estudiar y el plano de tierra de la antena monopolo, debido a que la medición sin contacto del plano de tierra nos entrega un menor ECM. Además, esto facilitará el proceso de medición en superficies duras o compactas, como lo puede ser un suelo de tierra.

Capítulo 5. Mediciones del medidor de permitividad y conductividad eléctrica en suelo

5.1. Introducción

En este capítulo, se presentan mediciones de suelos en los cuales no se tiene conocimiento de los valores de permitividad relativa y conductividad eléctrica. Debido a esto, la forma de trabajar y analizar las mediciones con respecto a la simulación cambia. En el capítulo anterior, se realizó un análisis comparando la curva del parámetro S_{11} en frecuencia de la medición con la de la simulación en FEKO. En ese caso, se consideraba, tanto para el análisis visual o estadístico que la curva proporcionada por el software FEKO era la curva que determinaba si la medición era correcta. Para este capítulo, consideraremos que la curva que determina si la medición es correcta, será la proporcionada por el NanoVNA. Es por esta razón que, para determinar un valor de permitividad relativa y conductividad eléctrica, es necesario crear una biblioteca de curvas que será proporcionada por el software FEKO, donde cada curva representará una simulación de suelo con diferentes valores de permitividad relativa y conductividad eléctrica. La comparación se realizará entre la simulación y cada curva proveniente de la biblioteca.

Una vez obtenida la biblioteca de curvas, se realiza el cálculo del ECM entre la curva proporcionada por la medición del parámetro S_{11} del NanoVNA y cada curva que integra la biblioteca de curvas obtenidas a través de una serie de simulaciones en FEKO. Será seleccionada la curva con menor ECM como la curva más representativa de la medición realizada, estimado así los valores de permitividad relativa y conductividad eléctrica del suelo.

También es importante aclarar que, por simplicidad y rapidez de las simulaciones, se decidió analizar el suelo como si fuera de un solo estrato o capa (suelo homogéneo sin cambios de propiedades a lo largo del eje Z).

5.2. Medición de S_{11} a través de antena monopolo

Para llevar a cabo esta medición, se decidió buscar un lugar con una topografía lo más plana posible y con la menor cantidad de elementos que pudieran alterar la medición de S_{11} que no están considerados en las simulaciones (ya sean elementos conductores, árboles, tendidos de la red eléctrica, entre otros). Por esta razón se decidió realizar esta medición en el parque municipal de Chonchi, ubicado en la provincia de Chiloé, ya que este lugar cumplía en gran parte con la condición

mencionada. Es importante destacar que, la condición del suelo es de tipo vegetal. Las mediciones se realizaron en un día soleado con temperatura de 9°C.



Fig. 5.1. Localización de lugar donde se realizó la medición de S11 en Suelo

El desarrollo de esta medición se realizó respetando los mismos procedimientos que se ejecutaron para el caso de la medición en aire y agua, es decir, se utilizó un cable de 10 metros. El elemento conductor de la antena monopolo se enterró a la superficie (en este caso es el suelo vegetal), llegando a tener una distancia de 5 cm entre el suelo y el plano de tierra. En las figuras 5.2 y 5.3 se muestran algunos pasos que se realizaron previamente a la medición realizada.



Fig. 5.2. Fotografías de mediciones de nivel y de distancia entre el suelo y el plano de tierra.



Fig. 5.3. Vista aérea de la antena monopolo.

Los resultados obtenidos de los parámetros S_{11} en frecuencia de esta medición son los ilustrados en la figura 5.4, donde se puede observar los comportamientos de la parte real e imaginaria, así como de la magnitud y fase del parámetro S_{11} en frecuencia.

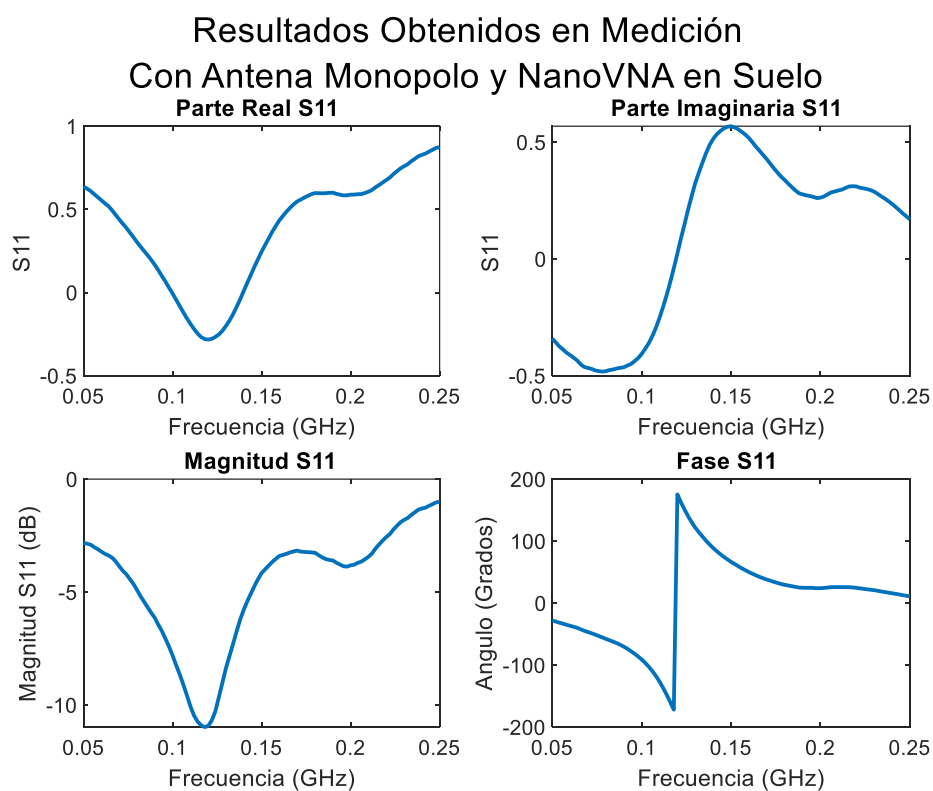


Fig. 5.4. Resultados obtenidos en medición con antena monopolo y NanoVNA en suelo.

5.3. Simulación de medición de suelo en FEKO

Al igual que en los casos anteriores, la modelación de la simulación debe ser lo más similar posible a la forma en que se realizó la medición. Por lo tanto, en la modelación de esta simulación se posicionó a la antena monopolo sumergiendo el elemento conductor a unos 14 cm del suelo para así obtener los 5 cm de distancia entre la superficie del suelo y el plano de tierra de la antena, tal como se muestra en la figura 5.5.

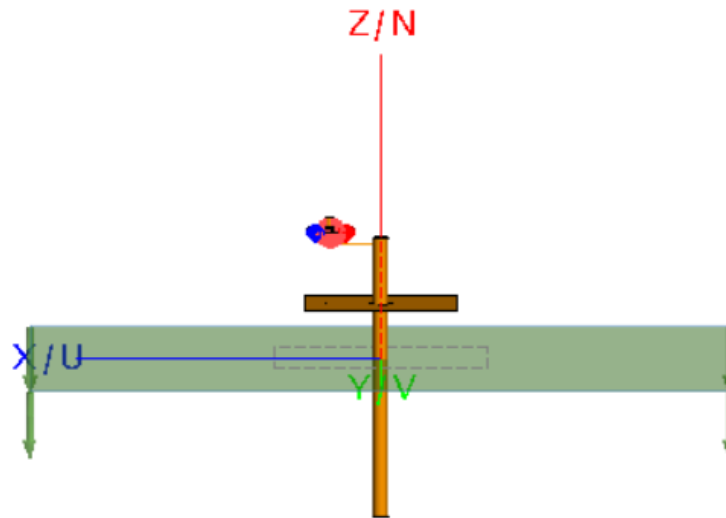


Fig. 5.5. Antena Monopolo simulada en suelo

En esta etapa se consideraron 16 simulaciones con diversos valores de permitividad relativa y conductividad eléctrica. Es importante aclarar que el desarrollo de esta etapa implica trabajos a futuros, donde es importante seguir complementando la biblioteca de curvas con más simulaciones con distintas propiedades del suelo, agregando simulaciones más complejas que consideren suelos con distintos estratos.

