

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



UCSC

Diseño, construcción y validación de medidor de parámetros eléctricos del suelo

Brayan Alexander Uribe Ancaten

Informe de Habilitación Profesional para optar al título de:
Ingeniero Civil Eléctrico

Profesor Patrocinante:
Dr. Ricardo A. Bustos P.

Profesores Guía:
Dra. Silvia E. Restrepo M.
Ing. Cinthia Altamirano.

Concepción, octubre de 2025

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTISIMA CONCEPCION
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Profesor Patrocinante:
Dr. Ricardo A. Bustos P.

Diseño, construcción y validación de medidor de parámetros eléctricos del suelo

Brayan Alexander Uribe Ancaten

Informe de Habilitación Profesional
Para optar al título de

Ingeniero Civil Eléctrico

Octubre 2025

Resumen

Este informe se enfoca en el estudio de los distintos métodos de análisis de las características dieléctricas del suelo. Se analiza la influencia del terreno en un sistema de antena, con el objetivo de entender cómo las propiedades de la permitividad relativa y la conductividad eléctrica del suelo afectan el funcionamiento y el rendimiento de una antena.

Con este propósito, se lleva a cabo el diseño y la construcción de un dispositivo que permita medir la permitividad y la conductividad eléctrica. Este dispositivo consiste en una antena monopolo, utilizada para medir el coeficiente de reflexión (parámetro S_{11}) al estar en contacto con distintos tipos de medios y superficies de interés. Posteriormente, se realiza una comparación de estas mediciones con simulaciones hechas en el software FEKO, para así determinar los parámetros eléctricos del suelo. En este caso, se determinan los valores de la permitividad relativa y la conductividad eléctrica.

Para llevar a cabo el ensamblaje de la antena, se realizaron un número de modelaciones y simulaciones, con el objetivo de ajustar mejor los parámetros y dimensiones en el diseño. Una vez finalizado este proceso, se construyó la antena de manera física. Con la antena terminada, se realizaron mediciones de prueba. En primer lugar, se efectuaron mediciones en medios con valores de permitividad y conductividad conocidos, como el aire y el agua, con el fin de comprobar el funcionamiento del sistema. En segundo lugar, se realizaron mediciones en el suelo, donde los valores son desconocidos, siendo estos determinados con el instrumento. Finalmente, se efectuaron mediciones a distintas alturas, ya que durante el proceso (particularmente en las mediciones en el agua) se comprobó que esta variable puede afectar los resultados. Por ello, se llevaron a cabo más mediciones y simulaciones para comprobar este fenómeno.

Para obtener resultados precisos de las características dieléctricas del suelo, la placa de aluminio debe estar en contacto directo con la superficie. Además, existen diferencias entre los escenarios de simulación y de medición, aunque los valores obtenidos son similares. Esto se debe a que la simulación representa un entorno ideal, sin interferencias externas, a diferencia de las condiciones reales en terreno. Por lo tanto, se propone refinar las simulaciones numéricas con el objetivo de determinar los valores mínimos de permitividad relativa y conductividad eléctrica del suelo.

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

Agradecimientos

Agradezco infinitamente a mis familiares, quienes siempre se sintieron orgullosos de mis decisiones. En especial, a mi madre, Ana Rosario Ancaten Calviqueo, y a mi padre, Guillermo Uribe Reyes, quienes siempre me han ayudado a mantener el ánimo y la fuerza para seguir caminando en esta larga carrera universitaria.

También quiero agradecer a mis hermanos Guillermo Uribe, Claudio Uribe y Víctor Uribe, quienes siempre me han brindado consejos y palabras de aliento cuando me he perdido en el camino.

Gracias al Dr. Ricardo Bustos por este desafío académico, por la confianza y por las oportunidades brindadas.

También doy los agradecimientos al apoyo del Proyecto ANID FONDECYT Regular 1251819.

Finalmente, y no menos importante, gracias a la señorita Cinthia Altamirano, quien me ha ayudado y apoyado en las mediciones realizadas durante este proyecto.

Tabla de Contenidos

LISTA DE FIGURAS	9
NOMENCLATURA.....	10
ABREVIACIONES	11
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	12
1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL	12
1.2. TRABAJOS PREVIOS	12
1.2.1 Antenas	13
1.2.2 Conductividad eléctrica.....	13
1.2.3 Permitividad Relativa	14
1.2.4 Proyecto MIST.....	15
1.2.5 Software FEKO.....	16
1.2.6 Discusión	16
1.3. HIPÓTESIS DE TRABAJO	17
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	18
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	19
2.1. INTRODUCCIÓN	19
2.2. ANTENA.....	19
2.2.1 Parámetros de una antena.....	19
2.3. EFECTO DEL SUELO EN LA ANTENA	22
2.4. PARÁMETROS ELÉCTRICOS DEL SUELO.....	23
2.4.1 Permitividad relativa	23
2.4.2 Conductividad eléctrica.....	23
2.4.3 Permeabilidad	23
2.5. TÉCNICAS PARA MEDIR PERMITIVIDAD	24
2.5.1 Línea de transmisión y reflexión.....	24
2.5.2 Líneas paralelas	25
2.5.3 Cavidad resonante.....	25
2.5.4 Sonda coaxial	26
2.6. TÉCNICA PARA MEDIR CONDUCTIVIDAD.....	26
2.6.1 Sondeo eléctrico vertical	26
2.6.2 Método Schlumberger.....	27
2.6.3 Método Wenner.....	27
2.7. PROYECTO MIST.....	28
2.7.1 Mediciones de permitividad y conductividad eléctrica del proyecto MIST	29
2.8. SOFTWARE FEKO.....	31
CAPÍTULO 3. DISEÑO DE ANTENA MONOPOLO.....	32
3.1. INTRODUCCIÓN	32
3.2. MODELACIÓN DE LA ANTENA MONOPOLO DE HÉCTOR MUÑOZ.....	32
3.2.1 Diseño y dimensiones de la antena.....	32
3.3. NUEVOS DISEÑOS DE LA ANTENA MONOPOLO	32
3.3.1 Simulación y resultados obtenidos de FEKO	34
3.3.2 Resultados obtenidos de FEKO del diseño (1) al (5).....	35
3.3.3 Resultados obtenidos de FEKO del diseño (6) y (10).....	38
3.4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	40
CAPÍTULO 4. SIMULACIÓN DE DISEÑO DE LA ANTENA EN EL SOFTWARE FEKO.....	42

4.1.	INTRODUCCIÓN	42
4.2.	SIMULACIÓN Y CAMBIO DE FRECUENCIA.....	42
4.3.	SIMULACIÓN DE LOS DISEÑOS (3) Y (8)	42
4.3.1	<i>Simulación de espacio libre (aire)</i>	42
4.3.2	<i>Simulación con elemento agua</i>	45
4.3.3	<i>Simulación con elemento suelo</i>	54
4.4.	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	58
CAPÍTULO 5. CONSTRUCCIÓN DE LA ANTENA Y RESULTADOS DE MEDICIONES DE AIRE Y AGUA		59
5.1.	INTRODUCCIÓN	59
5.2.	ELECCIÓN DE DISEÑO DE LA ANTENA MONOPOLO	59
5.3.	CONSTRUCCIÓN DE LA ANTENA MONOPOLO.....	60
5.3.1	<i>Materiales</i>	60
5.3.2	<i>Diseño estructural de la antena monopolo</i>	62
5.4.	MEDICIÓN EN ELEMENTOS	63
5.4.1	<i>Simulación y medición en espacio libre (Aire)</i>	63
5.4.2	<i>Simulación y medición en el agua</i>	67
5.5.	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	77
CAPÍTULO 6. MEDICIONES DE PERMITIVIDAD Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EN EL SUELO		79
6.1.	INTRODUCCIÓN	79
6.2.	MEDICIÓN DE LOS PARÁMETROS S11 DEL SUELO.....	80
6.2.1	<i>Lugar de medición para el suelo</i>	80
6.2.2	<i>Medición de característica del suelo</i>	80
6.2.3	<i>Resultados de la medición de característica del suelo</i>	80
6.2.4	<i>Simulación de medición de suelo en FEKO</i>	82
6.2.5	<i>Análisis de los resultados obtenidos en las simulaciones del suelo</i>	89
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES		93
7.1.	SUMARIO	93
7.2.	CONCLUSIONES	94
7.3.	TRABAJO FUTURO.....	96
BIBLIOGRAFÍA.....		97
ANEXO A. CÓDIGO UTILIZADO EN MATLAB		99

Lista de Tablas

Tabla 3.1 Dimensiones de diseño de la placa tierra	32
Tabla 3.2 Cálculo de ECM de los diseños con respecto a diseño (1) al (5)	36
Tabla 3.3 Cálculo de ECM de los diseños con respecto a diseño (6) al (10)	38
Tabla 3.4 Dimensiones de la placa de aluminio	41
Tabla 4.1 Posición de la placa de aluminio en la simulación	45
Tabla 5.1 Cálculo de ECM de la medición de aire	60
Tabla 5.2 Primera ronda de simulaciones del agua cuando el plano tierra está tocando la superficie	71
Tabla 5.3 Segunda ronda de simulaciones del agua cuando el plano tierra está tocando la superficie	71
Tabla 5.4 Primera ronda de simulaciones del agua cuando el plano tierra está en altura de la superficie	73
Tabla 5.5 Segunda ronda de simulaciones del agua cuando el plano tierra está en altura de la superficie	75
Tabla 5.6 Comparación de las mediciones entre la placa de aluminio tocando la superficie y a 5 cm de altura	78
Tabla 6.1 Número de simulación con los valores de permitividad relativa y conductividad eléctrica	83
Tabla 6.2 Error cuadrático medio entre las simulaciones y mediciones totales	92

Lista de Figuras

Fig. 2.1 Ejemplos de diseño antena.....	19
Fig. 2.2 Patrón de radiación de una antena. Fuente [1]	20
Fig. 2.3 Lóbulos de los patrones de radiación. Fuente: [1]	20
Fig. 2.4 Descripción gráfica de los Parámetros-S en una red de dos puertos. Fuente: [2]......	22
Fig. 2.5 Circuito equivalente de una línea de transmisión para medir parámetros dieléctricos. Fuente: [9]	24
Fig. 2.6 Configuración de una cavidad resonante para medir la permitividad compleja [5].	25
Fig. 2.7 Esquemas de funcionamiento de una sonda coaxial. Fuente: [8]	26
Fig. 2.8 Modelo ideal de capas horizontales de diferente conductividad [5]......	27
Fig. 2.9 Modelo de método Schlumberger. Fuente [5]	27
Fig. 2.10 Modelo del método de Wenner. Fuente: [5]	28
Fig. 2.11 Radiotelescopio MIST. Fuente [12]......	29
Fig. 2.12 Instrumento de medición de permitividad y conductividad eléctrica. Fuente: [15]	30
Fig. 2.13 (a) Instrumento enterrado en el suelo para realizar la medición. (b) Medición de las características del suelo con el Nano VNA. Fuente [15]	30
Fig. 2.14 Resultados obtenidos de la medición en el terreno. Fuente [15]	31
Fig. 3.1 Diseño de la antena monopolo con el plano de tierra con forma cuadrada	33
Fig. 3.2 Diseño de la antena monopolo con el plano de tierra con forma redonda	33
Fig. 3.3 Dimensiones del bosquejo de diseño de la antena monopolo.....	34
Fig. 3.4 Diseño modelado en el software FEKO con el plano tierra.....	34
Fig. 3.5 Resultado de simulación en FEKO de la antena en el aire	35
Fig. 3.6 Magnitud y fase de simulación del diseño (1) al (5)......	37
Fig. 3.7 Parte real e imaginario de simulación del diseño (1) al (5).	37
Fig. 3.8 Magnitud y fase de simulación del diseño (6) al (10)......	39
Fig. 3.9 Parte real e imaginario de simulación del diseño (6) al (10).	39
Fig. 3.10 Dimensiones de la placa de aluminio.....	41
Fig. 3.11 Dimensiones del tubo de cobre	41
Fig. 4.1 Comparación de la parte real e imaginaria del diseño (3) y (8).....	43
Fig. 4.2 Comparación de la magnitud y fase del diseño (3) y (8)	44
Fig. 4.3 Comparación de impedancia del diseño (3) y (8) con espesor	44
Fig. 4.4 Valor de permitividad y conductividad eléctrica del agua.....	45
Fig. 4.5 Comparación de la parte real e imaginaria con agua infinita d0.....	46
Fig. 4.6 Comparación de la magnitud y fase con agua infinita d0.....	47
Fig. 4.7 Comparación de la impedancia con agua infinita d0	47
Fig. 4.8 Comparación de la parte real e imaginaria con agua infinita d5.....	48
Fig. 4.9 Comparación de la magnitud y fase con agua infinita d5.....	49
Fig. 4.10 Comparación de la impedancia con agua infinita d5	49
Fig. 4.11 Simulación de antena monopolo en el agua con base cilíndrica con d0.	50
Fig. 4.12 Comparación de la parte real e imaginaria con agua cilíndrica d0	51
Fig. 4.13 Comparación de la magnitud y fase con agua cilíndrica d0	51
Fig. 4.14 Comparación de la impedancia con agua cilíndrica d0	52
Fig. 4.15 Comparación de la parte real e imaginaria con agua cilíndrica d5	53
Fig. 4.16 Comparación de la magnitud y fase con agua cilíndrica d5	53
Fig. 4.17 Comparación de la impedancia con agua cilíndrica d5	54
Fig. 4.18 Comparación de la parte real e imaginaria con suelo infinito d0	55
Fig. 4.19 Comparación de la magnitud y fase con suelo infinito d0.....	55

Fig. 4.20 Comparación de la impedancia con suelo infinito d0	56
Fig. 4.21 Comparación de la parte real e imaginaria con suelo infinito d5	57
Fig. 4.22 Comparación de la magnitud y fase con suelo infinito d5	57
Fig. 4.23 Comparación de la impedancia suelo infinito d5	58
Fig. 5.1 Plano de tierra cuadrada de la antena monopolo	60
Fig. 5.2 Elemento conductor vertical de la antena monopolo (tubo de cobre) y prensa de cable	61
Fig. 5.3 Cable de transmisión utilizado entre la antena monopolo y el NANO VNA	61
Fig. 5.4 Conector SMA hembra	62
Fig. 5.5 Equipo NANO VNA	62
Fig. 5.6 Medidor de permitividad relativa y conductividad eléctrica base antena monopolo	63
Fig. 5.7 Ubicación de medición en espacio libre en Google Earth	64
Fig. 5.8 Medición de antena monopolo en espacio libre en FEKO	65
Fig. 5.9 Comparación de la magnitud y fase del coeficiente reflexión aire	66
Fig. 5.10 Comparación de la parte real e imaginario del coeficiente reflexión aire	67
Fig. 5.11 Comparación de la resistencia y reactancia del coeficiente reflexión aire	67
Fig. 5.12 Ubicación de medición en el agua en Google Earth	68
Fig. 5.13 Medición de antena monopolo en el agua en FEKO	69
Fig. 5.14 Medición de la antena monopolo en agua en terreno	69
Fig. 5.15 Distancia de entre la superficie del agua y el plano tierra	70
Fig. 5.16 Comparación de la magnitud y fase del coeficiente reflexión agua d0	72
Fig. 5.17 Comparación de la parte real e imaginario del coeficiente reflexión agua d0	72
Fig. 5.18 Comparación de la resistencia y reactancia del coeficiente reflexión agua d0	73
Fig. 5.19 Comparación de la magnitud y fase del coeficiente reflexión agua d5	74
Fig. 5.20 Comparación de la parte real e imaginario del coeficiente reflexión agua d5	74
Fig. 5.21 Comparación de la resistencia y reactancia del coeficiente reflexión agua d5	75
Fig. 5.22 Comparación de la magnitud y fase del coeficiente reflexión agua optimizado	76
Fig. 5.23 Comparación de la parte real e imaginario del coeficiente reflexión agua optimizado	76
Fig. 5.24 Comparación de la resistencia y reactancia del coeficiente reflexión agua optimizado	77
Fig. 6.1 Medición de suelo cuando el plano de tierra está en contacto con la superficie	80
Fig. 6.2 Resultado de la medición del NANO VNA magnitud y fase en el suelo	81
Fig. 6.3 Resultado de la medición del NANO VNA parte real e imaginario en el suelo	81
Fig. 6.4 Resultado de la medición del NANO VNA impedancia en el suelo	82
Fig. 6.5 Antena monopolo simulada en el suelo con el plano tierra tocando la superficie	82
Fig. 6.6 Comparación de la magnitud y fase entre medición y simulación 1, 2 y 3	83
Fig. 6.7 Comparación de la parte real e imaginaria entre medición y simulación 1, 2 y 3	84
Fig. 6.8 Comparación de la resistencia y reactancia entre medición y simulación 1, 2 y 3	84
Fig. 6.9 Comparación de la magnitud y fase entre medición y simulación 4, 5 y 6	85
Fig. 6.10 Comparación de la parte real e imaginaria entre medición y simulación 5, 4 y 6	85
Fig. 6.11 Comparación de la resistencia y reactancia entre medición y simulación 4, 5 y 6	86
Fig. 6.12 Comparación de la magnitud y fase entre medición y simulación 7, 8 y 9	86
Fig. 6.13 Comparación de la parte real e imaginaria entre medición y simulación 7, 8 y 9	87
Fig. 6.14 Comparación de la resistencia y reactancia entre medición y simulación 7, 8 y 9	87
Fig. 6.15 Comparación de la magnitud y entre medición y simulación 10 y 11	88
Fig. 6.16 Comparación de la parte real e imaginaria entre medición y simulación 10 y 11	88
Fig. 6.17 Comparación de la resistencia entre medición y simulación 10 y 11	89
Fig. 6.18 Comparación de la magnitud y fase del coeficiente de reflexión en el suelo	90
Fig. 6.19 Comparación de la parte real e imaginario del coeficiente de reflexión en el suelo	90
Fig. 6.20 Comparación de la impedancia del coeficiente de reflexión en el suelo	91

Nomenclatura

MHz	: Mega Hertz.
GHz	: Giga Hertz.
G	: Ganancia.
D	: Directividad.
Z	: Impedancia.
P	: Potencia.
db	: Decibels.
E	: Campo Eléctrico.
S11	: Coeficiente de reflexión.
S12	: Coeficiente de transmisión inversa.
σ	: Conductividad.
ϵ	: Permitividad.
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 en el campo de la cosmología cuyo objetivo principal es realizar mediciones de espectros de radio del cielo a frecuencias inferiores a los 200 MHz. Estas observaciones son fundamentales para la detección de la señal de 21 cm, la cual proporciona información valiosa sobre la estructura, dinámica y evolución temprana del Universo.

El radiotelescopio MIST emplea una antena dipolo del tipo BLADE, caracterizada por presentar un patrón de radiación con su máxima ganancia dirigida hacia el cenit. Sin embargo, es esencial considerar el entorno donde se instalará la antena, ya que las características del medio circundante influyen significativamente en la calidad de la señal recibida. En particular, las propiedades del suelo afectan tanto el haz de radiación de la antena como su diagrama de radiación, modificando así la respuesta electromagnética del sistema.

Estas interacciones pueden introducir ruido, distorsiones o datos erróneos en las mediciones. El suelo posee propiedades dieléctricas propias, como la permitividad relativa y la conductividad eléctrica, que influyen en la propagación de las ondas electromagnéticas. A esto se suma la presencia de distintos estratos en el terreno, los cuales generan variaciones adicionales en la respuesta del sistema de antena.

Si bien existen diversos equipos comerciales que permiten medir las características eléctricas del suelo, estos suelen tener un costo elevado, lo que dificulta su acceso para proyectos de investigación de bajo presupuesto. Por esta razón, el presente informe se centra en destacar la importancia de caracterizar adecuadamente los parámetros eléctricos del terreno y en proponer el diseño de un instrumento económico que permita medir dichas propiedades de manera eficiente y confiable.

1.2. Trabajos Previos

Este apartado tiene como objetivo presentar la información obtenida a partir de la revisión bibliográfica realizada, con el fin de comprender la relevancia de los parámetros de permitividad y conductividad eléctrica del suelo, así como su influencia en el rendimiento de una antena. Además, se

exploran diferentes métodos y antecedentes sobre mediciones aplicadas al análisis de proyectos de astro ingeniería y otros ámbitos 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].

Este libro explica el funcionamiento de las antenas, detallando sus características y parámetros. Además, proporciona información sobre el impacto del suelo en el rendimiento de una antena, incluyendo diagramas de radiación para suelos con distintos 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, aborda los parámetros “S” en el desarrollo de modelos de simulación que permiten predecir con precisión el rendimiento de circuitos reales. En particular, proporciona información detallada sobre los parámetros “S”.

- ♣ H. Muñoz, “Construcción de medidor de permitividad relativa y conductividad eléctrica,” Tesis de pregrado, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Concepción, 2024 [3].

Este estudio se enfoca en la construcción de un medidor de la permitividad y conductividad del suelo. Inicialmente, se presenta sobre la teoría de las antenas y sus propiedades, utilizando materiales de años anteriores. Después, se describe sobre el tipo y diseño del medidor, el cual fue probado en el software FEKO para su construcción. Finalmente se utiliza para medir en los ambientes (aire, agua), al evaluar los datos.

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 [4].

Esta tesis destaca la relevancia de la conductividad eléctrica del suelo para la instalación de

una antena del tipo BLADE. Además, presenta diversas técnicas para medir la conductividad eléctrica en el suelo, analizando distintos puntos de la región de 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. [5].

Esta guía técnica ofrece métodos y procedimientos estandarizados para medir la resistividad del suelo, la impedancia de los sistemas de puesta a tierra y los potenciales de superficie en dichos sistemas. La norma incluye métodos de prueba, como los arreglos de Wenner y Schlumberger, explicando cómo realizar estas mediciones en el campo para obtener resultados precisos. Esta guía se utiliza en estudios de diseño de sistemas de puesta a tierra y en la evaluación de su eficacia, ayudando a mejorar la seguridad y protección de las instalaciones eléctricas.

- ♣ R. Bustos. M. Díaz “MIST Memo 2. Soil Conductivity Site Testing”, en línea: <https://sitios.ucsc.cl/mist/mist-memos/>, 2020 [6].

Informe técnico sobre las mediciones de conductividad del suelo realizadas mediante sondeo eléctrico vertical en los sitios de Llano Cerro Ventarrones, Salar de Pujas y Arenal Laguna Tara.

- ♣ Matheus A. S. Pessoa “MIST Memo 8. Soil Resistivity”, en línea: <https://sitios.ucsc.cl/mist/mist-memos/>. 2020 [7].

Este documento entrega información teórica sobre métodos de medición de resistividad de suelo, explica y fundamenta el método de medición de resistividad con 4 electrodos.

1.2.3 Permitividad 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 [8].

El presente informe técnico describe el diseño y construcción de un dispositivo compuesto por una cavidad y dos antenas, sintonizado a una frecuencia de resonancia de 2.4 GHz, destinado a la caracterización de materiales laminados. Las antenas están conectadas a un analizador de redes vectoriales, el que se calibra para medir los parámetros de dispersión.

- ♣ W. G. Fano, A. Razzitte, and P. Larocca, Eds., "Electromagnetic Field Radiation in Matter." IntechOpen, 2020 [9].

Este libro explora diversos aspectos de la interacción entre la radiación de campos electromagnéticos y distintos materiales. Sirve como una valiosa fuente de información sobre cómo medir la permitividad utilizando la técnica de líneas de transmisión. Además, incluye contenido relevante sobre antenas.

- ♣ Rohde & Schwarz, "Measurement of Dielectric Material Properties," Application Note, Mar. 2012. Disponible en: www.rohde-schwarz.com [10]

Este libro proporciona información sobre la medición de las propiedades dieléctricas de materiales en radiofrecuencia, utilizando la medición de coeficientes de reflexión junto con simulaciones. Además, resalta la importancia de las mediciones dieléctricas, ya que pueden ofrecer datos cruciales sobre las características eléctricas o magnéticas que afectan el diseño de los dispositivos

- ♣ Agilent Technologies, "Measuring Dielectric Properties using Agilent's Materials Measurement Solutions," [Online]. Available: <https://www.agilent.com>. [Accessed: marzo. 12, 2024]. [11]

Este documento presenta las soluciones de Agilent para la medición de propiedades dieléctricas, subrayando la relevancia de comprender las características dieléctricas de los materiales en diferentes industrias, con el fin de optimizar los procesos de diseño, control 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 [12].

Este artículo, presenta una descripción del instrumento Mapper of the IGM Spin Temperature, el cual es un proyecto diseñado para mapear la temperatura de espín del medio intergaláctico utilizando observaciones de la señal de 21 cm proveniente del hidrógeno neutro. Este instrumento se centra en detectar las fluctuaciones en la temperatura de espín del hidrógeno en el IGM, un aspecto crucial para entender las primeras etapas del universo, especialmente, la era cósmica oscura y la transición hacia la era de reionización.

1.2.5 Software FEKO

- ♣ Altair Engineering GmbH, “Altair Feko,” AeroExpo. [En línea]. Disponible en: <https://pdf.aeroexpo.online/pdf/altair-engineering-gmbh/altair-feko/171591-8974.html> (accedido: 10-jun-2025).[13]

Esta página web presenta la descripción del software FEKO, un programa utilizado para realizar simulaciones de tipo electromagnético. En nuestro proyecto, se emplea para simular una antena tipo monopolo. A través del análisis de distintos parámetros característicos, se evaluará su eficiencia, especialmente en entornos aéreos, acuáticos y en suelo.

1.2.6 Discusión

A partir de la revisión bibliográfica, se exponen y explican conceptos fundamentales sobre antenas, indispensables para comprender su funcionamiento y comportamiento. También, se presentan distintos tipos de antenas y se analizan los efectos que pueden generarse, debido a las propiedades del entorno en el que se instalan, especialmente, la permitividad relativa y la conductividad eléctrica del suelo [1]. De igual forma, se introduce el estudio de los parámetros S, los cuales son clave para el desarrollo de este proyecto [2].

En relación con las metodologías para medir la permitividad relativa, se consultaron diversas fuentes [8], [9], [10], [11], que permitieron identificar enfoques y técnicas aplicables para su evaluación. De manera similar, se revisaron estudios centrados en la medición de la conductividad eléctrica del suelo [4], [5], [6], [7], lo que facilitó una comprensión más amplia sobre los métodos disponibles para caracterizar estos parámetros eléctricos.

Además, se llevó a cabo un análisis general del proyecto MIST, haciendo énfasis en las estrategias empleadas para determinar los valores de permitividad y conductividad eléctrica del terreno. Esta revisión permitió identificar limitaciones en los métodos actuales de caracterización del suelo [13].

Con base en los hallazgos obtenidos en estos estudios, se establece un punto de partida para el desarrollo del presente proyecto. En particular, se propone mejorar los resultados previos mediante modificaciones en el diseño, enfocándose en el cambio de la estructura de la antena. Para ello, se realizarán comparaciones con los resultados obtenidos en la investigación de Héctor Muñoz [3].

1.3. Hipótesis de Trabajo

La implementación de un medidor de permitividad relativa y conductividad eléctrica del suelo permitirá caracterizar el comportamiento electromagnético del terreno, lo cual influirá directamente en el desempeño de la antena.

1.4. Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Construir un instrumento que permita medir la conductividad eléctrica y la permitividad relativa del suelo en el sitio del radio telescopio MIST.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Diseñar un instrumento de medición en base una antena tipo monopolo o dipolo.
- Simular el diseño propuesto en software FEKO.
- Construir el instrumento diseñado.
- Realizar mediciones en medios conocidos (agua, aire y suelo)

1.5. Alcances y Limitaciones

En este estudio se busca desarrollar un medidor de permitividad relativa y conductividad eléctrica con el objetivo de apoyar proyectos relacionados con la instalación y operación de antenas. Para ello se realizarán mediciones en diversos tipos de suelos y superficies utilizando el dispositivo en cuestión, obteniendo el parámetro S11, lo que permitirá determinar los valores de permitividad

relativa y conductividad eléctrica. Este proyecto presenta ciertas limitaciones en cuanto a los entornos de medición, debido a que no son ideales, pueden presentar obstáculos que interfieren en las mediciones.

Otra limitación es el desconocimiento de los valores de conductividad eléctrica y permitividad relativa de los suelos donde se realizaron las mediciones. Esta falta de información es significativa debido a que estos parámetros influyen considerablemente en el coeficiente de reflexión.

1.6. Temario y Metodología

La metodología utilizada comienza con una revisión bibliográfica. Posteriormente, se realiza el diseño del instrumento y simulaciones en los entornos seleccionados. Después, se construye la antena monopolo para llevar a cabo las mediciones y compararlas con los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas con el software FEKO.

El informe se estructura en siete capítulos que abordan los distintos aspectos del estudio. El segundo capítulo está dedicado a presentar el marco teórico necesario para comprender el contexto del tema. El tercer capítulo se enfoca en el diseño de la antena monopolo, la cual será simulada y construida. El cuarto capítulo presenta los resultados de las simulaciones del diseño seleccionado de la antena en los distintos entornos. El quinto capítulo se centra en la construcción de la antena y la realización de mediciones en terreno. El sexto capítulo compara los resultados obtenidos mediante las simulaciones realizadas en el software FEKO con las mediciones en terreno. Finalmente, el séptimo capítulo presenta un resumen del trabajo, las conclusiones obtenidas y posibles líneas de trabajo futuro.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1. Introducción

En este capítulo se presenta el desarrollo conceptual y teórico de las antenas, que permiten fundamentar el proyecto presentado. Se revisan los métodos utilizados para medir la permitividad relativa y la conductividad eléctrica mediante el coeficiente de reflexión, introduciendo así el programa FEKO y se expone la finalidad del proyecto MIST.

2.2. Antena

Una antena es un dispositivo utilizado para emitir o recibir ondas electromagnéticas. Su función principal es permitir el transporte de energía electromagnética desde una antena transmisora hasta una receptora. La antena transmisora es la encargada de emitir la señal, mientras que la antena receptora capta dicha señal. Existen diversos tipos de antenas, pero las más conocidas son la antena monopolo y la antena dipolo [1], como se muestra en la Fig. 2.1.

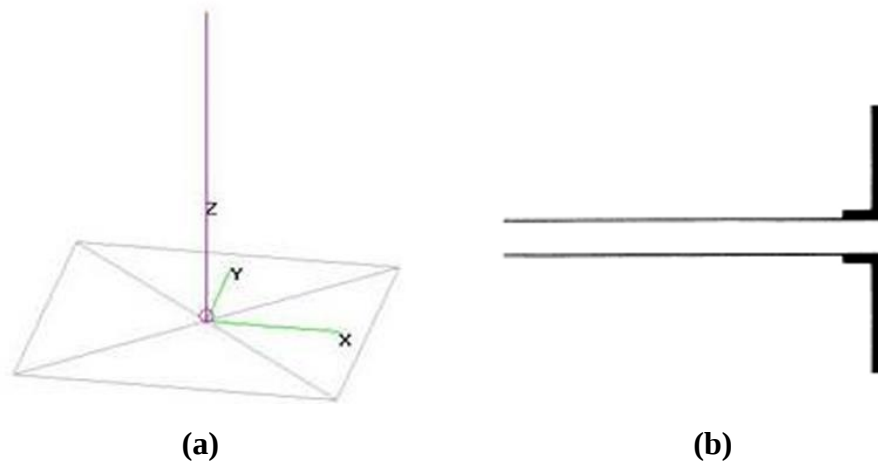


Fig. 2.1 Ejemplos de diseño antena

(a) monopolo (b) dipolo. Fuente: [1]

2.2.1 Parámetros de una antena

Los parámetros de una antena definen su comportamiento, tanto por sus características físicas como eléctricas. Existen distintos tipos de antenas que se diferencian entre sí por sus propiedades, entre los cuales se puede encontrar el patrón de radiación, la directividad, la ganancia, el ancho de banda y los parámetros S, entre otros [1].