Para poder exponer de mejor forma los resultados de las simulaciones, se decidió dividir los resultados en 8 figuras, cada una muestra 2 simulaciones y la medición del parámetro S_{11} superpuestas. En las leyendas de las simulaciones, se denominan “simulaciones” del número 1 hasta la 16. En la siguiente tabla se mostrarán los valores de permitividad relativa y conductividad eléctrica que corresponden a cada simulación. Los valores designados para la permitividad relativa y conductividad eléctrica fueron seleccionados a partir de información encontrada en [13], donde se obtuvieron valores de permitividad y conductividad eléctrica en terreno de similares características. Así, se realizan

variaciones de los valores de los parámetros mencionados, hasta obtener una simulación con un menor ECM.

Tabla 5.1. Designación de Nombres para las Leyendas de Cada Simulación Realizada.

Nombre	ϵ_r	σ
Simulación 1	21,088	0,08264 S/m
Simulación 2	30	0,06468 S/m
Simulación 3	42	0,04132 S/m
Simulación 4	21,088	0,04132 S/m
Simulación 5	20	0,04132 S/m
Simulación 6	21,088	0,02066 S/m
Simulación 7	21	0,021 S/m
Simulación 8	25	0,06 S/m
Simulación 9	10	0,1 S/m
Simulación 10	3	0,1 S/m
Simulación 11	3	0,04132 S/m
Simulación 12	1,75	0,0207 S/m
Simulación 13	3,5	0,0207 S/m
Simulación 14	3	0,05 S/m
Simulación 15	3	0,035 S/m
Simulación 16	21	0,005 S/m

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de las distintas simulaciones de medición de S_{11} en suelo. Como se mencionó anteriormente, los resultados se mostrarán en las siguientes 8 figuras (5.6-5.13).

Resultados de Simulación 1 y 2
de Medición de Suelo Con Antena Monopolo

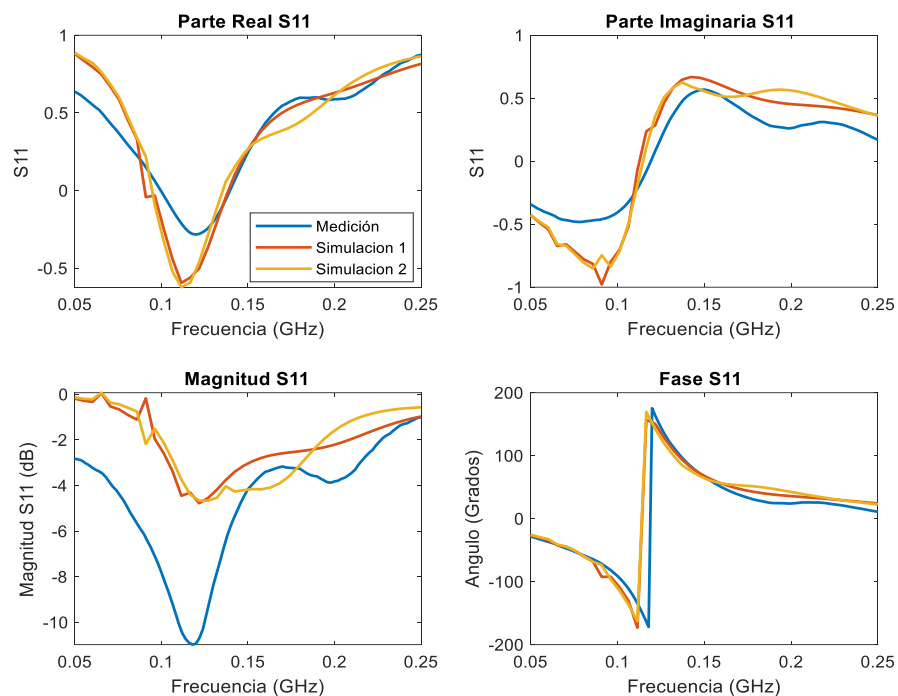


Fig. 5.6. Resultados de Simulación 1 y 2 de medición de suelo con antena monopolo.

Resultados de Simulación 3 y 4
de Medición de Suelo Con Antena Monopolo

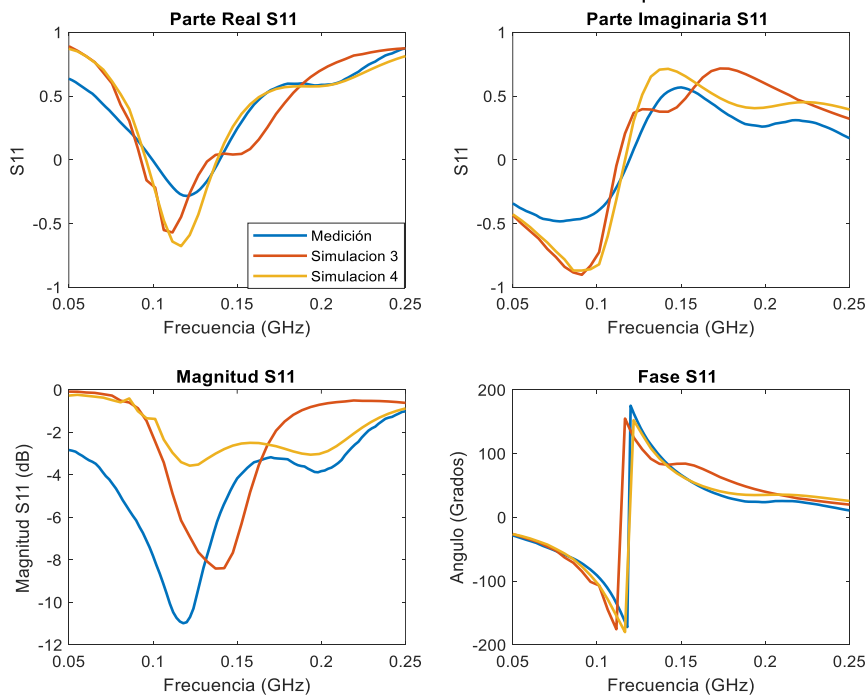


Fig. 5.7. Resultados de Simulación 3 y 4 de medición de suelo con antena monopolo.