A. Patrón de radiación

El patrón de radiación de una antena, es la representación espacial de la distribución de la energía que esta es capaz de radiar. Puede representarse en dos o tres dimensiones, dependiendo del nivel de detalle requerido. En el análisis tridimensional se consideran principalmente dos planos para graficar la energía radiada: el plano azimutal (horizontal) y el plano de elevación (vertical) [1], como se muestra en la Fig. 2.2.

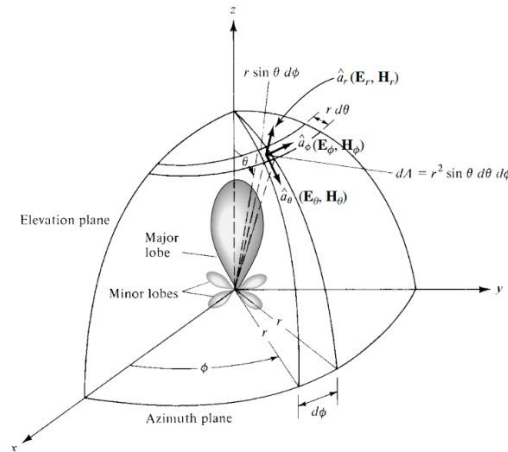


Fig. 2.2 Patrón de radiación de una antena. Fuente [1]

Los patrones de radiación presentan dos tipos de lóbulos: los principales y secundarios. Estos incluyen los lóbulos laterales y traseros [1], como se muestra en la Fig. 2.3.

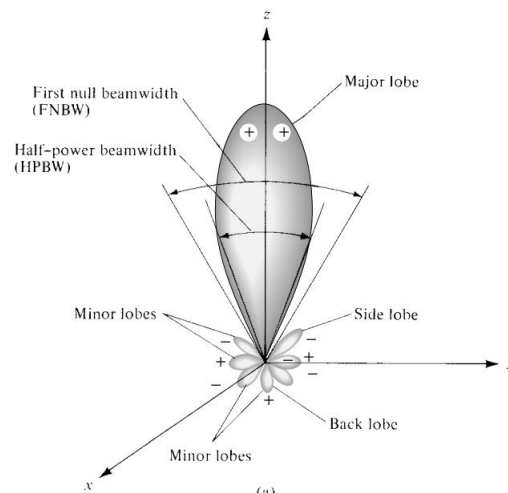


Fig. 2.3 Lóbulos de los patrones de radiación. Fuente: [1]

B. Directividad

Es la relación entre la densidad de potencia radiada en la dirección de máxima radiación, a una distancia determinada, y la densidad de potencia que una antena isotrópica emitiría en esa misma dirección y distancia, suponiendo que ambas antenas transmiten la misma potencia [1].

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

En donde:

D , es la directividad de la antena.

P_{ISO} , es la potencia de la antena isotrópica.

P_{RAD} , es la potencia de radiación de la antena

C. Ganancia

La ganancia se define como la relación entre la potencia que debe suministrarse a una antena isotrópica y la potencia que se debe suministrar a una antena real para generar el mismo campo de radiación, a una misma distancia y en la dirección de máxima radiación [1].

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

En donde:

G , es la ganancia

P_{ISO} , es la potencia de alimentación la antena isotrópica.

P_{Ant} , es la potencia de alimentación de una antena real.

D. Ancho de banda

El ancho de banda se define como el rango de frecuencias dentro del cual el desempeño de la antena, respecto a una determinada característica, cumple con un estándar especificado. En una antena es un valor que depende de las características deseadas en su funcionamiento [1].

E. Parámetros S

Los parámetros de dispersión, o parámetros S (Scattering), también conocidos como coeficientes de reflexión y transmisión, representan la relación entre la onda incidente y la onda reflejada. Estos parámetros permiten caracterizar el comportamiento de un dispositivo cuando opera de forma lineal dentro de un rango específico de frecuencias, por lo que son herramientas fundamentales para evaluar el rendimiento de una antena [2].

De manera similar a muchos circuitos electrónicos, y como se muestra en la Fig. 2.4, las antenas pueden representarse como una red de dos puertos debido a su interacción tanto con el entorno como

con el sistema o receptor al que están conectadas. En este contexto, el puerto 1, o puerto de entrada, está asociado con la señal que llega a la antena, mientras que el puerto 2, o puerto de salida, se relaciona con la señal que se transmite hacia el receptor [2].

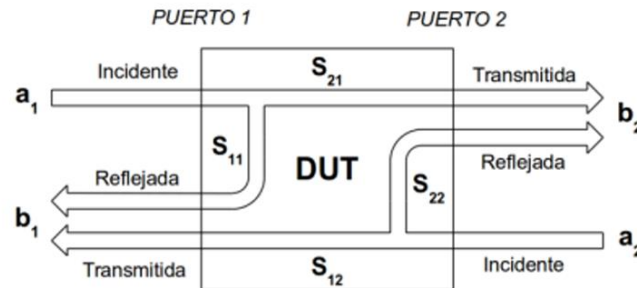


Fig. 2.4 Descripción gráfica de los Parámetros-S en una red de dos puertos. Fuente: [2].

- **S_{11} .** Este parámetro mide la cantidad de potencia reflejada en comparación con la potencia aplicada en el puerto 1. Además, también conocido como 'coeficiente de reflexión del puerto de entrada', indica qué fracción de la señal incidente es reflejada debido a desajustes de impedancia en la entrada de la antena [2].
- **S_{12} .** Este parámetro mide la potencia recibida en el puerto 1 en comparación con la potencia enviada desde el puerto 2. También se le conoce como 'coeficiente de transmisión inversa' [2].
- **S_{21} .** Este parámetro mide la potencia recibida en el puerto 2 en comparación con la potencia enviada desde el puerto 1. Se le conoce como 'coeficiente de transmisión directa' [2].
- **S_{22} .** Este parámetro mide la potencia reflejada en el puerto 2 en comparación con la potencia enviada desde ese mismo puerto. También se le conoce como 'coeficiente de reflexión del puerto de salida' [2].

2.3. Efecto del suelo en la antena

El suelo es un elemento inevitable en cualquier sistema de antena y actúa como un obstáculo no ideal. En frecuencias bajas y medias, sus propiedades eléctricas influyen directamente en el desempeño de la antena. Un aspecto clave es la resistencia de entrada, que representa la combinación de pérdidas y energía radiada; esta puede aumentar cuando la antena se instala a baja altura respecto a una superficie con cierta conductividad. En estos casos, las pérdidas introducidas por el suelo pueden

reducir significativamente la eficiencia de radiación [1]. Asimismo, tanto el parámetro S_{11} como los patrones de radiación se ven modificados según la naturaleza del terreno donde se ubique la antena [4].

2.4. Parámetros eléctricos del suelo

2.4.1 Permitividad relativa

La permitividad describe cómo responde un material cuando es sometido a un campo eléctrico. Esta propiedad también se observa en el entorno natural, por ejemplo, el aire tiene una permitividad relativa es 1, mientras que el agua es de 80. En el caso de las antenas, la permitividad relativa del suelo influye en la propagación de las ondas electromagnéticas, ya que un medio más permisivo puede dificultar su avance [8]. La permitividad se representa con el símbolo ϵ_r . Por teoría de electromagnetismo, el vector de densidad de flujo se expresa en función de la permitividad [8], como se muestra en la siguiente ecuación.

$$D = E\epsilon \quad (2.3)$$

En donde:

D, es la densidad del flujo eléctrico.

E, es el campo eléctrico.

ϵ , es la permitividad.

2.4.2 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica es una propiedad que describe la capacidad de un material para permitir el movimiento de cargas eléctricas en su interior, indicando qué tan fácilmente un medio puede conducir corriente. Los materiales con alta conductividad favorecen el flujo de cargas, mientras que aquellos con baja conductividad se comportan como aislantes. En el caso del suelo, su composición variable, formada por sales, minerales y distintos estratos, influye directamente en la interacción de las ondas electromagnéticas con la antena, afectando su propagación y generando pérdidas [4]. La conductividad se representa con el símbolo (σ) y su unidad de medida es el siemens por metro (S/m).

2.4.3 Permeabilidad

La permeabilidad es una propiedad electromagnética de los materiales que cuantifica la capacidad de un medio para permitir la formación de un campo magnético en su interior [9]. En el

ámbito de las antenas, influye en la propagación del campo magnético asociado a la onda electromagnética. Matemáticamente, se relaciona con la siguiente ecuación:

$$B = \mu H, \quad \mu = \mu_0 \mu_r \quad (2.4)$$

En donde:

B , es la densidad del flujo magnético.

H , es la intensidad campo magnético.

μ , es la permeabilidad total.

μ_0 , es la permeabilidad del vacío.

μ_r , es la permeabilidad relativa.

2.5. Técnicas para medir permitividad

En la práctica, la medición de la permitividad se puede realizar mediante diversas técnicas, cada una con características y procedimientos específicos para llevar a cabo esta medición, como se indica a continuación.

2.5.1 Línea de transmisión y reflexión

El método de la línea de transmisión es una técnica de banda ancha utilizada para medir materiales sólidos, que consiste en colocar el material de prueba dentro de una sección de línea de transmisión cerrada, donde la constante de propagación depende directamente de los parámetros del circuito equivalente. Estos parámetros, que caracterizan la constante de propagación de las ondas a lo largo de la línea, están directamente relacionados con la permitividad y la conductividad del medio [9].

La permitividad y la permeabilidad se calculan a partir de la medición de la señal reflejada (S_{11}) y de la señal transmitida (S_{21}). Para llevar a cabo este tipo de medición es necesario contar con un Analizador de Redes Vectoriales y es importante que el campo eléctrico sea máximo durante la medición, lo cual se puede lograr colocando un circuito abierto o en corto en la línea de transmisión [9], como se demuestra en la Fig. 2.5.

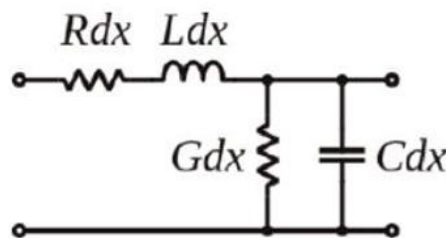


Fig. 2.5 Circuito equivalente de una línea de transmisión para medir parámetros dieléctricos. Fuente: [9]

2.5.2 Líneas paralelas

Estos sistemas se basan principalmente en un analizador de impedancia y un accesorio de prueba dieléctrica para realizar las mediciones, se utilizan típicamente bajas frecuencias (menos de 1 GHz) y los parámetros de la prueba con placas paralelas se derivan considerando las dimensiones del material y mediante la medición del factor de capacitancia y del factor de disipación [9].

2.5.3 Cavity resonante

Esta técnica es una de las más precisas para determinar los valores de permitividad y permeabilidad y consiste en utilizar estructuras con un alto factor de calidad, que presentan una frecuencia de resonancia específica. Al introducir una muestra del material, se afectan tanto la frecuencia de resonancia como el factor de calidad, a partir de estas variaciones, es posible calcular la permitividad del material en estudio, como se muestra en la Fig. 2.6. Un aspecto muy importante de esta técnica es que el analizador de redes vectoriales debe contar con una alta resolución en frecuencia, ya que estas estructuras resuenan en rangos de frecuencia elevados [8].

Este método consiste en utilizar antenas de alta directividad para enfocar microondas a través de una muestra en forma de losa o lámina. No requiere contacto físico con el material, es adecuado para su uso en altas temperaturas y ambientes hostiles. El sistema está compuesto por un analizador de redes vectoriales (VNA), antenas de transmisión y recepción, y accesorios de montaje, como soportes ajustables y guías de alineación, que garantizan la correcta orientación y distancia entre las antenas y la muestra. Además, se emplea software especializado para el análisis del comportamiento de las ondas electromagnéticas [9].

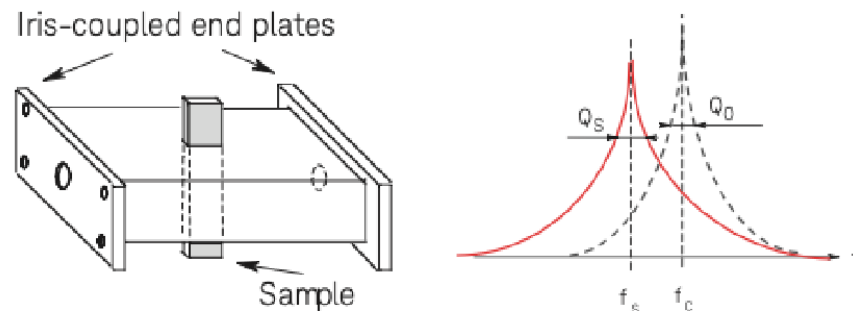


Fig. 2.6 Configuración de una cavidad resonante para medir la permitividad compleja [5].

2.5.4 Sonda coaxial

El método de sonda coaxial utiliza un cable coaxial abierto en un extremo para tener contacto directo con el material a estudiar. La medición se realiza sumergiendo la sonda en un líquido o tocando la superficie plana de un material sólido. Es importante destacar que la profundidad efectiva de la medición depende de la frecuencia de la señal; a frecuencias más altas, la penetración es menor, por lo que este método mide principalmente las propiedades del material cercano a la superficie. La técnica consiste en que la sonda esté en contacto con el material, lo que permite detectar una señal reflejada en fase y magnitud. Al igual que en el método de línea de transmisión, es necesario contar con un analizador de redes vectoriales para obtener el coeficiente de reflexión [8], como se muestra en la Fig. 2.7.

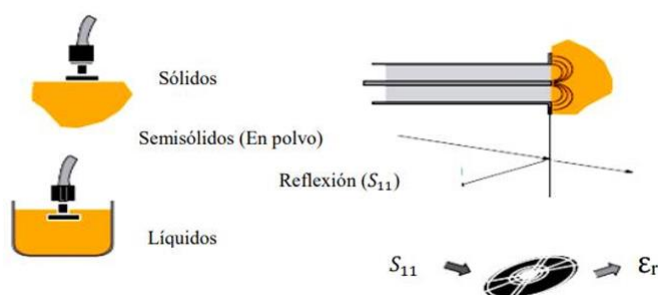


Fig. 2.7 Esquemas de funcionamiento de una sonda coaxial. Fuente: [8]

2.6. Técnica para medir conductividad

2.6.1 Sondeo eléctrico vertical

Este método consiste en utilizar electrodos para inyectar corriente eléctrica en el suelo desde la superficie y medir la caída de potencial eléctrico a diferentes profundidades, como se muestra en la Fig. 2.8. Normalmente se emplean al menos cuatro electrodos: dos para inyectar la corriente (electrodos de corriente) y dos para medir el potencial (electrodos de potencial). Los electrodos se colocan en el suelo siguiendo una disposición específica y se realizan mediciones en distintas posiciones de los electrodos, obteniendo así respuestas de resistividad eléctrica a diferentes profundidades conforme se desplazan. Estos datos se utilizan para construir un perfil de resistividad eléctrica en función de la profundidad [5].

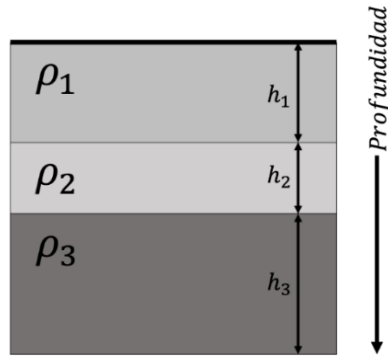


Fig. 2.8 Modelo ideal de capas horizontales de diferente conductividad [5].

2.6.2 Método Schlumberger

La configuración de Schlumberger se utiliza para mediciones de resistividad eléctrica, en el cual, el operador aumenta progresivamente la distancia entre los electrodos de corriente durante las mediciones, expandiendo así el espaciamiento. Este aumento se realiza generalmente a escala logarítmica. Para los electrodos de potencial, se asume un espaciamiento infinitesimal para obtener mediciones precisas [5], como se muestra en la Fig. 2.9.

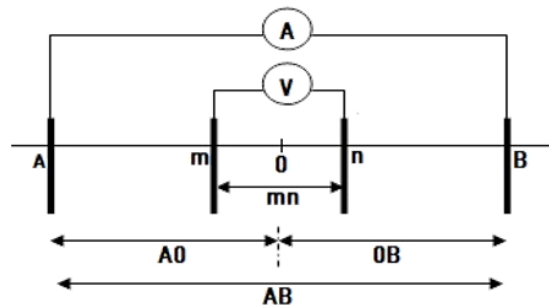


Fig. 2.9 Modelo de método Schlumberger. Fuente [5]

En donde:

$A0=B0$: Distancia en metros entre el electrodo de corriente y el centro.

mn : Distancia en metros entre los electrodos de potencial.

2.6.3 Método Wenner

La configuración de Wenner es una variante especial de la configuración de Schlumberger y es comúnmente utilizada para mediciones de resistividad. En esta configuración, cada electrodo de potencial está separado del electrodo de corriente adyacente por una distancia igual a un tercio del espaciamiento total entre los electrodos de corriente, como muestra la Fig. 2.10.

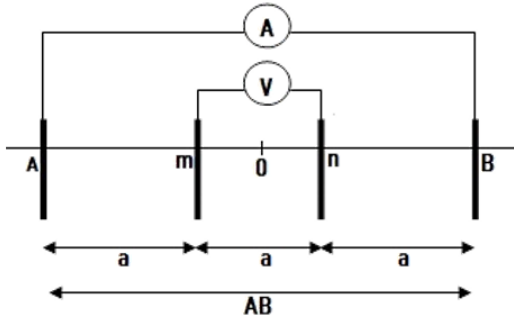


Fig. 2.10 Modelo del método de Wenner. Fuente: [5]

En donde:

A : Distancia entre electrodos en metros

B : Profundidad al que se entierra el electrodo en metros

2.7. Proyecto MIST

La medición de la línea de 21 cm del hidrógeno neutro en el medio intergaláctico (IGM) ha sido reconocida como una herramienta prometedora para cartografiar la evolución del universo durante sus primeros mil millones de años, y como la única forma de observar la 'edad oscura'. En este contexto, la antena radiotelescopio del proyecto MIST representa una contribución significativa a los instrumentos globales dedicados al estudio de la línea de 21 cm [12].

El instrumento MIST es un radiotelescopio de potencia total con polarización única. Su diseño está motivado por el objetivo de lograr un patrón de radiación centrado en el cenit, que disminuya hacia el horizonte, y por la intención de evitar el uso de un plano de tierra metálico. Esta elección elimina posibles reflexiones de señal entre los bordes del plano de tierra. Aunque operar sin un plano de tierra incrementa las pérdidas asociadas al suelo, dichas pérdidas pueden ser estimadas mediante simulaciones y corregidas posteriormente durante el análisis de datos [12].

En cuanto a las características físicas del radiotelescopio, se basa en una antena dipolo tipo Blade horizontal, con una longitud de 2,42 m y un ancho de 60 cm, construida con paneles de aluminio macizo. La antena está instalada a una altura de 52 cm sobre el suelo. El instrumento opera con cuatro baterías de 12 V y 18 Ah, y presenta un consumo máximo de energía de 17 Wh. En la Fig. 2.11 se muestra la antena utilizada en el proyecto MIST



Fig. 2.11 Radiotelescopio MIST. Fuente [12]

El proyecto MIST emplea simulaciones electromagnéticas mediante el software FEKO para estimar diversos parámetros de la antena, tales como la eficiencia de radiación, la directividad del haz, la eficiencia del haz y el coeficiente de reflexión [12].

Una etapa clave tanto para este informe como para el desarrollo del proyecto MIST es la modelación de los parámetros eléctricos del suelo, ya que el rendimiento de la antena depende en gran medida de la conductividad eléctrica y de la permitividad relativa. En condiciones reales, no son homogéneos espacialmente. No obstante, FEKO permite únicamente la modelación de suelos infinitos con variaciones en función de la profundidad. Por esta razón, y para simplificar el modelado dentro de las capacidades del software, el proyecto MIST selecciona sitios de observación con suelos muy planos, en los que las variaciones principales ocurren en función de la profundidad [12].

2.7.1 Mediciones de permitividad y conductividad eléctrica del proyecto MIST

Según lo documentado en el Memo 55 [15], se han realizado intentos de medir la permitividad relativa y la conductividad eléctrica del suelo utilizando un instrumento diseñado específicamente para estos parámetros. El principio de funcionamiento se basa en registrar el parámetro S_{11} generado al colocar en contacto una antena tipo dipolo, como la mostrada en la Fig. 2.12, con el suelo o medio de interés. El comportamiento en frecuencia de S_{11} se obtiene mediante un analizador de redes vectoriales (VNA).

Posteriormente, la antena se modela y simula en FEKO, generando la curva S_{11} en función de la frecuencia a partir de valores aproximados de permitividad relativa y conductividad eléctrica. Estos valores se ajustan iterativamente hasta que la curva simulada coincida con la medida experimental, obteniéndose así estimaciones precisas de los parámetros del suelo [15].

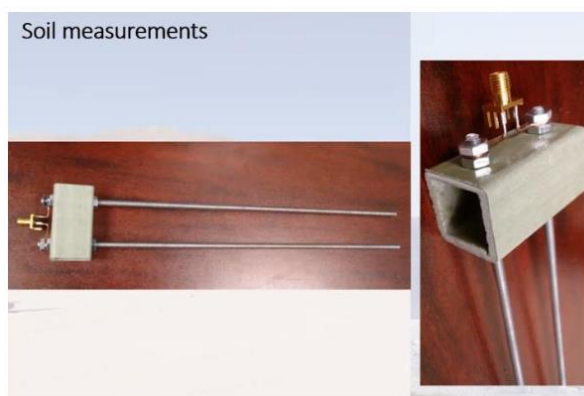


Fig. 2.12 Instrumento de medición de permitividad y conductividad eléctrica. Fuente: [15]

Para medir las propiedades del suelo y evaluar la repetibilidad en un lugar propuesto, se siguieron una serie de pasos específicos. Primero, se introdujeron cuidadosamente las varillas roscadas en el suelo, sin realizar aún la conexión con el analizador de redes vectoriales (VNA), como se muestra en la Fig. 2.13 (a). Luego, se conectaron las varillas al VNA y se procedió a registrar la medición correspondiente, la cual se presenta en la Fig. 2.13 (b). Una vez completada la medición, se desconectaron tanto el cable SMA como las varillas del VNA. Finalmente, se retiraron las varillas roscadas del suelo, completando así el procedimiento de medición.



Fig. 2.13 (a) Instrumento enterrado en el suelo para realizar la medición. (b) Medición de las características del suelo con el Nano VNA. Fuente [15]

Como se muestra en la Fig. 2.14, se compararon las curvas obtenidas por simulación en FEKO con las mediciones realizadas en terreno, en un rango de 0 a 200 MHz. La similitud entre ambas permitió estimar que las propiedades del suelo en el sitio de estudio son aproximadamente una conductividad de 0,032 S/m y una permitividad relativa de 24,03 [15].

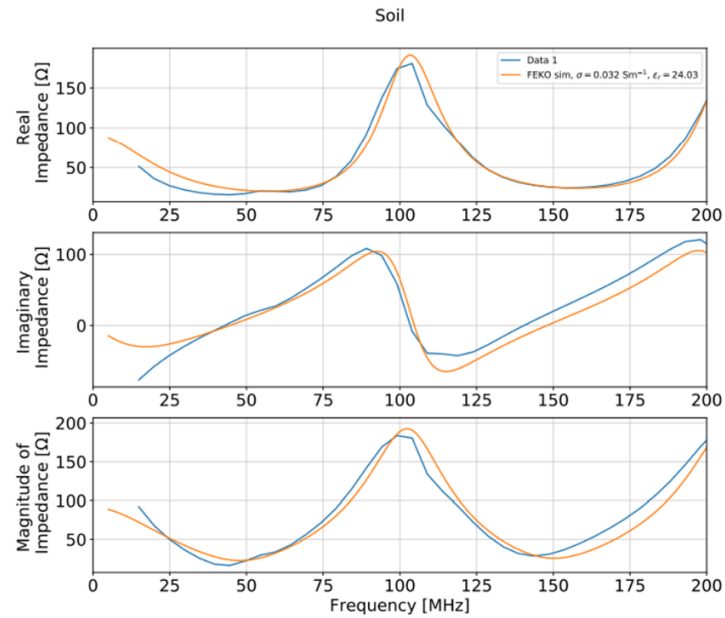


Fig. 2.14 Resultados obtenidos de la medición en el terreno. Fuente [15]

2.8. Software FEKO

FEKO es un software líder en simulación electromagnética que combina técnicas en el dominio de la frecuencia y del tiempo, permitiendo un análisis preciso de antenas, dispersión, sección transversal de radar y compatibilidad electromagnética, incluyendo PEM, descargas por rayos y campos radiados de alta intensidad [13].

Destaca por su capacidad de diseñar y analizar antenas, evaluar radar y estudiar compatibilidad electromagnética, gracias a sus métodos híbridos que manejan problemas grandes y complejos. Para este proyecto, FEKO se emplea principalmente en el diseño de antenas, analizando diagramas de radiación, coeficiente de reflexión e impedancia. Aunque permite simular aire, agua y suelo, estos últimos se modelan como medios infinitos, por lo que se requieren ajustes para limitar la simulación a las dimensiones del caso de estudio [13].

Capítulo 3. Diseño de antena monopolo

3.1. Introducción

En el siguiente capítulo, se presenta el diseño de una antena monopolo. Este proyecto toma como punto de partida la antena diseñada y construida en la tesis de Héctor Muñoz [3]. A partir de esta base, se modifican las dimensiones del dispositivo con el objetivo de obtener mejores resultados y analizar los cambios generados por los diferentes tipos de diseño.

3.2. Modelación de la antena monopolo de Héctor Muñoz

3.2.1 Diseño y dimensiones de la antena

La antena diseñada por Héctor Muñoz [3], utiliza un tubo de cobre de 12 mm de diámetro y 25,5 cm de longitud. Para el plano de tierra, necesario en una antena monopolo, se emplea una plancha de aluminio de 1 mm de espesor, con dimensiones de 15×14 cm, la cual presenta una perforación central de 21 mm de diámetro. La conexión del conector SMA hembra se realiza mediante cables de cobre de 1 mm de diámetro. Aunque en la construcción física de la antena se emplean otros materiales, estos se consideran irrelevantes en el proceso de simulación, ya que no son conductores eléctricos, es decir, son materiales aislantes.

3.3. Nuevos diseños de la antena monopolo

Como se mencionó en la sección anterior, el diseño realizado por Héctor Muñoz sirve como base para la nueva propuesta.

De la Tabla 3.1, se observa los diseños de la placa tierra. En los primeros cinco diseños, el plano presenta una forma cuadrada, mientras que en los diseños del 6 al 10, se adopta una forma circular.

Tabla 3.1 Dimensiones de diseño de la placa tierra

Diseño	Características
(1)	Placa Cuadrada 15x14 cm
(2)	Placa Cuadrada 10x10 cm
(3)	Placa Cuadrada 20x20 cm
(4)	Placa Cuadrada 25x25 cm
(5)	Placa Cuadrada 30x30 cm
(6)	Placa Redonda 10 cm Diámetro

(7)	Placa Redonda 15 cm Diámetro
(8)	Placa Redonda 20 cm Diámetro
(9)	Placa Redonda 25 cm Diámetro
(10)	Placa Redonda 30 cm Diámetro

Observación: El diseño (1), es la placa diseñada por Héctor Muñoz [3].

Las Fig. 3.1 y 3.2 muestran los bosquejos que serán simulados en el software FEKO. Las dimensiones del instrumento se mantienen constantes, con la excepción del plano de tierra, el cual se modifica como se ilustra en la Fig. 3.3. El entorno de simulación será el aire, ya que, en primer lugar, es necesario replicar los resultados obtenidos por Héctor Muñoz antes de continuar con el resto de las simulaciones. En segundo lugar, la frecuencia utilizada abarca desde 50 MHz hasta 250 MHz. La variable que se mide es el coeficiente de reflexión (S_{11}), el cual indica qué proporción de la señal es reflejada. Este coeficiente se representa en términos de magnitud, fase, parte real y parte imaginaria.

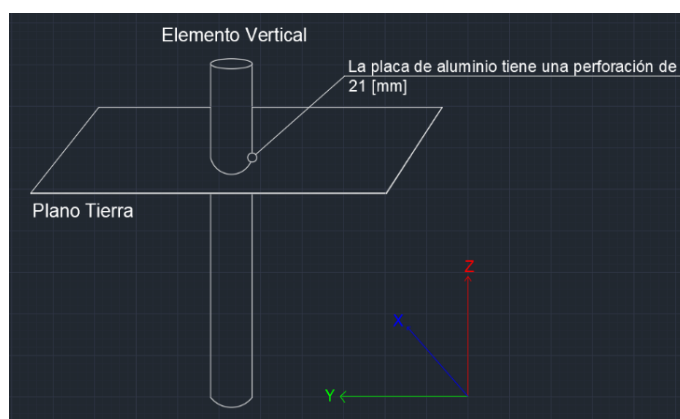


Fig. 3.1 Diseño de la antena monopolo con el plano de tierra con forma cuadrada

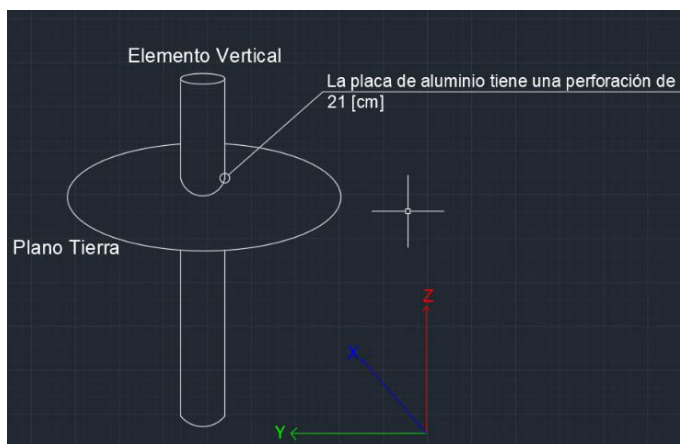


Fig. 3.2 Diseño de la antena monopolo con el plano de tierra con forma redonda

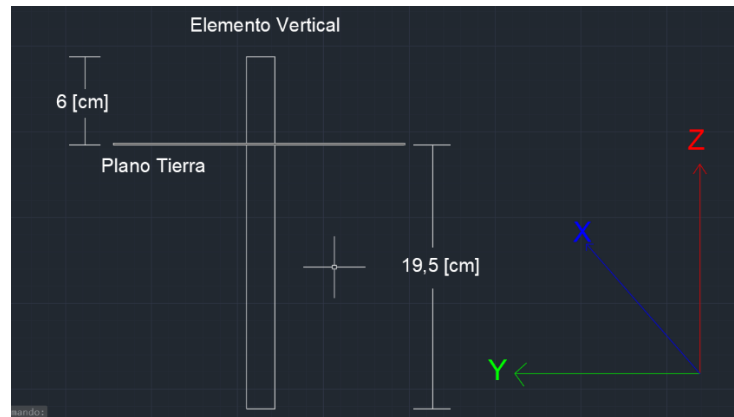


Fig. 3.3 Dimensiones del bosquejo de diseño de la antena monopolo

3.3.1 Simulación y resultados obtenidos de FEKO

Como se mencionó anteriormente, se realizaron 10 simulaciones correspondientes a los diseños propuestos, con el objetivo de identificar cuál de ellos presenta un mejor desempeño. La Fig. 3.4 , muestran los modelos diseñados y presentados en el software FEKO.

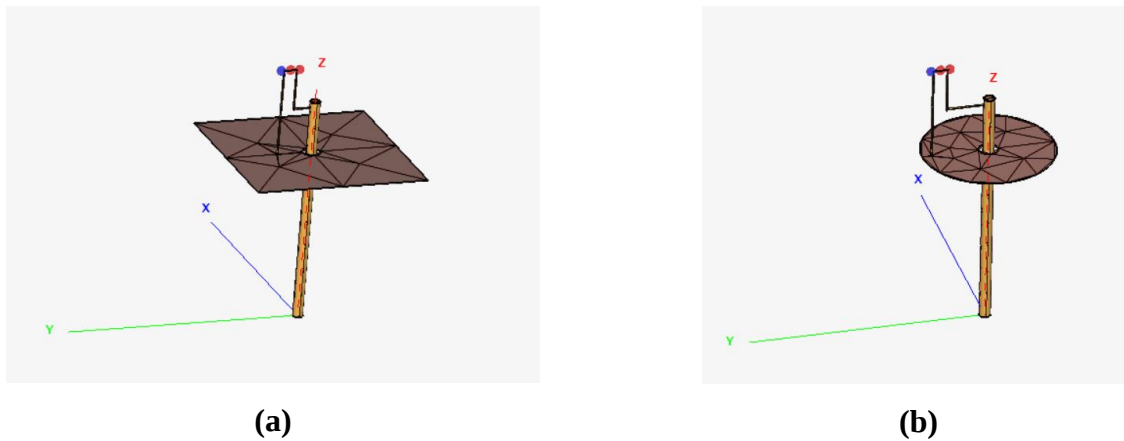


Fig. 3.4 Diseño modelado en el software FEKO con el plano tierra
(a) Cuadrada (b) Redonda

La Fig. 3.5, muestra los resultados obtenidos por Héctor Muñoz, los cuales se utilizarán como punto de referencia para las simulaciones posteriores. Para realizar una comparación efectiva entre los diferentes diseños, se emplearán dos métodos de análisis. El primero consiste en el uso de gráficas, que permitirán visualizar el comportamiento del coeficiente de reflexión en los distintos modelos. El segundo método se basa en el cálculo del Error Cuadrático Medio (ECM), con el objetivo de cuantificar de forma sistemática la diferencia entre las simulaciones.

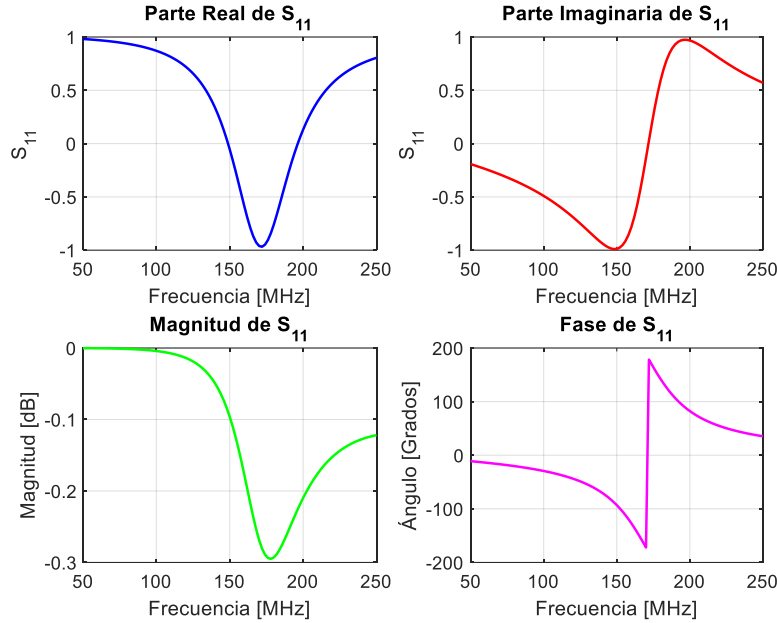


Fig. 3.5 Resultado de simulación en FEKO de la antena en el aire

Como se mencionó anteriormente, el coeficiente de reflexión está compuesto por una parte real y una imaginaria y para un análisis completo, se considerarán ambas componentes. Por ello, se calculará el ECM para cada parte y luego se sumarán, obteniendo así un ECM equivalente, que representará una métrica conjunta del error.

$$ECM = \sum_{i=1}^n \frac{(\hat{x}_i - x_i)^2}{n} \quad (3.1)$$

La ecuación (3.1), describe el cálculo de ECM, donde $\hat{x}$, es el vector de estudio, x_i es el vector base a comparar y n es el tamaño de los vectores a comparar.

3.3.2 Resultados obtenidos de FEKO del diseño (1) al (5)

En la Tabla 3.2, que presenta el error cuadrático medio (ECM), se observa que el diseño 3 es el que muestra mayor similitud con el diseño 1, lo que indica que su comportamiento en la simulación es muy parecido. Por otro lado, el diseño 4 presenta un valor de ECM sorprendentemente alto en comparación con los demás, lo que sugiere una mayor diferencia respecto al diseño de referencia. En cuanto al diseño 5, se encuentra algo más alejado que los diseños 2 y 4, aunque no de manera tan pronunciada.

Tabla 3.2 Cálculo de ECM de los diseños con respecto a diseño (1) al (5)

Diseño	ECM Real	ECM Imaginaria	ECM Equivalente
(1) Vs (2)	0.32453	0.31162	0.63615
(1) Vs (3)	0.037753	0.037139	0.074892
(1) Vs (4)	0.080905	0.080046	1.60951
(1) Vs (5)	0.12446	0.12291	0.24737

En las Fig. 3.6 y 3.7, se muestra el comportamiento de los diseños 1 al 5, en los cuales el plano de tierra tiene forma cuadrada. Como se puede observar, el comportamiento de cada diseño es similar, ya que tanto en la magnitud como en la parte real del coeficiente de reflexión se forma un valle simétrico. La principal diferencia entre ellos radica en la frecuencia en la que se presenta este valle.

El diseño 2, representado en color rojo, muestra una frecuencia cercana a los 200 MHz, lo cual se aprecia con mayor claridad en la Fig. 3.7, correspondiente a la parte real del coeficiente de reflexión. En comparación con los demás diseños, este presenta un desplazamiento mayor hacia la izquierda en el eje de frecuencia.

Los otros diseños presentan sus mínimos en un rango que va aproximadamente de 150 MHz a 160 MHz. Esto demuestra que, a medida que aumenta el tamaño de la superficie del plano de tierra de aluminio, la frecuencia de resonancia tiende a desplazarse hacia frecuencias más bajas. Este comportamiento es deseable, ya que el objetivo es que la frecuencia esté lo más cercana posible a los 150 MHz.

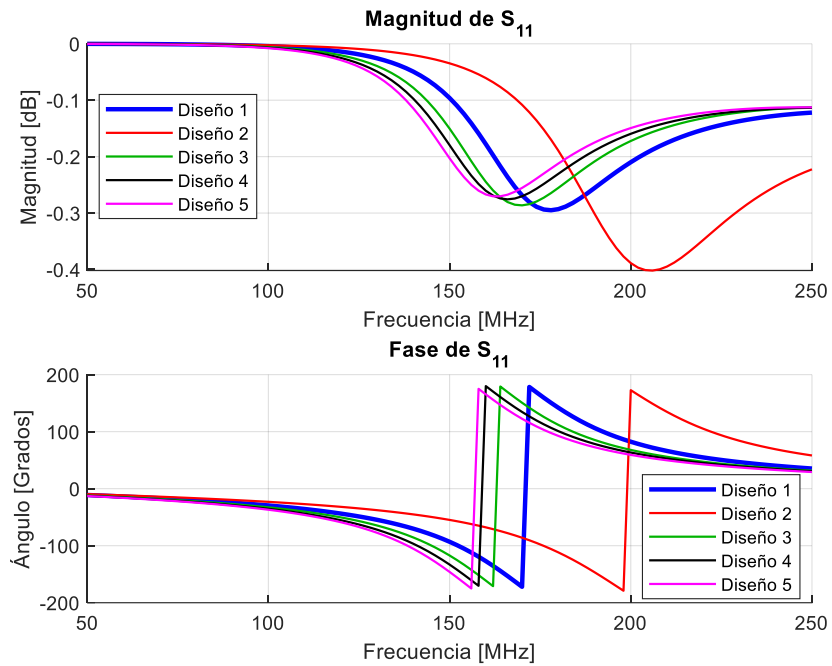


Fig. 3.6 Magnitud y fase de simulación del diseño (1) al (5)

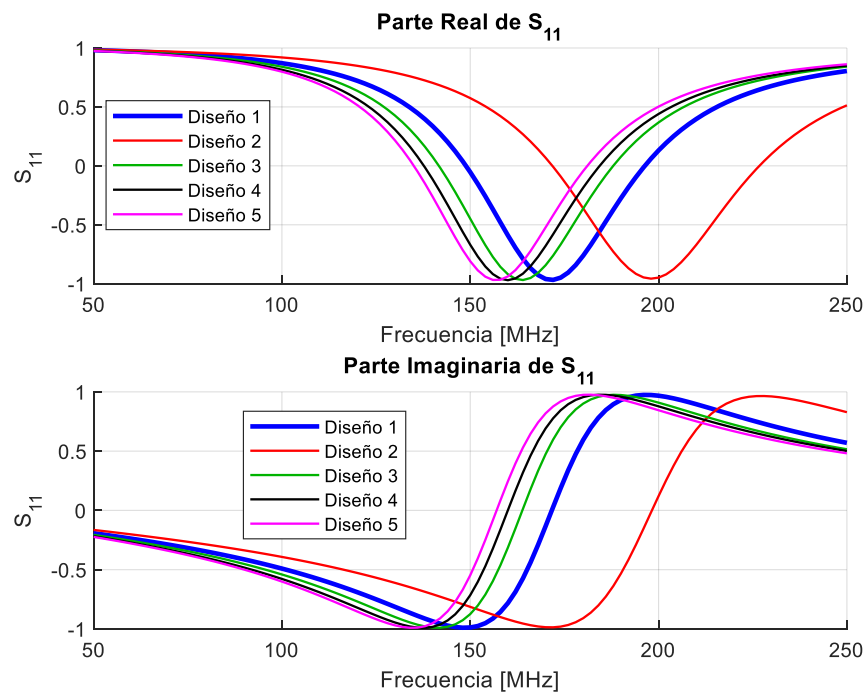


Fig. 3.7 Parte real e imaginario de simulación del diseño (1) al (5).

3.3.3 Resultados obtenidos de FEKO del diseño (6) y (10)

En la Tabla 3.3, que presenta el error cuadrático medio (ECM), se observa que el diseño 8 es el que muestra mayor similitud con el diseño 1 (excluyendo el diseño 7). Los demás diseños presentan un ECM considerablemente más alto, lo que indica una menor cercanía respecto al diseño de referencia.

Tabla 3.3 Cálculo de ECM de los diseños con respecto a diseño (6) al (10)

Diseño	ECM Parte Real	ECM Imaginaria	ECM Equivalente
(1) Vs (6)	0.42979	0.41244	0.84223
(1) Vs (7)	0.0012199	0.0010709	0.0022908
(1) Vs (8)	0.022749	0.022649	0.045398
(1) Vs (9)	0.067818	0.067392	0.13521

En la Fig. 3.8 , se muestra el comportamiento de los diseños 1 y 6 al 10, en los cuales el plano de tierra tiene forma circular, con excepción del diseño 1. Como se puede observar, el comportamiento de todos los diseños es similar, ya que tanto en la magnitud como en la parte real del coeficiente de reflexión se forma un valle simétrico. La principal diferencia entre ellos radica en la frecuencia en la que aparece dicho valle.

El diseño 6, representado en color celeste, presenta una frecuencia cercana a los 200 MHz, lo cual se aprecia con mayor claridad en la Fig. 3.9 (parte real del coeficiente de reflexión). En comparación con los demás, este diseño muestra un desplazamiento mayor hacia frecuencia más altas.

El diseño 7 tiene un comportamiento casi idéntico al diseño 1. Esto se debe a que su dimensión (15 cm de diámetro) es similar al diseño 1, cuya base cuadrada mide 14 x 15 cm. Por esta razón, el diseño 7 se descarta como opción viable, ya que no representa una variación significativa.

Los demás diseños presentan sus mínimos en un rango aproximado de 150 MHz a 160 MHz. Esto demuestra que, a medida que aumenta la superficie del plano de tierra de aluminio, la frecuencia tiende a desplazarse hacia frecuencias más bajas. Sin embargo, al tratarse de una forma circular, se observa que la frecuencia tiende a ubicarse ligeramente más a la derecha en comparación con la forma cuadrada. Esto se evidencia claramente al comparar el diseño 6 (parte real en la Fig. 3.9) con el diseño 2 (Fig. 3.7).

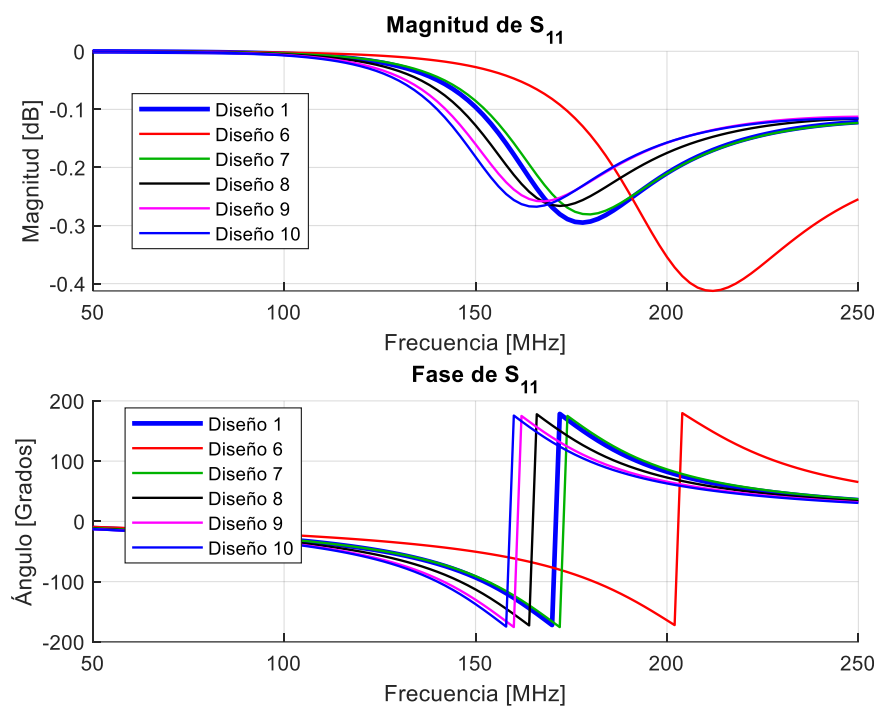


Fig. 3.8 Magnitud y fase de simulación del diseño (6) al (10)

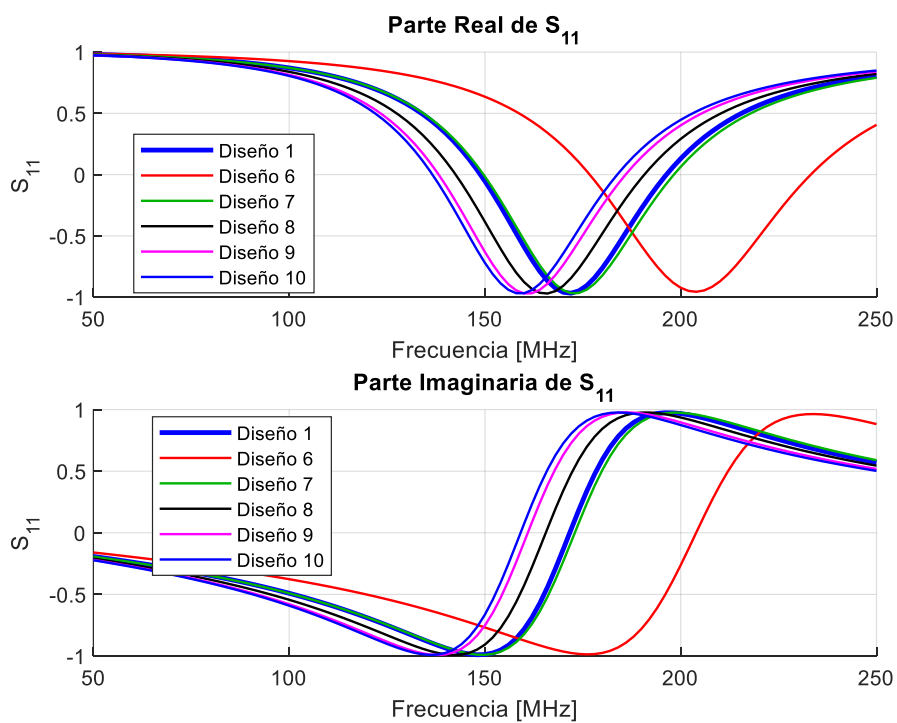


Fig. 3.9 Parte real e imaginario de simulación del diseño (6) al (10).

3.4. Discusión y Conclusiones

De los diez diseños propuestos anteriormente, se seleccionan dos: uno con plano de tierra cuadrado y otro con plano de tierra circular. Esta elección se hace con el propósito de realizar una comparación más amplia durante las mediciones en terreno, y así analizar cómo varían los resultados según la forma del plano de tierra.

Los diseños seleccionados son el diseño 3 (cuadrado) y el diseño 8 (circular), por las siguientes razones:

En primer lugar, el diseño 3 presenta una frecuencia de resonancia similar a la de los diseños 4 y 5, con una ligera mejora. Por ello, los diseños 4 y 5 pueden descartarse. Lo mismo ocurre con el diseño 8, en comparación con los diseños 9 y 10: sus resultados son semejantes, pero el diseño 8 muestra un rendimiento levemente superior. Por otra parte, los diseños cuya frecuencia se aleja significativamente de los 150 MHz fueron eliminados, ya que no cumplen con el objetivo del proyecto.

En segundo lugar, se ha comprobado que, al aumentar el tamaño del plano de tierra, la frecuencia tiende a acercarse a los 150 MHz. Sin embargo, esto implicaría el uso de placas de aluminio de grandes dimensiones, como 25 x 25 cm o un diámetro de 25 cm (como en el diseño 9), lo cual incrementa los costos y complica el trabajo en terreno debido al volumen y peso de las piezas.

Por estas razones, se ha decidido que la mejor opción es trabajar con los diseños 3 y 8. Se determinó que las placas de aluminio se fabricarán con espesores de 1 mm y 2 mm, esto debido a que un espesor muy delgado puede hacer que las placas sean demasiado flexibles, lo que dificultaría su manipulación y afectaría la precisión de las mediciones, especialmente si se realizan en condiciones de viento fuerte, donde podrían doblarse fácilmente.

Según lo anterior, las dimensiones de la antena monopolo, considerando el plano de tierra cuadrado y redondo, y el tubo de cobre quedan definidas como se muestra en las Fig. 3.10 y 3.11, las cuales se utilizarán para realizar las simulaciones en FEKO y la Tabla 3.4 muestra sus dimensiones. La diferencia principal con respecto a las simulaciones anteriores es que ahora se considerarán distintos medios, tales como el aire, el agua y el suelo.

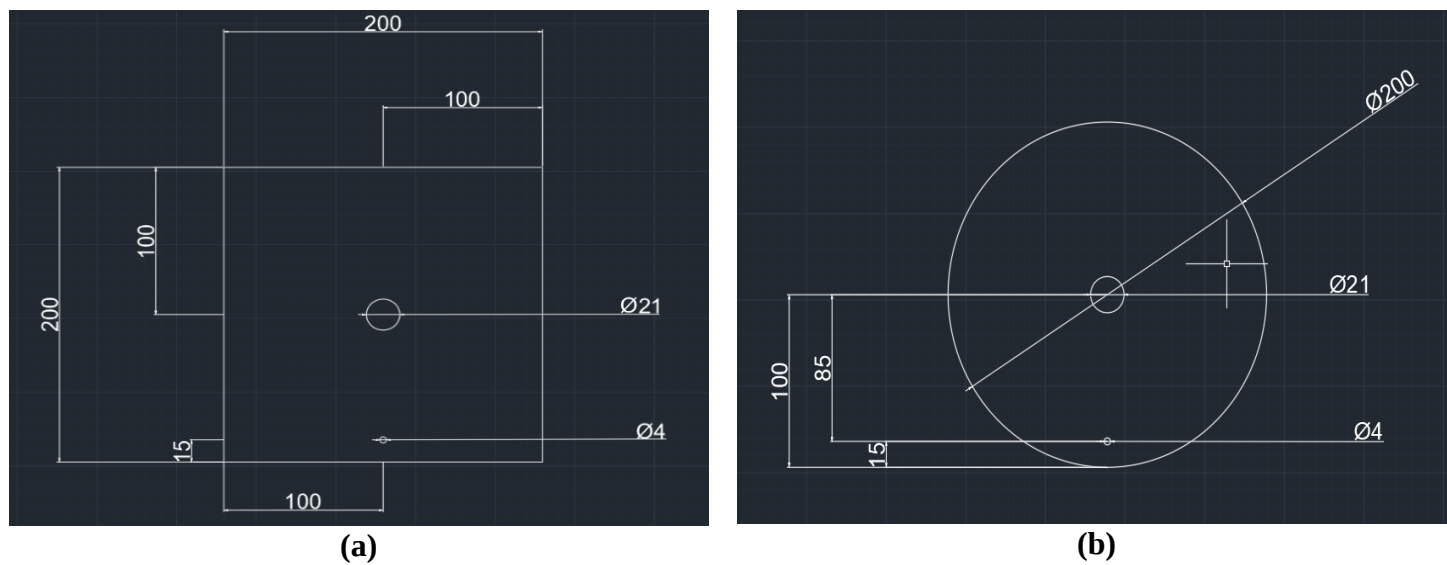


Fig. 3.10 Dimensiones de la placa de aluminio

(a) Cuadrada (b) Redonda

Tabla 3.4 Dimensiones de la placa de aluminio

Material	Diámetro	Espesor
Placa aluminio cuadrada	200 x 200 mm	1 mm / 2mm
Placa aluminio redondo	200 mm	1 mm / 2mm

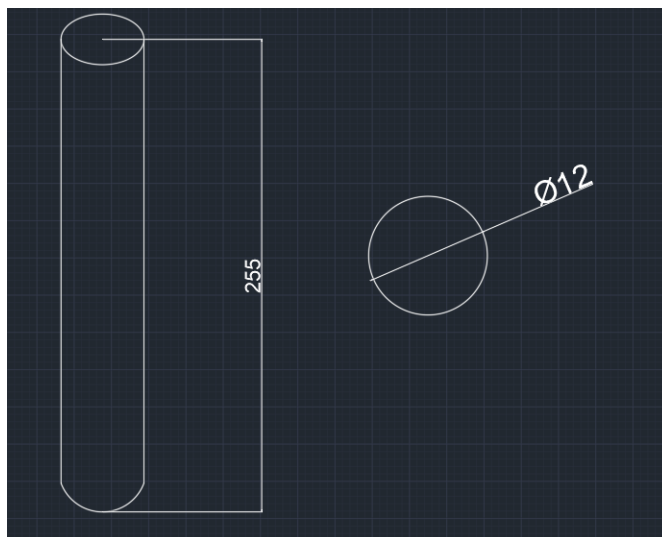


Fig. 3.11 Dimensiones del tubo de cobre

Capítulo 4. Simulación de diseño de la antena en el software FEKO

4.1. Introducción

En el siguiente capítulo se presentan las simulaciones correspondientes a los diseños 3 y 8, las cuales serán evaluadas en diferentes entornos: aire, agua y suelo. En total, se realizarán siete simulaciones. En el entorno acuático, se efectuarán cuatro simulaciones considerando la antena monopolo con referencia al plano tierra. En dos de ellas, el plano tierra estará en contacto directo con la superficie del agua, mientras que en las otras dos se ubicará a una altura de 5 cm sobre esta. De este modo, se considerarán dos configuraciones del plano de simulación: una con agua de extensión infinita y otra con una superficie de agua finita. El objetivo es analizar cómo varía el comportamiento del coeficiente de reflexión en función del tamaño de las fronteras impuestas en el modelo. El entorno de suelo se abordará de manera similar al caso del agua, realizando dos simulaciones: una con el plano tierra en contacto directo con el suelo y otra con una elevación de 5 cm respecto a este y finalmente, en el caso del aire, se efectuará una única simulación.

4.2. Simulación y cambio de frecuencia

El número total de simulaciones es 28. Esto se debe a que se consideran dos diseños diferentes y dos espesores de placa de aluminio: 1 mm y 2 mm. Para evitar una sobrecarga de figuras en el documento, se presentan comparaciones gráficas entre los diseños dentro de sus respectivos entornos.

Originalmente el rango de frecuencia utilizado en las simulaciones, abarcaba desde 50 MHz hasta 250 MHz; sin embargo, se amplió para cubrir un espectro más amplio, quedando establecido entre 25 MHz y 250 MHz.

4.3. Simulación de los diseños (3) y (8)

4.3.1 Simulación de espacio libre (aire)

La Fig. 3.4, muestran el diseño utilizado para las simulaciones en FEKO. Dado que la antena monopolo se encuentra en aire, no se incorporan otros elementos adicionales en el entorno de

simulación.

Las Fig. 4.1 y 4.2, presentan los resultados del instrumento en espacio libre (aire), correspondientes a la parte real e imaginaria, y a la magnitud con la fase, respectivamente. Como se observa en las figuras, los valores de la parte real e imaginaria son idénticos para ambos diseños y espesor, además de ser estables y sin presencia de perturbaciones. Esto se debe a que FEKO realiza las simulaciones bajo condiciones ideales, las cuales son difíciles de replicar en un entorno real. En cuanto a la fase, esta se mantiene constante en ambos casos; sin embargo, en la magnitud se aprecia que el diseño 3, 2 mm presenta valores mayores al resto, lo que podría indicar una mayor adaptabilidad.

La Fig. 4.3, muestra el comportamiento de la impedancia en base al coeficiente de reflexión. La impedancia, es el parámetro que permite comprender el origen físico de las reflexiones observadas y evaluar el grado real de adaptación entre la antena y el sistema de 50 ohm.

La resistencia en todos los diseños se mantiene idénticas, no producen variantes significativas en la impedancia de la antena dentro de rango de frecuencia.

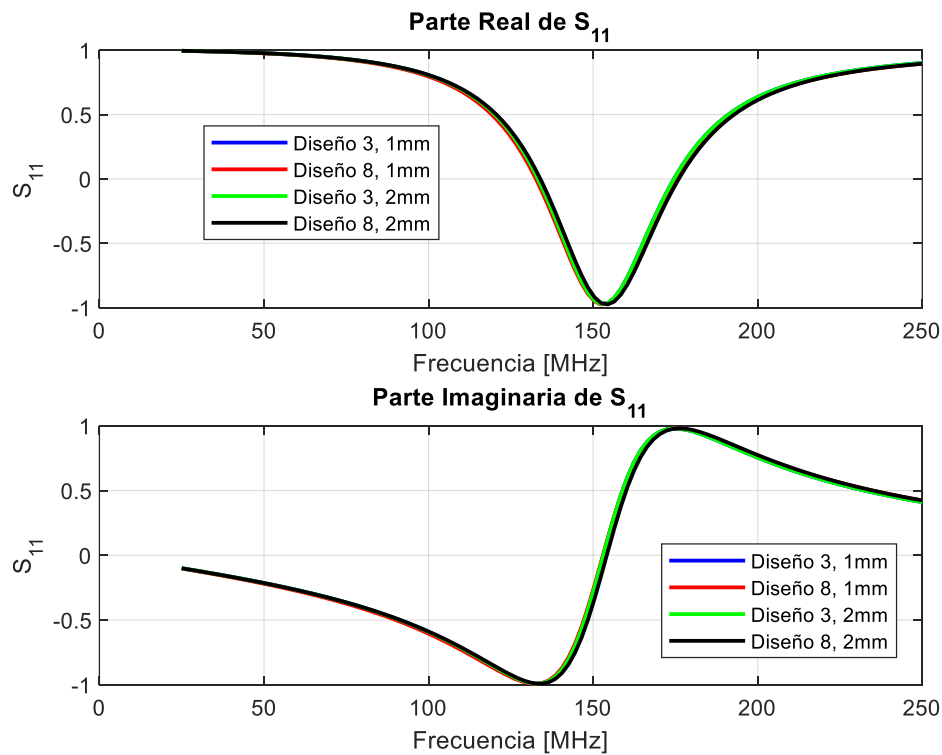


Fig. 4.1 Comparación de la parte real e imaginaria del diseño (3) y (8)

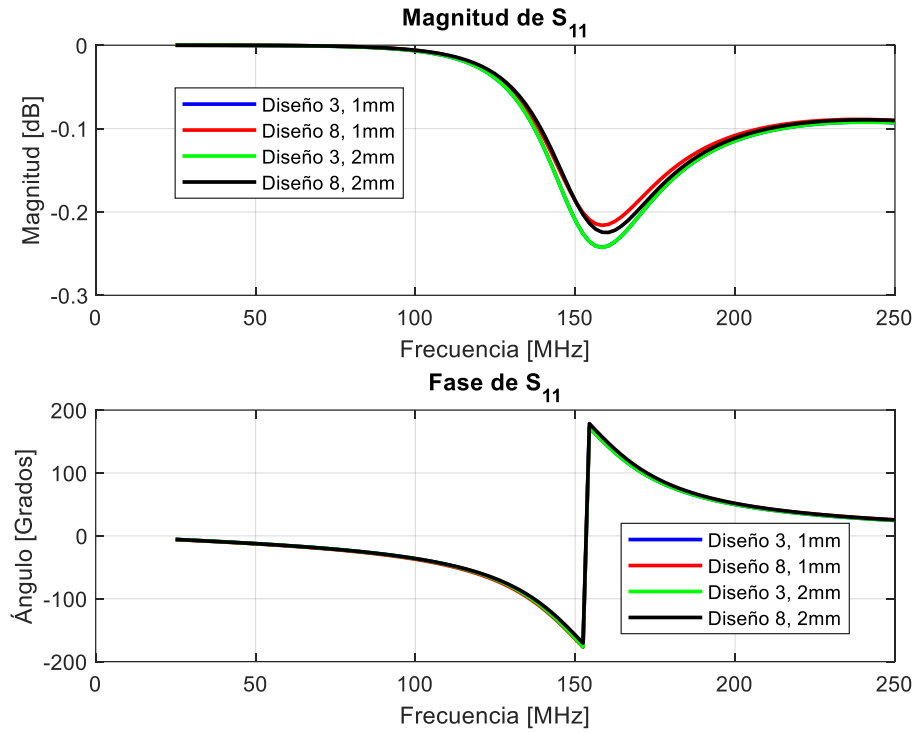


Fig. 4.2 Comparación de la magnitud y fase del diseño (3) y (8)

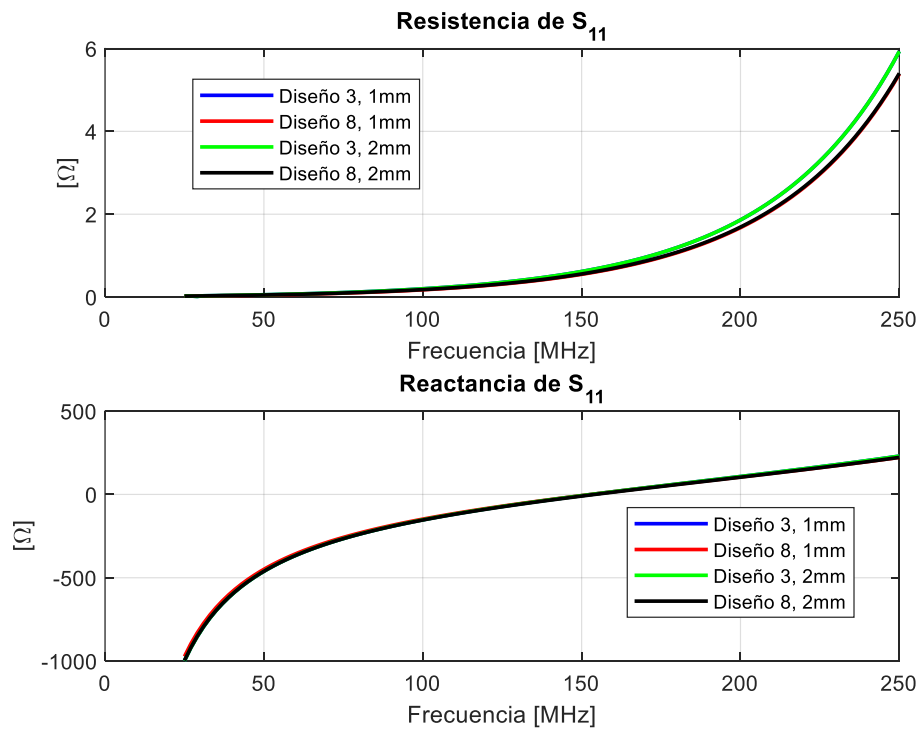


Fig. 4.3 Comparación de impedancia del diseño (3) y (8) con espesor

4.3.2 Simulación con elemento agua

En el entorno acuático se efectúan cuatro simulaciones. En dos de estas simulaciones, el plano tierra estará en contacto directo con la superficie del agua, mientras que en las otras dos estará elevado a una altura de 5 cm. Además, se contemplarán dos configuraciones del plano de simulación: una con agua infinita y otra con una superficie definida. La Tabla 4.1, muestra la simbología usada para diferenciar las diferentes alturas.