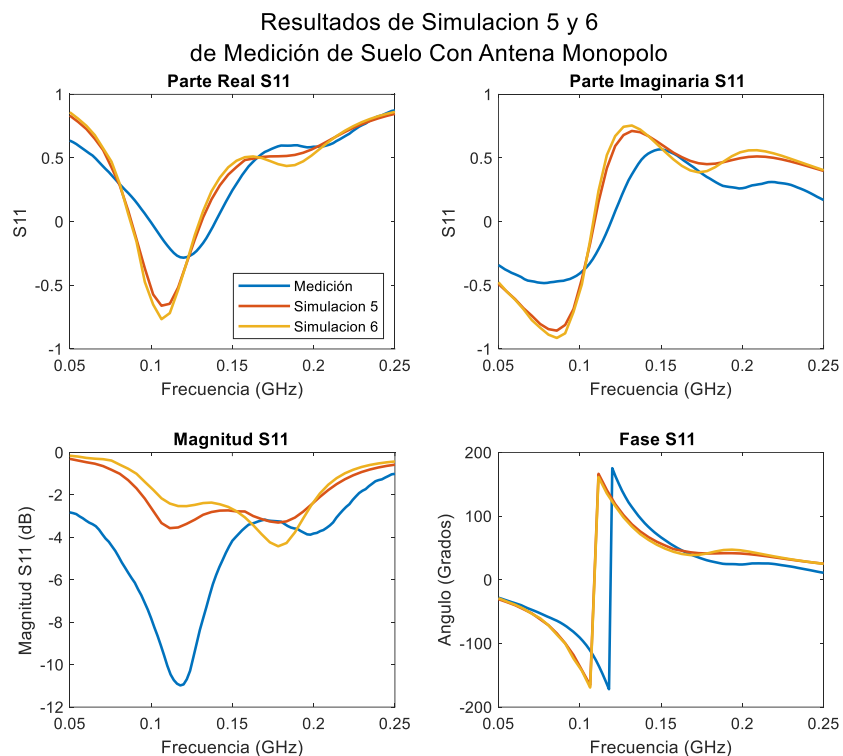


Fig. 5.8. Resultados de Simulación 5 y 6 de medición de suelo con antena monopolo.

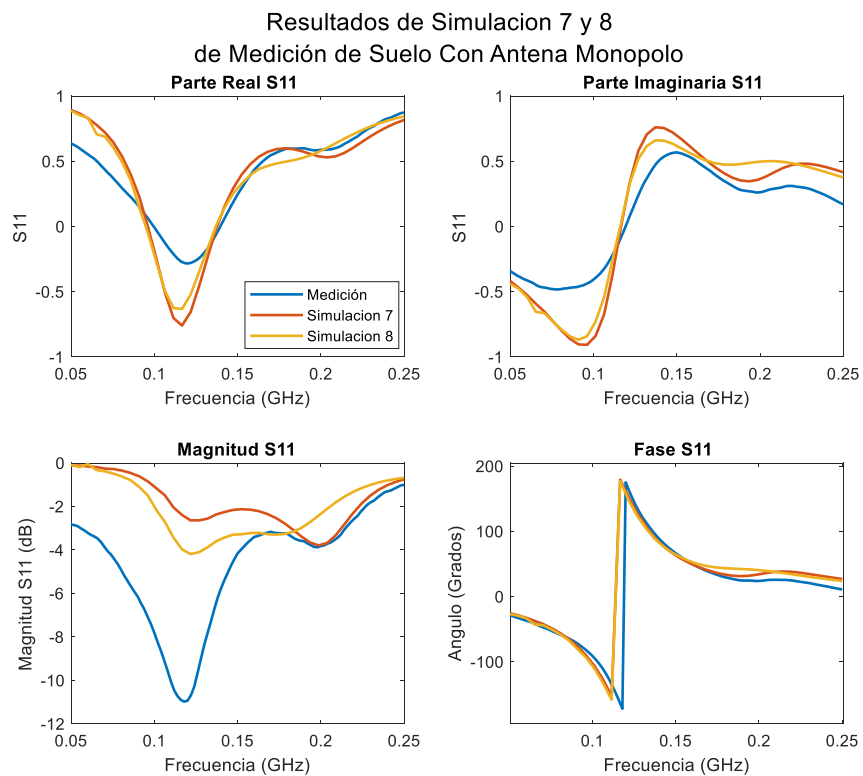


Fig. 5.9. Resultados de Simulación 7 y 8 de medición de suelo con antena monopolo.

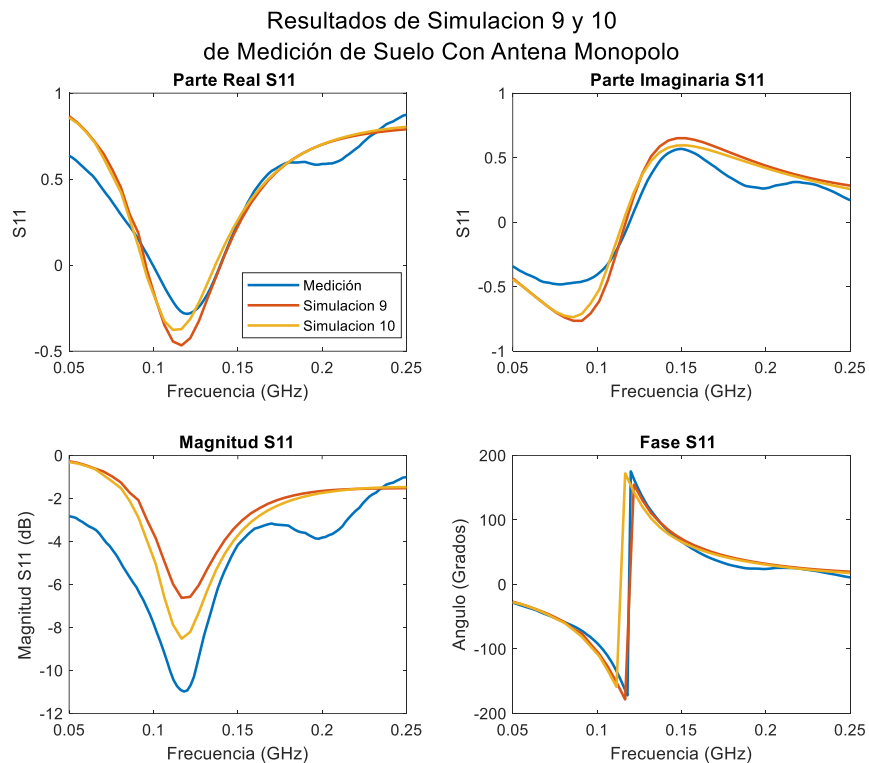


Fig. 5.10. Resultados de Simulación 9 y 10 de medición de suelo con antena monopolo.

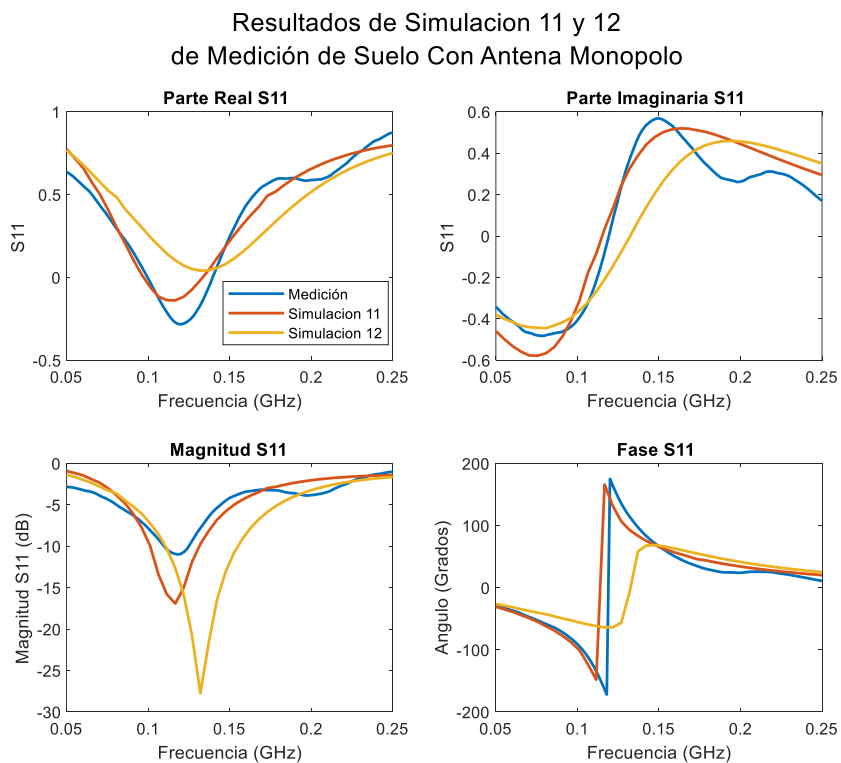


Fig. 5.11. Resultados de Simulación 11 y 12 de medición de suelo con antena monopolo.