Tabla 4.1 Posición de la placa de aluminio en la simulación

Símbolos	Observación
d0	significa que la placa de aluminio hace contacto con la superficie del elemento
d5	significa que la placa de aluminio está a una altura de 5 cm de la superficie

A. Simulación con agua de base infinita

En esta sección, la simulación se realiza con la antena monopolo ubicada en el eje Z con un valor de 0, lo que indica que el plano tierra de la antena está en contacto directo con la superficie del agua. La Fig. 4.4, muestra los valores de permitividad y conductividad eléctrica utilizados para la simulación.

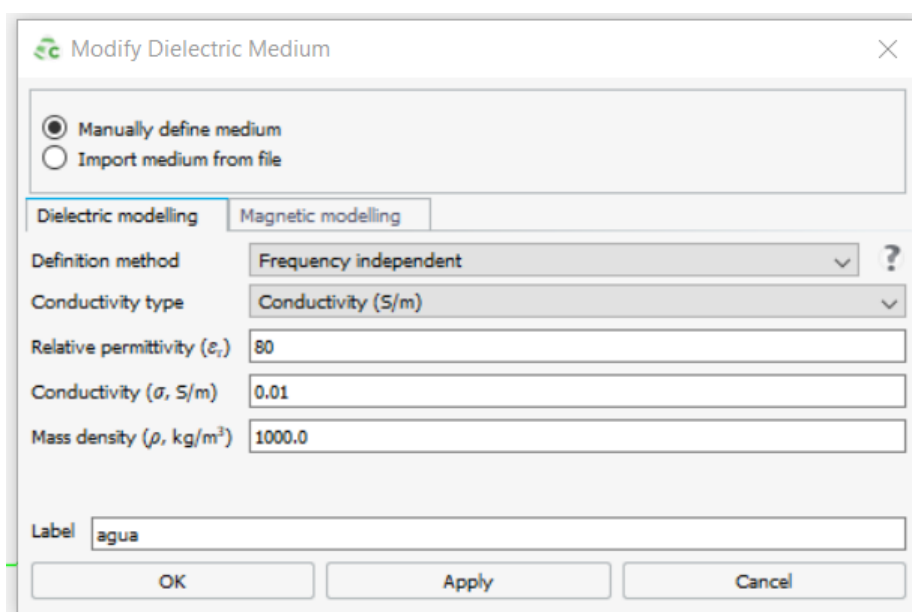


Fig. 4.4 Valor de permitividad y conductividad eléctrica del agua

Placa de aluminio en contacto con la superficie.

Las Fig. 4.5 y 4.6 muestran los resultados de la antena monopolo en un entorno de agua infinita, con la placa de aluminio en contacto directo con la superficie del agua. En ambas figuras, tanto la parte real e imaginaria como la magnitud y la fase presentan niveles bajos de ruido. En cuanto a los diseños y espesores, no se observan diferencias significativas, aunque la variación en la forma del plano tierra y grosor puede influir levemente en los resultados.

La Fig. 4.7 muestra el comportamiento de la impedancia. Alrededor de los 70 MHz se observa un aumento notable en la resistencia, acompañado de una disminución en la reactancia. Se presenta otro pico de resistencia aproximadamente a 150 MHz, aunque de menor magnitud; sin embargo, en este punto la reactancia es considerablemente mayor.

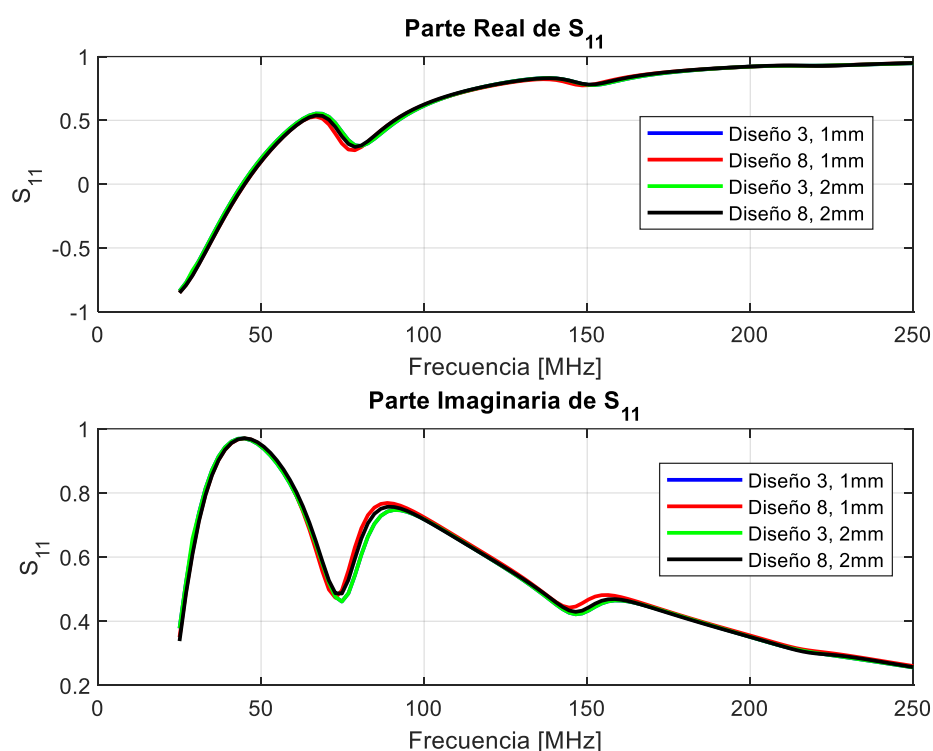


Fig. 4.5 Comparación de la parte real e imaginaria con agua infinita d0

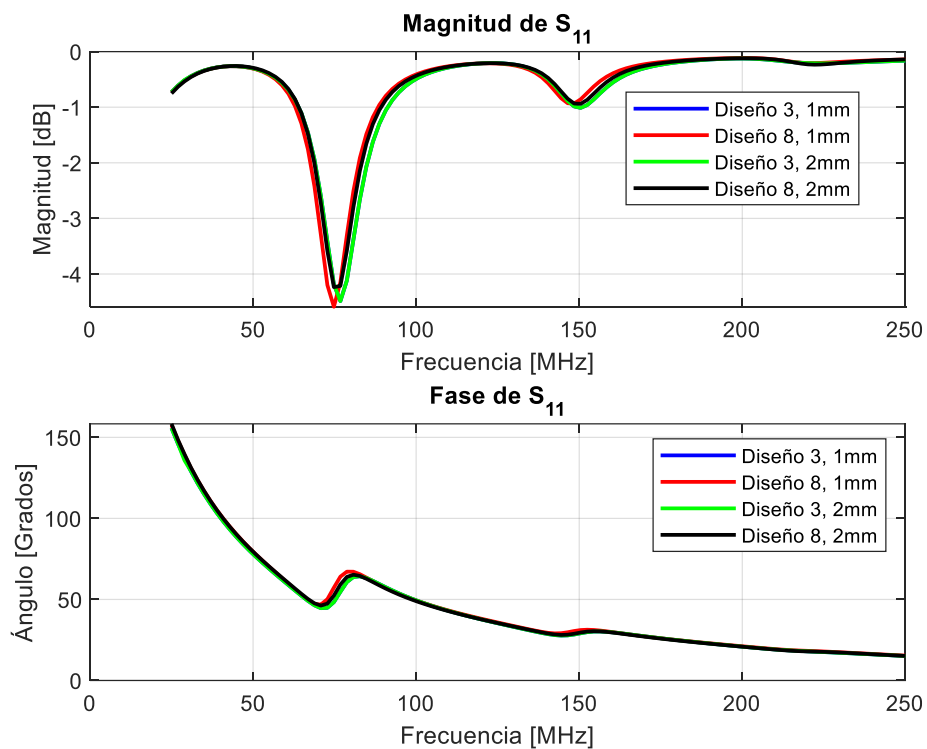


Fig. 4.6 Comparación de la magnitud y fase con agua infinita d0

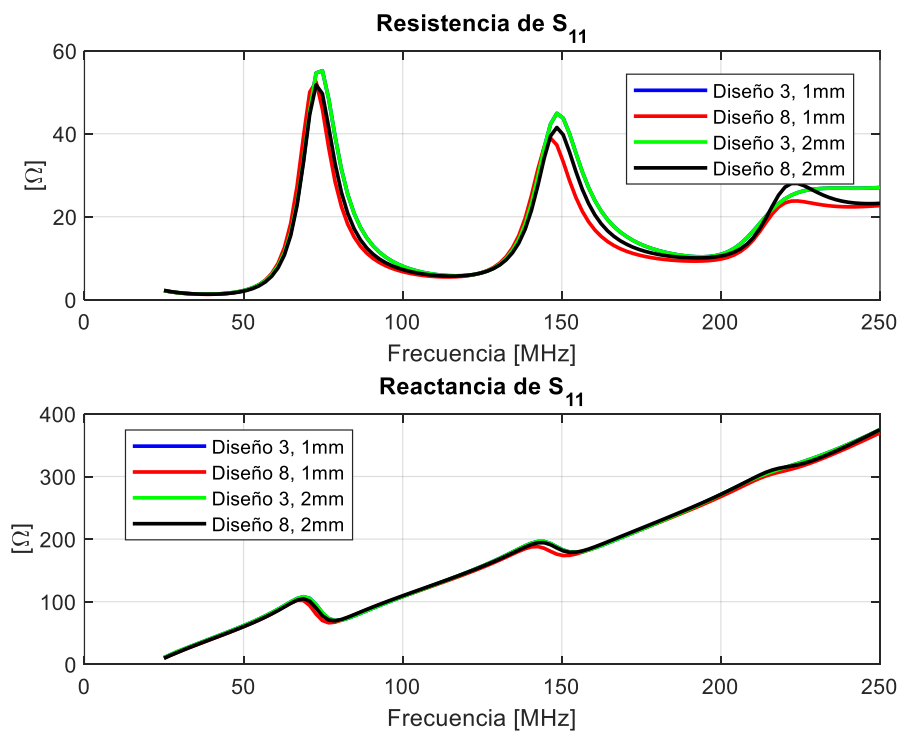


Fig. 4.7 Comparación de la impedancia con agua infinita d0

Placa de aluminio a una altura de 5 cm de la superficie.

Las Fig. 4.8 y 4.9 muestran los resultados de la antena monopolo en un entorno de agua infinita, con la placa de aluminio ubicada a una altura de 5 cm sobre la superficie del agua. Como se observa en las figuras, la parte real e imaginaria presentan un comportamiento similar al caso anterior; sin embargo, en la magnitud y la fase se evidencian diferencias más notables en comparación con la situación en la que la placa está en contacto directo con el agua. En este escenario, el diseño 3, 2 mm muestra una mejor adaptabilidad.

La Fig. 4.10 muestra el comportamiento de la impedancia. Se observa que alrededor de los 100 MHz la resistencia es menor en comparación con el valor alcanzado cerca de los 220 MHz. En cuanto a la reactancia, esta sigue una tendencia curva, siendo que el diseño 3, 2 mm presenta valores de reactancia superiores a las demás.

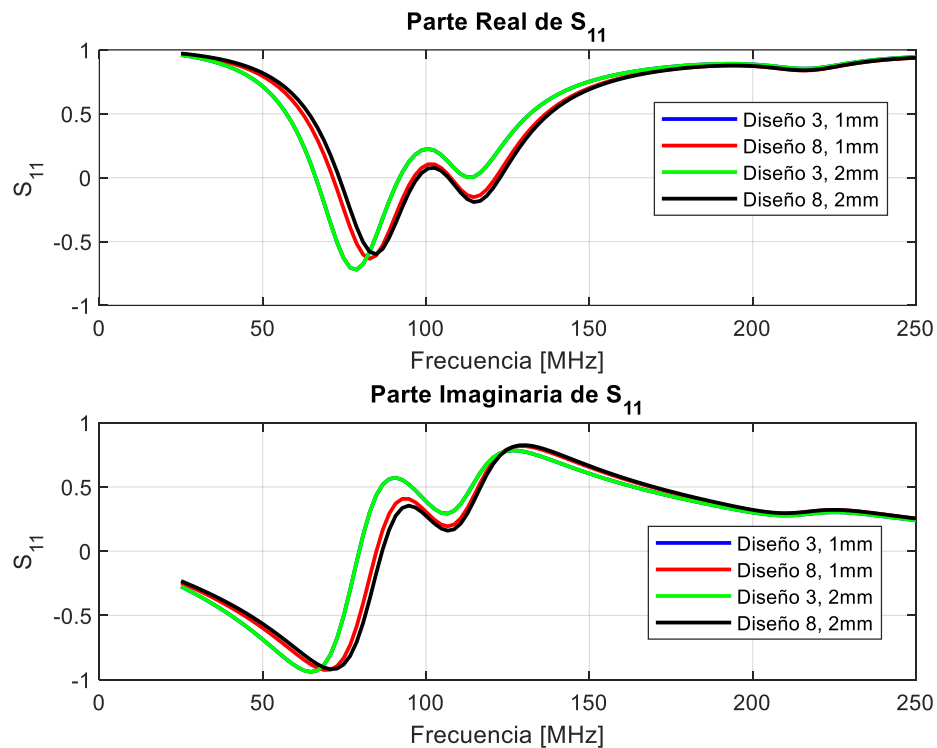


Fig. 4.8 Comparación de la parte real e imaginaria con agua infinita d5

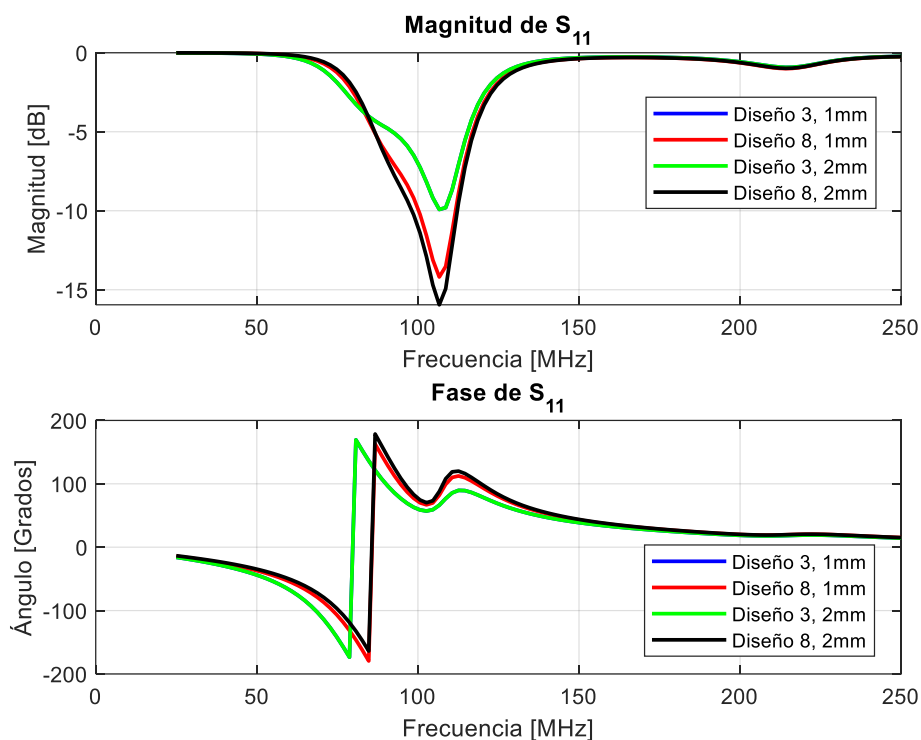


Fig. 4.9 Comparación de la magnitud y fase con agua infinita d5

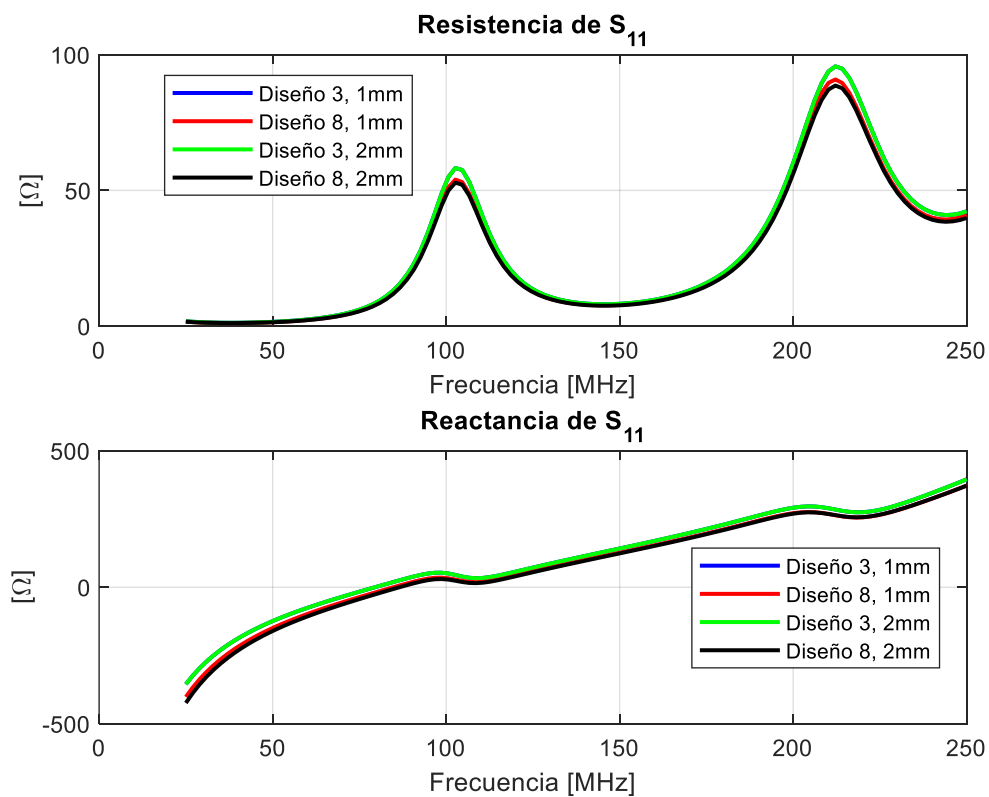


Fig. 4.10 Comparación de la impedancia con agua infinita d5

B. Simulación con agua de base cilíndrica

Para esta sección, se incorporó un cilindro en el diseño con el fin de simular un estanque de agua. El cilindro tiene un diámetro de 56 cm y una altura de 96 cm. Se mantienen los valores que muestra la Fig. 4.4. La Fig. 4.11 muestra la simulación en FEKO.

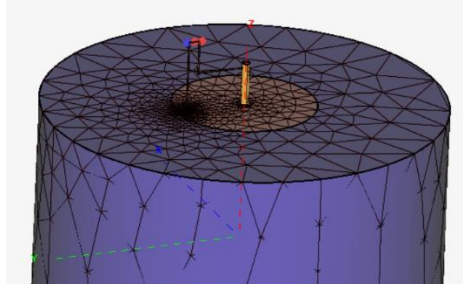


Fig. 4.11 Simulación de antena monopolo en el agua con base cilíndrica con d0.

Placa de aluminio está en contacto con la superficie.

Las Fig. 4.12 y 4.13, muestran los resultados de la antena monopolo en un entorno de agua cilíndrica, con la placa de aluminio en contacto directo con la superficie del agua. A diferencia del caso de agua infinita, en esta simulación se utiliza un volumen definido mediante un cilindro de agua con un diámetro de 56 cm y una altura de 97 cm. La parte real e imaginaria presentan mayores perturbaciones a lo largo del rango de frecuencia. Para los de espesor de 2 mm, existe un claro desfase en comparación con el de 1 mm, esto se demuestre en la magnitud y fase.

La Fig. 4.14, muestra el comportamiento de la impedancia. Se aprecia que la resistencia presenta múltiples picos a lo largo del rango de frecuencia, siendo el más alto alrededor de los 70 MHz. En cuanto a la reactancia, se observa una caída más pronunciada en ese mismo punto.

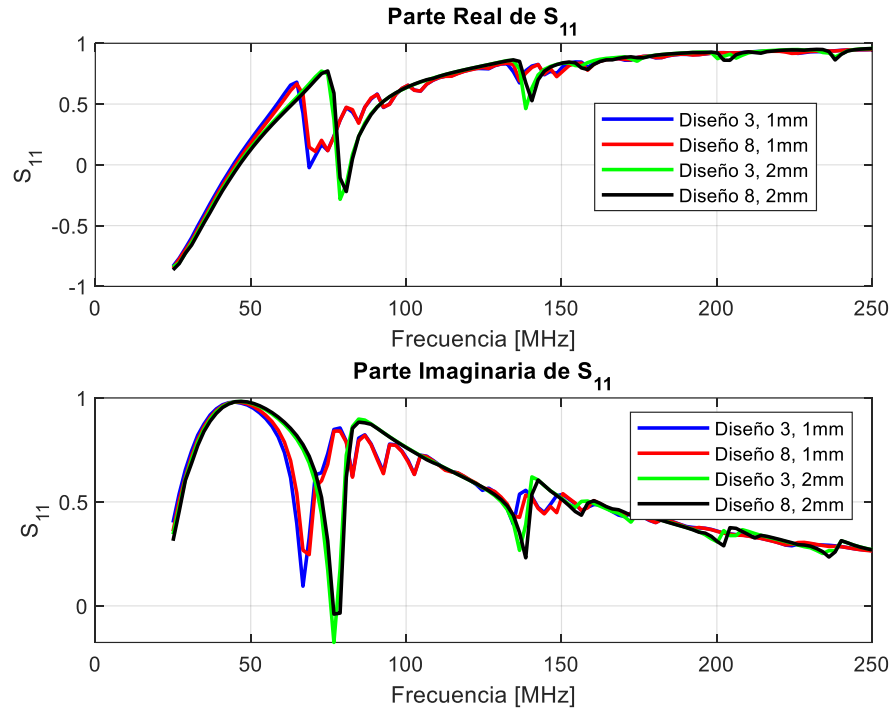


Fig. 4.12 Comparación de la parte real e imaginaria con agua cilíndrica d0

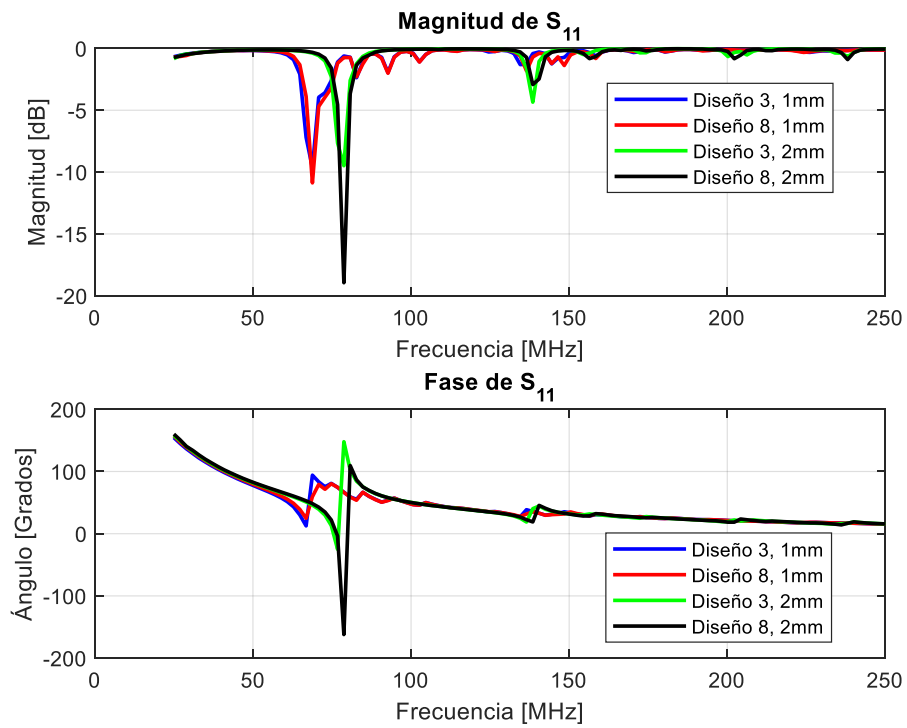


Fig. 4.13 Comparación de la magnitud y fase con agua cilíndrica d0

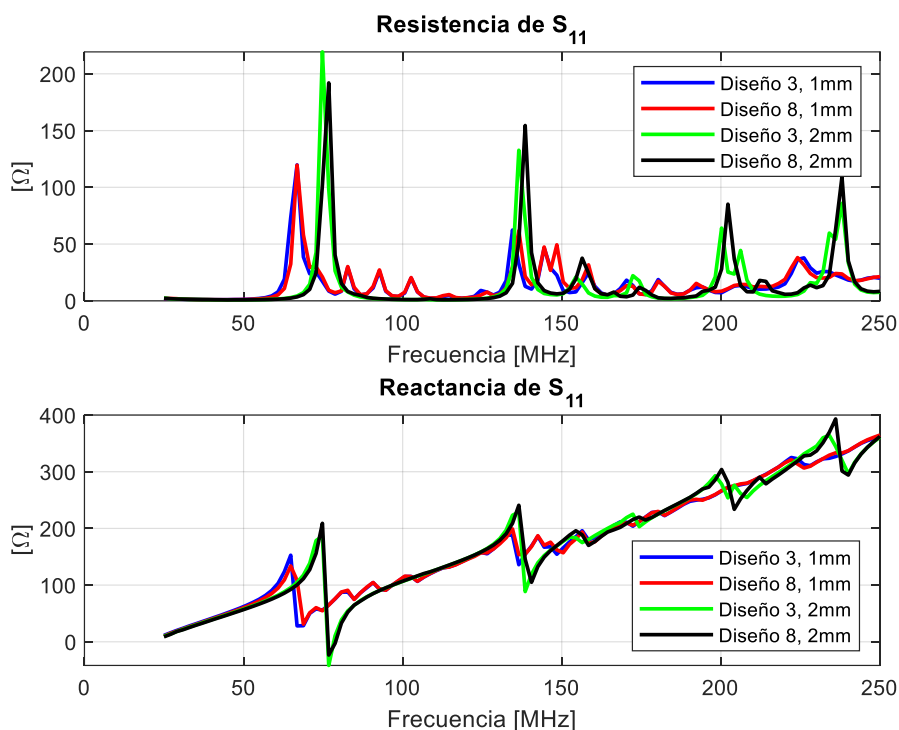


Fig. 4.14 Comparación de la impedancia con agua cilíndrica d0

Placa de aluminio está a una altura de 5 cm de la superficie.

Las Fig. 4.15 y 4.16, muestran los resultados de la antena monopolo en un entorno de agua con base cilíndrica, donde la placa de aluminio está ubicada a una altura de 5 cm sobre la superficie. Como se observa, existe un mayor nivel de ruido en la parte real e imaginaria, siendo más pronunciado en el diseño 3, 1 mm. En cuanto a la magnitud y la fase, también se presenta un nivel elevado de ruido, especialmente en torno a los 100 MHz.

La Fig. 4.17, muestra el comportamiento de la impedancia. A una frecuencia de aproximadamente 100 MHz, se observa un pico notable de resistencia. Sin embargo, cerca de los 200 MHz se presenta un valor aún mayor de resistencia, acompañado de un aumento significativo en la reactancia.