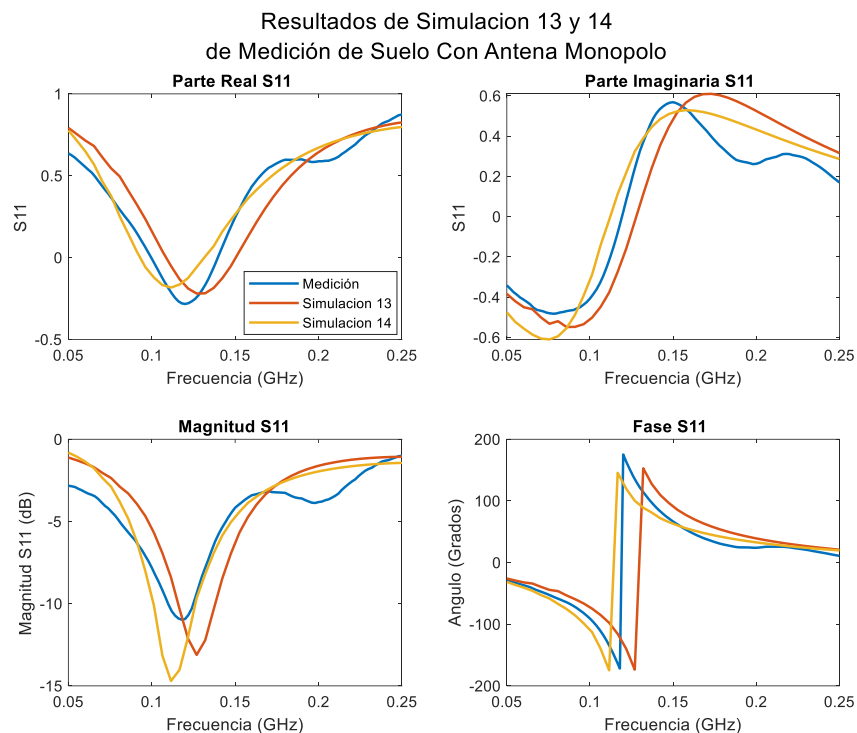


Fig. 5.12. Resultados de Simulación 13 y 14 de medición de suelo con antena monopolo.

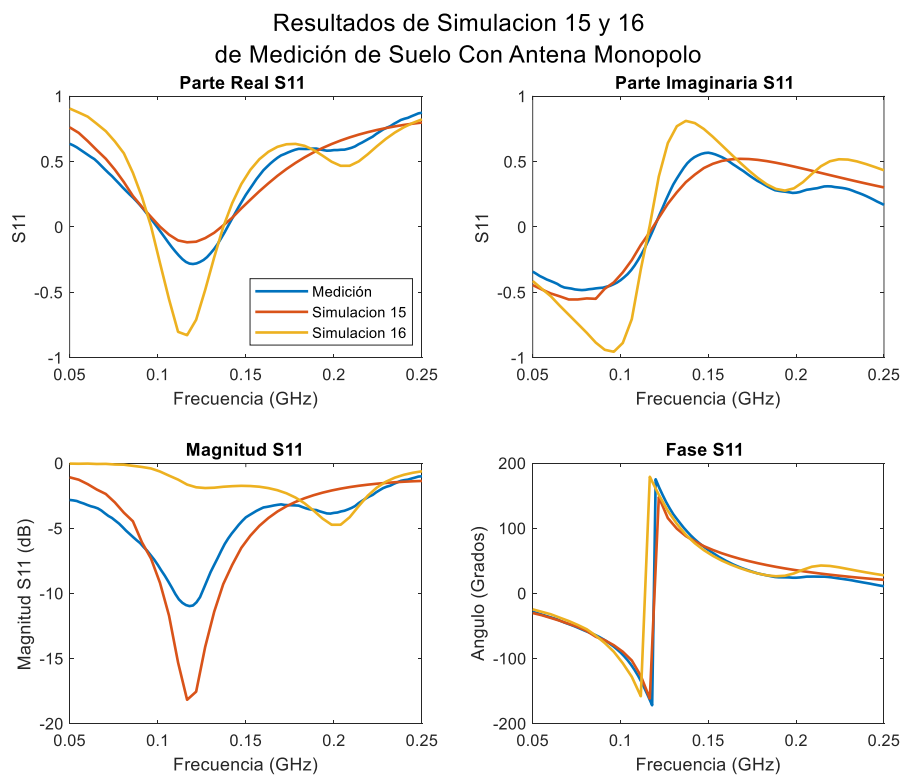


Fig. 5.13. Resultados de Simulación 15 y 16 de medición de suelo con antena monopolo.

5.4. Análisis de resultados obtenidos

Una vez ya realizada las simulaciones para crear la biblioteca de curvas de comportamiento de S_{11} en frecuencia, se obtuvieron las figuras 5.14 y 5.15 que ilustra el comportamiento de la parte real e imaginaria, además de la magnitud y fase del S_{11} en frecuencia, respectivamente. Adicionalmente la figura 5. 16 es la leyenda de las gráficas de las figuras 5.14 y 5.15, que nos indica que valores de ϵ_r y σ representa cada curva.

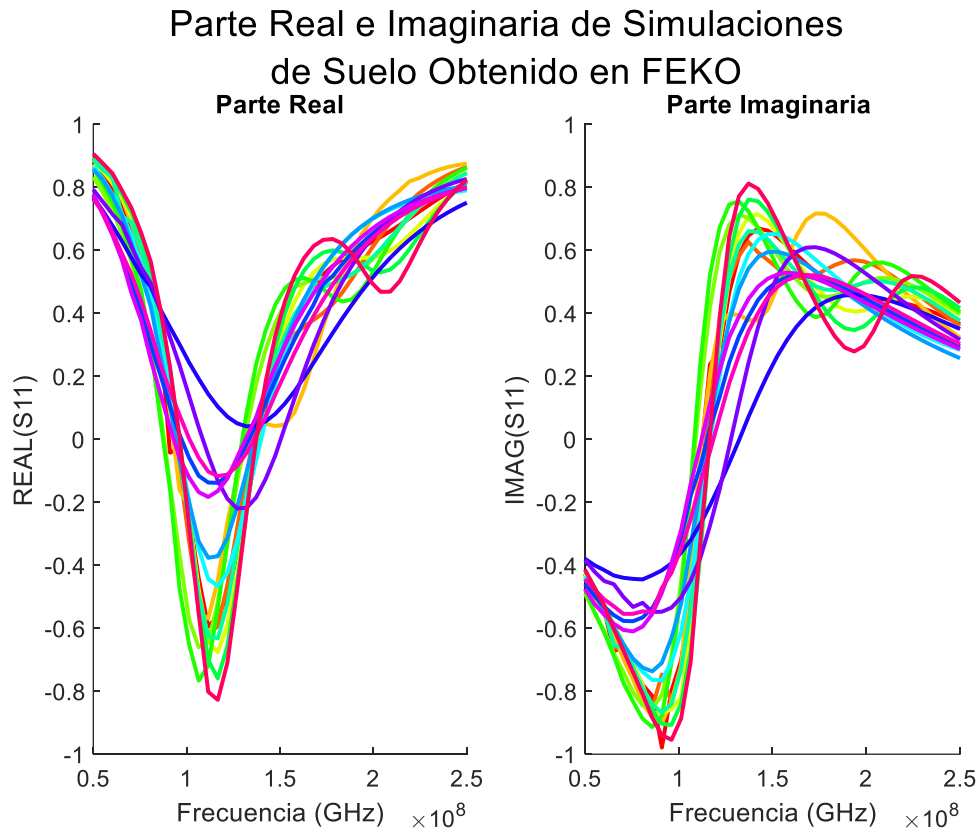


Fig. 5.14. Parte real e imaginaria de simulaciones de suelo obtenidas en FEKO.

Magnitud y Fase de Simulaciones de Suelo Obtenido en FEKO

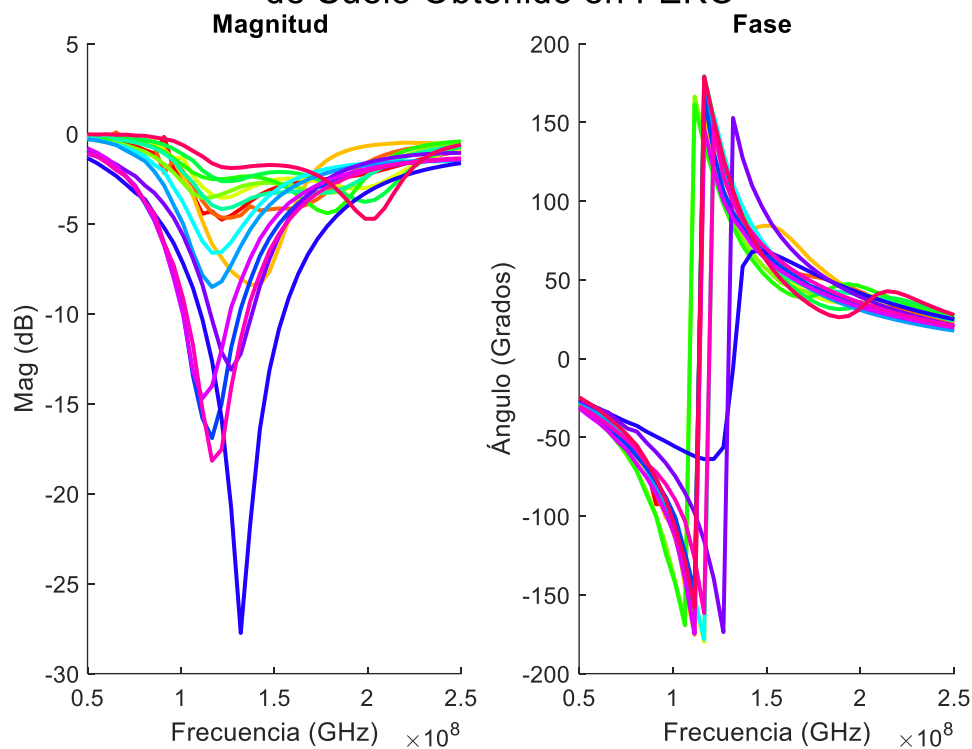


Fig. 5.15. Magnitud y fase de simulaciones de suelo obtenidos en FEKO.

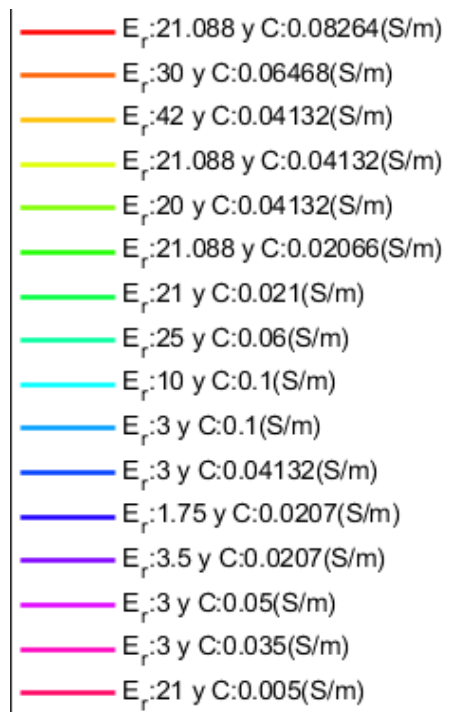


Fig. 5.16. leyendas de la biblioteca de curvas

Una vez teniendo la biblioteca se curvas de S_{11} , se decidió analizar la parte real e imaginaria de este parámetro, calculando el ECM de estas curvas en comparación al obtenida en la medición de S_{11} por el NanoVNA. Así se obtuvo la tabla número 5.2 que se presenta a continuación.

Es importante destacar que, debido a que el error cuadrático medio se analiza en parte real e imaginaria, se decidió realizar el criterio de la suma de cada ECM. Esto se debe a que, al analizar la parte real y la imaginaria de manera conjunta, se evalúa el desempeño de la simulación de forma más completa. Dado que los números complejos tienen ambos componentes, solo considerar una parte (real o imaginaria) podría llevar a conclusiones incompletas. La suma de los ECM proporciona una medida global del error en el dominio complejo. Otro motivo por el cual se realiza este ECM equivalente, es debido a que la suma de ambas partes, se obtiene un único valor que facilita la comparación entre diferentes simulaciones y así evitar la complicación de tener que comparar y ponderar dos métricas separadas.

Tabla 5.2. Cálculo del Error Cuadrático Medio de la Biblioteca de Curvas.

Nombre	ϵ_r	σ	ECM Parte	ECM Parte	ECM
			Real	Imaginaria	Equivalente
Simulación 1	21,088	0,08264 S/m	0,021961	0,042439	0,0644
Simulación 2	30	0,06468 S/m	0,02954	0,046227	0,075767
Simulación 3	42	0,04132 S/m	0,0361	0,062346	0,098446
Simulación 4	21,088	0,04132 S/m	0,029101	0,042967	0,072068
Simulación 5	20	0,04132 S/m	0,037845	0,06162	0,099465
Simulación 6	21,088	0,02066 S/m	0,054985	0,079921	0,134906
Simulación 7	21	0,021 S/m	0,037545	0,050759	0,088304
Simulación 8	25	0,06 S/m	0,026399	0,043453	0,069852
Simulación 9	10	0,1 S/m	0,01503	0,024449	0,039479
Simulación 10	3	0,1 S/m	0,012237	0,017836	0,030073
Simulación 11	3	0,04132 S/m	0,006422	0,01161	0,018032
Simulación 12	1,75	0,0207 S/m	0,039034	0,031841	0,070875
Simulación 13	3,5	0,0207 S/m	0,022495	0,02778	0,050275
Simulación 14	3	0,05 S/m	0,0071673	0,013561	0,0207283
Simulación 15	3	0,035 S/m	0,007666	0,012043	0,019703
Simulación 16	21	0,005 S/m	0,048656	0,061346	0,140002

El mejor resultado obtenido, en el análisis de la biblioteca de curvas con la medición en terreno fue la simulación 11. Esta simulación fue ejecutada con un suelo que tenía una propiedad de permitividad relativa de 3 y conductividad eléctrica de 0.04132 S/m. En la figura 5.17 se muestran el comportamiento de la medición comparada con el resultado de simulación 11. Considerando la ecuación número 2.3, en donde describe la relación entre el coeficiente de reflexión y la impedancia de entrada de la antena, se optó por ilustrar el comportamiento de la impedancia de entrada de la antena monopolo al tener contacto con el suelo en estudio, proporcionando así otra alternativa para poder realizar la comparación entre la medición y la simulación del sistema en general.