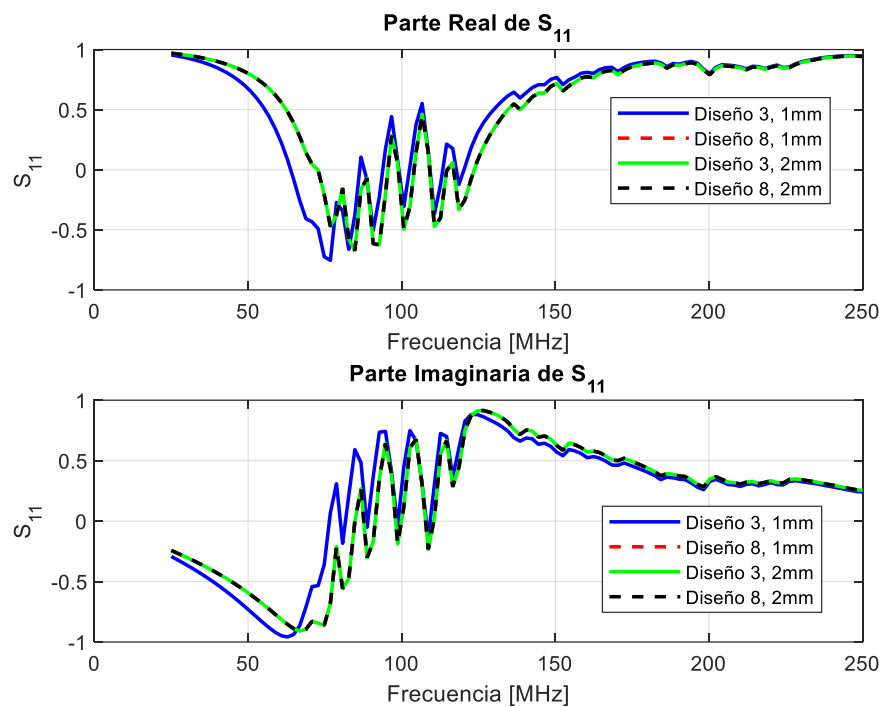


Fig. 4.15 Comparación de la parte real e imaginaria con agua cilíndrica d5

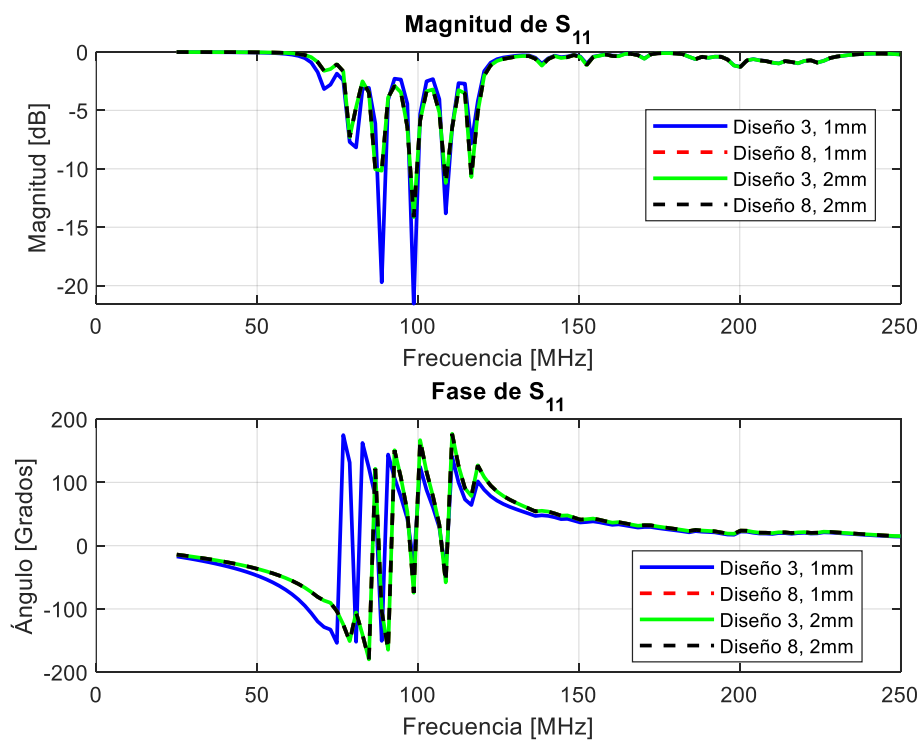


Fig. 4.16 Comparación de la magnitud y fase con agua cilíndrica d5

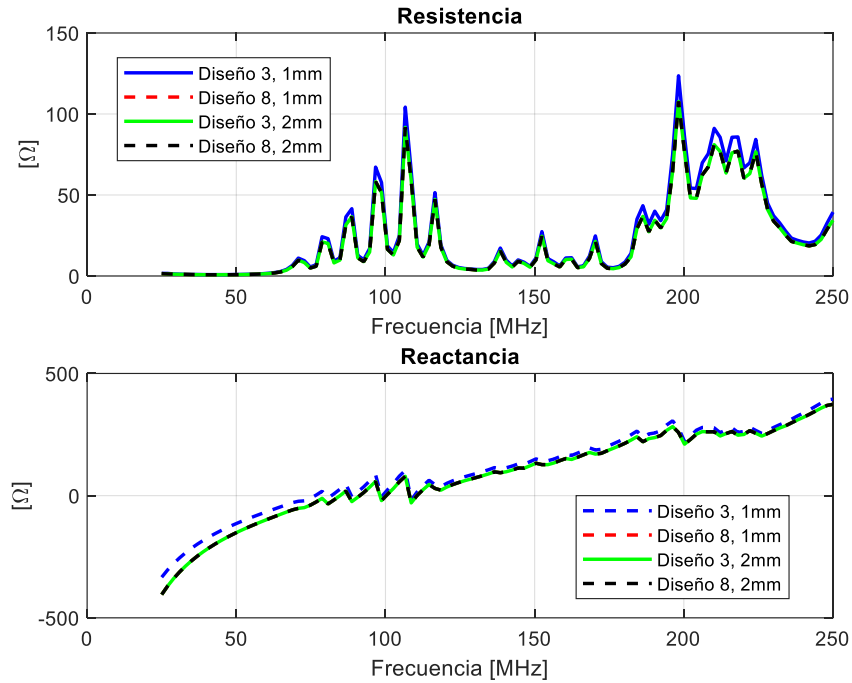


Fig. 4.17 Comparación de la impedancia con agua cilíndrica d5

4.3.3 Simulación con elemento suelo

Para la simulación del suelo, se utilizarán los mejores valores obtenidos por Héctor Muñoz [3] para la permitividad y la conductividad eléctrica, que son 3 y 0,04132 S/m, respectivamente. Al tratarse de tierra natural, se considerará una densidad de masa de 1500 kg/m³.

Placa de aluminio está en contacto con la superficie.

Las Fig. 4.18 y 4.19, presentan los resultados del instrumento en el entorno de suelo, donde la placa de aluminio está en contacto directo con la superficie. En la simulación se asignaron valores fijos de permitividad y conductividad eléctrica, utilizando los mejores datos obtenidos por Héctor Muñoz. Como se observa en las figuras, los valores de la parte real e imaginaria son idénticos para ambos diseños y espesores, donde se mantienen estables, sin presencia de perturbaciones. Lo mismo ocurre con la magnitud y la fase.

La Fig. 4.20, muestra el comportamiento de la impedancia. La resistencia presenta un crecimiento exponencial a lo largo del rango de frecuencia, mientras que la reactancia muestra una tendencia lineal.

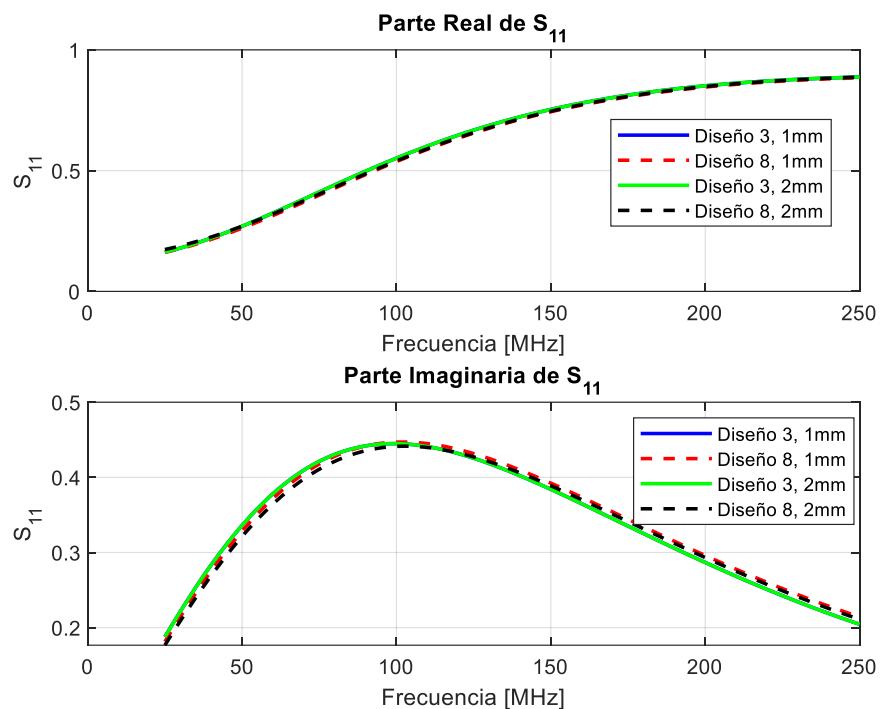


Fig. 4.18 Comparación de la parte real e imaginaria con suelo infinito d0

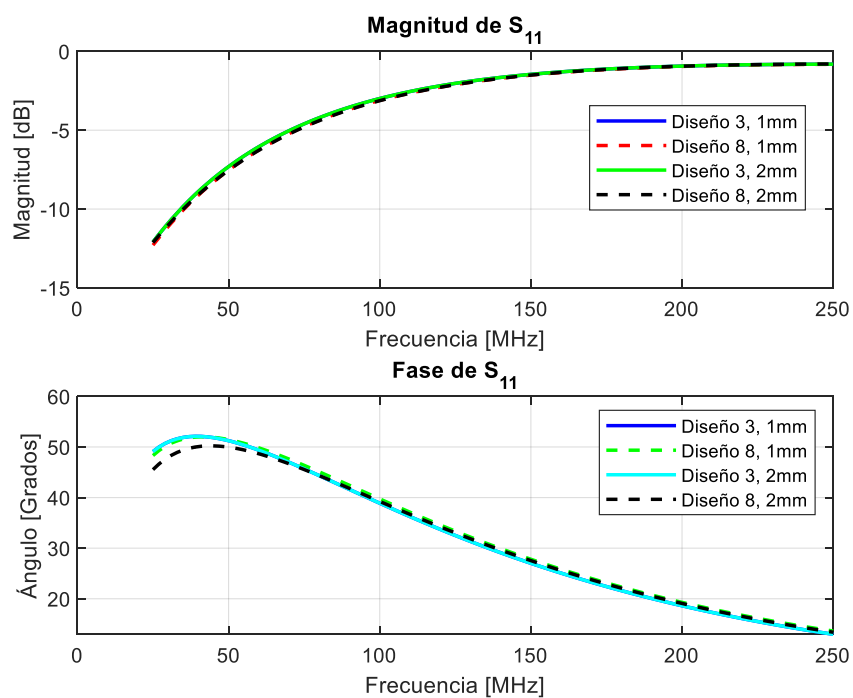


Fig. 4.19 Comparación de la magnitud y fase con suelo infinito d0

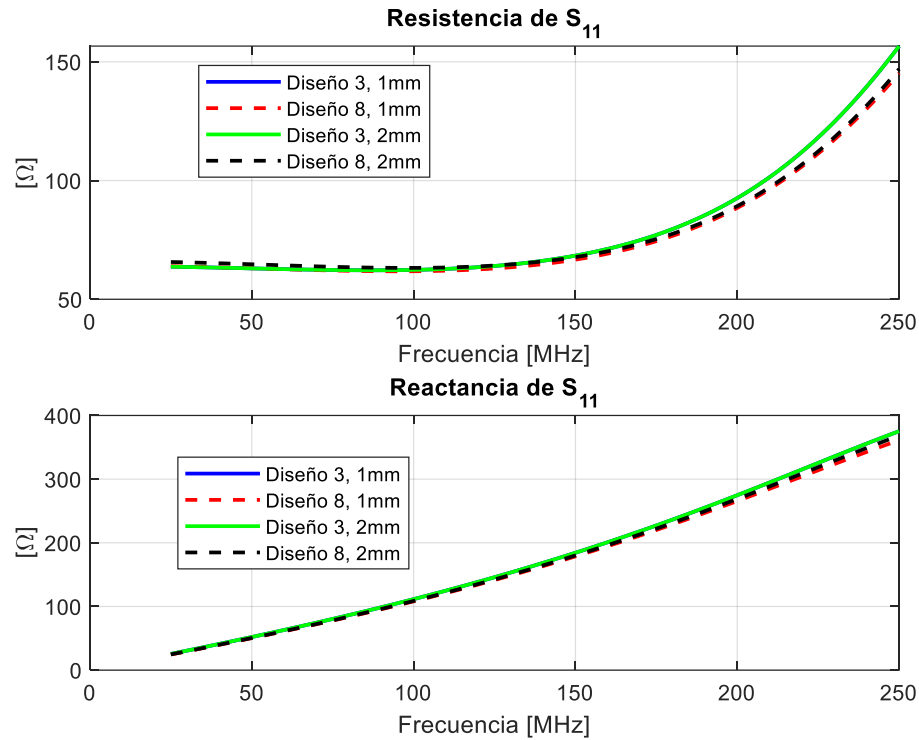


Fig. 4.20 Comparación de la impedancia con suelo infinito d0

Placa de aluminio está a una altura de 5 cm de la superficie.

Las Fig. 4.21 y 4.22, muestran los resultados de la antena monopolo en un entorno de suelo, donde la placa de aluminio está ubicada a una altura de 5 cm sobre la superficie. Como se observa, la parte real e imaginaria no presentan perturbaciones y se mantienen sumamente estables. El diseño 3, 2 mm muestra una frecuencia ligeramente menor en comparación con el diseño 8. En cuanto a la magnitud y la fase, ambas se mantienen igualmente estables.

La Fig. 4.23, muestra el comportamiento de la impedancia. La resistencia presenta un crecimiento exponencial: a mayor frecuencia, mayor es el valor de la resistencia. En cuanto a la reactancia, después de cruzar por cero, muestra un comportamiento lineal ascendente.

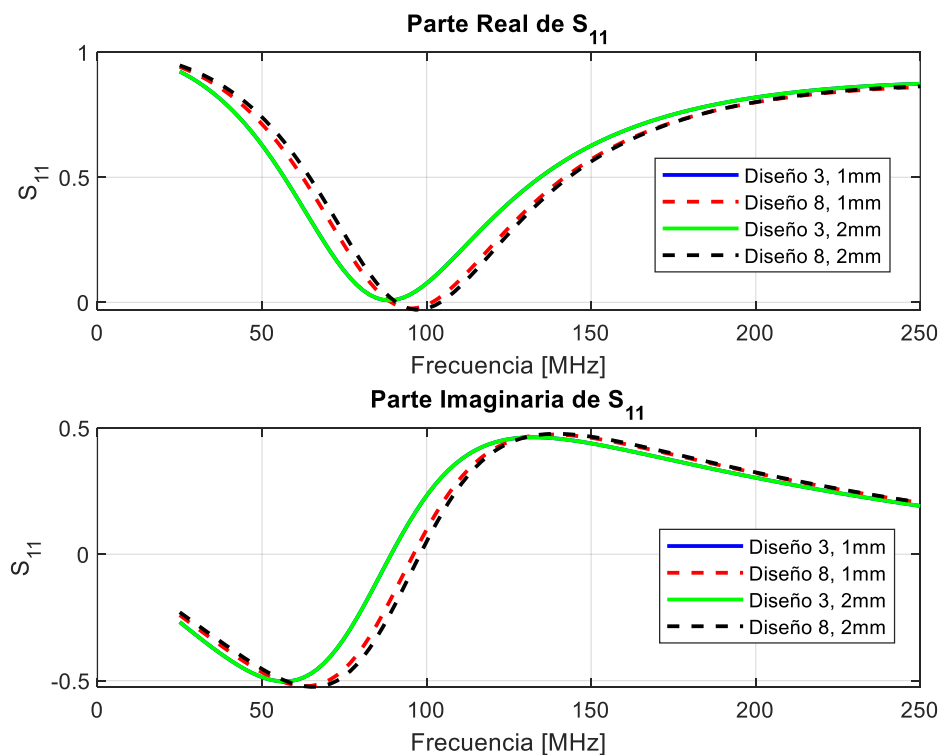


Fig. 4.21 Comparación de la parte real e imaginaria con suelo infinito d5

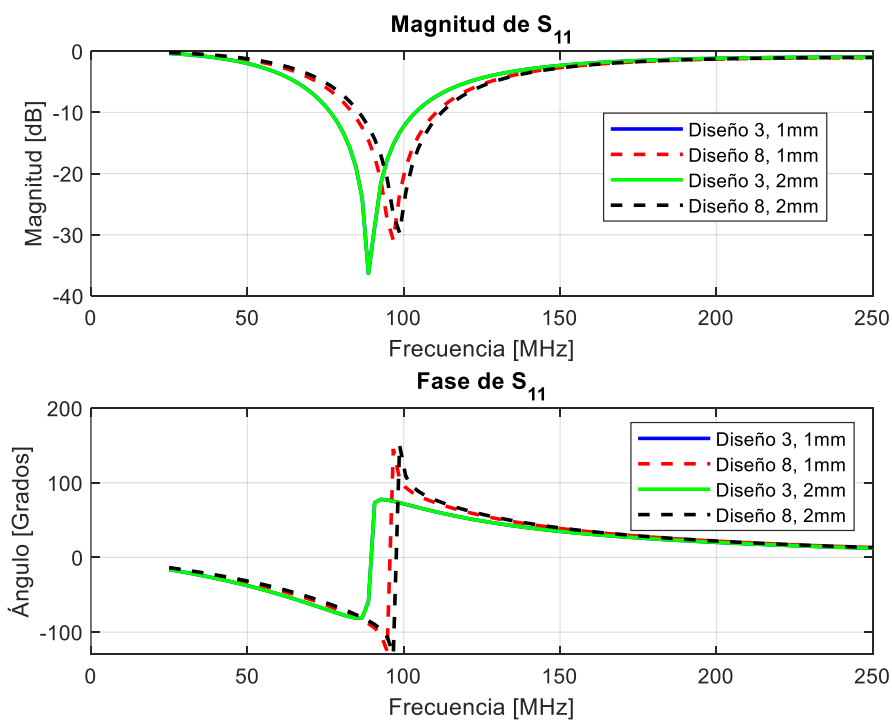


Fig. 4.22 Comparación de la magnitud y fase con suelo infinito d5

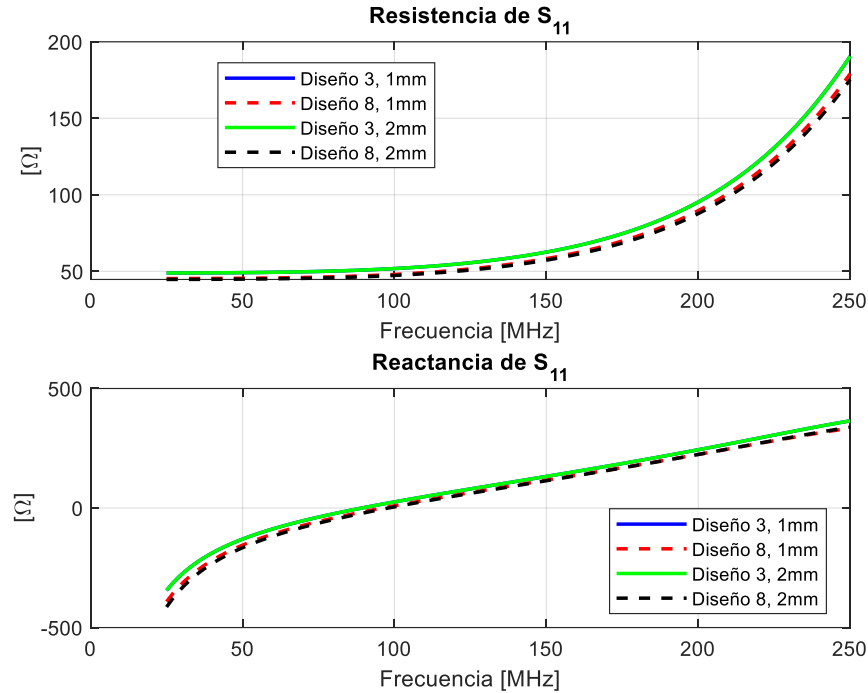


Fig. 4.23 Comparación de la impedancia suelo infinito d5

4.4. Discusión y Conclusiones

Los resultados de las simulaciones en los entornos de aire, agua y suelo presentan diferencias notables entre sí. En el caso del aire, aunque el software FEKO simula bajo condiciones ideales, los resultados no muestran perturbaciones en ninguno de los dos diseños.

En el entorno acuático, los resultados varían dependiendo de la distancia entre la placa de aluminio y la superficie del agua. Cuando la placa está en contacto directo con la superficie, se presentan algunas perturbaciones, aunque son mínimas. Sin embargo, cuando se utiliza un volumen definido (como el cilindro de agua), las perturbaciones se vuelven más frecuentes e intensas. Además, al observar los gráficos, se puede concluir que la distancia entre la placa de aluminio y la superficie es un factor clave: a mayor separación, es más probable que se generen perturbaciones en la señal.

En cuanto al entorno de suelo, los resultados se mantienen estables, con poca o ninguna perturbación. Este comportamiento está influenciado por los valores de permitividad y conductividad eléctrica utilizados, los cuales no fueron seleccionados al azar, sino que corresponden a las mejores mediciones obtenidas por Héctor Muñoz en su estudio previo.

Capítulo 5. Construcción de la antena y resultados de mediciones de aire y agua

5.1. Introducción

En el siguiente capítulo se presentará el diseño seleccionado y la construcción de la antena monopolo que será utilizada para realizar las mediciones en terreno. Asimismo, se expondrán los resultados obtenidos de las mediciones del parámetro S_{11} en los medios de agua y aire. Posteriormente, se llevará a cabo una comparación con las simulaciones realizadas en FEKO, con el fin de corroborar el desempeño del dispositivo en la estimación de la permitividad relativa y la conductividad eléctrica. Para complementar este análisis, se emplea el Error Cuadrático Medio definido en la ecuación (3.1).

5.2. Elección de diseño de la antena monopolo

El diseño de antena seleccionado corresponde al N.º 8, decisión que se fundamenta en tres razones principales. En primer lugar, se realizó una modificación en la geometría del plano de tierra: mientras que el diseño propuesto por Héctor Muñoz [3] utiliza un plano cuadrado, en este caso se optó por cambiar su forma con el fin de analizar cómo dicha variación influye en las mediciones. En segundo lugar, se consideraron las dimensiones empleadas: el diseño N.º 8 presenta un diámetro de 20 cm, lo que representa una superficie mayor en comparación con el dispositivo de Héctor Muñoz, cuyo plano de tierra mide 15×15 cm. En tercer lugar, se evaluaron distintas configuraciones mediante mediciones en espacio libre, utilizando los diseños 3 y 8 con espesores de 1 y 2 mm. De las cuatro variantes analizadas, el diseño N.º 8 con un espesor de 2 mm mostró el ECM más bajo.

Como se observa en la Tabla 5.1, se realizó una comparación del error cuadrático medio para determinar qué antena presenta mayor similitud con la medición. La placa redonda de 2 mm es la que muestra el ECM más bajo de todas, lo que indica que los datos de medición obtenidos con esta configuración son los más cercanos a la simulación. Además, se evidencia que la forma redonda ofrece mejores resultados que la forma cuadrada. El espesor de la placa también influye en el desempeño de la antena: las placas de 1 mm presentan un ECM superior a $4,0 \times 10^{-2}$, mientras que las de 2 mm se mantienen por debajo de este valor. Por estas razones, se utilizará la placa de aluminio redonda de 2 mm para las mediciones posteriores.

Tabla 5.1 Cálculo de ECM de la medición de aire

Placa Aluminio	Real	Imaginario	Total
Cuadrado 1mm	2,9091e-2	1,3254e-2	4,2345e-2
Cuadrado 2mm	3,0846e-2	1,4421e-2	4,5267-2
Redondo 2mm	2,5671e-2	1,2051e-2	3,7723-2
Redondo 1 mm	2,6733-2	1,1653-2	3,8387-2

5.3. Construcción de la antena monopolo

Los materiales empleados para la construcción corresponden principalmente a una plancha de aluminio y un tubo de cobre. A continuación, se describirán en detalle las distintas partes y componentes utilizados. Finalmente, al cierre de este apartado, se presentará la antena monopolo completamente construida, lista para la realización de las mediciones del parámetro S_{11} .

5.3.1 Materiales

A. Placa de aluminio

Para el plano de tierra de la antena monopolo se empleó una plancha de aluminio circular con un diámetro de 20 cm, a la cual se le realizó una perforación central de 21 mm de diámetro, como se muestra en la Fig. 5.1. Esta apertura permite instalar el conductor vertical de la antena, garantizando al mismo tiempo que no exista contacto eléctrico directo entre el plano de tierra y el elemento radiante. Adicionalmente, se efectuó una perforación secundaria de 4 mm de diámetro, ubicada a 85 mm de la perforación central, destinada a la conexión del cable negativo del conector SMA.

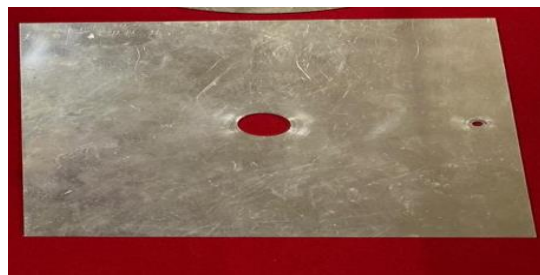


Fig. 5.1 Plano de tierra cuadrada de la antena monopolo

B. Tubo de cobre y prensa de cable

El conductor vertical de la antena se construyó a partir de un tubo de cobre con una longitud de 25,5 cm y un diámetro de 12 mm, como se muestra en la Fig. 5.2. En uno de sus extremos se realizó una perforación de 4 mm de diámetro, destinada a la conexión de los cables que transmiten y reciben la señal desde el NANO VNA. Para fijar y aislar el conductor vertical del plano de tierra se utilizó

una prensa de cables de plástico, la cual cumple la función de soporte mecánico sin generar conductividad eléctrica entre ambos elementos. Debido a esta característica dieléctrica, dicho componente no fue considerado en la simulación realizada en FEKO.

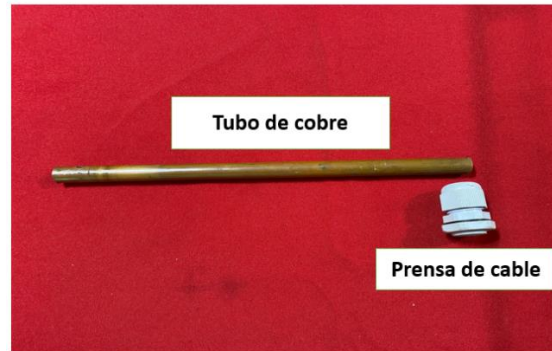


Fig. 5.2 Elemento conductor vertical de la antena monopolo (tubo de cobre) y prensa de cable

C. Cables de transmisión

Para la conexión de la antena con el conector SMA hembra se emplearon cables de 1 mm de diámetro en el conductor vivo. Los extremos de estos cables fueron terminados con terminales tipo ojo, lo que facilita la fijación tanto al elemento vertical como al plano de tierra. La parte roja corresponde al lado positivo y se conecta al tubo de cobre, mientras que la parte negra corresponde al lado negativo y se conecta a la plancha de aluminio que actúa como plano de tierra, como se muestra en la Fig. 5.3.

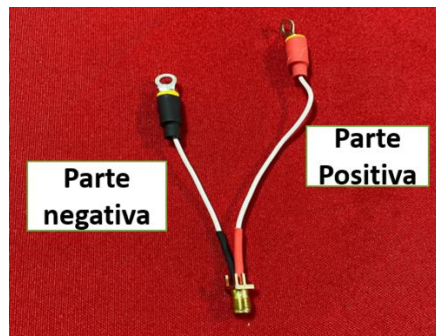


Fig. 5.3 Cable de transmisión utilizado entre la antena monopolo y el NANO VNA

D. Conector SMA hembra

El conector SMA hembra se utiliza como interfaz para transmitir la señal desde la antena hacia el analizador de redes vectoriales, permitiendo de esta manera la caracterización de sus parámetros eléctricos, como se muestra en la Fig. 5.4.



Fig. 5.4 Conector SMA hembra

E. Nano VNA

El analizador de redes vectoriales utilizado corresponde a un Nano VNA, el cual permite obtener el comportamiento del parámetro S_{11} en función de la frecuencia del medio con el que está en contacto la antena monopolo, como se muestra en la Fig. 5.5. Cabe destacar que este dispositivo es capaz de realizar mediciones de distintos parámetros de dispersión (S-parámetros); sin embargo, para el presente proyecto se considerará exclusivamente el análisis del S_{11} , por ser el más relevante para la caracterización de la antena.



Fig. 5.5 Equipo NANO VNA

5.3.2 Diseño estructural de la antena monopolo

Una vez reunidos los materiales, se procede con el ensamblaje físico de la antena como se muestra en la Fig. 5.6.

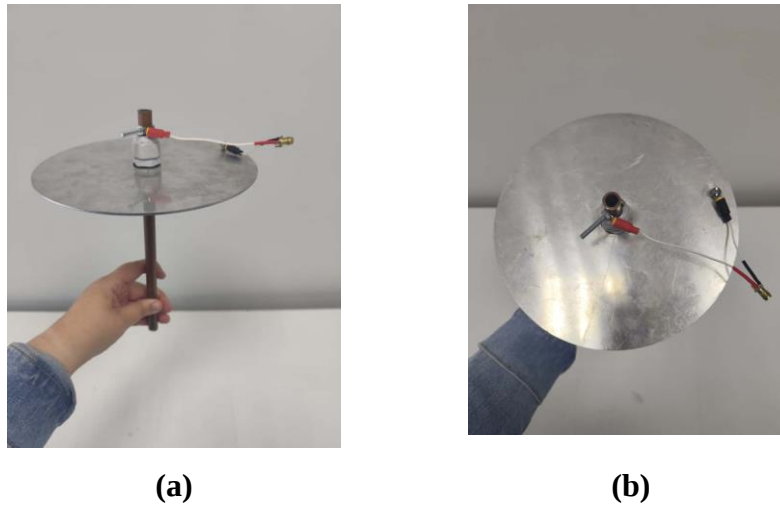


Fig. 5.6 Medidor de permitividad relativa y conductividad eléctrica base antena monopolo
(a) Vista de perfil (b) Vista aérea

5.4. Medición en elementos

5.4.1 Simulación y medición en espacio libre (Aire)

Para la simulación y la medición en espacio libre se consideraron dos factores principales. En primer lugar, la antena monopolo se ubicó a una altura de 2,10 m sobre el suelo, con el propósito de evitar que el terreno influyera en las mediciones reales. Esta altura fue seleccionada debido a que, durante la etapa de simulación, se evaluaron distintas distancias, y se observó que por encima de 2 m los resultados permanecían prácticamente invariables. En segundo lugar, se consideró que el aire no posee conductividad eléctrica, por lo que en la simulación se modeló con conductividad nula y una permitividad relativa igual a 1. Para las mediciones en terreno se ocupa un cable de 20 m.

A. Lugar de medición

Las mediciones en espacio libre se realizaron en las cuatro canchas ubicadas en Hualpén, Chile, como se muestra en la Fig. 5.7. Este lugar fue seleccionado debido a que no presenta obstáculos que pudieran interferir o contaminar las mediciones, como árboles, edificios u otras estructuras. Cumplir con esta condición es fundamental, ya que la presencia de obstáculos podría alterar los datos obtenidos y comprometer la precisión de los resultados.