Resultado de Simulación en Suelo con Menor ECM

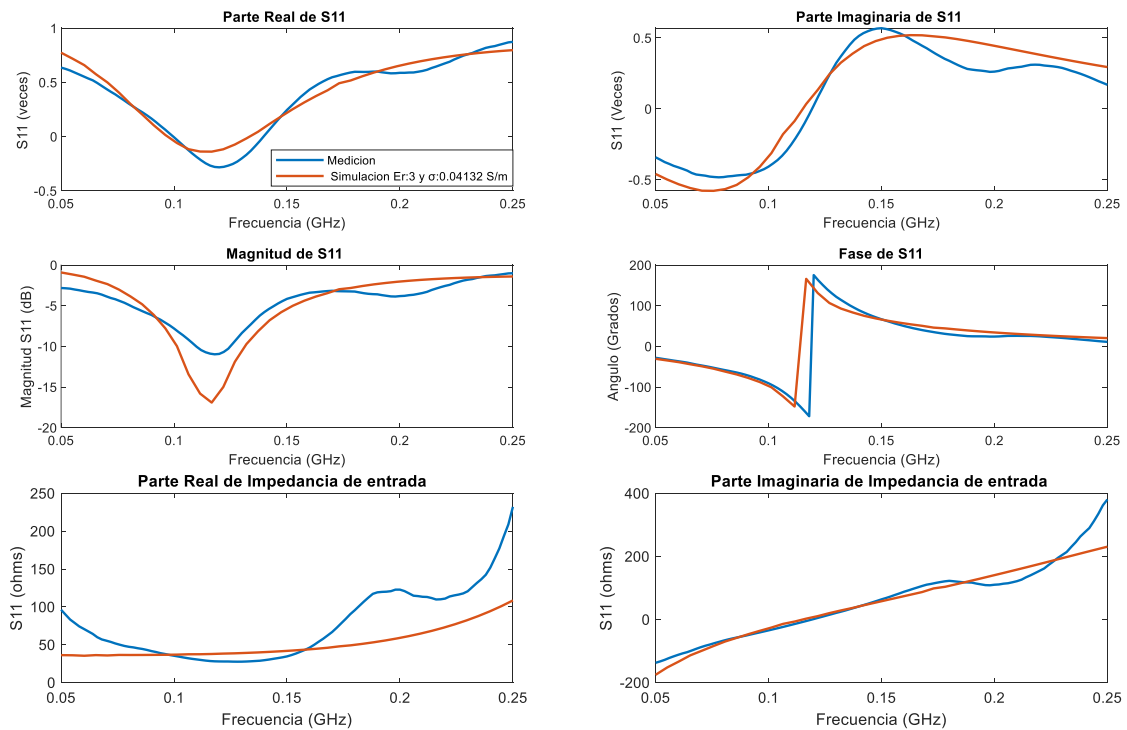


Fig. 5.17. Resultado de simulación en Suelo con menor ECM.

Como se mencionó en el inicio de este capítulo, para efectos de este proyecto se considera que el suelo a analizar es de 1 estrato. Sin embargo, al analizar visualmente la figura 5.17, se puede notar que el comportamiento, ya sea la parte real e imaginaria o bien la magnitud y fase no son exactamente iguales. Esto puede ser un efecto debido a la existencia de mayor cantidad de estratos en el terreno. Otras posibles influencias en esta medición pueden llegar a ser efectos de errores de medición, ya sean errores humano o bien influencia de la persona encargada de manipular el NanoVNA.

Capítulo 6. Conclusiones

6.1. Conclusiones

En cuanto al análisis del funcionamiento de la antena monopolo, se puede concluir que, la similitud del comportamiento del coeficiente de reflexión en frecuencia obtenido entre las mediciones y simulaciones del S_{11} en la prueba de Aire y en Agua, la antena monopolo puede servir como medidor de los parámetros eléctricos. El error existente se puede llegar a deber a la diferencia entre las simulación y mediciones de S_{11} . Por ejemplo, en el caso de la medición en aire, las simulaciones se realizaron en espacio libres sin interferencia de ningún elemento o medio que pudiera afectar los resultados de S_{11} . En cuanto al caso de la medición del agua, no era lo óptimo realizar esta medición en agua tan limitada como un bidón con diámetro de 60 cm.

En la medición del suelo, el mejor resultado entre todas las simulaciones de la biblioteca de curvas comparadas se obtuvo con una permitividad relativa de 3 y una conductividad eléctrica de 0.04132 S/m. Esta simulación presentó un ECM de 0.006422 para la parte real del S_{11} y un ECM de 0.01161 para la parte imaginaria, siendo ambos valores menores que los obtenidos en la medición en aire (0.0396 y 0.0307 para las partes reales e imaginarias, respectivamente). Esta diferencia se debe a que la medición en aire se realizó con una única simulación, usando valores de permitividad relativa de 1 y conductividad eléctrica de 0 S/m. Estas condiciones representan un escenario ideal que no considera posibles efectos de factores ambientales, como la temperatura y la humedad. Por otro lado, en la medición del suelo, se realizaron múltiples simulaciones, ajustando los valores de permitividad relativa y conductividad eléctrica para minimizar el error. Este proceso permitió obtener un resultado con un menor ECM. Es importante aclarar que, para el caso del agua, se obtienen las mismas conclusiones que las obtenidas en la comparación del resultado entre la medición en suelo con el aire. Debido que el ECM de la medición del agua es mayor a la del aire.

6.2. Trabajo Futuro

Considerando lo informado dentro del proyecto, los trabajos a futuros designados son los siguientes:

- Realizar medición S_{11} con antena monopolo en una superficie de agua más amplia.
- Complementar y seguir realizando simulaciones de suelos de la antena monopolo para poder obtener una biblioteca de curvas más completa.
- Realizar mediciones y simulaciones con antena Dipolo y compararlas con resultados obtenidos con antena Monopolo.
- Realizar estudios para poder determinar números de estratos en un suelo a estudiar, en conjunto con mediciones de S_{11} de antena Monopolo.

Bibliografía

- [1] C. A. Balanis, Antenna Theory. Analysis and Desing, Canada, 2005.
- [2] F. B. a. G. n. J. Amado, «característica de amplificadores de microondas de los Parametros-S a los parametros-X,» FCECyN Vol3, 2016.
- [3] S. Rojas, «Estudio y caracterización de la conductividad electrica del suelo para ser aplicado en radio telescopio MIST,» Concepcion , 2021.
- [4] Estándar IEEE Norma IEEE 81: Guía para medir la resistividad de la tierra, la impedancia de tierra y los potenciales de la superficie de la tierra de un sistema de puesta a tierra. Nueva York, Estados Unidos, 2012.
- [5] R. B. Mauricio Diaz, «MIST Memo 2. Soil Conductivity Site Testing 2020,» Universidad Catolica de la Santisima Concepcion, 2021.
- [6] M. A. S., «MIST Memo 8. Soil Resistivity,» McGill University, 2020.
- [7] E. Carreón, «Dispositivo para medir la permitividad relativa de 2.4GHz,» Mexico , 2018.
- [8] A. R. y. P. L. Walter Gustavo Fano, Electromagnetic Field Radiation in Matter, London: IntechOpen, 2020.
- [9] Measurement of Dielectric, 10 Changi Business Park Central 2: Rohde & Schwarz Regional Headquarters Singapore Pte. Ltd.
- [10] A. Technologies, «Measuring Dielectric,» [En línea]. Available: www.agilent.com. [Último acceso: 12 Marzo 2024].
- [11] C. A. V. B. R. B. e. a. R. A. Monsalve, «Mapper of the IGM spin temperature: instrument overview,,» 2024.
- [12] M. A. S. Pess^oa, «MIST Memo 55 VNA Measurements In Soil,» McGill University, 2021.
- [13] F. B. Roberta Porretta, «Profiles of relative permittivity and electrical conductivityfrom unsaturated soil water content models,» METER Group, Roma, Italia , 2016.
- [14] I. Pellejero, «Análisis de Monopolos de HF,» [En línea]. Available: <https://www.ipellejero.es/hf/antenas/monopolo/index.php#1>. [Último acceso: 20223].
- [15] nanovna, «ea5wa,» [En línea]. Available: <https://www.ea5wa.com/nanovna>. [Último acceso: 27 Agosto 2023].

Anexo A. Calibración NanoVNA para mediciones de S_{11}

Para medidas del S_{11} o medidas basadas en la reflexión se utiliza el conector CH0, donde se realiza la calibración con el kit de calibración que acompaña al NanoVNA que consiste en un conector ABIERTO (el conector dorado que no lleva pin central o activo), un conector en CORTO (el conector dorado que si lleva pin central) y la CARGA de 50 Ohmios (conector de color plateado) [10].

Es recomendable borrar la calibración que pueda existir en memoria, para ello se selecciona la opción RESET que veremos en el menú CALIBRATE.

A continuación, en las figuras se muestra a través de una serie de imágenes como realizar la calibración del equipo:

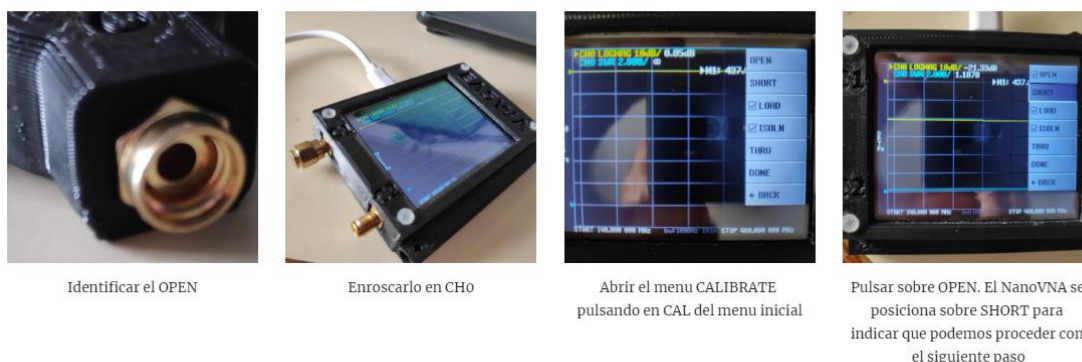


Fig A.1 Calibración del NanoVNA en circuito abierto. Fuente: [10]



Fig A.2. Calibración del NanoVNA en circuito Cerrado. Fuente: [10]

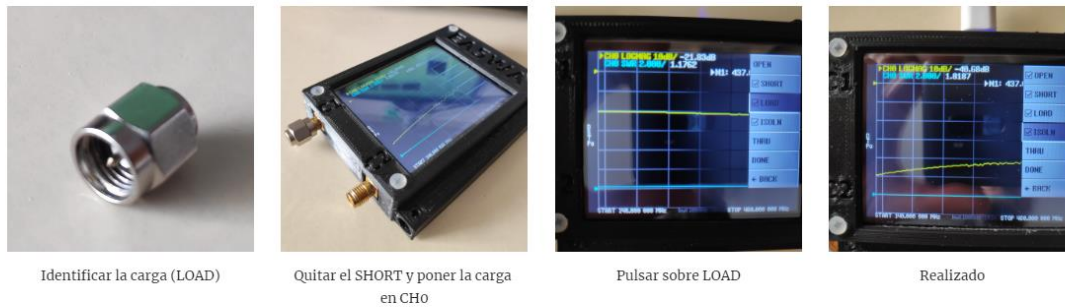


Fig A.2. Calibración del NanoVNA con carga de 50 Ohm. Fuente: [10]

Anexo B. Código utilizado en Matlab

```
% Datos de medicion suelo NanoVNA
Monopolo_Pica_aire_FEKOS = 'MedicionTierraAituyREV02.S1P';
SparamFEKOS = sparameters(Monopolo_Pica_aire_FEKOS);
F = SparamFEKOS.Frequencies;
SS = SparamFEKOS.Parameters(1, 1, :);

% Convierte el parámetro S11 en magnitud, parte real e
% imaginaria
mag_SS = abs(squeeze(SS));
real_SS = real(squeeze(SS));
imag_SS = imag(squeeze(SS));
angl_SS = angle(squeeze(SS));

%% Cargar simulacion Feko
Simulaciones = {'FekoTierraC0_08264Er21_088.S1P',
                'FekoTierraC0_06468Er30.S1P',
                'FekoTierraC0_04132Er42.S1P',
                'FekoTierraC0_04132Er21_088.S1P',
                'FekoTierraC0_04132Er20.S1P',
                'FekoTierraC0_02066Er21_088.S1P',
                'FekoTierraC0_021Er21.S1P',
                'FekoTierraC0_06Er25.S1P',
                'FekoTierraC0_1Er10.S1P',
                'FekoTierraC0_1Er3.S1P',
                'FekoTierraC0_04132Er3.S1P',
                'FekoTierraC0_0207Er1_75.S1P',
                'FekoTierraC0_0207Er3_5.S1P',
                'FekoTierraC0_05Er3.S1P',
                'FekoTierraC0_035Er3.S1P',
                'FekoTierraC0_005Er21.S1P'};
```

```

for i = 1:length(Simulaciones)
    Sparam = spparameters(Simulaciones{i});

    f = Sparam.Frecuencias; % Frecuencias
    S = Sparam.Parameters(1, 1, :); % Parámetro S11
    mag_S{i} = abs(squeeze(S));
    real_S{i} = real(squeeze(S));
    imag_S{i} = imag(squeeze(S));
    angl_S{i} = angle(squeeze(S));
end
info = [];
%% Cambiando el tipo de vector

for i = 1:length(Simulaciones)
    mag_S_temp = cell2mat(mag_S(:, i));
    real_S_temp = cell2mat(real_S(:, i));
    imag_S_temp = cell2mat(imag_S(:, i));
    angl_S_temp = cell2mat(angl_S(:, i));
    eval(['mag_S' num2str(i) ' = mag_S_temp;']);
    eval(['real_S' num2str(i) ' = real_S_temp;']);
    eval(['imag_S' num2str(i) ' = imag_S_temp;']);
    eval(['angl_S' num2str(i) ' = angl_S_temp;']);
end

%%
% Interpolan los vectores mag_s1 hasta mag_s11 para que tengan
101 puntos
for i = 1:length(Simulaciones)
    interp_mags(:, i) = interp1(f, mag_S{i}, F, 'spline');
end
for i = 1:length(Simulaciones)
    interp_real(:, i) = interp1(f, real_S{i}, F, 'spline');
end
for i = 1:length(Simulaciones)
    interp_imag(:, i) = interp1(f, imag_S{i}, F, 'spline');
end
%%
% Calcular el error cuadrático medio para cada vector
interpolado
ECM_Mag = zeros(1, length(Simulaciones));
for i = 1:length(Simulaciones)
    ECM_Mag(i) = sum((mag_SS - interp_mags(:, i)).^2) /
length(mag_SS);