Fig. 5.7 Ubicación de medición en espacio libre en Google Earth

B. Simulación en espacio libre

La simulación en aire se construyó de la forma más realista posible. Se incluyó un terreno de suelo con valores de permitividad relativa igual a 3 y una conductividad eléctrica de 0,04132 S/m, obtenidos de la tesis de Héctor Muñoz [3]. La antena se situó a una altura de 2,10 m, replicando las condiciones empleadas en las mediciones experimentales, como se muestra en la Fig. 5.8.

En la medición en terreno se emplearon tres tubos de PVC con el objetivo de mantener la estructura lo más estable posible y libre de curvaturas. Los tubos fueron unidos mediante huincha aisladora y asegurados con amarres plásticos en la parte superior, media e inferior, garantizando la rigidez de la antena durante las mediciones. Además, se utilizaron tres estacas de madera para fijar la base de los tubos. Todos los elementos de soporte fueron contruidos con materiales dieléctricos, como madera y plástico, con el fin de evitar cualquier influencia eléctrica sobre la antena. Esta elección asegura que las mediciones del parámetro S_{11} sean precisas, al minimizar perturbaciones o acoplamientos no deseados que podrían generarse si se emplearán materiales conductores en la estructura de soporte.



Fig. 5.8 Medición de antena monopolo en espacio libre en FEKO

(a) FEKO (b) Terreno

C. Resultados de la simulación y medición en terreno

La Fig. 5.9 presenta el comportamiento de la magnitud y la fase obtenidas en la simulación y en la medición, representadas en color verde segmentado y azul continuo, respectivamente. En el caso de la magnitud, la simulación exhibe una respuesta más suave en comparación con la medición, la cual presenta ruido y caídas más pronunciadas. Esta diferencia puede atribuirse a las pérdidas en los materiales, tales como los cables o la estructura de soporte de la antena. En cuanto a la fase, se observa una buena concordancia entre la simulación y la medición, lo que indica que la resonancia y la coincidencia de las señales fueron adecuadamente capturadas.

La Fig. 5.10 muestra el comportamiento de la parte real e imaginaria del S_{11} , tanto en la simulación como en la medición. En la parte real se observa que, a bajas frecuencias, el valor comienza cercano a 1 y, al llegar al rango de 140–150 MHz, desciende hasta aproximadamente -1 , punto en el cual ocurre la resonancia de la antena; posteriormente, a frecuencias más altas, vuelve a incrementarse hasta alcanzar nuevamente un valor cercano a 1. La medición presenta una magnitud ligeramente mayor. En cuanto a la parte imaginaria, se aprecia que inicia en cero, desciende hasta alrededor de -1 , y en el rango de 140–150 MHz vuelve a aumentar, cruzando nuevamente por cero, lo que coincide con la condición de resonancia. Las discrepancias observadas entre simulación y medición en este parámetro pueden atribuirse principalmente a interferencias externas durante el proceso de adquisición de datos.

La Fig. 5.11 presenta el comportamiento de la resistencia y la reactancia de la antena. En la resistencia se observa que la simulación se mantiene en $0\ \Omega$ hasta alcanzar el rango de 140 a 150 MHz, correspondiente a la resonancia de la antena, para luego aumentar suavemente. En contraste, la medición muestra un incremento más brusco, llegando a valores cercanos a $100\ \Omega$. En cuanto a la reactancia, ambas curvas siguen la misma tendencia: comienzan en valores negativos y, al atravesar el rango de 140 a 150 MHz, pasan a valores positivos. No obstante, en la medición la magnitud resulta más pronunciada que en la simulación.

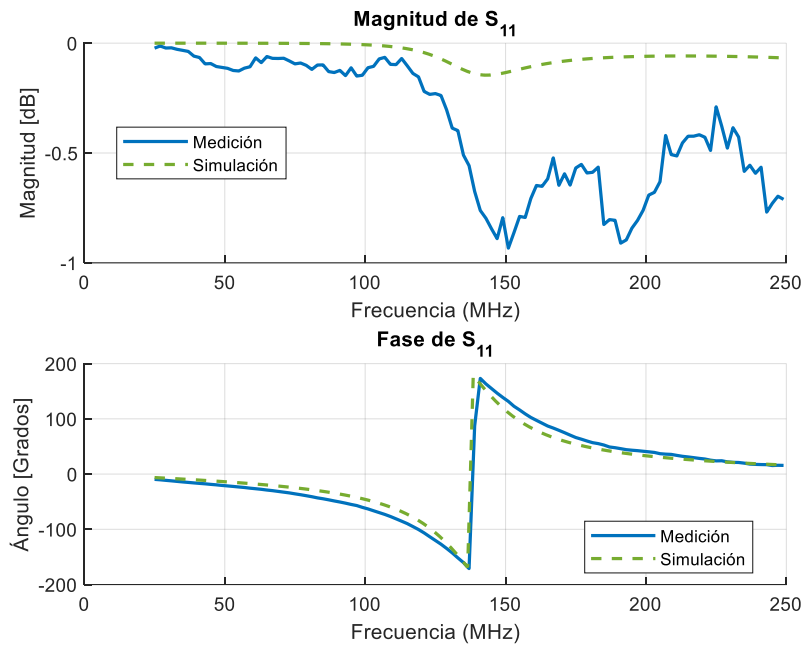


Fig. 5.9 Comparación de la magnitud y fase del coeficiente reflexión aire

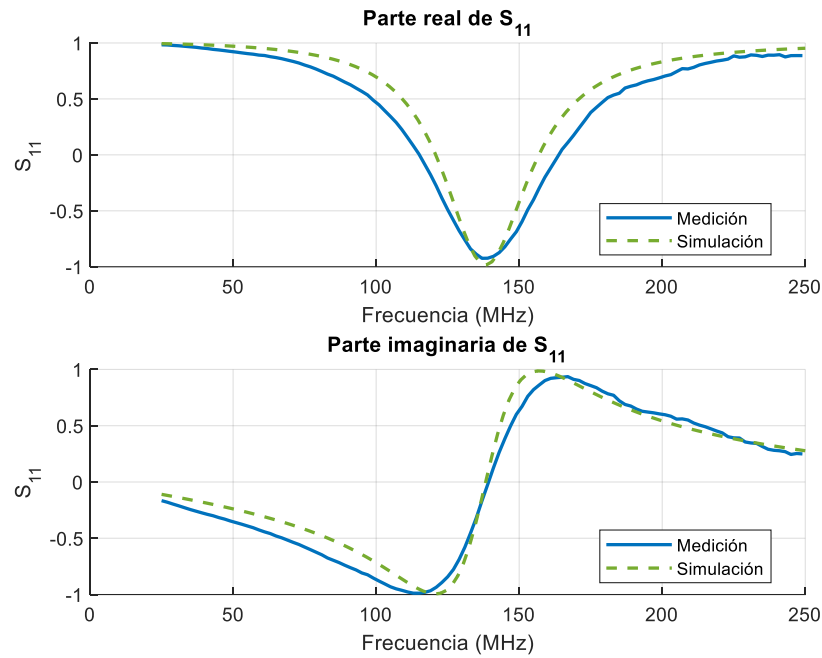


Fig. 5.10 Comparación de la parte real e imaginario del coeficiente reflexión aire

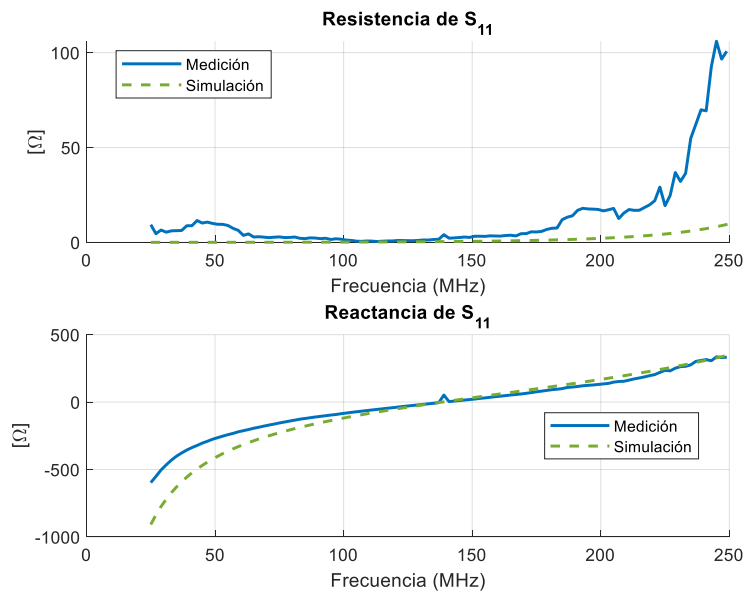


Fig. 5.11 Comparación de la resistencia y reactancia del coeficiente reflexión aire

5.4.2 Simulación y medición en el agua

Para realizar las simulaciones y mediciones en el estanque de agua, se deben considerar condiciones distintas a las de las mediciones en espacio libre. En primer lugar, se contemplan dos

configuraciones: la primera corresponde a la placa de aluminio en contacto con la superficie del agua (sin estar sumergida), y la segunda a la placa ubicada a una altura de 5 cm sobre dicha superficie. Además, en la medición es necesario incluir la estructura de soporte de la antena monopolo, de modo que se cumplan las condiciones establecidas. Tanto en la simulación como en la medición se emplea un tambor de plástico de 98 cm de altura y 60 cm de diámetro, junto con el mismo cable de 20 m.

A. Lugar de medición

Las mediciones para el estanque de agua se realizaron en la cancha de béisbol ubicada en San Pedro de la Paz, Chile, como se muestra en la Fig. 5.12. Este lugar fue seleccionado porque no presenta obstáculos que pudieran interferir o alterar los resultados. El objetivo de la medición es que la antena tenga como único entorno de observación el estanque de agua. Además, se consideró la cercanía del sitio, lo que facilitó el transporte de aproximadamente 180 litros de agua necesarios para el experimento.



Fig. 5.12 Ubicación de medición en el agua en Google Earth

B. Simulaciones tomadas en agua

La simulación para el caso del agua se realizó construyendo un cilindro de 98 cm de altura y 60 cm de diámetro. La placa de aluminio se colocó lo más cerca posible de la superficie del agua. En el escenario con una separación de 5 cm, la antena simplemente se elevó hasta alcanzar dicha altura, como se muestra en la Fig. 5.13.

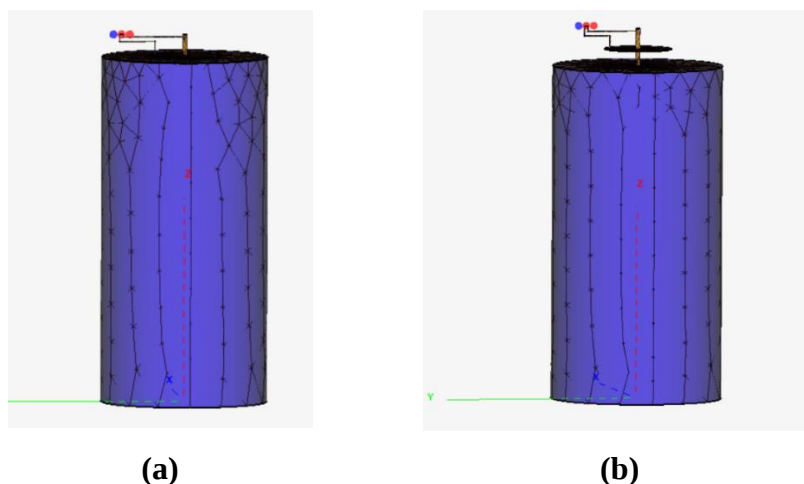


Fig. 5.13 Medición de antena monopolo en el agua en FEKO

(a) Antena monopolo tocando superficie (b) Antena monopolo a 5 cm de altura

En cuanto a los parámetros eléctricos del agua, se consideró una permitividad relativa de 80. Respecto a la conductividad eléctrica, esta se trató como una variable, ya que depende de la presencia y concentración de minerales disueltos en el agua.

Para la medición en el estanque de agua se utilizaron cajones plásticos y una barra de madera como soporte no conductor para la antena monopolo. El dispositivo se aseguró con una soga y se empleó un inclinómetro para mantener la antena estable durante la medición, como se muestra en la Fig. 5.14.

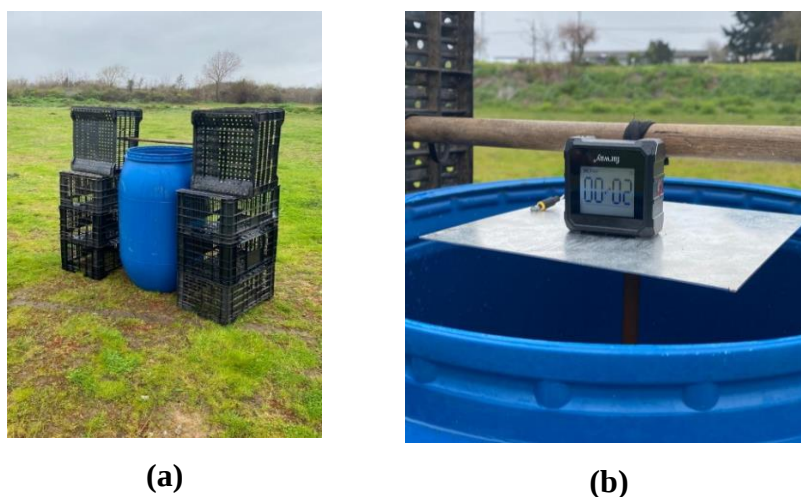


Fig. 5.14 Medición de la antena monopolo en agua en terreno

(a) Estructura de la medición de agua (b) Inclinómetro sobre la antena

Se empleó una huincha de medir para comprobar que la distancia entre la placa de aluminio y la superficie del agua fuese exactamente de 5 cm, como se muestra en la Fig. 5.15.



Fig. 5.15 Distancia de entre la superficie del agua y el plano tierra

C. Resultados de la simulación y medición en terreno

Medición de agua cuando la placa de aluminio está tocando la superficie

Se realizaron más de 20 simulaciones para el caso del agua, con el objetivo de determinar el valor adecuado de su conductividad eléctrica. Si bien la permitividad relativa se considera constante con un valor de 80, la conductividad es la variable de interés, ya que depende de la composición del agua. De la primera ronda de simulaciones se seleccionaron ocho casos, correspondientes a aquellos que presentaron un menor valor del error cuadrático medio, indicador que permite evaluar el grado de similitud entre la medición y la simulación.

Como se observa en la Tabla 5.2, se presentan los valores utilizados para la conductividad eléctrica del agua, los cuales fueron tomados del informe de Héctor Muñoz [3]. Las simulaciones N°6 y N°7 muestran un menor valor de error cuadrático medio, por lo que se puede inferir que la conductividad eléctrica del agua se encuentra en el rango $[0.02, 0.03]$ S/m. A partir de este resultado, se realizó una segunda ronda de simulaciones dentro de dicho intervalo con el fin de obtener una estimación más precisa.

Tabla 5.2 Primera ronda de simulaciones del agua cuando el plano tierra está tocando la superficie

Simulación	Conductividad (S/m)	ECM
1°	0.001	0.08862
2°	0.1	0.097279
3°	0.002	0.092809
4°	0.01	0.06789
5°	0.05	0.088857
6°	0.02	0.066211
7°	0.03	0.06683
8°	0.04	0.067889

De la Tabla 5.3, se observa que la simulación N°5, con una conductividad de 0.021 S/m, presenta el valor más bajo del error cuadrático medio, siendo este de 0.06533. Por lo tanto, se puede estimar que la conductividad aproximada del agua, cuando la antena está en contacto con su superficie, es de 0.021 S/m.

Tabla 5.3 Segunda ronda de simulaciones del agua cuando el plano tierra está tocando la superficie

Simulación	Conductividad (S/m)	ECM
1°	0.0205	0.065988
2°	0.025	0.067414
3°	0.02009	0.066066
4°	0.022	0.065921
5°	0.021	0.06533
6°	0.02109	0.066077
7°	0.0198	0.065816

Como se observa en las Fig. 5.16, 5.17 y 5.18, el comportamiento de los parámetros S_{11} utilizando los valores correspondientes a la simulación N°5 difiere de manera significativa respecto al obtenido en aire. En los gráficos se evidencia una mayor presencia de ruido en las mediciones realizadas en agua, mientras que la simulación presenta una respuesta más estable debido a que representa un modelo ideal. Por el contrario, las mediciones reales en agua muestran variaciones asociadas a la presencia, concentración y tipo de minerales disueltos en el medio.

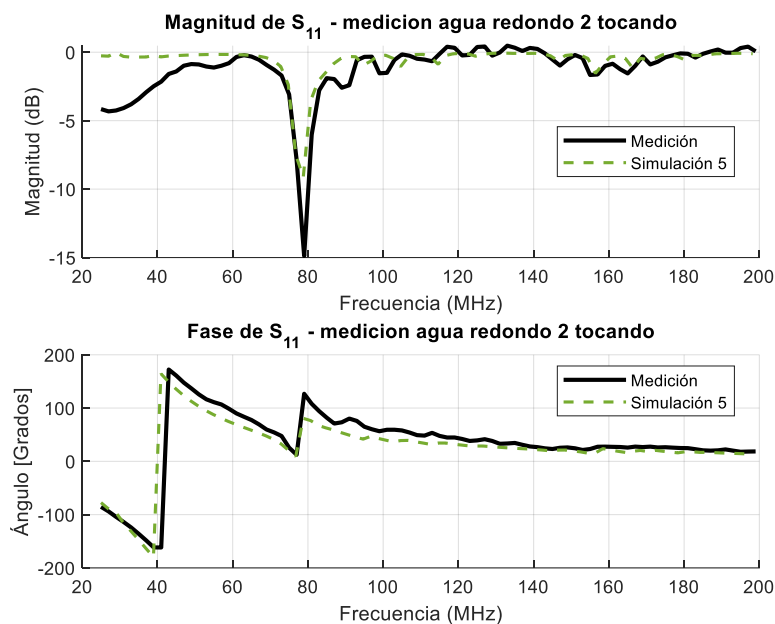


Fig. 5.16 Comparación de la magnitud y fase del coeficiente reflexión agua d0

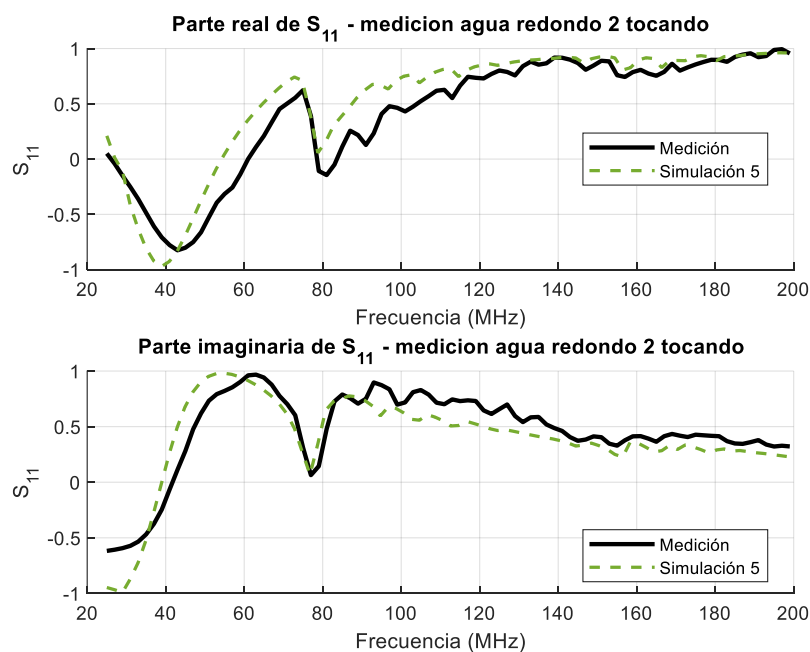


Fig. 5.17 Comparación de la parte real e imaginario del coeficiente reflexión agua d0

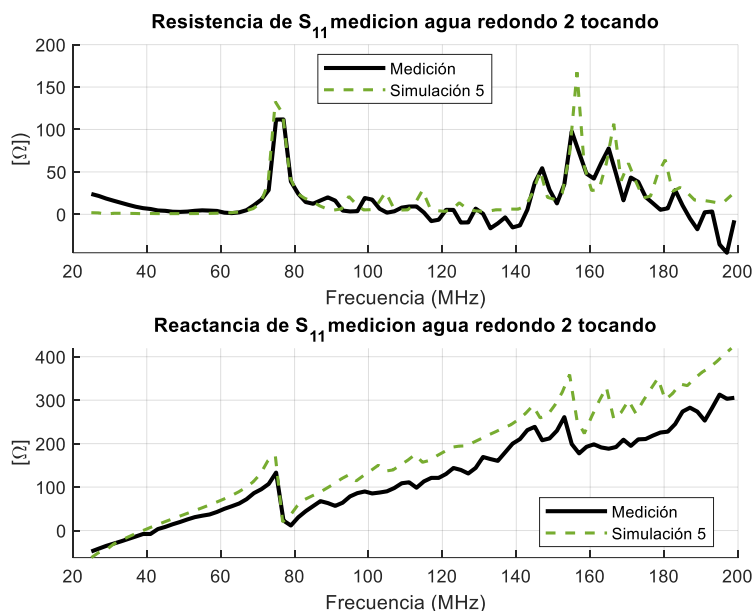


Fig. 5.18 Comparación de la resistencia y reactancia del coeficiente reflexión agua d0

Medición de agua cuando la placa de aluminio está a una altura de 5 cm de la superficie

En la Tabla 5.4 se muestran los valores de conductividad empleados en esta serie de simulaciones.

Tabla 5.4 Primera ronda de simulaciones del agua cuando el plano tierra está en altura de la superficie

Simulación	Conductividad (S/m)	ECM
1°	0.001	0.28481
2°	0.1	0.20155
3°	0.002	0.27135
4°	0.01	0.22081
5°	0.05	0.19627
6°	0.021	0.20209

Como se observa en la Tabla 5.4, cuando la antena se encuentra a una altura de 5 cm sobre la superficie del agua, se realizaron las simulaciones bajo las mismas condiciones que en el caso anterior. Se utilizó la misma conductividad obtenida previamente; sin embargo, el error cuadrático medio resultó mayor que el de la simulación N°5, que corresponde a una conductividad de 0.05 S/m. En teoría, la conductividad eléctrica debería ser la misma, ya que la permitividad relativa del agua se mantiene aproximadamente en 80 para todas las simulaciones y el agua utilizada es la misma. La única diferencia en esta serie de mediciones es la altura de la antena respecto a la superficie del agua.

Como se observa en la Fig. 5.19, 5.20 y 5.21, se presenta el comportamiento del sistema cuando la antena se encuentra a una altura de 5 cm sobre la superficie del agua. Este comportamiento difiere del caso en que la antena estaba en contacto directo con el agua, lo que indica que la altura puede influir en los valores obtenidos, especialmente en la conductividad eléctrica.

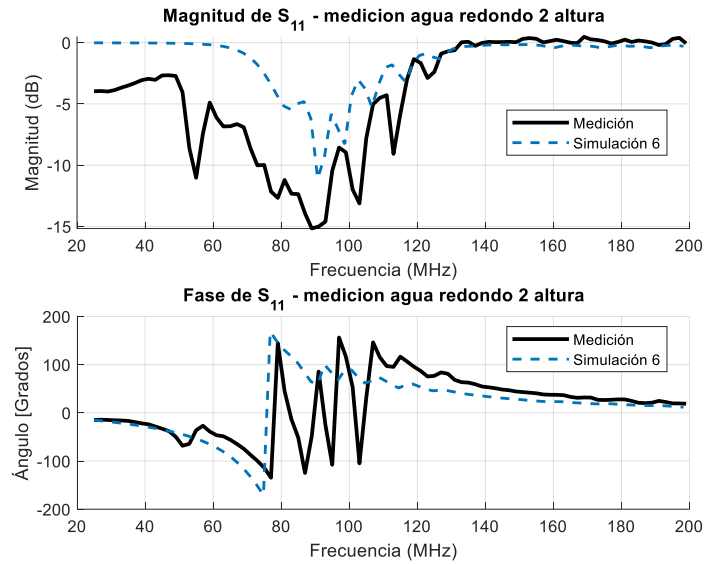


Fig. 5.19 Comparación de la magnitud y fase del coeficiente reflexión agua d5

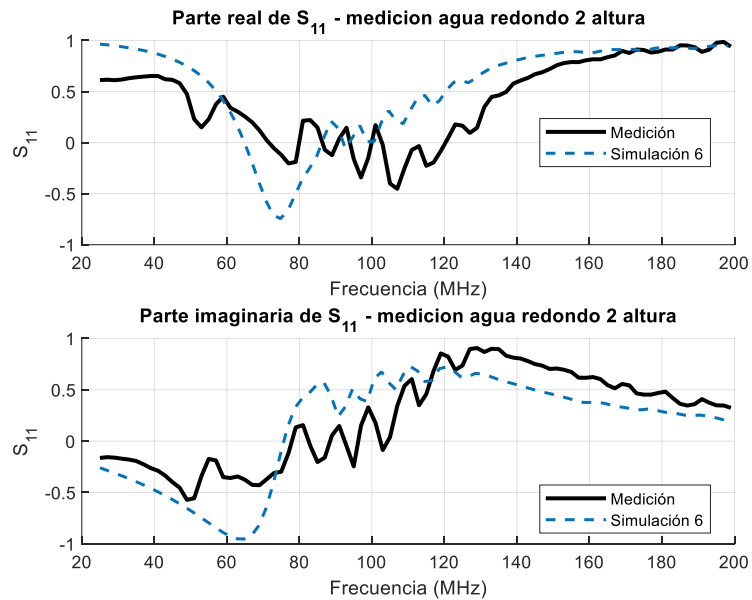


Fig. 5.20 Comparación de la parte real e imaginario del coeficiente reflexión agua d5

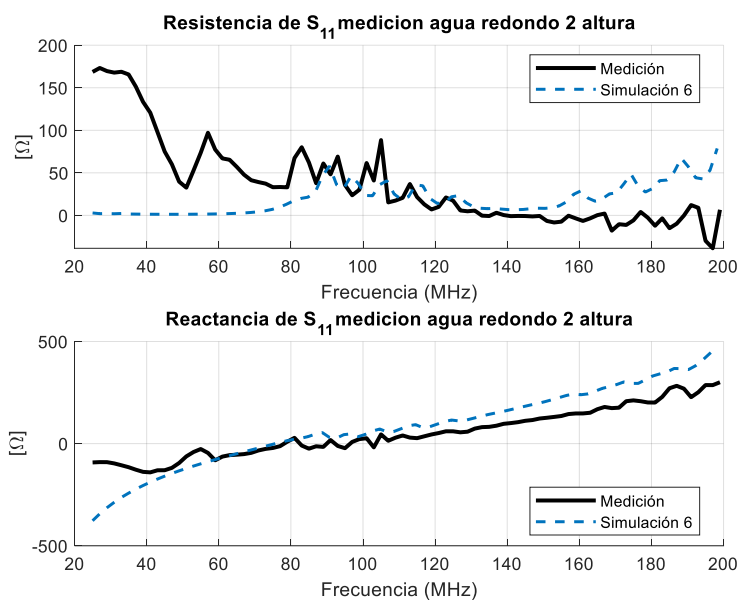


Fig. 5.21 Comparación de la resistencia y reactancia del coeficiente reflexión agua d5

Se llevó a cabo una segunda ronda de simulaciones con el objetivo de obtener un valor más preciso de la conductividad eléctrica del agua, como se muestra en la Tabla 5.5. La simulación que presentó el menor error cuadrático medio fue la N°3, con un ECM de 0.19624 y una conductividad de 0.04 S/m. Las Fig. 5.22, 5.23 y 5.24, muestran su comportamiento.

Tabla 5.5 Segunda ronda de simulaciones del agua cuando el plano tierra está en altura de la superficie

Simulación	Conductividad (S/m)	ECM
1°	0.0405	0.19625
2°	0.03	0.19769
3°	0.04	0.19624

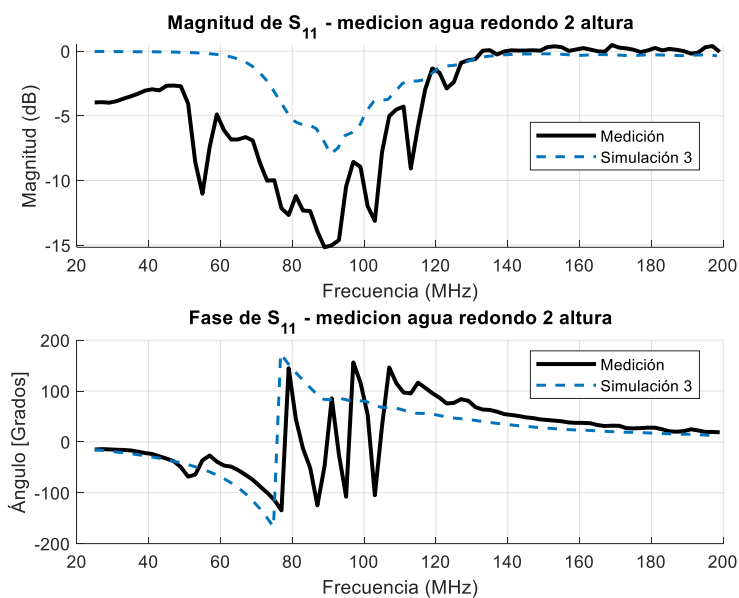


Fig. 5.22 Comparación de la magnitud y fase del coeficiente reflexión agua optimizado

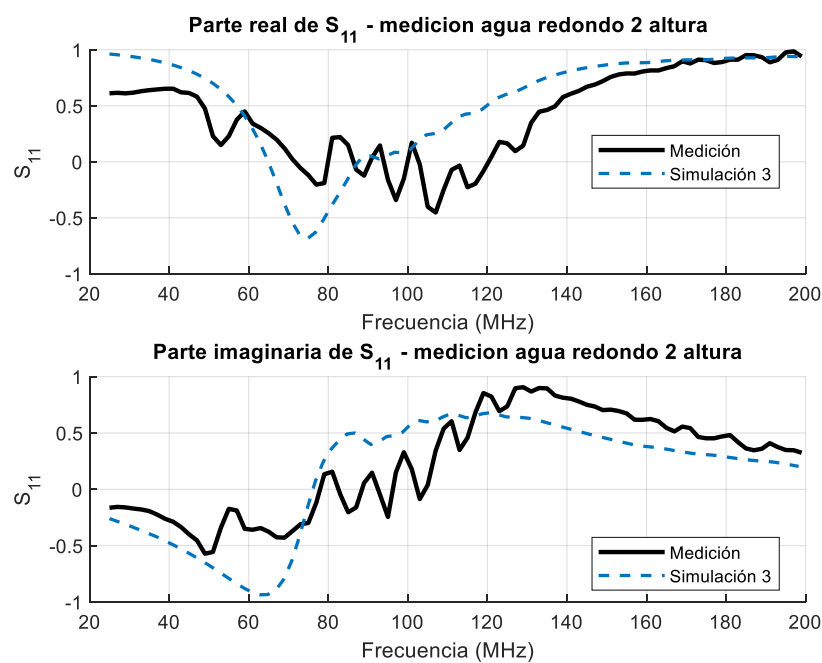


Fig. 5.23 Comparación de la parte real e imaginario del coeficiente reflexión agua optimizado

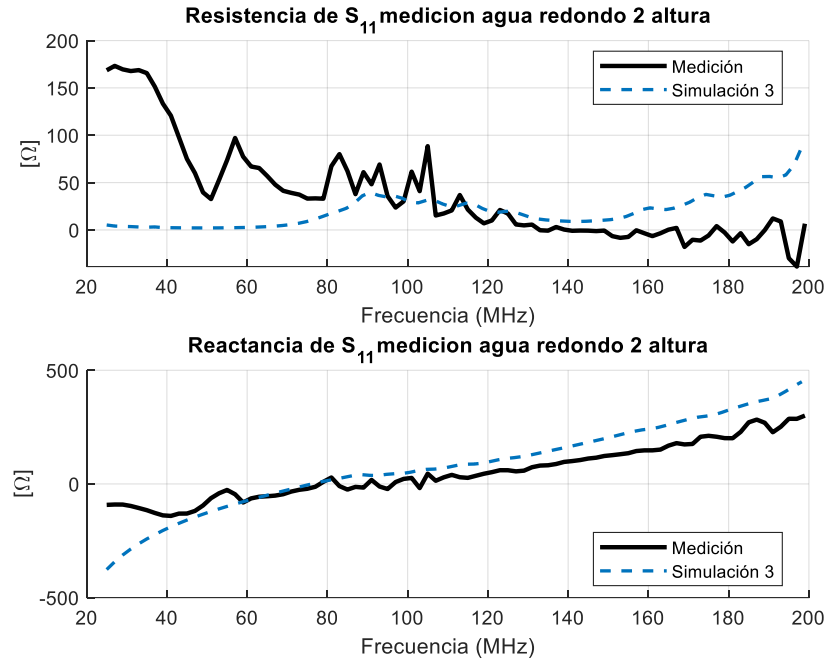


Fig. 5.24 Comparación de la resistencia y reactancia del coeficiente reflexión agua optimizado

5.5. Discusión y Conclusiones

De los resultados obtenidos en la simulación y en las mediciones de terreno, se pueden extraer varias conclusiones. En primer lugar, se destaca la elección de la antena monopolo, seleccionando el diseño N°8 con un espesor de 2 mm.