```

```

end
ECM_Real = zeros(1, length(Simulaciones));
for i = 1:length(Simulaciones)
    ECM_Real(i) = sum((real_SS - interp_real(:, i)).^2) /
length(imag_SS);
end
ECM_Imag = zeros(1, length(Simulaciones));
for i = 1:length(Simulaciones)
    ECM_Imag(i) = sum((imag_SS - interp_imag(:, i)).^2) /
length(imag_SS);
end
% tabla con los resultados
resultados = table(Simulaciones, ECM_Mag', ECM_Real', ECM_Imag',
'VariableNames', {'Simulacion', 'ECM Magnitud', 'ECM Real', 'ECM
Imaginario'});

disp(resultados);
%%
figure;
subplot(1,2,1)
title( 'Parte Real')
hold on;
for i = 1:length(Simulaciones)
    plot(f, real_S{i}, 'DisplayName', ['Simulación ',
num2str(i)], 'LineWidth', 1.5);
    xlabel('Frecuencia (GHz)');
    ylabel('REAL(S11)')
end
hold off;

subplot(1,2,2)
hold on;
for i = 1:length(Simulaciones)

    plot(f, imag_S{i}, 'DisplayName', ['Simulación ',
num2str(i)], 'LineWidth', 1.5);
    xlabel('Frecuencia (GHz)');
    ylabel('IMAG(S11)')

end

title( 'Parte Imaginaria ')
hold off;
suptitle({'Parte Real e Imaginaria de Simulaciones', 'de Suelo
Obtenido en FEKO'})

```

```

figure;
subplot(1,2,1)

hold on;

for i = 1:length(Simulaciones)
    plot(f, 20*log10(mag_S{i}), 'DisplayName', ['Simulación ',
num2str(i)], 'LineWidth', 1.5);
xlabel('Frecuencia (GHz)');
ylabel('Mag (dB)')
end
title('Magnitud ')
hold off;
subplot(1,2,2)
hold on;
title('Fase ')
for i = 1:length(Simulaciones)
    plot(f, rad2deg(angl_S{i}), 'DisplayName', ['Simulación ',
num2str(i)], 'LineWidth', 1.5);
end
xlabel('Frecuencia (GHz)');
ylabel('Angulo (Grados)')

hold off;
legend('E_r:21.088 y C:0.08264(s/m)', 'E_r:30 y
C:0.06468(s/m)', 'E_r:42 y C:0.04132(s/m)', 'E_r:21.088 y
C:0.04132(s/m)', 'E_r:20 y C:0.04132 (s/m)')
suptitle({'Magnitud y Fase de Simulaciones', 'de Suelo
Obtenido en FEKO'})

Medicion_Suelo = 'MedicionTierraAituyREV02.S1P';
SparamMedicion = sparameters(Medicion_Suelo);

% Obtén los datos de S11
f = SparamMedicion.Frequencies;
S11 = SparamMedicion.Parameters(1, 1, :);

% Convierte el parámetro S11 en magnitud, parte real e
imaginaria
mag_S11 = abs(squeeze(S11));
real_S11 = real(squeeze(S11));
imag_S11 = imag(squeeze(S11));

```

```

angl_S11= angle(squeeze(S11));
Simulacion_FEKO = 'FekoTierraC0_04132Er3.S1P';
SparamFEKO = sparameters(Simulacion_FEKO);

% Obtén los datos de S11
F = SparamFEKO.Frequencies;
S = SparamFEKO.Parameters(1, 1, :);

% Convierte el parámetro S11 en magnitud, parte real e
imaginaria
Mag_S11 = abs(squeeze(S));
Real_S11 = real(squeeze(S));
Imag_S11 = imag(squeeze(S));
Angl_S11= angle(squeeze(S));

%%

Zin = zeros(size(S11));
Z0=50

for k = 1:length(S11)
    Zin(k) = Z0 * (1 + S11(k)) / (1 - S11(k));

end

disp('Impedance values in ohms:');
disp(Zin);

mag_Zin = abs(squeeze(Zin));
real_Zin = real(squeeze(Zin));
imag_Zin = imag(squeeze(Zin));
angl_Zin= angle(squeeze(Zin));

%%

ZIN = zeros(size(S));
Z0=50
for A = 1:length(S)
    ZIN(A) = Z0 * (1 + S(A)) / (1 - S(A));

end
disp(ZIN);

mag_ZIN = abs(squeeze(ZIN));

```

```

    real_ZIN = real(squeeze(ZIN));
    imag_ZIN = imag(squeeze(ZIN));
    angl_ZIN= angle(squeeze(ZIN));

    %% Graficas
    figure;
    subplot(3,2,1)
    plot(f/1e9, real_S11,F/1e9, Real_S11, 'LineWidth', 1.5); %
    Frecuencia en GHz
    title('Parte Real de S11 ');
    ylabel('S11 (veces)');
    xlabel('Frecuencia (GHz)');
    subplot(3,2,2)
    plot(f/1e9, imag_S11,F/1e9, Imag_S11, 'LineWidth', 1.5); %
    Frecuencia en GHz

    xlabel('Frecuencia (GHz)');
    ylabel('S11 (Veces)');
    title('Parte Imaginaria de S11 ');

    subplot(3,2,3)
    plot(f/1e9, 20*log10(mag_S11),F/1e9,
    20*log10(Mag_S11),'LineWidth', 1.5); % Frecuencia en GHz
    xlabel('Frecuencia (GHz)');
    ylabel('Magnitud S11 (dB)');
    title('Magnitud de S11 ');

    subplot(3,2,4)

    plot(f/1e9, rad2deg(angl_S11),F/1e9,
    rad2deg(Angl_S11),'LineWidth', 1.5); % Frecuencia en GHz
    xlabel('Frecuencia (GHz)');
    ylabel('Angulo (Grados)');
    title('Fase de S11');
    suptitle({'Resultado de Simulacion en Suelo con Menor ECM '})
    legend('Medicion', ' Simulacion Er:3 y ?:0.04132 S/m')

    subplot(3,2,5)

    plot(f/1e9, real_Zin,F/1e9, real_ZIN,'LineWidth', 1.5); %
    Frecuencia en GHz
    xlabel('Frecuencia (GHz)');
    ylabel('S11 (ohms)');
    title('Parte Real de Impedancia de entrada ');

```

```
subplot(3,2,6)
plot(f/1e9, imag_Zin,F/1e9, imag_ZIN,'LineWidth', 1.5); %
Frecuencia en GHz
xlabel('Frecuencia (GHz)');
ylabel('S11 (ohms)');
title('Parte Imaginaria de Impedancia de entrada ');
```