En segundo lugar, se considera la ubicación donde se realizaron las mediciones en aire y agua. Las mediciones en aire se llevaron a cabo en Hualpén, Chile, debido a que en intentos anteriores se habían presentado datos anómalos, por lo que se decidió cambiar de locación. En el caso del agua, se seleccionó un lugar libre de obstáculos y cercano, con el fin de facilitar el transporte de los aproximadamente 180 litros de agua necesarios para el experimento.

En tercer lugar, se analizan las comparaciones entre las simulaciones en aire y en agua. Para el aire, no se presentaron mayores problemas, ya que los datos de medición y simulación son bastante semejantes, variando principalmente en magnitud y desfase. Las pequeñas diferencias se deben a la presencia de obstáculos dentro del perímetro de medición; aunque existía una distancia de 20 m entre

la antena y la persona, la estructura de soporte de la antena también pudo influir en los valores. En FEKO, la simulación es ideal, sin interferencias ni obstáculos que alteren los resultados.

En el caso del agua, se observa una diferencia significativa en los valores de conductividad eléctrica según la altura de la antena: cuando la antena toca la superficie del agua y cuando se encuentra a cierta altura. Este fenómeno se atribuye a la presencia de aire en el espacio entre la antena y el agua en las mediciones en altura, lo que afecta los resultados obtenidos.

Con la información obtenida en las mediciones y su análisis, se puede suponer que, a medida que aumenta la altura entre la superficie del terreno y el plano tierra de la antena, el error cuadrático medio tiende a incrementarse, siempre que se mantenga la conductividad eléctrica determinada para el caso en que el plano tierra está en contacto directo con la superficie.

De la Tabla 5.6 se observa que, para obtener mediciones precisas de las características dieléctricas del agua, se opta por que el plano tierra de la antena esté en contacto directo con la superficie del terreno.

Tabla 5.6 Comparación de las mediciones entre la placa de aluminio tocando la superficie y a 5 cm de altura

Medición del terreno	Conductividad eléctrica (S/m)	ECM
Plano tierra tocando superficie del agua	0.021	0.06533
Plano tierra en altura 5 cm	0.021	0.20209
Plano tierra en altura 5 cm ajustado	0.04	0.19624

Capítulo 6. Mediciones de permitividad y conductividad eléctrica en el suelo

6.1. Introducción

En este capítulo se presentan mediciones de suelos cuyos valores de permitividad relativa y conductividad eléctrica son desconocidos. Debido a esto, la metodología para trabajar y analizar las mediciones en comparación con la simulación cambia. En el capítulo anterior se realizó un análisis comparando la curva del parámetro S_{11} en función de la frecuencia obtenida de la medición con la correspondiente a la simulación en FEKO. En ese caso, se consideraba, tanto para el análisis visual como para el estadístico, que la curva proporcionada por FEKO determinaba si la medición era correcta.

En este capítulo, por el contrario, se tomará como referencia la curva obtenida por el Nano VNA para determinar la validez de la medición. Por esta razón, para estimar los valores de permitividad relativa y conductividad eléctrica, es necesario realizar múltiples simulaciones de dos variables con distintos valores de las características dieléctricas del suelo.

Una vez obtenida la tabla con los distintos valores de las propiedades del suelo, se calcula el error cuadrático medio entre la curva del Nano VNA y cada curva simulada. La curva que presente el menor ECM se seleccionará como la más representativa de la medición, permitiendo así estimar los valores de permitividad relativa y conductividad eléctrica del suelo.

Este método resulta más complejo que en el caso del aire, donde se conocen los valores de permitividad relativa y conductividad eléctrica, o del agua, donde solo se considera una variable (la conductividad eléctrica). En el suelo, en cambio, existen dos variables que deben ser estimadas simultáneamente, lo que aumenta la dificultad del análisis.

6.2. Medición de los parámetros S_{11} del suelo

6.2.1 Lugar de medición para el suelo

El lugar de la medición es el mismo donde se realizó las mediciones del agua. Como se muestra en la Fig. 5.12.

6.2.2 Medición de característica del suelo

El desarrollo de estas mediciones es similar al de los casos en aire y agua, utilizando un cable de 20 m. Sin embargo, en este caso se realizó una medición con el plano tierra en contacto directo con el suelo. Esto se debe a que, como se demostró en el capítulo anterior, la altura influye en los resultados de la medición. Por lo demás, el procedimiento de trabajo es el mismo, solo que ahora la medición se realiza directamente sobre el terreno.

El elemento conductor de la antena monopolo (tubo de cobre) se enterrará con la superficie del suelo, alcanzando las alturas previamente mencionadas. La Fig. 6.1 muestra la posición de la antena.



(a)



(b)

Fig. 6.1 Medición de suelo cuando el plano de tierra está en contacto con la superficie

(a) antena monopolo enterrada (b) inclinómetro sobre la antena

6.2.3 Resultados de la medición de característica del suelo

Los resultados obtenidos de los parámetros S_{11} en función de la frecuencia para esta medición se ilustran en la Fig. 6.2, donde se muestran la magnitud y la fase. En la Fig. 6.3 se presentan los

comportamientos de la parte real e imaginaria, mientras que la Fig. 6.4 muestra la impedancia y la reactancia. Cabe destacar que estas mediciones se realizaron dos días después de que finalizaran las lluvias. Como se observa en las figuras anteriores, cuando la placa está en contacto con el suelo, su resonancia se encuentra alrededor de los 80 MHz, donde alcanza su máxima eficiencia. También se aprecia ruido en los datos, lo cual se debe a que el suelo estaba húmedo debido a las lluvias. Además, se debe considerar la presencia de distintos estratos de tierra que existen en el terreno, los cuales pueden afectar la medición.

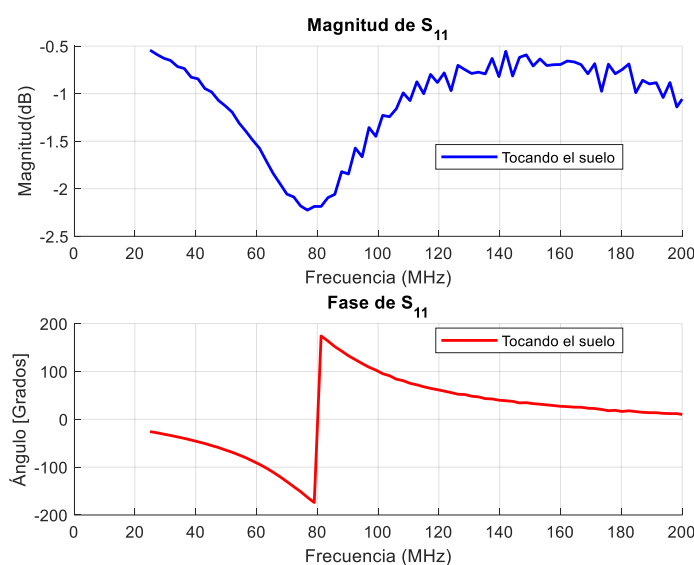


Fig. 6.2 Resultado de la medición del NANO VNA magnitud y fase en el suelo

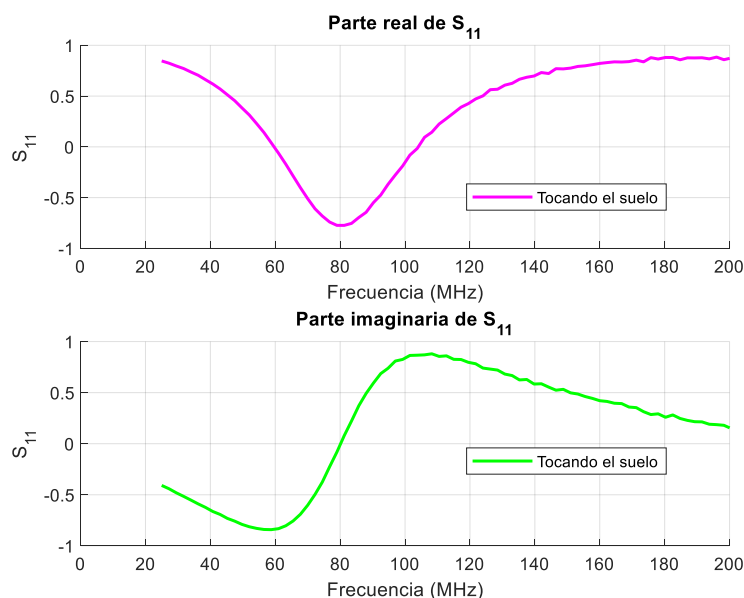


Fig. 6.3 Resultado de la medición del NANO VNA parte real e imaginario en el suelo

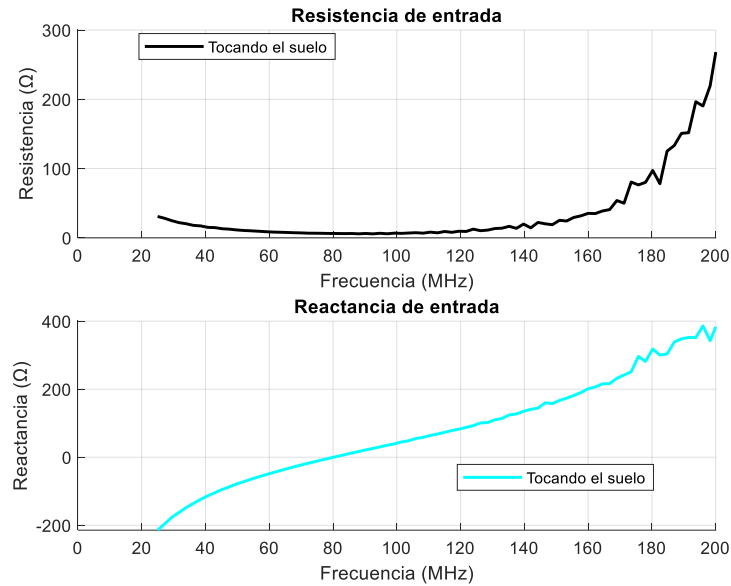


Fig. 6.4 Resultado de la medición del NANO VNA impedancia en el suelo

6.2.4 Simulación de medición de suelo en FEKO

Como en los casos anteriores, la simulación debe representar con la mayor fidelidad posible las condiciones de la medición. Por este motivo, en el modelo se ubicó la antena monopolo de manera que su elemento conductor quedara parcialmente enterrado para que cumpla la altura establecida.

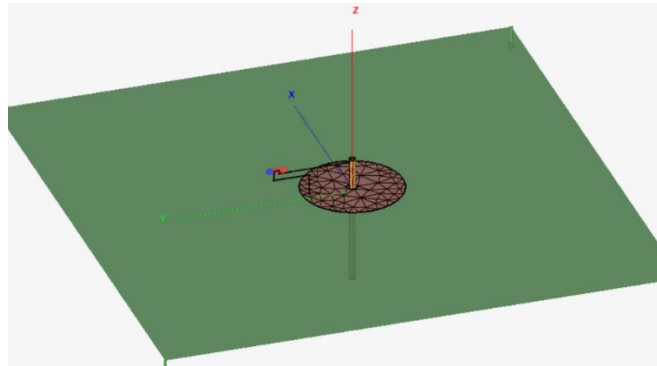


Fig. 6.5 Antena monopolo simulada en el suelo con el plano tierra tocando la superficie

Se realizaron 11 simulaciones, limitadas por el tiempo disponible y porque cada una requiere cerca de 4 horas de ejecución. En ellas se variaron la permitividad relativa y la conductividad eléctrica del suelo. Este trabajo constituye una primera aproximación; por ello, como línea futura se propone ampliar la tabla de resultados con nuevas simulaciones que consideren distintas propiedades del terreno e incluso modelos más complejos, como suelos estratificados.

En esta etapa solo se simuló el caso en que la placa de aluminio está en contacto con la superficie del suelo, principalmente por razones de tiempo y para demostrar que la altura del plano tierra influye de forma importante en las mediciones.

Tabla 6.1 Número de simulación con los valores de permitividad relativa y conductividad eléctrica

N° DE SIMULACIÓN	PERMITIVIDAD	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (S/M)	ECM TOTAL
1°	3	0.04132	0.18466
2°	12	0.0451	0.070132
3°	15	0.0765	0.041899
4°	16	0.05	0.045011
5°	18	0.01	0.047301
6°	30.08	0.0871	0.049604
7°	20	0.055	0.040151
8°	25	0.0563	0.038844
9°	30	0.0318	0.056786
10°	40	0.03871	0.083062
11°	25	0.1	0.052433

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de las diferentes simulaciones de coeficiente de reflexión.

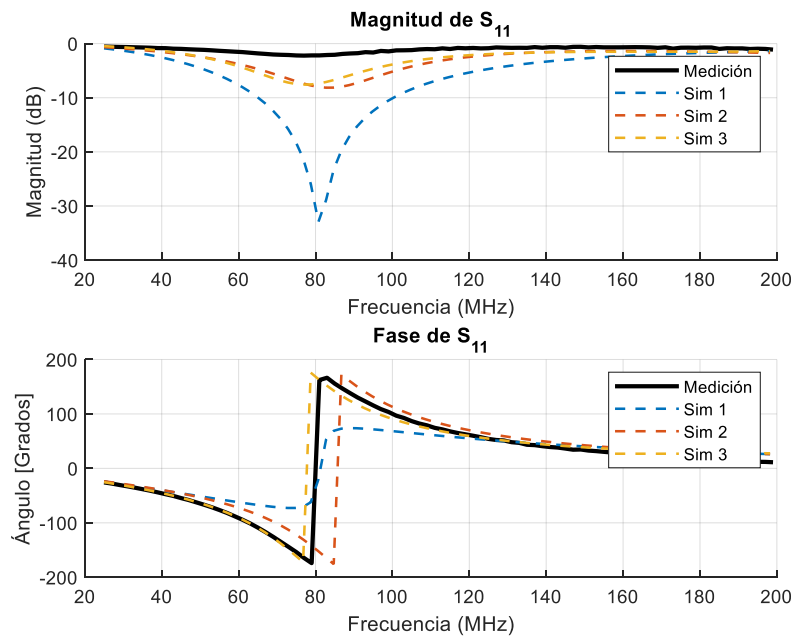


Fig. 6.6 Comparación de la magnitud y fase entre medición y simulación 1, 2 y 3

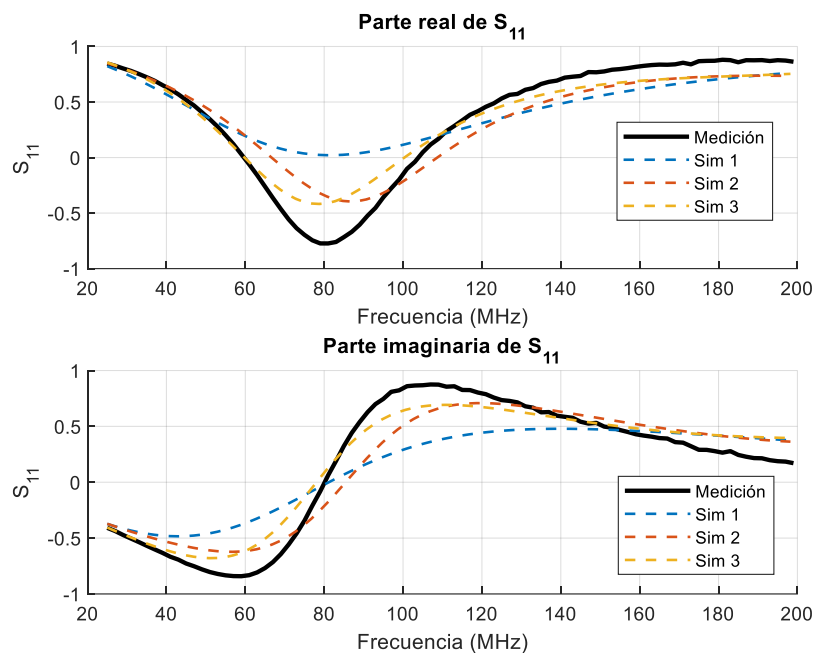


Fig. 6.7 Comparación de la parte real e imaginara entre medición y simulación 1, 2 y 3

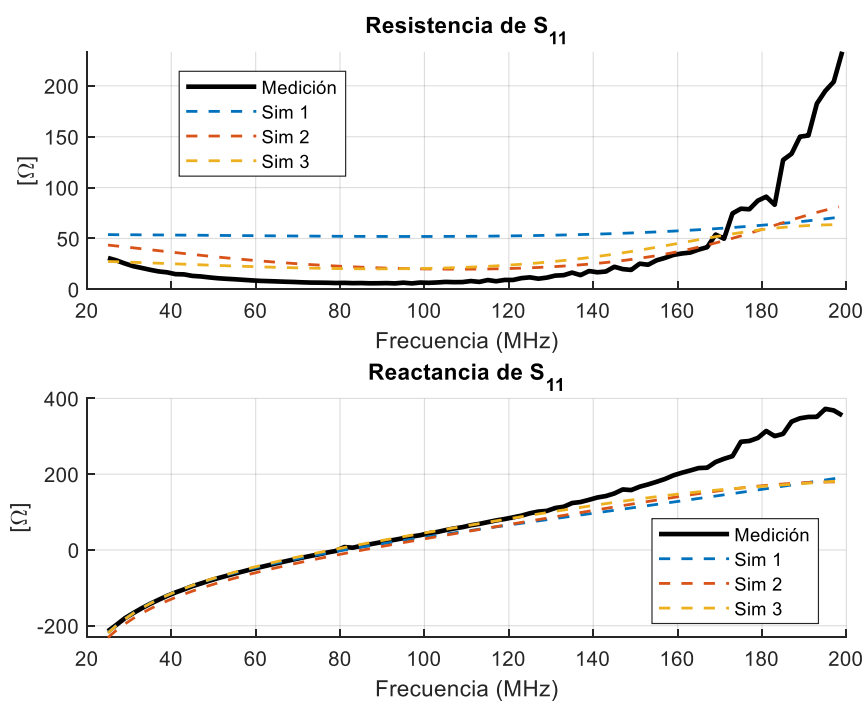


Fig. 6.8 Comparación de la resistencia y reactancia entre medición y simulación 1, 2 y 3

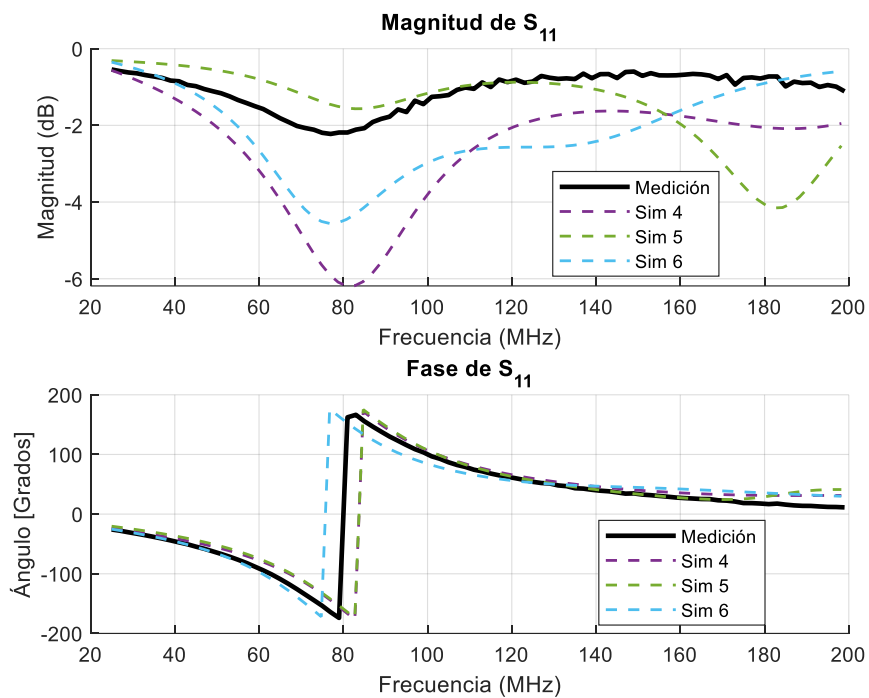


Fig. 6.9 Comparación de la magnitud y fase entre medición y simulación 4, 5 y 6

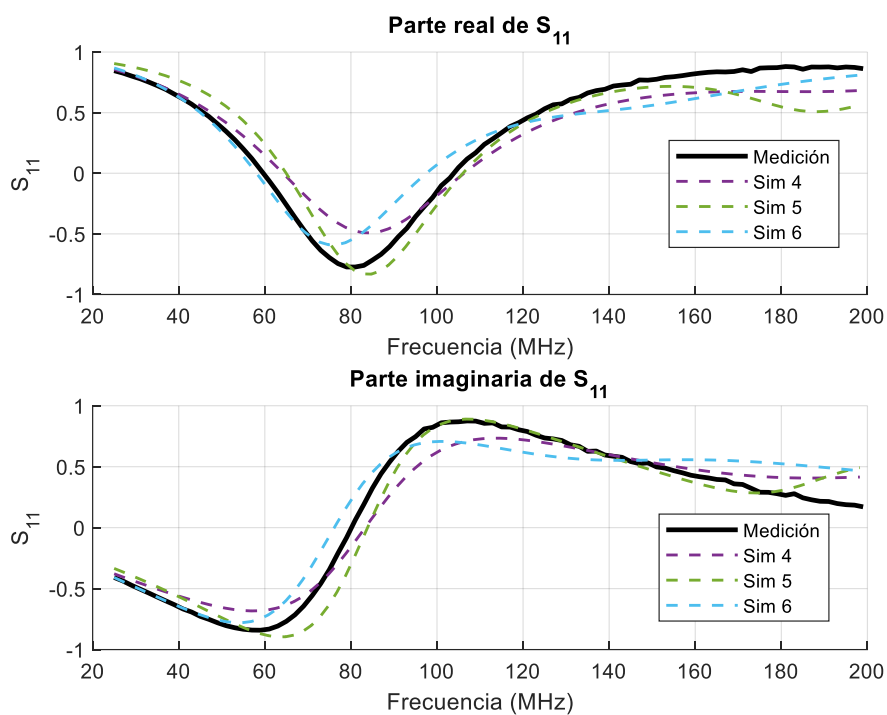


Fig. 6.10 Comparación de la parte real e imaginara entre medición y simulación 5, 4 y 6

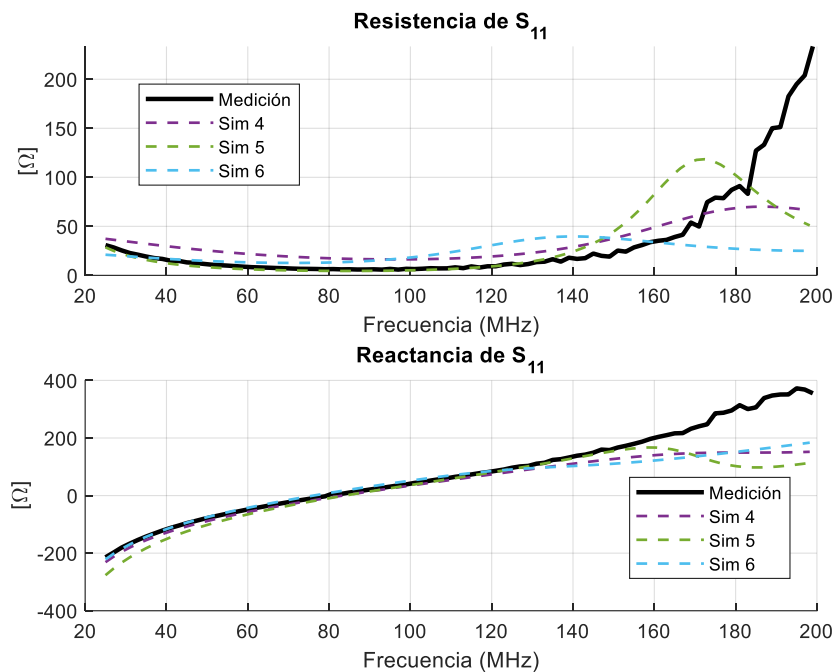


Fig. 6.11 Comparación de la resistencia y reactancia entre medición y simulación 4, 5 y 6

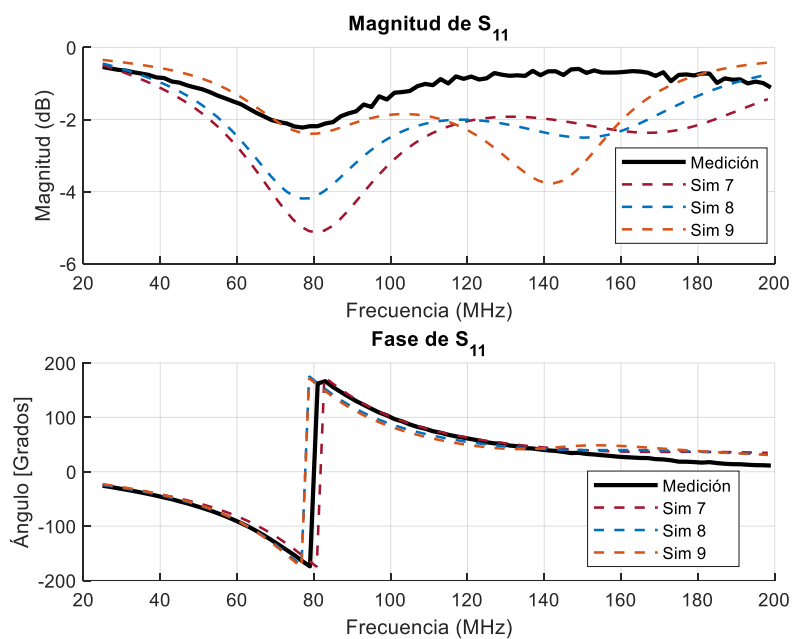


Fig. 6.12 Comparación de la magnitud y fase entre medición y simulación 7, 8 y 9

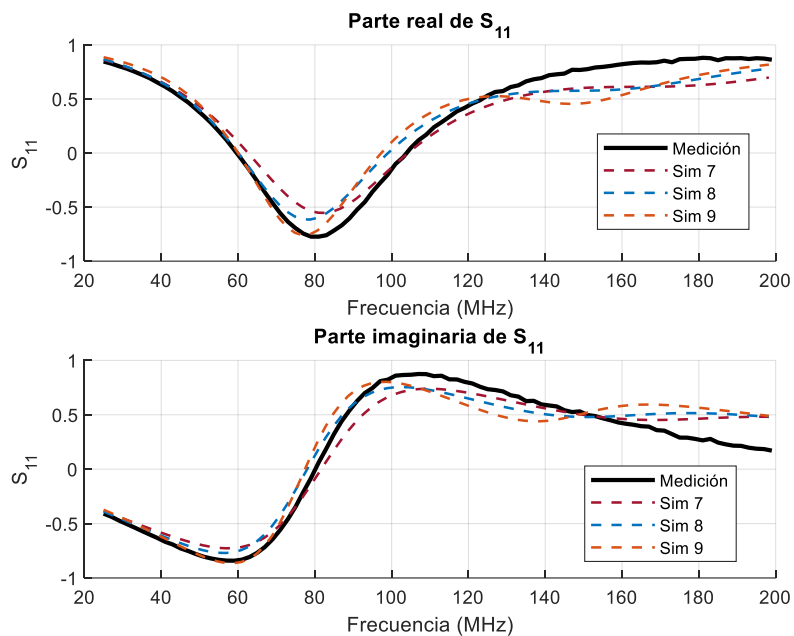


Fig. 6.13 Comparación de la parte real e imaginaria entre medición y simulación 7, 8 y 9

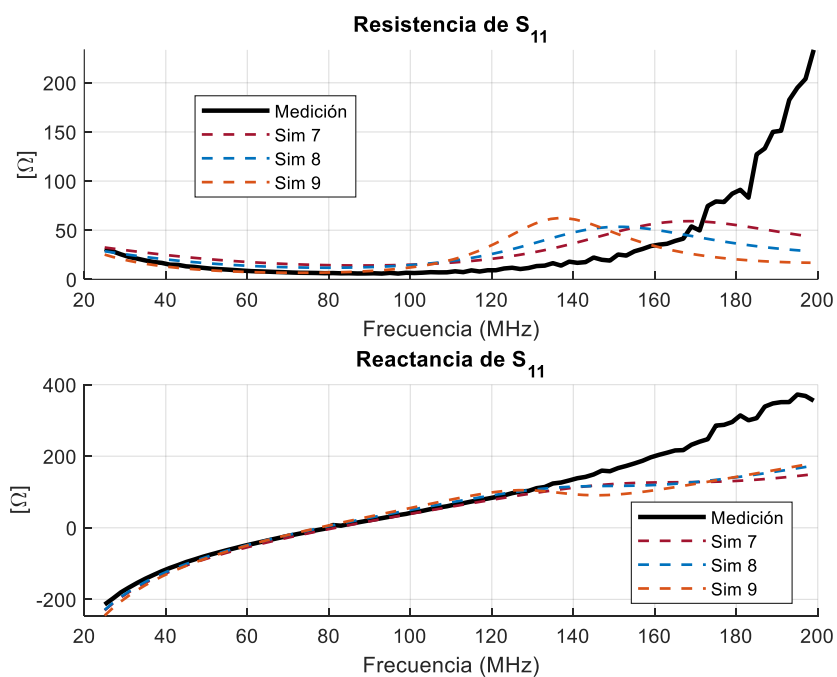


Fig. 6.14 Comparación de la resistencia y reactancia entre medición y simulación 7, 8 y 9

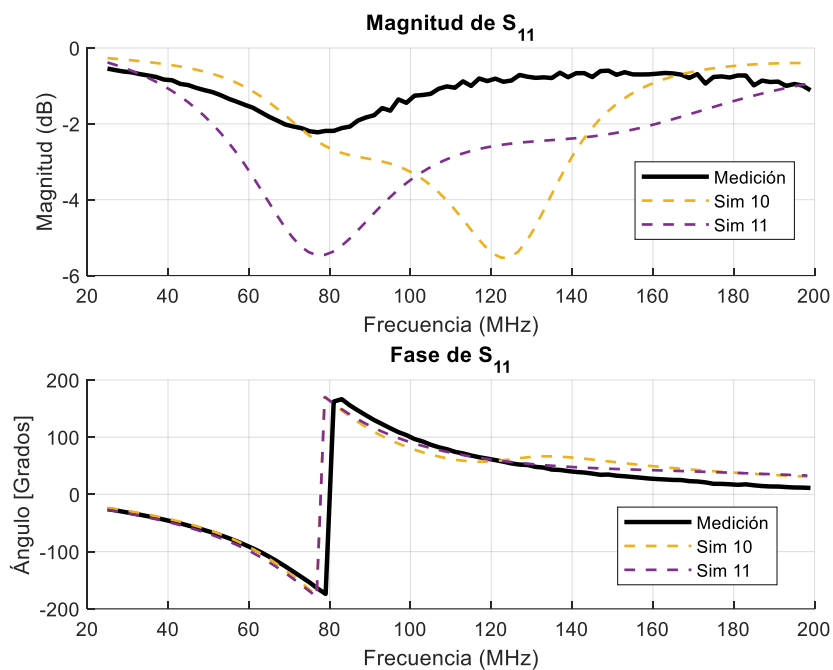


Fig. 6.15 Comparación de la magnitud y entre medición y simulación 10 y 11

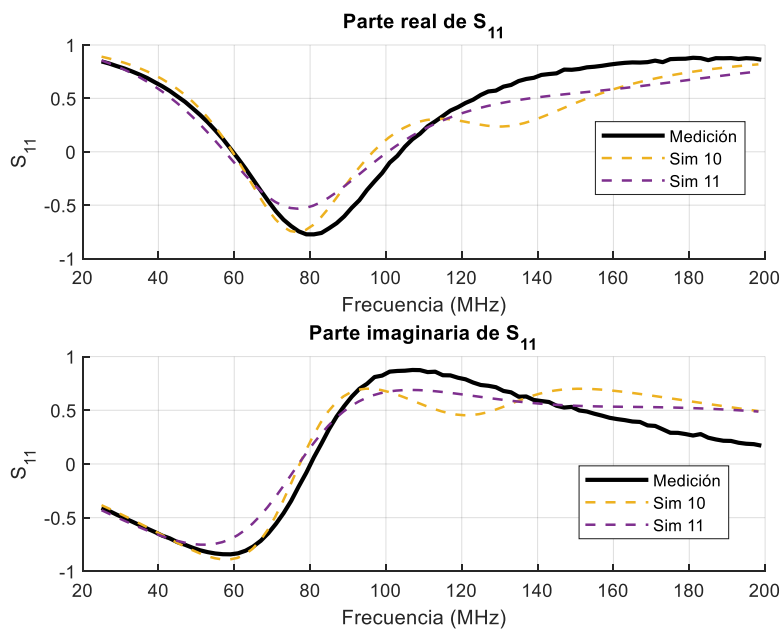


Fig. 6.16 Comparación de la parte real e imaginara entre medición y simulación 10 y 11

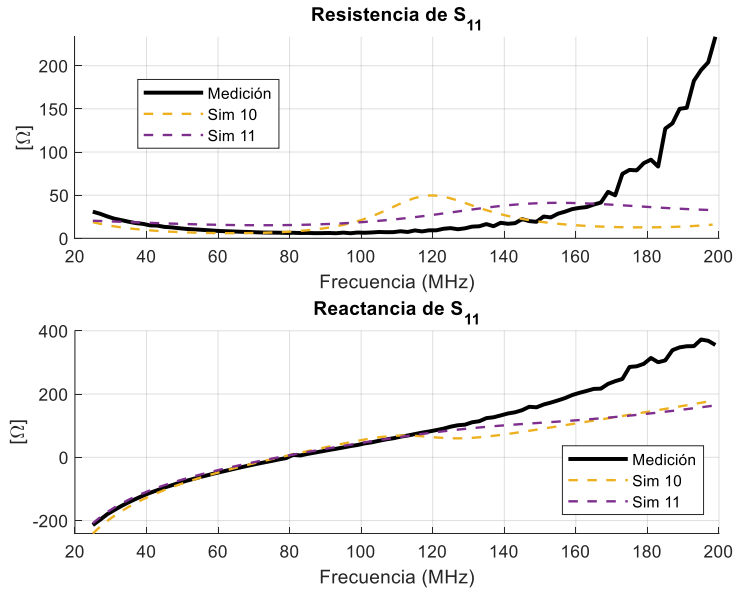


Fig. 6.17 Comparación de la resistencia entre medición y simulación 10 y 11

6.2.5 Análisis de los resultados obtenidos en las simulaciones del suelo

La Tabla 6.1 resume todas las simulaciones realizadas, indicando los valores de permitividad relativa y conductividad eléctrica, junto con el ECM total, calculado como la suma de los ECM correspondientes a la parte real e imaginaria del coeficiente de reflexión. Solo se consideran estas dos componentes, ya que presentan datos completos y un comportamiento lineal. La magnitud se descarta debido a su representación logarítmica (en decibelios), la cual impide un análisis lineal, mientras que la fase únicamente expresa el ángulo de la señal reflejada. La resistencia y la reactancia constituyen otra forma de representar la parte real e imaginaria, pero desde la perspectiva de la antena como carga, evidenciando su interacción con la fuente de energía. Por ello, para el análisis comparativo y la interpretación del comportamiento del material, resulta más apropiado utilizar directamente la parte real e imaginaria del coeficiente de reflexión. Cabe destacar que ambas componentes presentan una relación lineal, lo cual se sustenta en su formulación matemática descrita en la ecuación (6.2).

$$S_{11} = a + bj \quad (6.2)$$

La simulación que presenta el ECM más bajo, y por lo tanto la mayor semejanza con los datos de la medición, es la simulación N°8, con un valor aproximado de permitividad relativa de 25 y una

conductividad eléctrica de 0.0563 S/m. A continuación, se muestra la comparación del coeficiente de reflexión del suelo con el ECM menor.

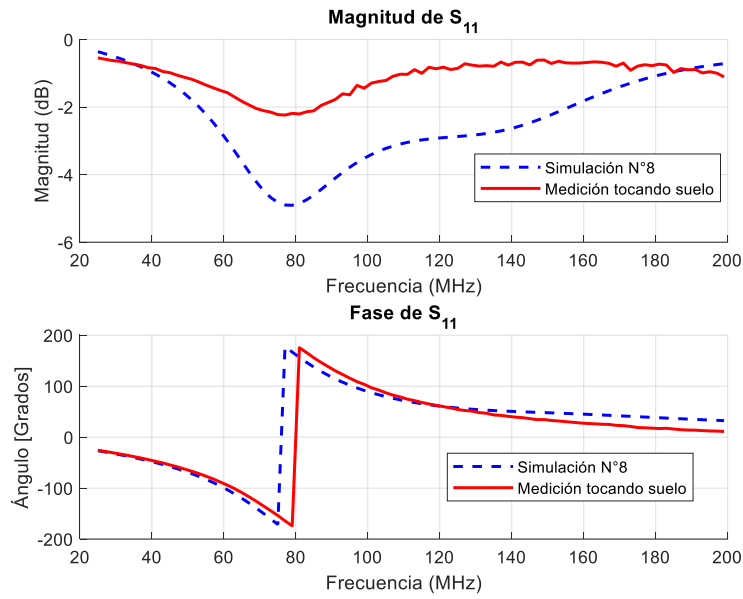


Fig. 6.18 Comparación de la magnitud y fase del coeficiente de reflexión en el suelo

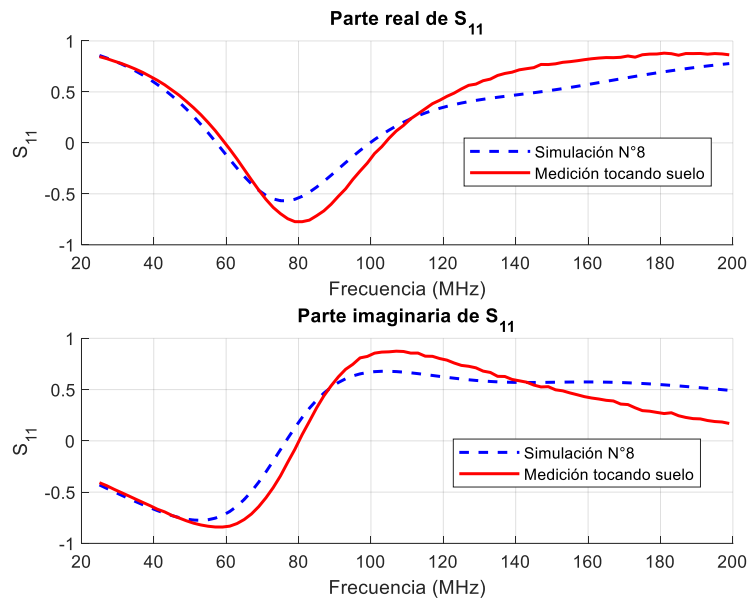


Fig. 6.19 Comparación de la parte real e imaginario del coeficiente de reflexión en el suelo

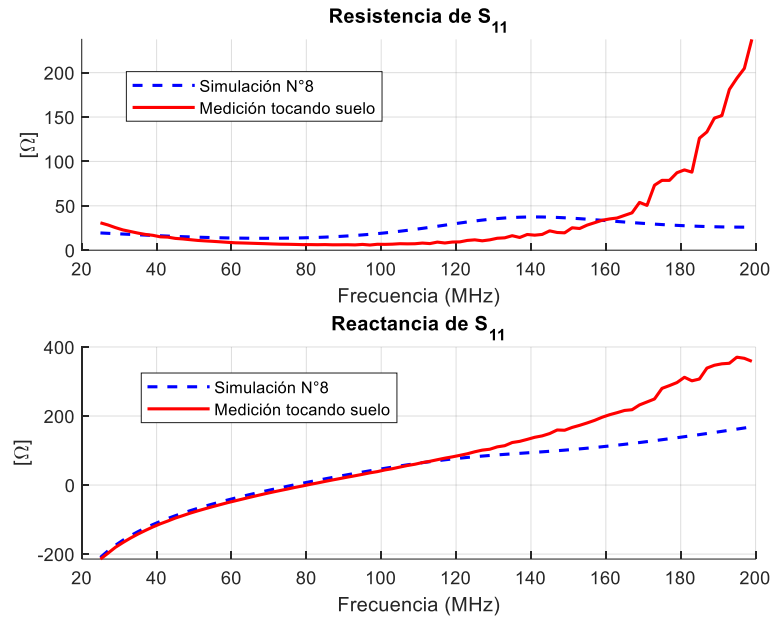


Fig. 6.20 Comparación de la impedancia del coeficiente de reflexión en el suelo

Como se mencionó al inicio de este capítulo, para efectos de este proyecto se considera que el suelo analizado corresponde a un modelo de un solo estrato. Sin embargo, al observar la Fig. 6.20, se aprecia que el comportamiento del coeficiente de reflexión, tanto en su parte real e imaginaria, como en la magnitud y fase mostradas en la Fig. 6.19, no coincide exactamente entre la simulación y la medición.

Este comportamiento podría deberse a la presencia de múltiples estratos en el terreno, lo que provocaría variaciones en las propiedades dieléctricas a diferentes profundidades. Adicionalmente, otros factores que podrían haber influido en las diferencias observadas son posibles errores de medición, ya sea por imprecisiones humanas o por la interferencia del operador al manipular el Nano VNA durante la toma de datos.

Se realizaron mediciones a distintas alturas entre la placa de aluminio y la superficie del suelo, con el propósito de analizar la influencia de la separación en el comportamiento electromagnético del sistema. Este procedimiento permite evaluar cómo la distancia entre la placa y el terreno afecta la interacción del campo electromagnético con el medio y, por ende, las características de la señal reflejada.

En la Tabla 6.2, se muestra que, al aumentar la altura, se modifican las propiedades aparentes del suelo. Las ondas electromagnéticas de la antena monopolo se ven afectadas, ya que el dispositivo

no solo interactúa con el suelo, sino también con la capa de aire presente entre el plano tierra y la superficie. Al comparar con la medición en contacto directo con el suelo, se observa que el error cuadrático medio aumenta con la altura.

Tabla 6.2 Error cuadrático medio entre las simulaciones y mediciones totales

Altura Antena	ECM
Tocando suelo	0.038746
5 cm	0.469766
10 cm	0.577449
15 cm	0.583995

Capítulo 7. Conclusiones

7.1. Sumario

Inicialmente, se realizó un análisis bibliográfico con el fin de comprender el funcionamiento de una antena, sus partes, características y las propiedades físicas que intervienen en ella. Además, se estudió el comportamiento del suelo, sus características dieléctricas y los métodos disponibles para medirlas.

En cuanto a la construcción de la antena monopolo, se efectuó un estudio del diseño con el objetivo de obtener información detallada sobre los materiales y sus dimensiones. Posteriormente, se realizaron modificaciones al diseño para ajustar el dispositivo y analizar el impacto que tenían los cambios en sus medidas. Una vez finalizada esta etapa, se continuó con el ensamblaje de todos los componentes adquiridos que conforman la antena monopolo.

Respecto a las mediciones del coeficiente de reflexión o parámetro S_{11} , se comenzó con mediciones de prueba utilizando el Nano VNA y el cable propio del dispositivo, con el propósito de familiarizarse con el equipo. A continuación, se efectuaron las mediciones finales en terreno: en la comuna de Hualpén para el caso del aire, y en la comuna de San Pedro de la Paz para las mediciones en agua y suelo.

Finalmente, las simulaciones se realizaron con valores aproximados debido al tiempo que demandaba cada ejecución. En primera instancia, se tomaron como referencia los datos obtenidos mediante el Nano VNA. Posteriormente, se procedió a variar los parámetros eléctricos del agua y del suelo, optimizando los valores y seleccionando aquellos que presentaban mayor similitud con las mediciones en terreno. Por último, se efectuaron nuevas modificaciones con el fin de lograr el mejor ajuste posible, tanto en la parte real como en la imaginaria del coeficiente de reflexión.

7.2. Conclusiones

A partir del análisis de la antena monopolo construida, se concluye que la similitud observada en el comportamiento del coeficiente de reflexión entre las mediciones experimentales y las simulaciones numéricas, en los casos del aire y del agua, demuestra que el dispositivo puede emplearse como un sistema de medición de parámetros eléctricos. No obstante, para los casos del agua y del suelo, con el fin de obtener resultados más precisos, la placa de aluminio debe mantenerse en contacto directo con la superficie del terreno.

Si bien los datos obtenidos presentan una tendencia similar, no son completamente iguales. Esta diferencia se atribuye a los errores inherentes a la práctica experimental. En las simulaciones, cada escenario se desarrolla en un entorno ideal, libre de interferencias externas. En el caso del aire, la simulación resulta más sencilla, dado que el entorno no presenta contacto con otros elementos, aunque se modele una tierra infinita. En cambio, durante la medición en terreno, la presencia de la estructura de soporte de la antena introduce interferencias que afectan los resultados.

Para el caso del agua, la situación es más compleja. En la simulación, la antena monopolo se encuentra en un entorno controlado, dentro de un volumen delimitado de agua. Sin embargo, en la práctica fue necesario construir una base de apoyo para el dispositivo, lo que introduce diferencias geométricas y posibles perturbaciones en el campo electromagnético. En el caso del suelo, la medición resulta relativamente más sencilla, ya que la antena se inserta directamente en el terreno y este actúa como soporte. No obstante, la presencia de elementos cercanos genera interferencias externas que también pueden afectar la respuesta medida y dado que el suelo puede presentar distintas capas que no fueron modeladas en FEKO, solo se asumió una capa.

Asimismo, es importante considerar la estructura física de la antena monopolo. En la simulación, el modelo es ideal y carece de imperfecciones, mientras que, en la realidad, aunque se respeten las mismas dimensiones, siempre existen diferencias debidas a los materiales, cables de conexión, tornillos y uniones mecánicas, que pueden provocar pérdidas o variaciones en la respuesta electromagnética.

Para el caso del aire, se trata de un medio cuyas propiedades dieléctricas son conocidas, con una permitividad relativa de 1 y una conductividad eléctrica de 0 S/m. El error cuadrático medio total

obtenido fue de 0.037723, un valor bajo que indica una alta similitud entre la simulación y la medición. En el entorno simulado, la configuración es relativamente simple, ya que se modela un suelo infinito y se ubica la antena a una altura de 2,10 m. Sin embargo, en las mediciones en terreno es necesario incorporar un soporte no metálico para mantener la antena a dicha altura, lo que introduce pérdidas y pequeñas desviaciones en los datos medidos.

En el caso del agua, el análisis resulta más complejo que en el aire. Aunque la permitividad relativa del agua ($\epsilon_r = 80$) es conocida, su conductividad eléctrica varía en función de los minerales disueltos, lo que dificulta su determinación exacta. Además, la medición requiere un soporte de mayor tamaño que en el caso del aire, aumentando la posibilidad de interferencias. Los valores obtenidos indican una conductividad eléctrica de 0.021 S/m, considerada precisa debido al proceso de ajuste realizado, con un ECM de 0.06533, superior al del aire, lo que refleja la mayor complejidad del entorno de medición. Asimismo, se evidencia que la altura de la placa de aluminio respecto a la superficie influye directamente en los resultados: al repetir la medición a 5 cm de altura, el ECM aumenta a 0.20209. Si se reajusta el valor de conductividad para este caso, se obtiene una nueva conductividad de 0.04 S/m, evidenciando la sensibilidad del sistema ante la separación entre la antena y el medio.

En el caso de las mediciones del suelo, la simulación que presentó el mejor ajuste correspondió a una permitividad relativa de 25 y una conductividad eléctrica de 0.0563 S/m, obteniendo un Error Cuadrático Medio total de 0.038844, el valor más bajo entre todas las simulaciones evaluadas. Este resultado indica una mayor similitud con la medición realizada en terreno. Sin embargo, dichos valores deben considerarse aproximados y no definitivos, ya que no se alcanzó el mínimo posible para ambas variables.

Finalmente, se concluye que la altura de la antena respecto a la superficie del medio tiene una influencia directa en los resultados experimentales. El espacio de aire existente entre la placa de aluminio y la superficie provoca variaciones en las mediciones. Este fenómeno no se encuentra representado en las simulaciones realizadas en FEKO, ya que el software considera únicamente la interacción entre la antena y el medio (agua o suelo), sin incluir la capa de aire intermedia. Por lo tanto, se recomienda optimizar el método de medición, reduciendo a cero la distancia entre la antena y la superficie del material bajo estudio de manera que este tocando, con el fin de obtener resultados más representativos y comparables con las simulaciones numéricas.

7.3. Trabajo Futuro

Considerando los resultados obtenidos y los antecedentes desarrollados en este proyecto, se proponen las siguientes líneas de trabajo futuro:

- Simular y medir empleando una antena tipo dipolo, con el objetivo de comparar sus resultados con los obtenidos mediante la antena monopolo y analizar las diferencias en comportamiento electromagnético entre ambas configuraciones.
- Realizar mediciones en entornos acuosos utilizando superficies de mayor extensión, con el fin de reducir los efectos de borde y obtener resultados más representativos del comportamiento real del medio.
- Efectuar nuevas simulaciones con la antena monopolo, variando los parámetros eléctricos del suelo, con el propósito de optimizar y determinar con mayor precisión los valores de sus características dieléctricas.

Bibliografía

- [1] C. A. Balanis “Antenna Theory: Analysis and Design”, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA, Wiley, 2005
- [2] 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
- [3] H. Muñoz, «Construcción de medidor de permitividad relativa y conductividad eléctrica,» Tesis de grado Universidad Católica de la Santísima Concepción, Concepción, 2024
- [4] 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
- [5] 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.
- [6] R. Bustos. M. Diaz “MIST Memo 2. Soil Conductivity Site Testing”, en línea: <https://sitios.ucsc.cl/mist/mist-memos/>, 2020
- [7] M. A. S “MIST Memo 8. Soil Resistivity”, en línea: <https://sitios.ucsc.cl/mist/mist-memos/>. 2020
- [8] E. A. Carreón Rebolledo, O. E. Muñiz 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
- [9] W. G. Fano, A. Razzitte, and P. Larocca, Eds., "Electromagnetic Field Radiation in Matter." IntechOpen, 2020
- [10] Rohde & Schwarz, "Measurement of Dielectric Material Properties," Application Note, Mar. 2012. Disponible en: www.rohde-schwarz.com
- [11] Agilent Technologies, "Measuring Dielectric Properties using Agilent's Materials Measurement Solutions," [Online]. Available: <https://www.agilent.com>. [Accessed: marzo. 12, 2024].
- [12] MM Patricio, BP Ricardo, CE Tomás, and PT Francisco, “Caracterización de la conductividad y permitividad relativa del suelo para radiotelescopio MIST”, *repositorio.uchile.cl*, 2024, doi: 10.58011/43cq-1q26.
- [13] 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

- [14] Altair Engineering GmbH, “Altair Feko,” AeroExpo. [En línea]. Disponible en: <https://pdf.aeroexpo.online/pdf/altair-engineering-gmbh/altair-feko/171591-8974.html> (accedido: 10-jun-2025).
- [15] M. A. S. Pessôa, «MIST Memo 55 VNA Measurements in Soil, » McGill University, 2021.

Anexo A. Código utilizado en Matlab

```

%% Análisis de los datos obtenidos por el NANO VNA

% Archivos de medición
archivos = {
    'suelo tocando suelo.S1P';
    'suelo altura 5 cm.S1P';
    'suelo altura 10 cm.S1P';
    'suelo altura 15 cm.S1P';
};

% Nombres de leyendas
nombres = {
    'tocando suelo';
    'Altura 5 cm';
    'Altura 10 cm';
    'Altura 15 cm';
};

Z0 = 50;

colores = lines(numel(archivos));

h_mag = gobjects(numel(archivos),1);
h_phase = gobjects(numel(archivos),1);
h_real = gobjects(numel(archivos),1);
h_imag = gobjects(numel(archivos),1);
h_rin = gobjects(numel(archivos),1);
h_xin = gobjects(numel(archivos),1);

% Figuras
figure(1);
subplot(2,1,1); hold on; grid on; title('Magnitud de S_{11}');
subplot(2,1,2); hold on; grid on; title('Fase de S_{11}');

figure(2);
subplot(2,1,1); hold on; grid on; title('Parte real de S_{11}');
subplot(2,1,2); hold on; grid on; title('Parte imaginaria de S_{11}');

figure(3);

```

```

subplot(2,1,1); hold on; grid on; title('Resistencia de
entrada');
subplot(2,1,2); hold on; grid on; title('Reactancia de
entrada');

% INTERPOLACION
F_interp = (25e6 : 2e6 : 200e6)';    % Hz

for k = 1:numel(archivos)
    Spara = sparameters(archivos{k});
    F = Spara.Frequencies;
    S11 = squeeze(Spara.Parameters(1,1,:));

    S11_real_i = interp1(F, real(S11), F_interp, 'pchip');
    S11_imag_i = interp1(F, imag(S11), F_interp, 'pchip');
    S11_interp = S11_real_i + 1j*S11_imag_i;

    Mag    = abs(S11_interp);
    Reals  = real(S11_interp);
    ImagS  = imag(S11_interp);
    Ang    = angle(S11_interp);

    Zin = Z0 * (1 + S11_interp) ./ (1 - S11_interp);
    Rin = real(Zin);
    Xin = imag(Zin);

    c = colores(k,:);

    % Figura 1 - Magnitud y Fase
    figure(1);
    subplot(2,1,1);
    h_mag(k) = plot(F_interp/1e6, 20*log10(Mag), 'LineWidth',
1.5, 'Color', c);
    xlabel('Frecuencia (MHz)'); ylabel('|S_{11}| (dB)');

    subplot(2,1,2);
    h_phase(k) = plot(F_interp/1e6, rad2deg(Ang), 'LineWidth',
1.5, 'Color', c);
    xlabel('Frecuencia (MHz)'); ylabel('Fase (°)');

    % Figura 2 - Parte real e imaginaria
    figure(2);
    subplot(2,1,1);

```

```

    h_real(k) = plot(F_interp/1e6, RealS, 'LineWidth', 1.5,
'Color', c);
    xlabel('Frecuencia (MHz)'); ylabel('Re(S_{11})');

    subplot(2,1,2);
    h_imag(k) = plot(F_interp/1e6, ImagS, 'LineWidth', 1.5,
'Color', c);
    xlabel('Frecuencia (MHz)'); ylabel('Im(S_{11})');

    % Figura 3 - Impedancia
    figure(3);
    subplot(2,1,1);
    h_rin(k) = plot(F_interp/1e6, Rin, 'LineWidth', 1.5,
'Color', c);
    xlabel('Frecuencia (MHz)'); ylabel('Resistencia (?)');

    subplot(2,1,2);
    h_xin(k) = plot(F_interp/1e6, Xin, 'LineWidth', 1.5,
'Color', c);
    xlabel('Frecuencia (MHz)'); ylabel('Reactancia (?)');
end

% --- Añadir leyendas ---
figure(1);
subplot(2,1,1); legend(h_mag, nombres, 'Location','best');
subplot(2,1,2); legend(h_phase, nombres, 'Location','best');

figure(2);
subplot(2,1,1); legend(h_real, nombres, 'Location','best');
subplot(2,1,2); legend(h_imag, nombres, 'Location','best');

figure(3);
subplot(2,1,1); legend(h_rin, nombres, 'Location','best');
subplot(2,1,2); legend(h_xin, nombres, 'Location','best');

%%
%% Comparacion de la medicion respecto a la simulacion

% Archivos de simulación
archivos_simulacion = {
    'altura 15 0-0765 real.dat', ...
    'altura 15 0-0765 imaginario.dat';
};

% Archivo de medición

```

```

archivo_medicion = 'suelo tocando suelo.S1P';

data_real = readmatrix(archivos_simulacion{1});
data_imag = readmatrix(archivos_simulacion{2});

F_sim      = data_real(:,1);      % Frecuencia [Hz]
Real_sim   = data_real(:,2);
Imag_sim   = data_imag(:,2);

S11_sim = Real_sim + 1i*Imag_sim;

Spara = sparameters(archivo_medicion);
F_med = Spara.Frequencies;
S11_med = squeeze(Spara.Parameters(1,1,:));

Real_med = real(S11_med);
Imag_med = imag(S11_med);

% INTERPOLACION DE MEDICION
F_interp = (25e6:2e6:200e6).'; % rango 25-250 MHz, paso 2 MHz
Real_med_i = interp1(F_med, Real_med, F_interp, 'linear',
'extrap');
Imag_med_i = interp1(F_med, Imag_med, F_interp, 'linear',
'extrap');

Real_sim_i = interp1(F_sim, Real_sim, F_interp, 'linear',
'extrap');
Imag_sim_i = interp1(F_sim, Imag_sim, F_interp, 'linear',
'extrap');

S11_sim_i = Real_sim_i + 1i*Imag_sim_i;
S11_med_i = Real_med_i + 1i*Imag_med_i;

Mag_sim_i = abs(S11_sim_i);
Ang_sim_i = angle(S11_sim_i);

Mag_med_i = abs(S11_med_i);
Ang_med_i = angle(S11_med_i);

Z0 = 50;
Zin_sim_i = Z0 * (1 + S11_sim_i) ./ (1 - S11_sim_i);
Zin_med_i = Z0 * (1 + S11_med_i) ./ (1 - S11_med_i);

Rin_sim_i = real(Zin_sim_i);
Xin_sim_i = imag(Zin_sim_i);

```

```

Rin_med_i = real(Zin_med_i);
Xin_med_i = imag(Zin_med_i);

% CALCULO DEL ECM
ECM_real = mean((Real_sim_i - Real_med_i).^2);
ECM_imag = mean((Imag_sim_i - Imag_med_i).^2);

fprintf('--- Error Cuadrático Medio ---\n');
fprintf('ECM Re(S11)      : %.6f\n', ECM_real);
fprintf('ECM Im(S11)       : %.6f\n\n', ECM_imag);

% Graficas

% Magnitud y fase
figure;
subplot(2,1,1); hold on; grid on;
plot(F_interp/1e6, 20*log10(Mag_sim_i), 'b--', 'LineWidth',1.5);
plot(F_interp/1e6, 20*log10(Mag_med_i), 'r', 'LineWidth',1.5);
xlabel('Frecuencia (MHz)'); ylabel('|S_{11}| (dB)');
title('Magnitud de S_{11}');
legend('Simulación 15 0-0765', 'Medición');

subplot(2,1,2); hold on; grid on;
plot(F_interp/1e6, rad2deg(Ang_sim_i), 'b--', 'LineWidth',1.5);
plot(F_interp/1e6, rad2deg(Ang_med_i), 'r', 'LineWidth',1.5);
xlabel('Frecuencia (MHz)'); ylabel('Fase (°)');
title('Fase de S_{11}');
legend('Simulación 15 0-0765', 'Medición');

% Parte real e imaginaria
figure;
subplot(2,1,1); hold on; grid on;
plot(F_interp/1e6, Real_sim_i, 'b--', 'LineWidth',1.5);
plot(F_interp/1e6, Real_med_i, 'r', 'LineWidth',1.5);
xlabel('Frecuencia (MHz)'); ylabel('Re(S_{11})');
title('Parte real de S_{11}');
legend('Simulación 15 0-0765', 'Medición');

subplot(2,1,2); hold on; grid on;
plot(F_interp/1e6, Imag_sim_i, 'b--', 'LineWidth',1.5);
plot(F_interp/1e6, Imag_med_i, 'r', 'LineWidth',1.5);
xlabel('Frecuencia (MHz)'); ylabel('Im(S_{11})');
title('Parte imaginaria de S_{11}');
legend('Simulación 15 0-0765', 'Medición');

```

```

% Impedancia de entrada
figure;
subplot(2,1,1); hold on; grid on;
plot(F_interp/1e6, Rin_sim_i, 'b--','LineWidth',1.5);
plot(F_interp/1e6, Rin_med_i, 'r','LineWidth',1.5);
xlabel('Frecuencia (MHz)'); ylabel('Resistencia (?)');
title('Resistencia de entrada');
legend('Simulación 15 0-0765','Medición');

subplot(2,1,2); hold on; grid on;
plot(F_interp/1e6, Xin_sim_i, 'b--','LineWidth',1.5);
plot(F_interp/1e6, Xin_med_i, 'r','LineWidth',1.5);
xlabel('Frecuencia (MHz)'); ylabel('Reactancia (?)');
title('Reactancia de entrada');
legend('Simulación 15 0-0765','Medición');

```